



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DEL ASFALTO
ESPUMADO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DEFLECTOMETRÍA FWD

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RODRIGO ANDRÉS FAÚNDEZ CARVAJAL

PROFESOR GUÍA:
VÍCTOR FARAGGI HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
VÍCTOR ROCCO HERRERA
CARLOS AGUILERA GUTIÉRREZ

SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2011

ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DEL ASFALTO ESPUMADO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DEFLECTOMETRÍA FWD

El asfalto espumado es una alternativa a las mezclas calientes y frías, que permite producir material de base con un comportamiento estructural similar a las técnicas tradicionales, pero presentando ventajas energéticas y ambientales.

Con el fin de estimar un coeficiente estructural que permita realizar el diseño con método AASHTO-93, la Dirección de Vialidad ha construido un tramo de prueba de 400 metros, el cual está dividido en tres subtramos de 100 metros cada uno, donde se utilizó asfalto espumado como base estructural (12, 17 y 22 cm de espesor) y un cuarto subtramo confeccionado con una base granular típica, que será utilizada como punto de comparación. Sobre todo el tramo se encuentra una carpeta asfáltica de espesor constante.

Mediante mediciones de deflectómetro de impacto (FWD) se obtuvieron 8 series de datos, registrados en un periodo de 33 meses, las que fueron analizadas mediante gráficos de cuencos, mostrando las diferencias en los en el comportamiento de los pavimentos del tramo, además, se determinó que al año de servicio el pavimento logró el curado. Una vez definido este primer hito se procedió a realizar el retrocálculo con cuatro metodologías mecanicistas y con el método empírico AASHTO, determinando que el método mecanicista de retrocálculo que mejor se adaptó a las condiciones del pavimento fue el propuesto por Evercalc, obteniendo un módulo elástico representativo de 1.300 MPa para la base espumada. Del retrocálculo empírico AASHTO, se estimó el coeficiente estructural en 0,20 al considerar indicaciones del documento guía de este estudio.

Una vez puntualizado el coeficiente en 0,20 se diseñó el pavimento por medio del método AASHTO, obteniendo una pérdida de serviciabilidad de 2,2 en: 6 años para el espesor de 12 cm de base espumada, 17 años para el espesor de 17 cm y 33 años para el espesor de 22 cm.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo por la gestión de muchas personas entre ellas se destacan:

Don Víctor Faraggi Hernández. Dr. Ing., Director Gerente General VFH - INGEMED, gestor de este tema de investigación, quien depositó en mi la confianza de desarrollar el presente estudio y siempre estuvo dispuesto a guiar en forma profesional y cordial.

Señor Ing. Víctor Rocco Herrera, Director del Laboratorio Nacional de Vialidad, a quien destaco por guiar este trabajo, apoyando en aspectos técnicos y facilitando la información utilizada en el estudio.

Mi agradecimiento y especial reconocimiento por su constante ayuda a Ing. Viviana Morales. La atención que tuvo para impulsar el tema y el tiempo dedicado a esta investigación fueron fundamentales para el desarrollo de este estudio.

Señor Ing. Gabriel Palma Papic, a quien agradezco por su disposición e interés en el tema y sus valiosos aportes en el desarrollo y análisis de las metodologías utilizadas.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA	1
1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4 PAVIMENTO	4
1.4.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO.....	4
1.4.2 DISEÑO DE PAVIMENTO	6
1.5 ASFALTO ESPUMADO	9
1.5.1 DESCRIPCIÓN	9
1.5.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ESPUMA.....	11
1.5.3 ESTRUCTURA DEL MATERIAL	12
1.5.4 RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO	16
1.6 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRAMO DE PRUEBA	19
1.6.1 CONDICIONES PREVIAS DEL PAVIMENTO	20
1.6.2 CONSTRUCCIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA	20
1.6.3 COLOCACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO	22
1.7 MEDICIONES.....	22
1.8 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	24
1.9 EQUIPOS UTILIZADOS	25
CAPÍTULO 2. DEFLEXIONES	26
2.1 INTRODUCCIÓN.....	26
2.2 ANÁLISIS DE DEFLEXIONES	28

2.2.1	GRÁFICOS CUENCO DE DEFLEXIONES POR ESPESOR	28
2.2.2	GRÁFICOS CUENCO DE DEFLEXIONES POR SENSOR.....	32
2.3	COMENTARIOS	36
CAPÍTULO 3. RETROCÁLCULO MECANICISTA		38
3.1	ANÁLISIS POR MÉTODO	39
3.1.1	WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - WSDOT.....	39
3.1.2	EVERCALC 5.0.....	44
3.1.3	MODTAG.....	47
3.1.4	MICH PAVE.....	50
3.1.5	COMENTARIOS.....	53
3.2	COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS.....	54
3.2.1	CARPETA ASFÁLTICA	54
3.2.2	BASE.....	56
3.2.3	SUBRASANTE	58
3.3	RESUMEN DE DATOS	59
3.4	COMENTARIOS.....	60
CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DEL ASFALTO ESPUMADO.		63
4.1	INTRODUCCIÓN.....	63
4.1.1	NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO	64
4.2	RESULTADOS AASHTO	66
4.2.1	COEFICIENTE ESTRUCTURAL AASHTO.....	66
4.2.2	COEFICIENTE ESTRUCTURAL AASHTO CORREGIDO.....	67
4.2.3	SUBRASANTE	70
CAPÍTULO 5. TRÁNSITO Y EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES		72
5.1	INTRODUCCIÓN.....	72

5.2	TRÁNSITO DE DISEÑO	72
5.2.1	TASA DE CRECIMIENTO	75
5.2.2	TMDA	76
5.2.3	TRÁNSITO ACUMULADO	78
5.2.4	VOLUMEN POR PISTA DE DISEÑO	79
5.2.5	ESTRATIGRAFÍA DE PESOS POR EJES	80
5.2.6	TRÁNSITO EQUIVALENTE	80
5.2.7	RESULTADOS.....	86
5.3	DETERMINACIÓN DE EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES USANDO METODOLOGÍA AASHTO	87
5.3.1	PARÁMETROS DE DISEÑO	88
5.4	DETERMINACIÓN DE EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES	93
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		96
BIBLIOGRAFÍA:		100
ANEXOS		101
ANEXO A.	PROPIEDADES ASFALTO ESPUMADO.	102
ANEXO B.	INFORMACIÓN CENSAL POR ESTACIÓN	103
ANEXO C.	ESTRATIGRAFÍA PESOS POR EJES	104
ANEXO D.	DEFLEXIÓN FWD.....	105
ANEXO E.	CERTIFICADOS DE LABORATORIO.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS:

FIGURA 1.4.2-1	PAVIMENTO ASFÁLTICO SOBRE BASE GRANULAR. PUNTOS CRÍTICOS DE FALLA.	8
FIGURA 1.5.2-1	RELACIÓN VIDA MEDIA-EXPANSION.	12
FIGURA 1.5.3-1	ESQUEMA DE UNIÓN ASFALTO-PARTÍCULA	13
FIGURA 1.5.3-2	INTERFACE DE ASFALTO ENTRE PARTÍCULAS	14
FIGURA 1.5.3-3	ESQUEMA INTERPARTÍCULA, EFECTO DE COMPACTACIÓN	15
FIGURA 1.5.4-1	CURVA GRANULOMÉTRICA PARA ASFALTO ESPUMADO	16
FIGURA 1.5.4-2	RECICLADO IN-SITU USANDO ASFALTO ESPUMADO.	18
FIGURA 1.6.2-1	ESQUEMA DEL TRAMO DE PRUEBA. CORTE LONGITUDINAL	21
FIGURA 1.6.3-1	ESQUEMA DEL TRAMO DE PRUEBA. PLANTA	22
FIGURA 2.1-1	ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO FWD	27
FIGURA 4.1-1	ESQUEMA AASHTO DE RETROCÁLCULO	63
FIGURA 5.2-1	PLANO UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL DE TRÁNSITO Nº24 Nº7 Y Nº8	74

ÍNDICE DE TABLAS:

TABLA 1.6.2-1	CONFIGURACIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA	20
TABLA 1.6.2-2	ESPEORES POR TRAMO	21
TABLA 1.7-1	FECHA Y NÚMERO DE MEDICIONES PARA DEFLECTOMETRÍA FWD	23
TABLA 3.3-1	VALORES DE MÓDULO ELÁSTICO PROMEDIO, DISTINTOS MÉTODOS	59
TABLA 4.2.1-1	COEFICIENTE SIN CORRECCIÓN, AASHTO	66
TABLA 4.2.2-1	COEFICIENTE ESTRUCTURAL CORREGIDO POR BASE GRANULAR, AASHTO	68
TABLA 4.2.2-2	VALORES COEFICIENTES PROMEDIO, MÉTODO AASHTO	70
TABLA 4.2.3-1	MÓDULO DEL SUELO:	70
TABLA 5.2-1	RESUMEN TMDA AÑO 2008	73
TABLA 5.2-2	UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL	74
TABLA 5.2-3	TMDA TOTAL POR TIPO DE VEHÍCULO PARA EL AÑO 2008	75
TABLA 5.2.1-1	PROYECCIÓN DE PGB	75
TABLA 5.2.1-2	ELASTICIDAD β	76
TABLA 5.2.1-3	TASA DE CRECIMIENTO ESPERADO POR AÑO	76
TABLA 5.2.2-1	TMDA PROYECTADO AÑO INICIAL	77
TABLA 5.2.2-2	TMDA PROYECTADO POR PUNTO CENSAL ESTACIÓN 02-008-01-1	77
TABLA 5.2.2-3	TMDA PROYECTADO POR PUNTO CENSAL ESTACIÓN 02-007-01-1	77
TABLA 5.2.2-4	TMDA PROYECTADO POR PUNTO CENSAL ESTACIÓN 02-024-02-1	77
TABLA 5.2.3-1	VOLUMEN ACUMULADO ESPERADO POR TRAMO ESTACIÓN 02-008-01-1	78
TABLA 5.2.3-2	VOLUMEN ACUMULADO ESPERADO POR TRAMO ESTACIÓN 02-007-01-1	78
TABLA 5.2.3-3	VOLUMEN ACUMULADO ESPERADO POR TRAMO ESTACIÓN 02-024-02-1	78
TABLA 5.2.4-1	VOLUMEN ACUMULADO POR PISTA DE DISEÑO ESTACIÓN 02-008-01-1	79
TABLA 5.2.4-2	VOLUMEN ACUMULADO POR PISTA DE DISEÑO ESTACIÓN 02-007-01-1	79
TABLA 5.2.4-3	VOLUMEN ACUMULADO POR PISTA DE DISEÑO ESTACIÓN 02-024-02-1	79

TABLA 5.2.6-1	FACTOR DE EQUIVALENCIA DE ASFALTO POR TRAMO DE CARGA	81
TABLA 5.2.6-2	ESTRATIGRAFÍA POR EJE, TIPO DE VEHÍCULO (1000 UNIDADES)	82
TABLA 5.2.6-3	EJES EQUIVALENTES POR TIPO DE VEHÍCULO PARA ASFALTO (1000 UNIDADES)	83
TABLA 5.2.6-4	RESUMEN DE EJES EQUIVALENTES POR TIPO DE VEHÍCULO PARA ASFALTO	83
TABLA 5.2.6-5	DETALLE EE POR ESTACIÓN PARA ASFALTO ESTACIÓN 08	84
TABLA 5.2.6-6	DETALLE EE POR ESTACIÓN PARA ASFALTO ESTACIÓN 07	84
TABLA 5.2.6-7	DETALLE EE POR ESTACIÓN PARA ASFALTO ESTACIÓN 24	85
TABLA 5.2.7-1	DETALLE EE POR TRAMO PARA ASFALTO	86
TABLA 5.2.7-2	VARIACIÓN PORCENTUAL POR ESTACIÓN	86
TABLA 5.3.1.2-1	EJES EQUIVALENTES	88
TABLA 5.3.1.6-1	COEFICIENTES ESTRUCTURALES	92
TABLA 5.3.1.7-1	PARÁMETROS DE DISEÑO AASHTO.	93
TABLA 5.4-1	DISEÑO AASHTO	94
TABLA A-1	RESUMEN DE PROPIEDADES ASFALTO ESPUMADO	102
TABLA B-1	INFORMACIÓN CENSO 2008	103
TABLA C-1	ESTRATIGRAFÍA POR EJES	104
TABLA D-1	DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 12cm	105
TABLA D-2	DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 17cm	106
TABLA D-3	DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 22cm	107
TABLA D-4	DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 24cm.(BASE GRANULAR)	108

ÍNDICE DE GRÁFICOS:

GRÁFICO 2.2.1-1	VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 12cm	29
GRÁFICO 2.2.1-2	VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 17cm	29
GRÁFICO 2.2.1-3	VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 22cm	30
GRÁFICO 2.2.1-4	VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 24cm	30
GRÁFICO 2.2.1-5	VALORES PROMEDIO DE DEFLEXIÓN SENSOR D0, POR ESPESOR DE BASE	31
GRÁFICO 2.2.2-1	DEFLEXIÓN SENSOR D0, POR ESPESOR DE BASE	32
GRÁFICO 2.2.2-2	DEFLEXIÓN SENSOR D20, POR ESPESOR DE BASE	33
GRÁFICO 2.2.2-3	DEFLEXIÓN SENSOR D30, POR ESPESOR DE BASE	33
GRÁFICO 2.2.2-4	DEFLEXIÓN SENSOR D45, POR ESPESOR DE BASE	34
GRÁFICO 2.2.2-5	DEFLEXIÓN SENSOR D60, POR ESPESOR DE BASE	35
GRÁFICO 2.2.2-6	DEFLEXIÓN SENSOR D90, POR ESPESOR DE BASE	35
GRÁFICO 2.2.2-7	DEFLEXIÓN SENSOR D120, POR ESPESOR DE BASE	36
GRÁFICO 3.1.1.1-1	MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, WSDOT	41
GRÁFICO 3.1.1.2-1	MÓDULO BASE ESPUMADA, WSDOT	42
GRÁFICO 3.1.1.3-1	MÓDULO SUBBRASANTE, WSDOT	43
GRÁFICO 3.1.2.1-1	MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, EVERCALC	44
GRÁFICO 3.1.2.2-1	MÓDULO BASE ESPUMADA, EVERCALC	45
GRÁFICO 3.1.2.3-1	MÓDULO SUBBRASANTE, EVERCALC	46
GRÁFICO 3.1.3.1-1	MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, MODTAG	47

GRÁFICO 3.1.3.2-1	MÓDULO BASE ESPUMADA, MODTAG	48
GRÁFICO 3.1.3.3-1	MÓDULO SUBRASANTE, MODTAG	49
GRÁFICO 3.1.4.1-1	MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, MICHBACK	50
GRÁFICO 3.1.4.2-1	MÓDULO BASE ESPUMADA, MICHBACK	51
GRÁFICO 3.1.4.3-1	MÓDULO SUBRASANTE, MICHBACK	52
GRÁFICO 3.2.1-1	MÓDULO DE LA CARPETA ASFÁLTICA	54
GRÁFICO 3.2.2-1	MÓDULO DE LA BASE	56
GRÁFICO 3.2.3-1	MÓDULO DE LA SUBRASANTE	58
GRÁFICO 4.2.1-1	COEFICIENTE ESTRUCTURAL SIN CORRECCIÓN, AASHTO	67
GRÁFICO 4.2.2-1	COEFICIENTE ESTRUCTURAL CORREGIDO POR BASE GRANULAR, AASHTO	69
GRÁFICO 4.2.3-1	MÓDULO DEL SUELO	71
GRÁFICO 5.2.6-1	EJES ACUMULADOS PARA PISTA DE DISEÑO	85
GRÁFICO 5.3.1.4-1	EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DEL TERRAPLÉN	90
GRÁFICO 5.4-1	DISEÑO AASHTO	94

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN DEL TEMA

El tratamiento de materiales con asfalto espumado es una técnica que utiliza procesos constructivos especializados y de alto rendimiento, que permite para elaborar mezclas capaces de ser empleadas en el reciclado en frío de pavimentos asfálticos y en la estabilización de suelos.

En la actualidad, una de las principales aplicaciones del asfalto espumado es el reciclado de pavimentos asfálticos, el que se puede realizar tanto en sitio como en planta, utilizando el material procedente del fresado de pavimentos antiguos, denominado genéricamente RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). El tratamiento que se realiza en la cámara mezcladora de la máquina de estabilización, incluye la expansión del asfalto líquido y el mezclado con el material proveniente del pulverizado del camino. El asfalto expandido tiene mayor potencial de cobertura que el estado líquido, dado su mayor volumen, y produce un recubrimiento en el espesor más completo del material tratado.

Si bien es cierto, el asfalto espumado se ha masificado en los últimos 20 años, su utilización en Chile es aún incipiente. El tramo de prueba hecho por el Laboratorio Nacional de Vialidad manifiesta el interés que tiene el país en el estudio y la implementación de nuevas tecnologías. En relación a lo anterior, el siguiente trabajo pretende proponer un coeficiente estructural del asfalto espumado, que permita dar antecedentes para futuros diseños mediante método AASHTO a pavimentos diseñados con este material.

Para esto, en el desarrollo de este trabajo se hizo un estudio de las deflexiones registradas en el tramo de prueba entre Julio del 2008 y Marzo del 2011, las que fueron analizadas, a fin de obtener un módulo representativo del material, mediante cuatro distintas metodologías mecanicistas: Washington State Department of Transportation (WSDOT), Análisis de Sistemas Multicapas WESLEA (EVERCALC 5.0), Cornell Local

Road Program (MODTAG) Michigan Department of Transportation and the University of Michigan Transportation Research Institute (MICHBACK).

Para determinar en forma empírica el coeficiente estructural del asfalto espumado, se siguieron las indicaciones incluidas en el texto guía: "Foamed Asphalt Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Mid-Western Roads" de: Romanoschi, Hossain, Heitzman, and Gisi, desprendiendo valores del módulo de la subrasante, módulos elásticos y un coeficiente estructural del asfalto espumado, permitiendo establecer directrices para futuros diseños utilizando esta nueva técnica.

Como una forma de complementar el comportamiento del método de diseño para bases tratadas con asfalto espumado, se incluirá un estudio del tránsito, definiendo ejes equivalentes que han pasado por el tramo y una proyección de estos, tratando de estimar el período de vida útil del pavimento.

Lo obtenido en este estudio es bajo las condiciones propias del tramo de prueba analizado y sujeto a lo medido en las fechas expuestas anteriormente.

1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El asfalto espumado fue desarrollado en 1956 en la universidad de Iowa, inicialmente el proceso consistía en inyectar vapor al asfalto en caliente para producir la espuma. Poco interés hubo en el nuevo proceso hasta que en 1968 Mobil Oil adquirió la patente del invento y realizó investigación en el tema, principalmente modificó el procedimiento original, agregando agua fría en lugar de vapor y desarrolló una serie de investigaciones relacionadas a optimización del proceso. El vencimiento de los derechos sobre la patente del espumado derivó en un explosivo avance en los 90s. Diversos estudios internacionales han determinado parámetros para mejorar la eficiencia del proceso, relacionados con: Temperatura del Asfalto; Presión de inyección del asfalto en la cámara; Viscosidad del asfalto; Tamaño del recipiente donde se espuma en laboratorio, Banda granulométrica; Utilización de Filler; Contenido de RAP; Cantidad de finos y algunos estudios de contenido óptimo de asfalto.

En Chile, se han hecho investigaciones a nivel de laboratorio y a escala real, en particular el Laboratorio Nacional de Vialidad ha participado en el desarrollo tramos de prueba en

distintas zonas del país. El primero de ellos fue: “Proyecto Rehabilitación Travesía-Copiapó, Ruta 5”, registrando todo lo relacionado al método constructivo y aportando en la experiencia logística en obra.

Por otro lado, en laboratorio se han desarrollado una serie de estudios al material reciclado, en particular, se han realizado estimaciones de ángulo de fricción, determinación de la cohesión del material espumado, curvas de maduración, evolución de la fragilidad y ensayos triaxiales sobre el material, entre otros.

En el anexo a se incluye una tabla resumen con propiedades del asfalto espumado definidas en la actualidad.

1.3 OBJETIVOS

Se espera a futuro poder determinar parámetros de diseño representativos y fieles al comportamiento de bases tratadas con asfalto espumado. Para ello, este trabajo pretende dar un paso más en el conocimiento de esta tecnología, estudiando la deflectometría de impacto sobre un pavimento construido con base reciclada y comparando los resultados con una base tradicional, para ello se proponen los siguientes objetivos.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar en forma empírica, mediante el análisis de deflexiones registradas en el tramo de prueba, valores representativos del coeficiente estructural de una base reciclada, tratada con asfalto espumado y dar una predicción del período de vida útil para los distintos subtramos que componen el tramo de prueba, según método de diseño AASHTO-93.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para obtener valores representativos del coeficiente estructural de la base espumada y poder plantear la discusión de los resultados, se proponen los siguientes objetivos:

- Estudiar las deflexiones medidas en el tramo de prueba, realizando retrocálculo mediante métodos mecanicistas y AASHTO

- Estimar un coeficiente estructural para realizar diseño AASHTO y determinar mediante retrocálculo mecanicista valores de módulo elástico, que sean representativos del pavimento del tramo de prueba.
- Estimar los ejes equivalentes que han transitado por el tramo de prueba y realizar una proyección de estos, prediciendo la vida útil de la estructura.

1.4 PAVIMENTO

Comúnmente se define el pavimento como un conjunto de capas superpuestas horizontalmente, formadas por diversos materiales sueltos o tratados con una sustancia aglomerante, cuya misión es transmitir adecuadamente las cargas generadas por el tránsito, de tal forma que las capas subyacentes no se deformen en límites inadmisibles durante el período de proyecto.

El pavimento debe ser capaz de resistir las solicitaciones de cargas dinámicas y aportar una serie de propiedades que garanticen la seguridad y comodidad de los usuarios en forma duradera.

La actual concepción de la estructura multicapa, unida al desarrollo de nuevas técnicas, deriva en la generación de infinidad de secciones diseñadas específicamente para determinadas situaciones de carga. No obstante, puede hacerse una síntesis de todas ellas en dos grupos, pavimentos rígidos, compuestos principalmente por estructuras de hormigón, y los pavimentos flexibles, formados por capas bituminosas y granulares.

1.4.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DEL PAVIMENTO

Las propiedades estructurales se relacionan directamente con las propiedades resistentes de los materiales que constituyen el pavimento y con el espesor de las capas que lo forman.

El espesor de las capas y la calidad estructural define la forma de transmisión y el grado de absorción de las tensiones transmitidas por los vehículos; se entiende que un mayor espesor contribuirá a mejorar las propiedades resistentes de una determinada capa. Las características de los materiales que conforman las capas del pavimento originarán distintos esfuerzos en las zonas de contacto. Esto implica que el diseño de cada capa

debe ser tal, que garantice un buen comportamiento estructural del conjunto, disipando las tensiones gradualmente.

Para determinar el espesor de las capas que constituirán el pavimento existen diversos métodos de diseño, los que se basan en los conceptos de: "estabilidad estructural", resistencia, leyes de fatiga de los materiales o en experiencias a escala real; estimando el número de repeticiones de carga-descarga que es capaz de soportar cada capa o el conjunto, tanto para el consumo de fatiga, como para las deflexiones iterativas, que originan procesos de descompactación del material, provocando la pérdida de propiedades estructurales. Para estimar el número de procesos de carga-descarga que será solicitante del pavimento, es necesaria la estimación de intensidad de tránsito pesado previsto para la vía, generando el cálculo de vida útil del pavimento.

En resumen, las características estructurales dependen de:

- Resistencia: Adecuada transmisión de cargas.
- Absorción: Reducción progresiva de las tensiones.
- Estabilidad: Trabajo en conjunto y solidario de las capas.

En la absorción de tensiones y deformaciones producidas por el tránsito, son principalmente los módulos los que proveen la mayor capacidad estructural, seguidamente, el espesor de las capas, disipando las tensiones aplicadas y así estas pueden ser absorbidas con deformaciones compatibles por las capas siguientes, generalmente de menor calidad, hasta llegar al suelo de subrasante, encargada de otorgar un medio adecuado para el apoyo de las capas del pavimento.

Como ya se indicó, el pavimento es una estructura multicapa constituida por un conjunto estratificado de capas horizontales que descansan una sobre otra, en función del cometido que desempeña cada capa se distinguen capas tipo, de las que se destacan carpeta asfáltica o carpeta de rodadura y las capas base y sub-base:

- Carpeta de Rodadura: Es la parte superior del pavimento, encargada de resistir directamente las solicitaciones originadas por el tráfico. Actúa como medio de contacto con el vehículo. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales.

- Capas de base y Sub-base: Situada justo bajo la carpeta de rodadura, tiene una función resistente de las cargas solicitantes, absorbiendo gran parte de las cargas verticales y distribuyendo las cargas en mayor área sobre la subrasante.

1.4.2 DISEÑO DE PAVIMENTO

El diseño de un pavimento debe perseguir una optimización resistente y funcional de la estructura, con un costo global mínimo, y que sea capaz de soportar las solicitaciones de carga en un período determinado, generalmente de entre 15 y 20 años.

Como todo problema de diseño estructural, en el cálculo de pavimento se emplean hipótesis básicas sobre materiales, condiciones externas, solicitaciones o evolución y deterioro de la estructura, que generalmente son diferentes según el método de diseño empleado.

No obstante, es posible identificar una serie de factores comunes a todos ellos los que se detallan a continuación:

1.4.2.1 EL TRÁNSITO

El objetivo principal de los caminos es permitir el tráfico vehicular. Para determinar la sollicitación sobre el pavimento se trabaja con estadísticas de tráfico proyectado, las que intentan predecir el número de vehículos, composición vehicular y cargas por eje.

Las presiones de inflado de los automóviles se encuentran típicamente en el rango de 180 a 250 kPa, y llevan una carga menor a 3,6 kN por neumático. Si se compara con un camión utilizado para transporte de cargas pesada, cuyo rango varía de 30 a 180 kN por eje, con presiones de inflado de 500 a 900 kPa, se intuye que este provocará una sollicitación mucho más grande a la estructura de pavimento.

Del amplio abanico de vehículos que componen el flujo de tráfico en un camino, interesa conocer el porcentaje de ellos con más carga por eje, así como la cuantía máxima de la carga por pista. De esta forma se diseña la pista más sollicitada.

1.4.2.2 LA SUBRASANTE

Las características de resistencia de la subrasante, determinan las propiedades de la estructura de pavimento requerida para disipar las fuerzas aplicadas a la superficie. Los métodos de diseño generalmente utilizan la resistencia y rigidez de la subrasante como parámetro de entrada.

1.4.2.3 EL CLIMA

Las superficies de los caminos están expuestas al sol, viento, lluvia, nieve, radiación UV y otros elementos naturales, los que tienen negativas consecuencias sobre la estructura de pavimento. Algunas de ellas son:

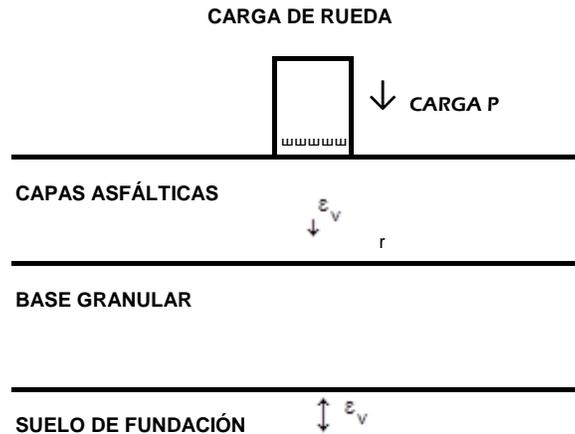
- Efectos térmicos causan una variación del volumen producto de la expansión y contracción del material, en áreas desérticas la carpeta de rodadura puede experimentar una variación de 50°C durante el día.
- Efectos de radiación produce un efecto de insolación, originando la oxidación del asfalto, volviéndolo frágil.
- La presencia de agua es el principal enemigo de las estructuras de caminos. La saturación con agua hace que los materiales se vuelvan deformables y proporciona lubricación en las partículas. La capacidad de soporte del material en condición seca siempre es mayor que en condiciones de saturación.

El factor climático sólo se considera en la elección de los materiales y en aspectos constructivos. En lo que se refiere a diseño puro de la estructura no tiene especial influencia.

El concepto básico del diseño de pavimentos de asfalto, es proporcionar una estructura que permita prevenir la deformación permanente del suelo de fundación, aporte una superficie de rodado adecuada y una combinación de la carpeta asfáltica más una base y/o subbase que evite el agrietamiento por fatiga.

El deterioro de los pavimentos asfálticos se debe principalmente por el efecto combinado del clima, edad y tránsito. La figura 1.4.2-1 muestra una estructura de pavimento típica, con los puntos críticos que conducen a los deterioros estructurales antes mencionados.

FIGURA 1.4.2-1
PAVIMENTO ASFÁLTICO SOBRE BASE GRANULAR. PUNTOS CRÍTICOS DE FALLA.



Donde:

- ϵ_r : Deformación radial unitaria por tracción de la capa asfáltica.
 ϵ_v : Deformación vertical unitaria por compresión.

El agrietamiento por fatiga se produce por deformaciones radiales de tracción a nivel de la fibra inferior de la capa asfáltica, resultantes de la acción de las cargas de tránsito, mientras que el ahuellamiento es provocado, generalmente, por deformaciones verticales excesivas a nivel de suelo de fundación (subrasante).

Pese a que aún no está definido en forma clara, se piensa que el asfalto espumado falla principalmente por el fenómeno de ahuellamiento, el que puede ser originado por dos causas diferentes:

- Deformación permanente causada por densificación, donde las tensiones de cargas repetidas hacen que las partículas del pavimento se aglomeren más, produciendo una disminución de volumen.
- Movimientos laterales del material por las cargas del tránsito, debilitando la estructura bajo la carga de rueda.

El cálculo de pavimento constituye por tanto, la aplicación práctica de lo que se ha llamado mecánica de firmes, cuyo objetivo no es otro que definir materiales y espesores de las capas que lo constituyen, siendo ambos aspectos los que determinan las características estructurales.

Para realizar el dimensionamiento de las distintas capas, existe gran variedad de métodos y modelos de comportamiento. El fin que se persigue en todos los métodos es proyectar una estructura multicapa económicamente satisfactoria que sea capaz de servir como soporte a la rodadura de los vehículos durante un tiempo mínimo, sin que los materiales que la componen se deformen en forma excesiva.

1.5 ASFALTO ESPUMADO

1.5.1 DESCRIPCIÓN

La espuma de asfalto se forma cuando el bitumen se transforma a un conjunto de burbujas mediante la adición de pequeñas cantidades de agua. En el momento en que se añade agua al betún caliente, el agua se evapora de golpe, producto de la transferencia de calor, generando una expansión explosiva en el betún. Esta expansión se produce por la retención de las partículas de agua en estado gaseoso debido a la tensión superficial propia del asfalto, generando un aumento volumétrico de hasta 20 veces el original. Por la baja conductividad térmica del asfalto, la espuma puede mantener el equilibrio por poco tiempo, entre 10 a 30 segundos.

Se sostiene que espumar el asfalto reduce la viscosidad, aumentando las propiedades adherentes, haciéndolo apto para mezclar con agregados fríos y húmedos. La realidad es que bajo un mismo nivel de temperatura, el bitumen sin espumar posee exactamente la misma viscosidad que uno espumado, ya que solo es un cambio físico, la diferencia se encuentra al considerar el volumen completo, ya espumado, porque se incluye la cantidad de gas en la estimación de la viscosidad, por lo tanto, se obtiene un sistema bitumen-aire, que realmente es menos viscoso, a este efecto se le suma la mayor área superficial por unidad de masa, derivando en que sea más fácil de dispersar en materiales granulares fríos.

La intensidad y eficiencia del bitumen espumado se puede controlar óptimamente mediante la relación agua/asfalto, teniendo en cuenta condiciones físicas y ambientales, tales como presión y temperatura.

A continuación se muestra un listado con algunas de las ventajas y desventajas más importantes de la utilización de asfalto espumado.

VENTAJAS:

- Flexibilidad. La estabilización con asfalto produce un material con propiedades viscoelásticas, que posee una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.
- Facilidad de preparación. Un tanque se acopla a la recicladora y el asfalto caliente es bombeado y esparcido mediante una barra rociadora, donde la espuma de asfalto es inyectada en la cámara de mezclado.
- Costo. El asfalto espumado utiliza cemento asfáltico de penetración estándar. No existen costos adicionales de producción del mismo.
- Velocidad para adquirir resistencia. El material puede ser transitado inmediatamente después de ser colocado y compactado.

DESVENTAJAS:

- El asfalto espumado requiere que el asfalto esté caliente, generalmente sobre los 160°C. Frecuentemente esto requiere de instalaciones para calentar el mismo, y medidas especiales de seguridad.
- Condición y tipo de material. El material saturado y pobre en la fracción fina (menor a 0,075 mm) no puede ser procesado con asfalto espumado sin un tratamiento previo o la adición de material nuevo.
- Los materiales granulares estabilizados con asfalto espumado sometidos a cargas repetidas de tránsito se encuentran bajo un efecto de densificación gradual, generando una deformación de la capa superficial del pavimento, haciéndolos propensos a una falla de ahuellamiento.

1.5.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ESPUMA

La calidad del bitumen espumado es determinada por dos parámetros: la expansión y la vida media:

EXPANSIÓN:

Se define la relación entre el volumen máximo alcanzado del betún en estado espumado y el volumen del betún sin espumar. Normalmente, la expansión del asfalto es entre 15 y 20 veces el volumen inicial.

VIDA MEDIA:

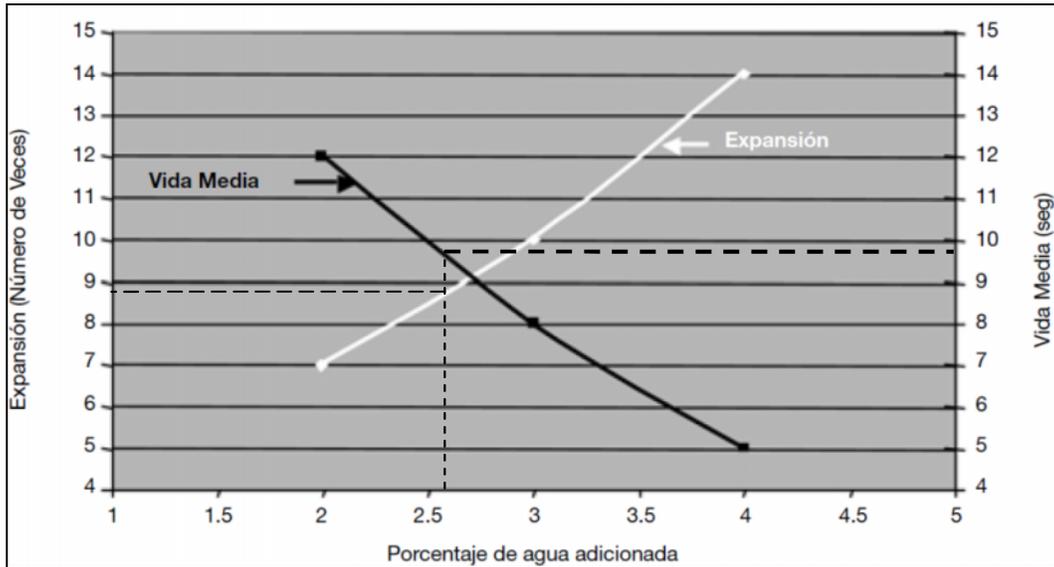
Se entiende como el tiempo transcurrido que tarda la espuma en sedimentarse hasta la mitad del volumen máximo obtenido en el proceso de espumado. La vida media es medida en segundos y por lo general oscila entre 5 y 10 segundos.

La razón de expansión y vida media son medidas que dependen de muchos factores, entre éstos:

- Temperatura del asfalto: Las propiedades de espumación de la mayoría de los asfaltos mejoran con temperaturas más altas. Espumas aceptables se consiguen sobre 149 ° C (Abel, 1978).
- Dosis de agua inyectada: Generalmente la Razón de Expansión aumenta, con un incremento en la cantidad de agua inyectada, mientras la Vida Media decrece.
- Presión bajo la cual el asfalto es inyectado en la cámara de expansión: Bajas presiones (menores a 3 bar) afectan negativamente tanto a la Razón de Expansión como a la Vida Media.

Siendo los principales factores, la temperatura del asfalto y la dosis de agua. A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua, se incrementa la Razón de Expansión pero a su vez disminuye la Vida Media, sin embargo, el mejor espumado es considerado como aquel que optimiza tanto la Razón de Expansión como la Vida Media.

**FIGURA 1.5.2-1
RELACIÓN VIDA MEDIA-EXPANSION.**



Se llega a la siguiente relación: Cuanto mayor sea la expansión y mayor vida media, mejor será la calidad del espumado. En general no existen especificaciones estándar para perfeccionar estas propiedades, pero es recomendable aumentar levemente el valor óptimo de la Vida Media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la Razón de Expansión.

Para determinar las propiedades del bitumen espumado utilizado, es posible efectuar un análisis de idoneidad por medio del equipo móvil de laboratorio antes de comenzar las obras, realizando una serie de ensayos donde se varía la temperatura del betún y las cantidades añadidas de agua y aire. Una vez definidas las características del betún se procede a la confección de probetas para el análisis de los aglomerados.

1.5.3 ESTRUCTURA DEL MATERIAL

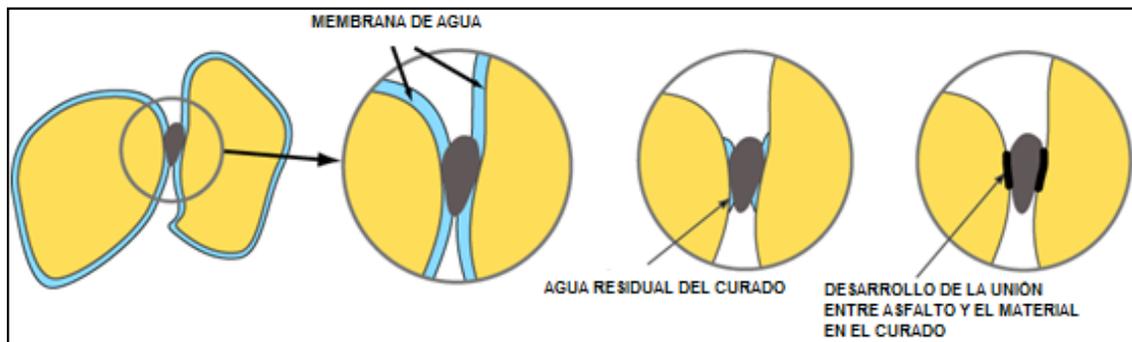
El propósito de espumar es hacer que sea más fácil de distribuir el asfalto en materiales que se encuentran a temperatura ambiente. El bitumen líquido a alta temperatura (sin espumar), al entrar en contacto con partículas de agregado frío, se convertiría inmediatamente en glóbulos y por lo tanto no puede ser trabajado completamente. Por otro lado, el asfalto espumado puede ser introducido en la mezcla de manera bastante

uniforme. Un proceso análogo de la mezcla en frío, es el efecto que produce batir una clara de huevo, la que puede ser mezclada con harina seca.

Cuando se realiza la mezcla del asfalto espumado con el material pétreo, se forma un mortero (mastic o masilla) entre el bitumen y la fracción fina. Los materiales que son pobres en finos no se mezclan en forma adecuada con el bitumen espumado, el porcentaje mínimo de finos requerido es del 5%, considerando como finos la fracción que pasa la malla de 0,075 mm (Nº 200). 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 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 de la mezcla.

En la cámara de mezclado, mientras ocurre el proceso de formación del mortero asfáltico, visible como pequeñas gotas de bitumen entre la mezcla suelta, las partículas mayores de árido son cubiertas por una membrana de agua. Esta capa sobre el material reduce enormemente el desarrollo de la unión entre el asfalto y la piedra (el asfalto es hidrófugo y el material pétreo es hidrofílico).

FIGURA 1.5.3-1
ESQUEMA DE UNIÓN ASFALTO-PARTÍCULA



El completo desarrollo de la resistencia es logrado cuando existe unión entre todos los elementos que componen la mezcla, estado que se obtiene en la medida en que disminuye la cantidad de agua presente en la mezcla durante el proceso de curado. El agua ubicada en grandes vacíos se evapora con gran facilidad, pero es mucho más

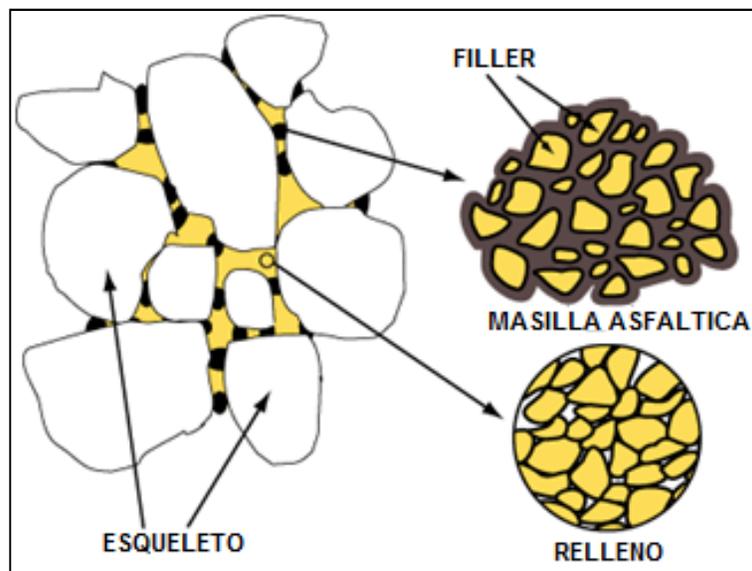
complicado en el caso de la interfaz mortero-agregado, dado el menor potencial termodinámico, lo que significa un mayor tiempo para obtener el curado final del material.

Después de la compactación y curado se obtiene una estructura similar a la que, conceptualmente, se ilustra en la figura 1.5.3-2, donde los agregados de mayor tamaño son parcialmente recubiertos o “soldados” por puntos de mortero asfáltico, formado por la masilla (mastic) de asfalto y la fracción de arena que está parcialmente cubierta.

La base tratada con asfalto espumado se puede caracterizar como una estructura de tres grandes elementos:

- El esqueleto, formado por partículas de agregado grueso.
- La porción de asfalto fundido unido a material fino, existente en forma de gotas que provoca la unión del esqueleto.
- La fase de relleno mineral, que parcialmente llena los vacíos en el esqueleto.

FIGURA 1.5.3-2
INTERFACE DE ASFALTO ENTRE PARTÍCULAS

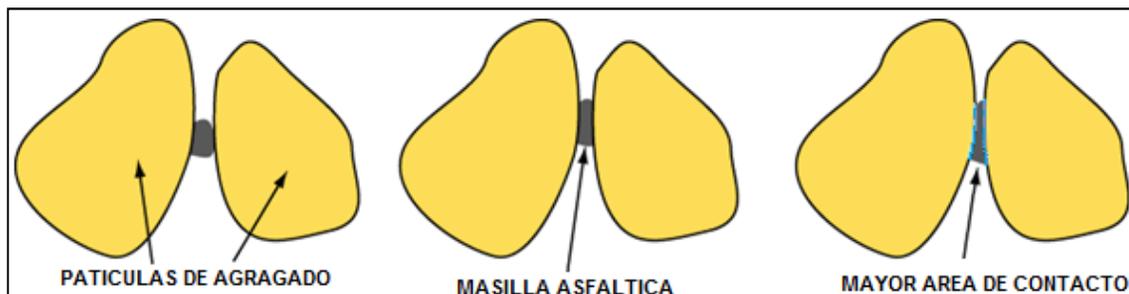


Como se aprecia en la figura anterior, la base tratada con asfalto espumado presenta una matriz de finos, pero se agregan puntos de mastic o masilla asfáltica, que cubren parcialmente el agregado grueso, ilustrando el estado de material “híbrido” expuesto en diferentes estudios. La resistencia bajo carga tiende a ser tomada por la fracción granular,

que soporta tensiones de compresión-aplastamiento gracias a la fricción inter-partícula, y por la matriz fina estabilizada, la cual presenta un comportamiento visco-elástico, capaz de resistir tensiones de tracción repetidas.

Un aspecto de gran importancia en el desarrollo de la resistencia y en definitiva, la eficiencia del proceso de rehabilitación, es la compactación que se realiza sobre el material. A medida que aumenta el esfuerzo de compactación, las partículas mayores de agregado se acercan más, la porción de asfalto entre las dos partículas se aprieta y se extiende a lo largo entre ellas. A medida que aumenta la densidad, el área de contacto entre la masilla de asfalto y la partícula también se hace más grande, lo que resulta en una mayor fuerza de unión después del curado. La intuición indica que una mezcla con una mayor densidad debe tener una mayor resistencia y rendimiento. Si se considera que el ítem de compactación no es significativamente elevado, en comparación a otros aspectos de la rehabilitación, es necesario dar atención a este punto en la construcción.

FIGURA 1.5.3-3
ESQUEMA INTERPARTÍCULA, EFECTO DE COMPACTACIÓN



Reciclar con asfalto espumado crea un material que no tiene la apariencia típica de un pavimento asfáltico. Generalmente, una base de asfalto de graduación continua presenta un contenido de vacíos entre un 3 a un 6% y cada partícula es cubierta por una película de asfalto delgada, actuando como un adhesivo de contacto. El contenido real de vacíos del material tratado con espumado después de compactado, es rara vez menor que el 10% y solo se cubre parcialmente a las partículas de agregado.

En cuanto a la relación resistencia-humedad, los materiales estabilizados con asfalto espumado pierden resistencia al sumergirlos en agua, esto puede ser enfrentado mediante la adición de un filler activo, tal como cal hidratada o cemento. El filler, aplicado en cantidades cercanas al 1% en peso, puede producir un aumento significativo de la resistencia retenida sin afectar las propiedades de fatiga de la capa.

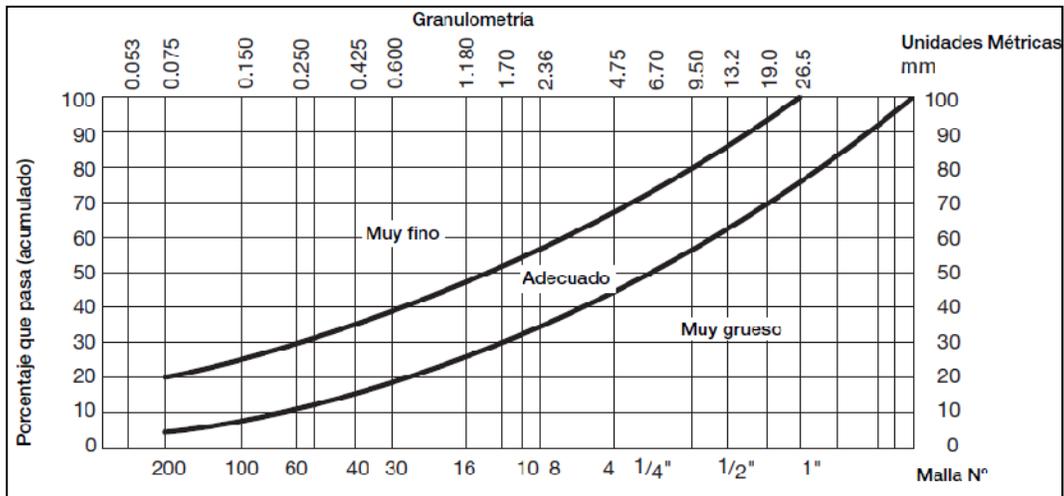
1.5.4 RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO

El betún espumado es un ligante que ofrece múltiples posibilidades de uso y que se puede emplear en la fabricación de mezclas de materiales de diversos tipos y procedencias. Así, por ejemplo, es posible emplear el pavimento fresado, material escarificado o mezcla nueva de grava mineral, con asfalto espumado.

El asfalto espumado pertenece al grupo de los llamados “Reciclajes en Frio” (Cold in Place Recycling), que da la impresión de que el asfalto espumado es frío, lo que no es cierto. Se le llama reciclado en frío, por el estado del agregado, el que no necesita calentarse. El hecho que se “pueda” usar material sin calentar no significa que sea mejor que utilizarlo con agregado caliente. En diversos estudios realizados, se determinó que el calentamiento de los agregados siempre produce una dispersión mayor del asfalto, mejorando la mezcla. En general, no se recomienda realizar operaciones de reciclaje si la temperatura ambiente es inferior a 10°C o la temperatura de superficie de la carretera es inferior a 15°C.

La siguiente figura ilustra la banda granulométrica óptima para realizar el estabilizado, pero sin desmedro que puede trabajar bajo condiciones de material ubicado en los sectores “Muy fino” y “Muy grueso” del diagrama.

FIGURA 1.5.4-1
CURVA GRANULOMÉTRICA PARA ASFALTO ESPUMADO



Debido a la gran variedad de agregados que pueden ser mezclados con asfalto espumado (áridos chancados, RAP y otras escorias) y a la mayor amplitud de la banda

granulométrica, en comparación a las usadas tradicionalmente en bases granulares, es posible su utilización en el estabilizado del material proveniente del fresado. Esto se debe a que el proceso de espumado incrementa el área superficial del asfalto, reduciendo la viscosidad, lo que ocasiona el revestimiento de los componentes de la mezcla que presentan un tamaño fino. El relleno crea un mortero que adhiere el grano grueso, permitiendo el uso de material reciclado.

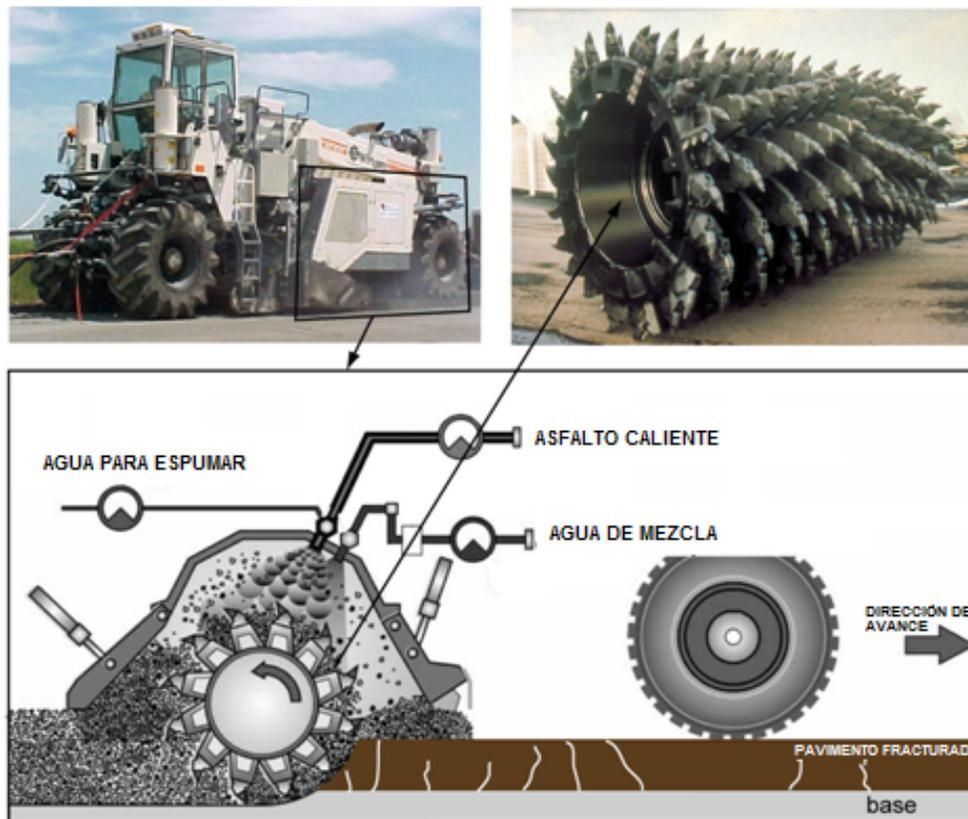
La técnica de reciclado consiste en el tratamiento de materiales de pavimento antiguo, después de haber sido fragmentado o disgregado mecánicamente mediante un equipo fresador y recuperado para su uso. Este fresado puede ser profundo o superficial, lo cual depende del daño de la estructura del pavimento; cabe señalar que, si la estructura de un pavimento se encuentra deteriorada, no significa que los materiales que lo conforman también lo estén. El reciclado de las capas granulares superficiales existentes generalmente es realizado a una profundidad menor a 150 mm, mientras que estabilizar con cemento o cal hidratada requiere una profundidad de 150 a 250 mm para alcanzar un producto similar en términos de vida estructural.

El reciclado en frío puede ser 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 se trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo). In-situ, el reciclado se logra utilizando una máquina recicladora móvil que fresa el pavimento, espuma el bitumen y forma la mezcla.

En la actualidad, el tratamiento in-situ de los materiales de pavimentos es de uso generalizado, gracias a la llegada de potentes máquinas recicladoras, que pueden rehabilitar estructuras con costos comparables a los métodos de reconstrucción convencionales. Considerando la situación de la actual red vial a nivel mundial, la recuperación de pavimentos existentes excede ampliamente la demanda por caminos nuevos. Como consecuencia de estos, el reciclado in-situ ha sido adoptado en muchos países como el método recomendado para abordar el enorme trabajo pendiente en términos de rehabilitación.

La figura 1.5.4-2 ilustra el proceso de reciclado in-situ, indicando los elementos más importantes presentes en el tambor mezclador de la máquina.

**FIGURA 1.5.4-2
RECICLADO IN-SITU USANDO ASFALTO ESPUMADO.**



En general, el proceso en planta es la opción más cara en términos de costo por metro cúbico. Esto se debe principalmente al ítem de transporte y los costos asociados, que no existen en el reciclado in-situ.

A continuación, se presenta un listado con beneficios del reciclado estructural.

- Integridad Estructural: El proceso de reciclado en frío produce capas ligadas gruesas que son consideradas homogéneas y no contienen interfaces débiles con otras capas más delgadas.
- Se logra una alta calidad de mezclado de los materiales provenientes del fresado, el agua de compactación y los agentes estabilizadores.
- Se hace un uso de 100% de RAP, no se necesita crear sitios de empréstitos y se reduce las cantidades destinadas a botadero. Esto reduce los efectos sobre el medio ambiente.

- La alteración de la subrasante es mínima. La intervención de la estructura de pavimento subyacente es ínfima, en comparación con la rehabilitación utilizando técnicas tradicionales de construcción.
- Menores tiempos de construcción: Las máquinas empleadas en el reciclaje en frío son capaces de producir con altas tasas de rendimiento, que reducen significativamente los tiempos de construcción.

1.6 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRAMO DE PRUEBA

El objetivo principal de la realización del tramo es la determinación en forma empírica de un coeficiente estructural representativo de la base espumada, de modo que los diseños se realicen de acuerdo al método de diseño AASHTO 1993.

El tramo de prueba se construyó entre los km 1.266,980 y 1.267,380 de la Ruta 5 Norte en la región de Antofagasta, zona desértica de Chile.

Las características climáticas de la Región de Antofagasta¹ son de una marcada aridez. El desierto se manifiesta plenamente hacia la zona intermedia, donde la influencia marítima, propia del relieve, pierde importancia. La situación de extrema aridez en la depresión intermedia y la escasa vegetación existente definen un paisaje natural conocido como Desierto de Atacama.

El tramo está ubicado en la franja intermedia de la región, donde se desarrolla el subtipo climático desértico interior, y corresponde al clima desértico propiamente tal, caracterizado por una aridez extrema, importante variación térmica entre el día y la noche, y gran sequedad atmosférica. Las temperaturas diurnas extremas son de 30° C y en la noche bajan de 1 a 2° C en las zonas intermedias de las pampas interiores.

Entre diciembre y marzo, las condiciones meteorológicas del altiplano difieren enormemente de la estabilidad estival que predomina en el territorio. Durante estos meses, ocurre el llamado invierno altiplánico, que se genera tras la llegada a la zona de

¹ Fuente: SIIT: Sistema Integrado de Información Territorial. Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile.

considerables masas de aire húmedo provenientes de la cuenca amazónica, lo que produce que los cielos del territorio que posee este clima sean llamativamente claros y limpios, situación que es aprovechada por la investigación astronómica con la instalación de gran cantidad de observatorios.

1.6.1 CONDICIONES PREVIAS DEL PAVIMENTO

El tramo se desarrolla en un sector de la Ruta 5 Norte sobre un pavimento con avanzado deterioro tanto en calzada como en bermas, exhibiendo agrietamientos transversales y longitudinales, además de extensas zonas con baches considerables.

Es posible observar que la carpeta asfáltica ha sido sometida a conservaciones mediante la aplicación de tratamiento superficial simple, el cual presenta desprendimiento parcial. Se ha generado escalonamiento entre la calzada y la berma producto del desprendimiento del material base.

No hubiera sido posible prolongar la vida útil del tramo con sellos asfálticos.

1.6.2 CONSTRUCCIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA

El tramo de prueba fue construido durante el mes de Junio de 2008 y consistió en el reciclado en planta de pavimento asfáltico existente, mediante el pulverizado de la capa asfáltica y parte de la base granular presente.

Se subdividió en 4 tramos continuos de 100 metros de longitud, los cuales poseen diferentes espesores de sus bases recicladas. Todo el tramo de prueba se construyó sobre el mismo terraplén y utilizando una carpeta asfáltica de espesor constante, con el fin de reducir las variables de análisis, permitiendo enfocar el estudio al comportamiento del material reciclado.

**TABLA 1.6.2-1
CONFIGURACIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA**

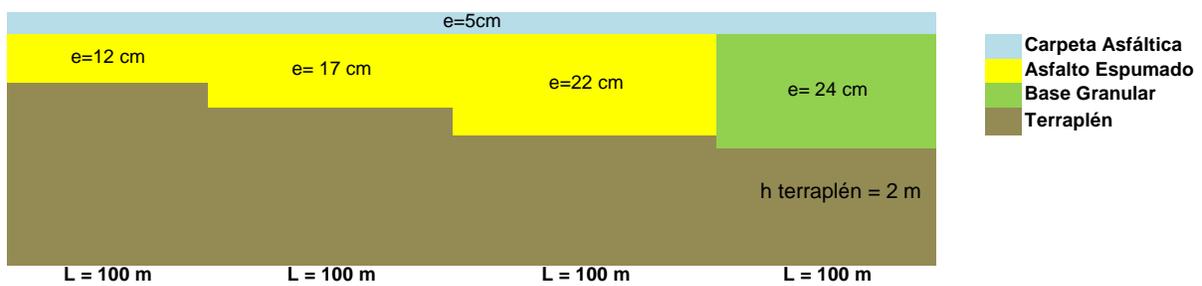
Tramo	km Inicio	km Final	Longitud [m]
1	1.266,98	1.267,08	100
2	1.267,08	1.267,18	100
3	1.267,18	1.267,28	100
4	1.267,28	1.267,38	100

**TABLA 1.6.2-2
ESPEORES POR TRAMO**

Tramo	Carpeta Asfáltica [cm]	Asfalto Espumado [cm]	Base Granular [cm]
1	5	12	-
2	5	17	-
3	5	22	-
4	5	-	24

El tramo de prueba se puede esquematizar de la siguiente forma:

**FIGURA 1.6.2-1
ESQUEMA DEL TRAMO DE PRUEBA. CORTE LONGITUDINAL**



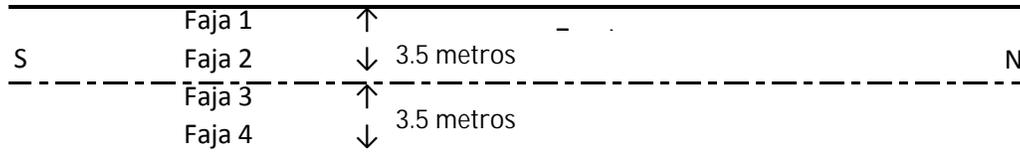
El programa de construcción del tramo abarca 51 días, desde el 15 de Mayo al 4 de Julio del 2008 y se realizó según los requerimientos del Laboratorio Nacional de Vialidad, siguiendo especificaciones técnicas del Manual de Carreteras en:

- Excavación de Corte en TCN.
- Formación y Compactación de Terraplenes.
- Preparación de la Subrasante.
- Base Granular.
- Riego de Liga.
- Imprimación.
- Concreto Asfáltico de Rodadura.
- Mezcla Asfáltica Reciclada y Estabilizada con Asfalto Espumado.

1.6.3 COLOCACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO

El reciclaje se realizó en cuatro fajas de 300 m de longitud, con un traslape de 10 cm a cada lado. Los trabajos se efectuaron de Norte a Sur, comenzando con el tramo de base de mayor espesor.

**FIGURA 1.6.3-1
ESQUEMA DEL TRAMO DE PRUEBA. PLANTA**



La dosificación utilizada para el asfalto espumado fue la siguiente:

CARACTERÍSTICAS DE LA ESPUMA:

Temperatura:	170°C
Agua de Inyección:	1,1%

CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA RECICLADA:

Contenido Óptimo de Asfalto:	2,7%
Contenido de Cemento:	1,0%
Contenido de Agua de Compactación:	5,8%

Para el tramo de prueba se utilizó asfalto CA-24 y se aplicó Cemento Inacesa Especial como filler. Mayor información se puede obtener en el apartado anexos, donde se incluyen los certificados de ensaye realizados a los materiales usados en el tramo.

1.7 MEDICIONES

Las primeras mediciones de deflectometría se hicieron en el período de construcción del terraplén, donde se registró la deflexión de cada capa que lo conforma. Una vez finalizada la construcción del pavimento se realizaron mediciones de deflectometría de impacto sobre la carpeta asfáltica en cada uno de los sectores de 100 metros, las que se registraron en estaciones separadas a 20 metros e intercaladas entre pistas.

Posteriormente, se hicieron siete mediciones como seguimiento, utilizando la misma configuración.

Los datos se agruparon y analizaron en forma independiente según el espesor de la capa base, sin distinción de pista medida. Se graficará y analizará en función del tiempo transcurrido desde la construcción.

**TABLA 1.7-1
FECHA Y NÚMERO DE MEDICIONES PARA DEFLECTOMETRÍA FWD**

Fecha de Medición	Edad [mes]	N° de Pasadas:	Temperatura media aire* [°C]	Temperatura media pavimento* [°C]
Julio 2008	1	6	25,4	30,2
Septiembre 2008	3	2	28,2	36,5
Marzo 2009	9	7	25,1	36,4
Mayo 2009	11	2	26,8	29,9
Agosto 2009	14	2	24,1	31,3
Febrero 2010	20	2	23,5	40,4
Octubre 2010	28	1	28,1	48,1
Marzo 2011	33	2	22,1	38,4

**Valores registrados por el deflectómetro de impacto*

1.8 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

- Para el análisis de deflexiones solo se utilizarán datos en que la carga aplicada sea $50 \text{ kN} \pm 2,5 \text{ kN}$. Los datos de deflexión d_0 que se encuentren en este rango serán normalizados a la carga de referencia.
- Para cada una de las mediciones realizadas al tramo, se eliminarán valores que estén fuera del rango: promedio ± 2 desviaciones estándar de la serie analizada, separando por espesor de base medido.
- Los resultados del análisis serán agrupados por fecha y nuevamente se eliminarán aquellos que estén sobre el promedio ± 2 desviación estándar, para una misma fecha, dejando un punto representativo por espesor.
- Del análisis de retrocálculo, aquellos puntos en que no exista un orden de magnitud lógico en los módulos resultantes serán eliminados del análisis, esto quiere decir, que aquellas mediciones en que la base resulte con módulos mayores a la carpeta asfáltica, no serán consideradas.
- Como una forma de acotar los resultados del retrocálculo, solo se trabajarán aquellos datos de deflexión que tengan un error medio cuadrático menor a 14%. Definido según la siguiente ecuación:

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \quad EC.1.8-1$$

Donde:

d_{ci} : Deflexiones calculadas
 d_{mi} : Deflexiones medidas
 n : Número de sensores

Generalmente, con un límite de 4% de RMS el análisis es aceptado, pero en este caso y dado que los métodos no están diseñados para bases espumadas, se acepta aumentar este valor.

Tanto los análisis y gráficos posteriores indican el espesor de la base como referencia para distinguir los subtramos en estudio.

1.9 EQUIPOS UTILIZADOS

DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO FWD

En términos generales el Deflectómetro de Impacto es un equipo que mide las deformaciones verticales (cuenco de deflexiones) generadas por una carga de impacto aplicada sobre la superficie de pavimento.

El equipo se encuentra constituido por cuatro sistemas principales: sistema de control, sistema de procesamiento, sistema de aplicación de cargas, y sistema de medición de cargas y deflexiones. La característica principal del deflectómetro radica en el sistema de aplicación de la carga, ya que genera impulsos que modelan en forma aproximada, tanto en magnitud como en duración, las cargas que imponen los vehículos al pavimento. El Deflectómetro de Impacto permite estimar el módulo en el pavimento terminado en forma indirecta y no-destructiva.

Una de las mayores desventajas del deflectómetro de impacto, es que realiza medición de carga deformación, lo que no permite, teóricamente, obtener la respuesta resiliente del pavimento y solo es una buena aproximación cuando el pavimento alcanza un estado completamente resiliente.

El módulo resiliente definido como la relación entre la magnitud del esfuerzo desviador y la deformación axial recuperable, no puede ser medido por un sistema que registra carga-deformación en la rama de aplicación de la carga, ya que es necesario conocer la deformación recuperada después de la descarga, pero para el caso de los estudios de pavimento, se considera insignificante esta diferencia.

CAPÍTULO 2.

DEFLEXIONES

2.1 INTRODUCCIÓN

El pavimento es una estructura constituida por varias capas, de diversos materiales, espesores y módulos, que al ser sometida a una determinada sollicitación se produce en él, un estado de tensiones y deformaciones verticales en magnitudes muy pequeñas (del orden de centésimas o milésimas de milímetro). Este desplazamiento se conoce con el nombre de deflexión.

La deflexión es una característica del pavimento que depende de los materiales que lo conforman y del estado de estos, a partir de lo cual, es posible realizar una relación entre los valores de los módulos de las diversas capas que componen el pavimento y los valores de la deflexión de los mismos.

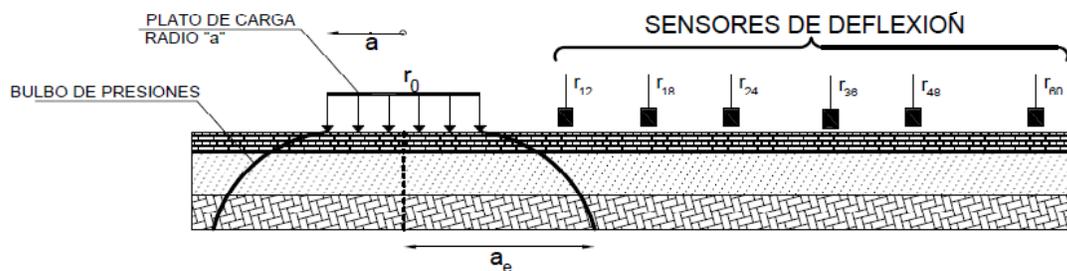
Para medir o cuantificar la deflexión, existen una variada gama de técnicas, a saber; Viga Benkelman, Deflectógrafos Lacroix, Curvímetros, Deflectómetro de Impacto o conocidos por sus siglas inglesas como FWD (Falling Weight Deflectometers)

Dentro de las técnicas enunciadas precedentemente, el FWD presenta dos ventajas fundamentales:

- El sistema de aplicación de la carga se parece mucho al de las cargas dinámicas producidas por los vehículos reales que afectan y dañan la carretera. La escasa duración del impacto (del orden de 20/30 milisegundos) se aproxima bastante al efecto de un vehículo circulando a 60 ó 70 km/h.
- La técnica FWD, permite además medir lo que sucede en los alrededores del punto de carga (normalmente se mide en 6, 7 ó 9 puntos situados secuencialmente a distancias entre 20 cm y 180 cm del punto de impacto). Estas deflexiones asociadas son utilizadas para estudiar el pavimento en su concepto de estructura multicapa, cosa que es imposible tanto con la viga Benkelman, como con los deflectógrafos.

Al ser sometido el pavimento a una carga, sufre una deformación elástica que produce tracciones en el material, estas deformaciones pueden ser correlacionadas directamente con el comportamiento del pavimento in-situ o utilizadas para estimar las propiedades elásticas de los materiales que conforman la estructura. La siguiente imagen permite ver la forma de obtener el cuenco de deflexiones para un pavimento flexible:

FIGURA 2.1-1
ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO FWD



La técnica de retrocálculo (Backcalculation) para la determinación de los valores de los módulos, conocidas las deflexiones y los espesores de las capas, solo es posible de aplicar con datos del FWD.

La deflexión registrada por el equipo en el momento del impacto se analiza utilizando la metodología multicapa. En dicho análisis, el principal modelo de respuesta es un sistema basado en la teoría de Boussinesq- Burmister. El sistema multicapa considera que los materiales son elásticos, lineales, homogéneos e isótropos y están caracterizados por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson. Las capas son de espesor finito y dimensiones horizontales indefinidas, salvo la capa del sello de fundación (terraplén) que se considera de espesor infinito, también en el sentido vertical. Se supone adherencia total en todas las interfaces entre materiales. Los esfuerzos de corte que se producen en las zonas de contacto entre la rueda y la superficie del pavimento se consideran despreciables.

Bajo estas consideraciones y conociendo los espesores de las capas, es posible obtener, a partir de deflexiones producidas por una carga estándar, los valores de los módulos de

los materiales que están constituyendo el pavimento, especial cuidado se debe tener al considerar que la solución no es exacta ni única y se requiere de varias iteraciones.

Como primera tarea se realizará un análisis de las deflexiones obtenidas en el tramo de prueba, graficando las variaciones que ha tenido el cuenco del pavimento en función del tiempo, de ésta forma, poder determinar tiempos de consolidación del pavimento, puntos conflictivos y variaciones significativas de la deformación, que ayudarán al análisis posterior.

2.2 ANÁLISIS DE DEFLEXIONES

Con los valores de la deflectometría de impacto, es posible graficar el cuenco de deflexiones para cada caso y ver la evolución de la respuesta estructural del pavimento, en función del tiempo y de los espesores.

Se presentan los datos procesados, individualizando en cada gráfico por espesor de la base o por punto de medición del deflectómetro. Esta información servirá para determinar la fecha en que el pavimento cambia de comportamiento y logra una estabilización.

2.2.1 GRÁFICOS CUENCO DE DEFLEXIONES POR ESPESOR

Se muestran las deformaciones obtenidas para cada uno de los espesores de pavimento. En los siguientes gráficos es posible ver la evolución que tiene la magnitud de la deflexión producida por la carga del deflectómetro y demuestra el aumento de la resistencia del pavimento en el tiempo.

GRÁFICO 2.2.1-1
VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 12cm

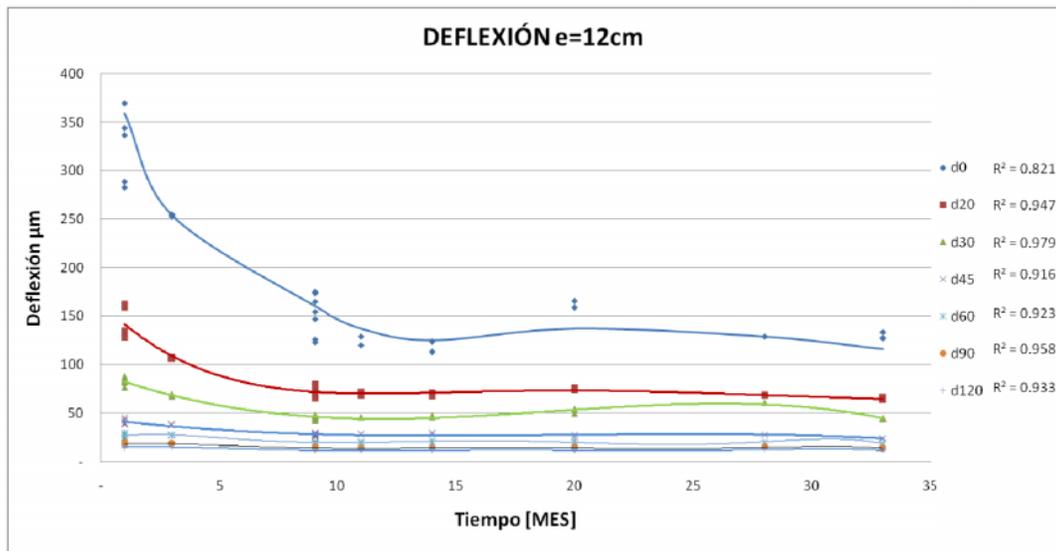


GRÁFICO 2.2.1-2
VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 17cm

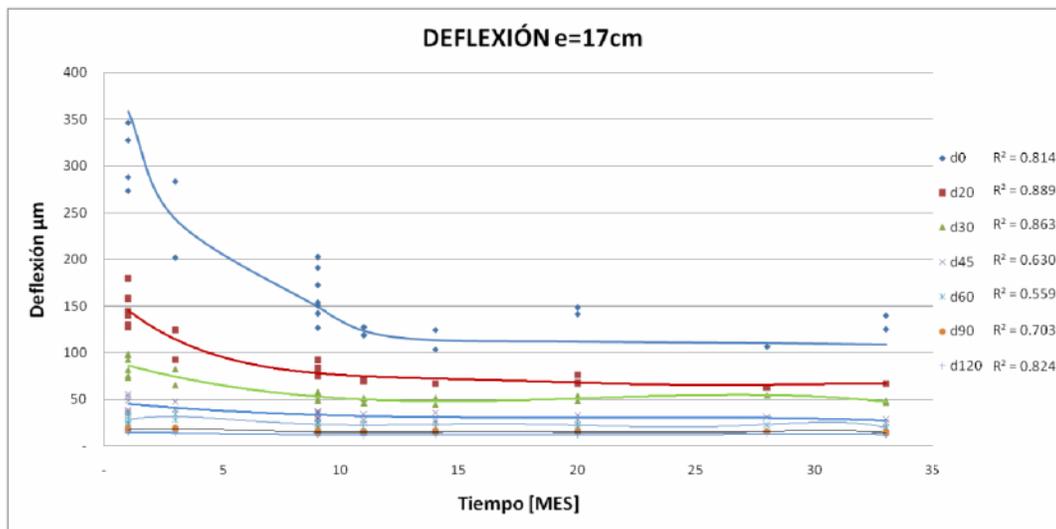
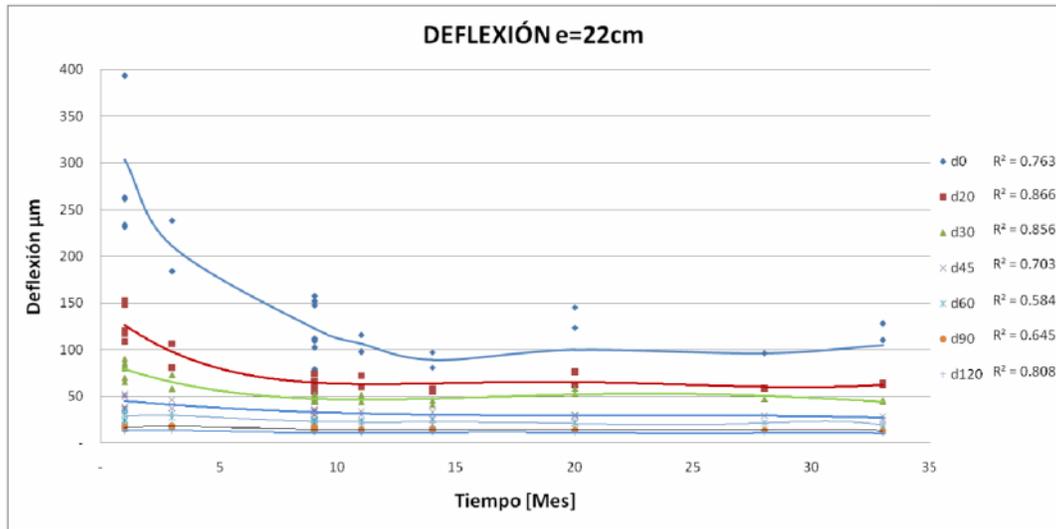


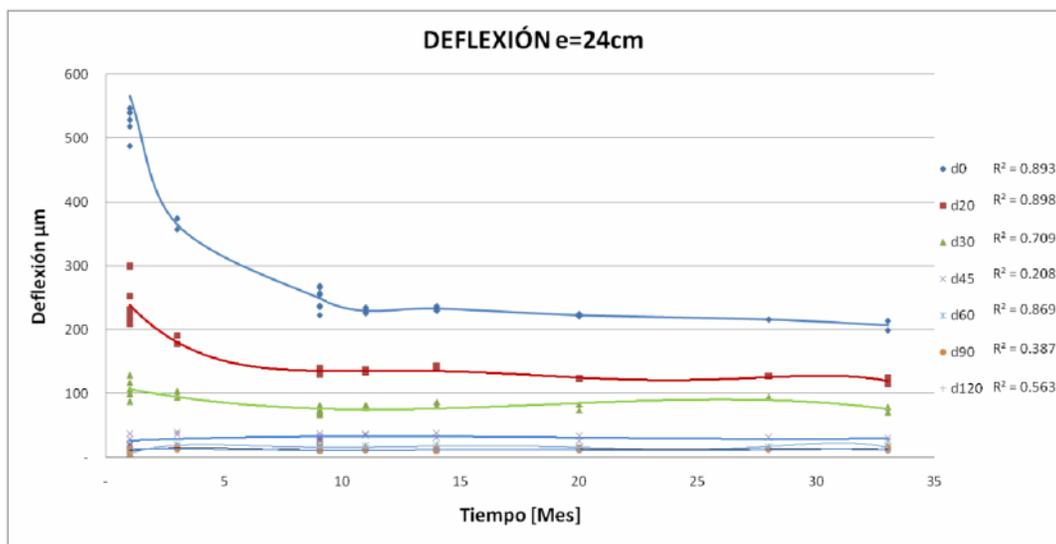
GRÁFICO 2.2.1-3
VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 22cm



En todos los tramos se observa una estabilización de las deformaciones desde la medición realizada en Mayo del 2009 (Mes 11). Es posible notar que para todos los espesores se produjo un aumento de la deflexión medida en Febrero de 2010 (mes 20) y Marzo 2011 (Mes 33), la que es más evidente en el sensor d_0 , esto puede ser originado por variaciones en las condiciones de humedad en la fecha de medición.

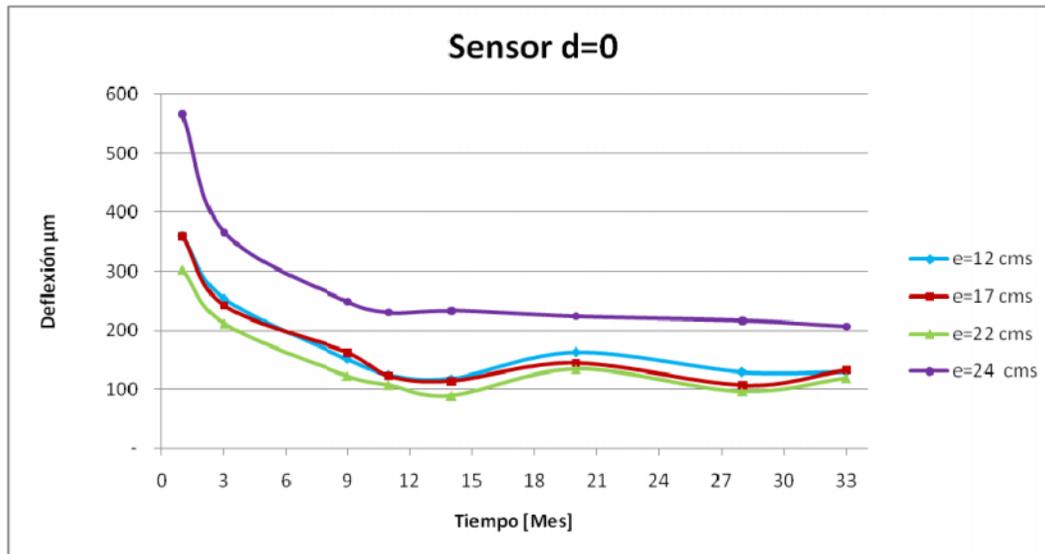
Haciendo el mismo análisis a la base granular se obtiene:

GRÁFICO 2.2.1-4
VARIACIÓN DE DEFLEXIÓN POR SENSOR. ESPESOR BASE 24cm



Como una forma de evidenciar este aumento en las deflexiones, a continuación se grafican los resultados promediados del sensor d0 para cada espesor de base.

GRÁFICO 2.2.1-5
VALORES PROMEDIO DE DEFLEXIÓN SENSOR D0, POR ESPESOR DE BASE



La base granular no muestra el aumento de deflexión obtenido en el mes 20 (Febrero de 2010) y mes 33 (Marzo 2011) que evidencian los tramos de base espumada. Es posible que exista humedad en esa fecha debido al invierno altiplánico y que, desde un punto proporcional a la magnitud de las deflexiones, la susceptibilidad de la base espumada sea mayor que la del granular, ya que ésta última no trabaja por adherencia, en ella, la cohesión es despreciable en comparación al efecto del roce entre partículas. Deterioros por humedad en bases granulares se dan, generalmente, en una situación de agua libre, pero en la zona norte de país, la humedad sube desde estratos inferiores producto de la capilaridad, lo que afecta la base tratada con espumado, provocando un desplazamiento del ligante asfáltico y consiguiente disminución en la adhesión entre él bitumen y la superficie mineral de las partículas.

Ha sido ampliamente reportado que las magnitudes de las deflexiones aumentan cuando se incrementa la cantidad de agua en el material. La presencia de agua genera efectos lubricantes entre las partículas y una disminución en la adherencia, desarrollando un incremento en la deformación y disminuyendo la rigidez de la capa. Diversos informes describen que el efecto de la disminución de la humedad provoca menores deformaciones de corte y por lo tanto se obtiene un incremento en la rigidez.

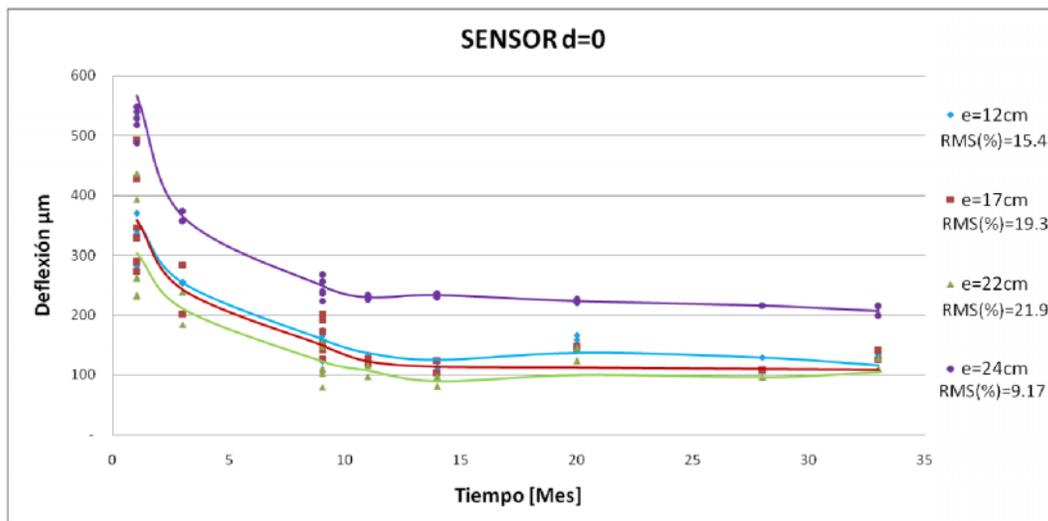
Por otro lado, la deflexión es menor cuando el contenido de agua decrece, porque se incrementan las fuerzas de capilaridad entre las partículas. Existe evidencia de disminuciones por sobre el 60% en el valor del módulo cuando se incrementa el grado de saturación desde 20% hasta el 90%. La capacidad de soporte del material en condición seca es siempre mayor que en estado húmedo y mientras más cohesivo sea el material, como el caso del material espumado, mayor es la susceptibilidad a la humedad.

Se descarta influencia de la temperatura del pavimento en este comportamiento. Como se verifica en la tabla 1.5.4-1, el pavimento medido en Octubre del 2010 (mes 28) tuvo mayor temperatura y presenta una menor deflexión promedio.

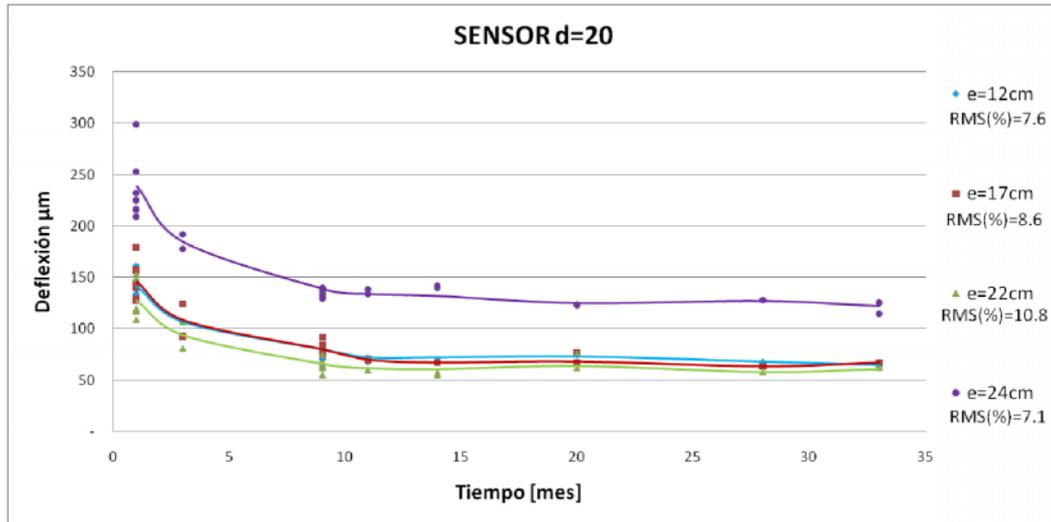
A continuación se mostrarán las variaciones que ha tenido la deflexión, según el sensor que caracteriza el cuenco.

2.2.2 GRÁFICOS CUENCO DE DEFLEXIONES POR SENSOR

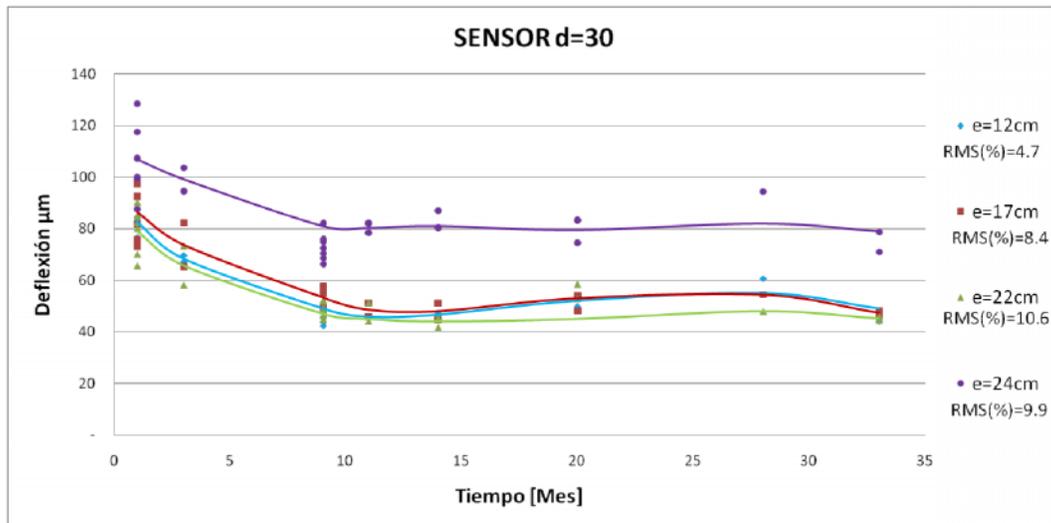
GRÁFICO 2.2.2-1
DEFLEXIÓN SENSOR D0, POR ESPESOR DE BASE



**GRÁFICO 2.2.2-2
DEFLECCIÓN SENSOR D20, POR ESPESOR DE BASE**



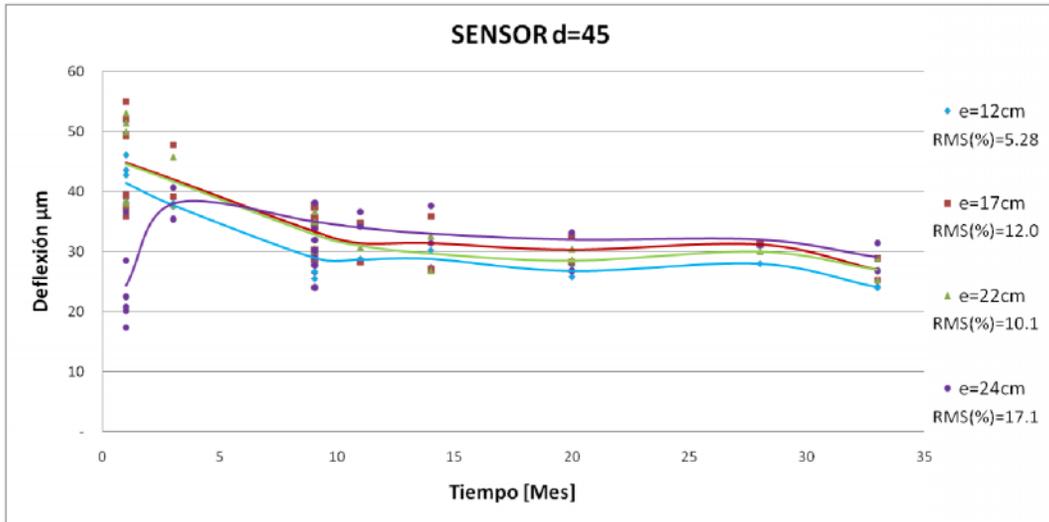
**GRÁFICO 2.2.2-3
DEFLECCIÓN SENSOR D30, POR ESPESOR DE BASE**



Las deflexiones medidas en los sensores d0, d20 y d30 muestran diferencias cercanas a un 40% entre los valores del espumado y del granular, confirmando el mejor comportamiento de pavimentos con bases espumadas. Tal como se esperaba, el espesor de 22 cm tiene una menor deflexión en casi todas las mediciones.

Para todos los sensores se ve el cambio de comportamiento al mes 11 desde la construcción.

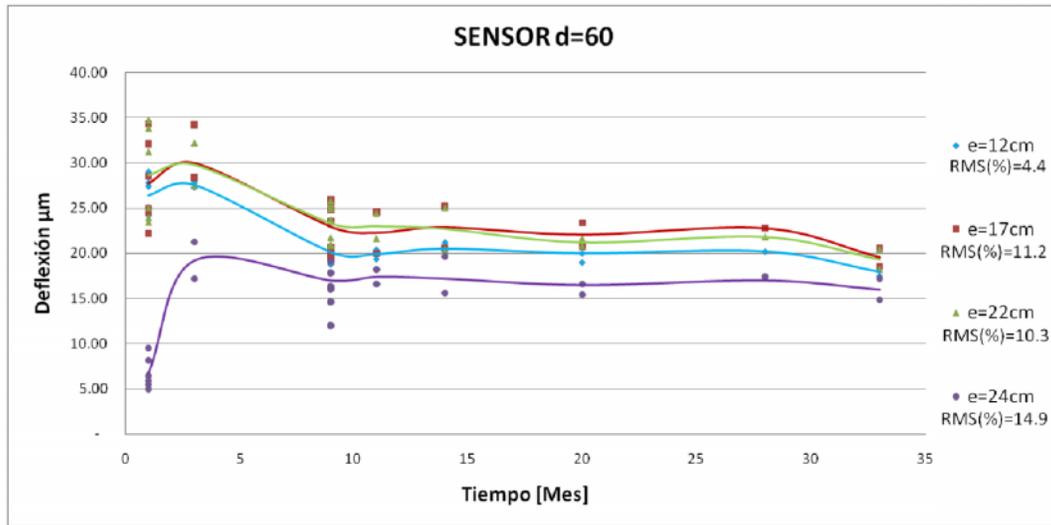
GRÁFICO 2.2.2-4
DEFLEXIÓN SENSOR D45, POR ESPESOR DE BASE



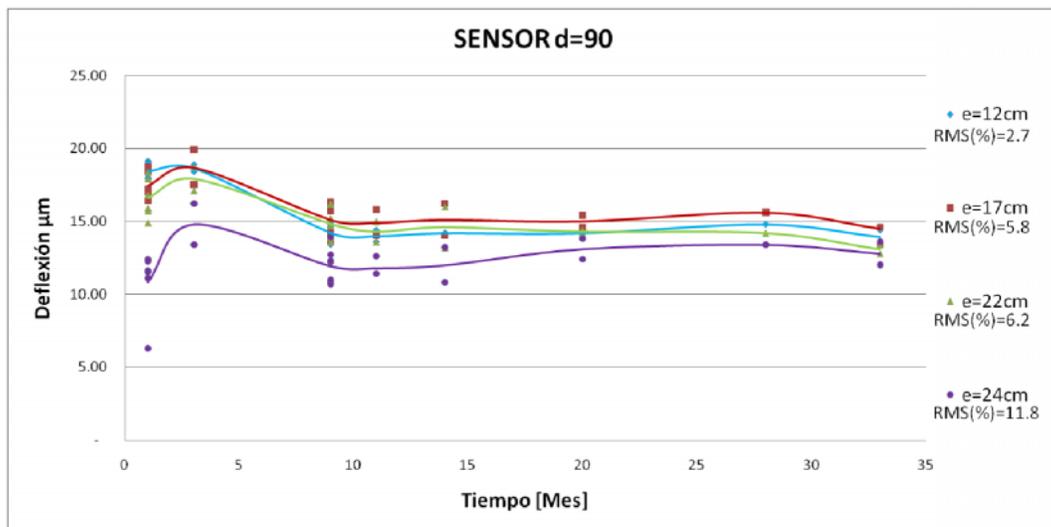
El sensor d45 registró magnitudes de deflexión similares entre los pavimentos de base espumada y los de base granular tradicional, marcando un punto de interés para el análisis, ya que representa el sensor del cuenco donde el comportamiento de la estructura confeccionada con asfalto espumado en su base, se diferencia de una tradicional.

La primera deflexión medida en la base granular (mes 1) es inferior a las medidas en otros meses, este efecto es ocasionado por la humedad de compactación, que actúa como lubricante entre las partículas. El pavimento con base tradicional recibe las tensiones de impacto y no es capaz de distribuirla a los puntos más alejados, en cambio, el fabricado con base espumada no presenta esta conducta, distribuyendo de mejor forma las tensiones en los periodos cercanos a la fabricación. Se deduce un mejor comportamiento de la base espumada en la abertura al tránsito del pavimento. Las mediciones en los siguientes puntos confirman este planteamiento.

**GRÁFICO 2.2.2-5
DEFLECCIÓN SENSOR D60, POR ESPESOR DE BASE**



**GRÁFICO 2.2.2-6
DEFLECCIÓN SENSOR D90, POR ESPESOR DE BASE**

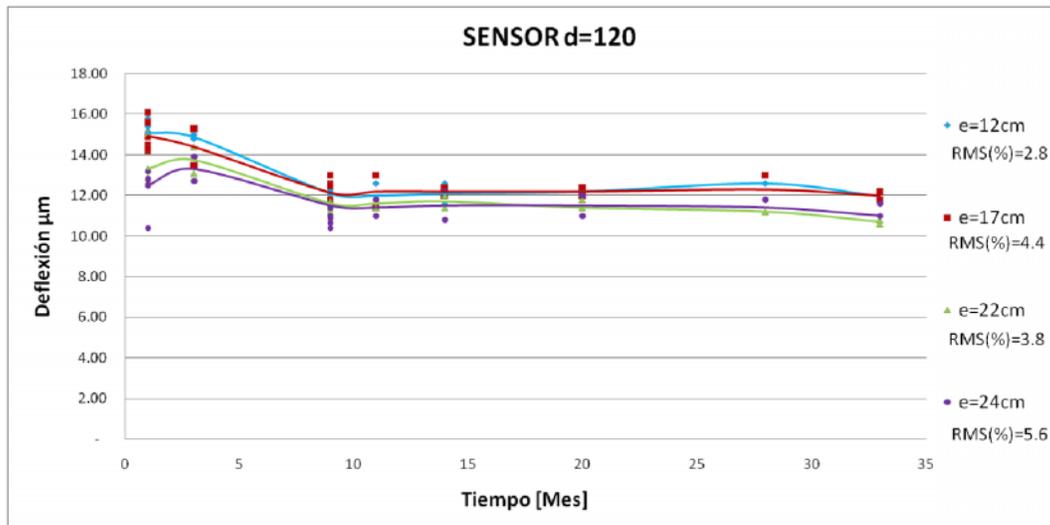


Existe una variación importante en la respuesta del pavimento en los sensores d60 y d90, donde la relación entre las bases se invierte, ahora las deflexiones medidas en el espumado son mayores, no en gran magnitud, pero significativas para el estudio del material.

Mayores deformaciones medidas en estos sensores implican que las tensiones de corte están siendo transferidas a puntos más alejados de la carga de impacto, ampliando el

bulbo de presiones, lo que conlleva a una mayor área donde se distribuyen los esfuerzos sobre la subrasante, logrando un mejoramiento en la respuesta global del pavimento.

GRÁFICO 2.2.2-7
DEFLECCIÓN SENSOR D120, POR ESPESOR DE BASE



Las deflexiones medidas en el sensor d120 son similares para todos los pavimentos en estudio. Esto se debe a la mayor distancia que existe entre el punto de aplicación de la carga y el sensor, disminuyendo las magnitudes medidas a valores cercanos al error de medición que tiene el equipo.

2.3 COMENTARIOS

Mediciones realizadas en terreno han demostrado que la rigidez de una capa estabilizada con asfalto espumado crece después de la construcción. La rigidez aumenta en la medida que el material cura y el contenido de humedad se reduce hasta estacionarse, posteriormente, aparece una fase de acomodación acompañada por una pérdida de la rigidez y también por la aparición de una deformación permanente que se producirá mientras la capa se asienta. Se establece un período de 11 meses para la consolidación del material, punto donde las deflexiones caen a un estado prácticamente constante.

Las deflexiones en el pavimento con bases de asfalto espumado son similares en forma y magnitud, no evidenciando gran diferencia entre los espesores 12 y 17 cm. Con el espesor de 22 cm se obtuvieron menores deflexiones, propio del mayor ancho del

paquete estructural, mostrada mayormente en los gráficos de los sensores $d=0$ y $d=20$, donde no es posible percibir convergencia en la magnitud de deflexión entre los distintos tramos.

Existe una clara diferencia entre los resultados obtenidos en la base granular y el asfalto espumado, esto se debe principalmente a la acción del bitumen sobre las partículas finas y el filler de cemento, los que forman el mortero asfáltico que produce la adherencia de los granulares.

Gracias al gráfico se puede determinar que, frente al impacto realizado por el deflectómetro, un pavimento diseñado con asfalto espumado posee mejores características que uno diseñado con una base granular sin tratar. Los parámetros de deflexión máxima, medida usando los sensores entre $d0$ y $d30$, arrojan valores significativamente menores en el espumado, esta relación se invierte en los sensores siguientes, lo que significa que el área alejada del impacto es afectada por deformaciones mayores, en comparación a la base granular. La adherencia entre partículas involucra una mayor área en la absorción de las tensiones. Una base tratada con asfalto espumado provoca un comportamiento más rígido de la capa, logrando menores deflexiones en el punto de aplicación de la carga, transfiriendo las tensiones de corte a un área mayor.

CAPÍTULO 3.

RETROCÁLCULO MECANICISTA

Los datos obtenidos de la deflectometría FWD se procesan por medio de una técnica analítica conocida como retrocálculo, que permite determinar el módulo elástico equivalente de las capas del pavimento y de la subrasante. El análisis se puede hacer por medio de métodos iterativos, búsqueda en bases de datos, ecuaciones simultáneas, etc. El procedimiento de análisis se lleva a cabo por medio de la suposición de los valores de módulo elástico por capas, realizando el cálculo de la deflexión en la superficie a diferentes distancias del punto de aplicación, bajo un medio teórico propio del método. Las deflexiones calculadas son comparadas con las medidas, repitiendo el proceso cambiando el módulo elástico de las capas en cada iteración, hasta que las diferencias entre lo medido y lo calculado se encuentren en un rango aceptado, se alcance un máximo de iteraciones o exista convergencia.

El cuenco de deflexiones en un pavimento se puede inducir a partir de cargas estáticas o dinámicas. Algunos materiales que componen el pavimento son de tipo viscoelásticos y se asume comportamiento elástico bajo altas velocidades de aplicación de carga (que es el caso del FWD), mientras presentan comportamiento plástico a velocidades de aplicación baja. Es por esto que se considera la teoría elástica apropiada para el análisis. La teoría de elasticidad multicapa es uno de los métodos de análisis más comunes utilizados en el estudio y diseño de pavimentos flexibles. En esencia, los métodos calculan las deflexiones teóricas y las comparan con las deflexiones producidas por el FWD, ajustando por iteración los valores de los módulos, hasta obtener una diferencia adecuada entre las deflexiones calculadas teóricamente y las deflexiones reales medidas en terreno.

Diversos programas computacionales han sido desarrollados con el fin de realizar las iteraciones y facilitar la resolución de las ecuaciones. Lamentablemente, las soluciones no son únicas ni exactas, por lo que requieren ser comparadas con diversos métodos de cálculo. Se debe destacar que los programas computacionales que efectúan el retrocálculo utilizan consideraciones propias y trabajan sobre distintos algoritmos, por lo que suelen tener discrepancias considerables. En la actualidad, existe un amplio número

de programas que resuelven las ecuaciones diferenciales que determinan los estados tensionales del pavimento. Con el fin de minimizar el error obtenido por la diversidad de soluciones y comparar las distintas metodologías, se desarrollará el retrocálculo con cuatro programas, ampliando el análisis a las mediciones realizadas a partir del mes 11, definido como el punto donde el pavimento muestra un estado consolidado.

Los módulos determinados por retroanálisis se consideran representativos de la respuesta estructural del pavimento, pero debido a la complejidad de las soluciones, es difícil definir valores específicos para cada una de las capas que lo componen.

Como una forma de contrastar los módulos elásticos de los tramos de asfalto espumado, se incluyen en cada gráfico los resultados de la capa confeccionada con base granular sin tratar. Además de mostrar líneas de tendencias que fueron propuestas como ajustes de menor RMS(%) y en algunos casos como representativo del comportamiento del módulo. Se señala como asfalto espumado el pavimento diseñado con una base espumada y con la palabra granular aquel que tiene una base granular tradicional.

3.1 ANÁLISIS POR MÉTODO

3.1.1 WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - WSDOT

WSDOT consta de una serie de ecuaciones que utiliza el área del cuenco de deflexiones, concepto establecido por el Ing. Mario Hoffman en 1981, propiedad que fue incorporada por el método AASHTO y recientemente ha sido recuperada en diversos estudios. El método fue desarrollado en base a los resultados obtenidos del programa ELSYM, empleando una placa de carga de 300 mm de diámetro, obteniendo relaciones para dos capas, con $R^2=0.99$ y para tres capas con $R^2=0.7$. Se asume como metodología mecanicista, pero utiliza ecuaciones obtenidas empíricamente para representar los módulos

El valor de los módulos de las distintas capas se definen por las siguientes expresiones algebraicas:

$$A1 = \frac{150(D_0 + 2D_{30} + 2D_{60} + D_{90})}{D_0} \quad \text{ECUACIÓN 3.1.1-1}$$

$$E_{SG} = -346 + 0.00676 \frac{2P}{D_{90} + D_{120}} \quad \text{ECUACIÓN 3.1.1-2}$$

$$\log(E_{AC}) = -4.13164 + 0.25726 \frac{5.9}{h_{AC}} + 0.92874 \sqrt{\frac{5.9}{h_B}} - 0.69727 \sqrt{\frac{h_{AC}}{h_B}} +$$

$$-0.96687 \log(E_{SG}) + 1.88298 \log\left(\frac{P \cdot A_1}{D_0^2}\right) \quad \text{ECUACIÓN 3.1.1-3}$$

$$\log(E_B) = 0.50634 + 0.03474 \frac{5.9}{h_{AC}} + 0.12541 \sqrt{\frac{5.9}{h_B}} - 0.09416 \sqrt{\frac{h_{AC}}{h_B}} +$$

$$+0.51386 \log(E_{SG}) + 0.25424 \log\left(\frac{P \cdot A_1}{D_0^2}\right) \quad \text{ECUACIÓN 3.1.1-4}$$

Donde:

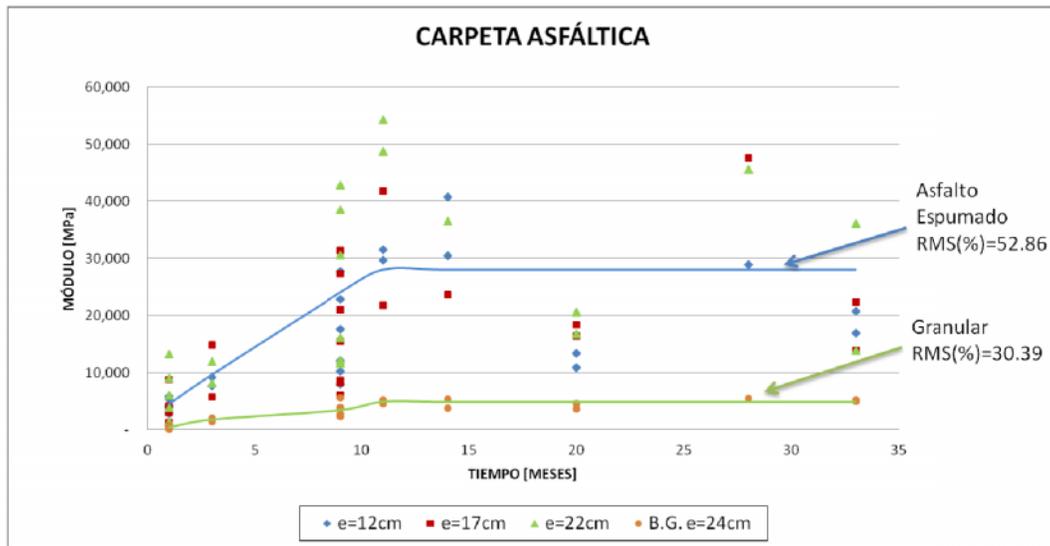
- E_{sg} : Módulo de elasticidad del suelo (psi).
- E_{ac} : Módulo de elasticidad del pavimento asfáltico (psi).
- E_B : Módulo de elasticidad de la base.
- h_{AC} : Espesor del pavimento asfáltico (plg).
- h_B : Espesor de la base (plg).
- P : Carga aplicada (lbs).
- D_0 : Deflexión en el centro de la carga (plg).
- D_{30} : Deflexión a 30 cm de la carga (plg).
- D_{60} : Deflexión a 60 cm de la carga (plg).
- D_{90} : Deflexión a 90 cm de la carga (plg).
- A_1 : Área aproximada bajo el cuenco de deflexión hasta 90 cm del punto de aplicación de la carga.

Como se puede deducir de las ecuaciones, el método propone una relación entre las deflexiones medidas y un valor de módulo representativo, descartando el análisis comparativo entre cuencos medidos y cuencos teóricos expuesto anteriormente. Los resultados obtenidos son de menor validez en casos en que las condiciones en que fue concebido el método varían mayormente, tal es el caso del estudio de la base espumada.

A continuación se muestra en forma gráfica los resultados obtenidos del retrocálculo para las distintas capas del pavimento.

3.1.1.1 CARPETA ASFÁLTICA

GRÁFICO 3.1.1.1-1
MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, WSDOT



Los resultados del retrocálculo indican un aumento lineal del módulo de la carpeta, hasta llegar a un periodo de oscilación que comienza con el mes 11, donde el módulo elástico varía en una banda con un máximo cercano a los 40.000 MPa, en las mediciones a los 11, 14 y 28 meses, y se reducen hasta los 18.000 MPa para los meses 20 y 33. La curva tendencia desprende un valor promedio de 28.000 MPa.

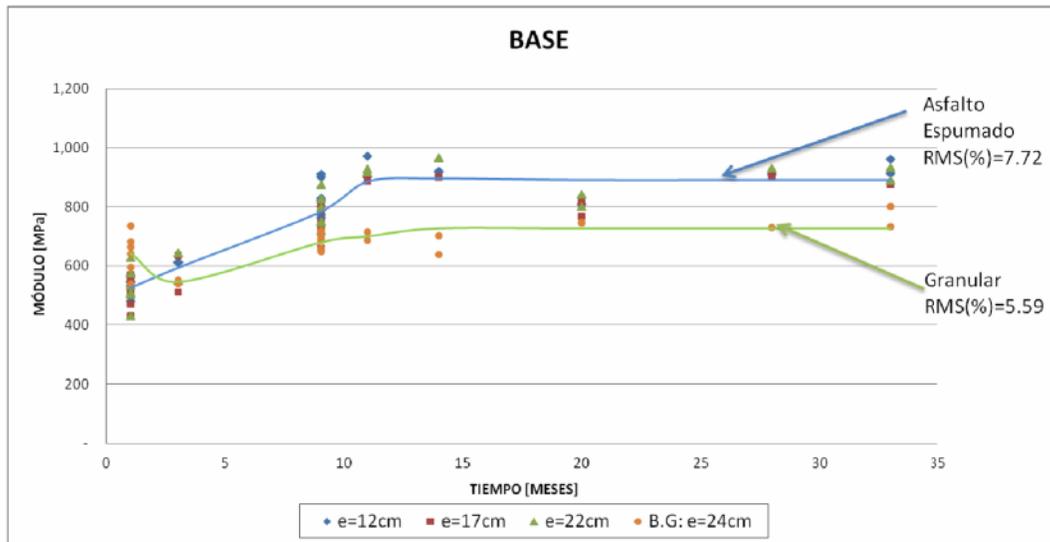
Para al pavimento confeccionado con base granular, los resultados son constantes y tienen un promedio de 4.800 MPa. Se puede observar que hasta el mes 11 el valor de la magnitud del módulo aumentó sistemáticamente, tal como se esperaba.

El método no es suficiente para el análisis de la carpeta asfáltica, los resultados para el pavimento confeccionado con base granular y los de base espumada no son similares en forma y tampoco en magnitud. Para una carpeta de espesor constante y misma fecha de construcción, se esperaban resultados similares. Esta discordancia se debe principalmente a que el método fue concebido para una estructura tipo, y acomodado para otros pavimentos, no siendo capaz de asimilar la estructura con asfalto espumado.

La aplicación de la metodología, a un pavimento distinto al que está diseñada, origina una gran dispersión de los valores analizados, llegando a obtener diferencias sobre 300% para una misma fecha de medición.

3.1.1.2 BASE ESPUMADA

GRÁFICO 3.1.1.2-1
MÓDULO BASE ESPUMADA, WSDOT



En esta oportunidad, los valores de la base no oscilan en función del tiempo, siguiendo un estado casi constante en el período consolidado. Para la base espumada es posible desprender un valor de 890 MPa.

Al pertenecer a una capa con mayor espesor, en comparación a la carpeta asfáltica, la dispersión de los datos es acotada y la tendencia de los resultados es consistente con lo esperado. Se observa una consolidación de los valores del módulo a partir del mes 11.

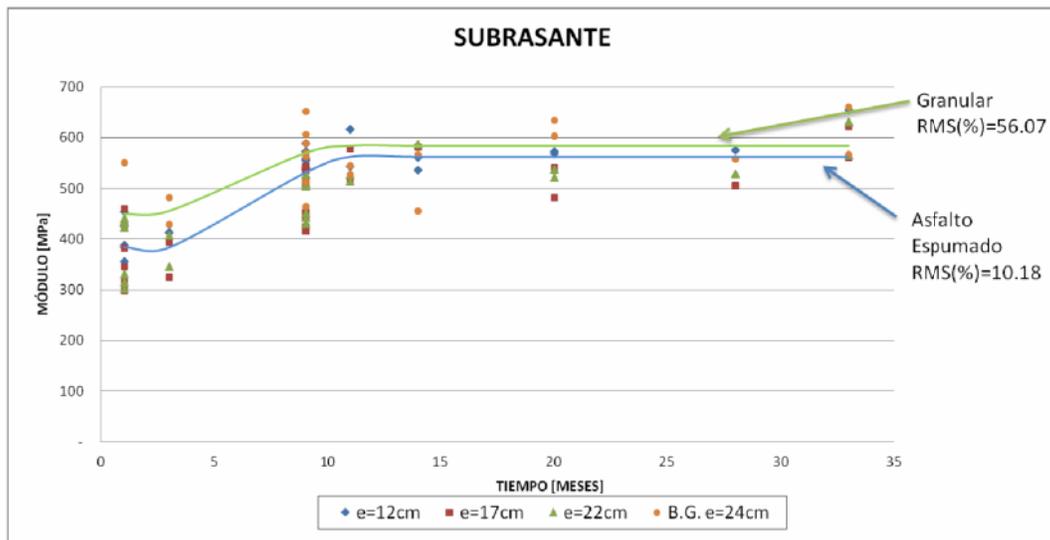
Entre los 3 subtramos fabricados con espumado no se distinguen diferencias de magnitudes considerables, los distintos espesores se comportan de la misma forma.

La base granular tiene módulos muy similares a la base espumada, en promedio resultó 720 MPa. La semejanza que existe entre los valores del asfalto espumado y la base granular sin tratar, se debe principalmente a lo que se aprecia en el gráfico del sensor d45 (Gráfico 2.2.2-4), donde prácticamente convergen los resultados de deflexión entre espumado y granular.

3.1.1.3 SUBRASANTE

Otra de las aplicaciones que se pueden obtener, a partir de la explotación de los datos del FWD, es la estimación del módulo de la subrasante, la que es modelada como una capa de espesor infinito en profundidad. El módulo es calculado a partir de las deflexiones alejadas del punto de aplicación de la carga, ya que son representativas del comportamiento de las capas más profundas del pavimento.

GRÁFICO 3.1.1.3-1
MÓDULO SUBRASANTE, WSDOT



Los valores obtenidos en el cálculo son consistentes entre los pavimentos con base espumada y el de base granular y siguen una tendencia similar, mostrando una estabilización del terraplén a los 8 meses de su confección. Es posible atribuir esta rapidez en la consolidación a las condiciones climáticas del norte del país.

3.1.2 EVERCALC 5.0

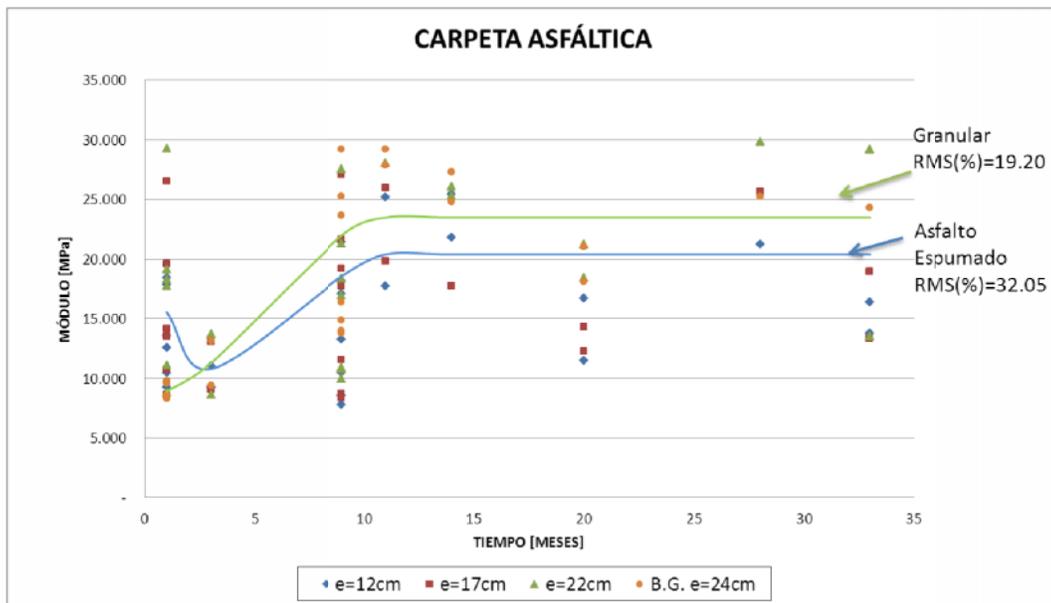
EVERCALC 5.0 es un programa desarrollado a partir del análisis de sistemas multicapas WESLEA suministrado por Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers. Es uno de los considerados FWD Pavement Moduli Backcalculation Program, diseñado especialmente para deflectometría FWD.

El método resuelve problemas multicapa con teorías elásticas, procesando deflexiones con un algoritmo Gauss-Newton siguiendo los siguientes supuestos:

- Capas de largo infinito en la dirección horizontal.
- Capas de espesores uniformes.
- Considera la subrasante como una capa semi-infinita en la dirección vertical.
- Las capas están formadas por materiales homogéneos, isotrópicos, que se comportan en el rango elástico lineal y que son caracterizadas por un módulo elástico y Coeficiente de Poisson.

3.1.2.1 CARPETA ASFÁLTICA

GRÁFICO 3.1.2.1-1
MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, EVERCALC



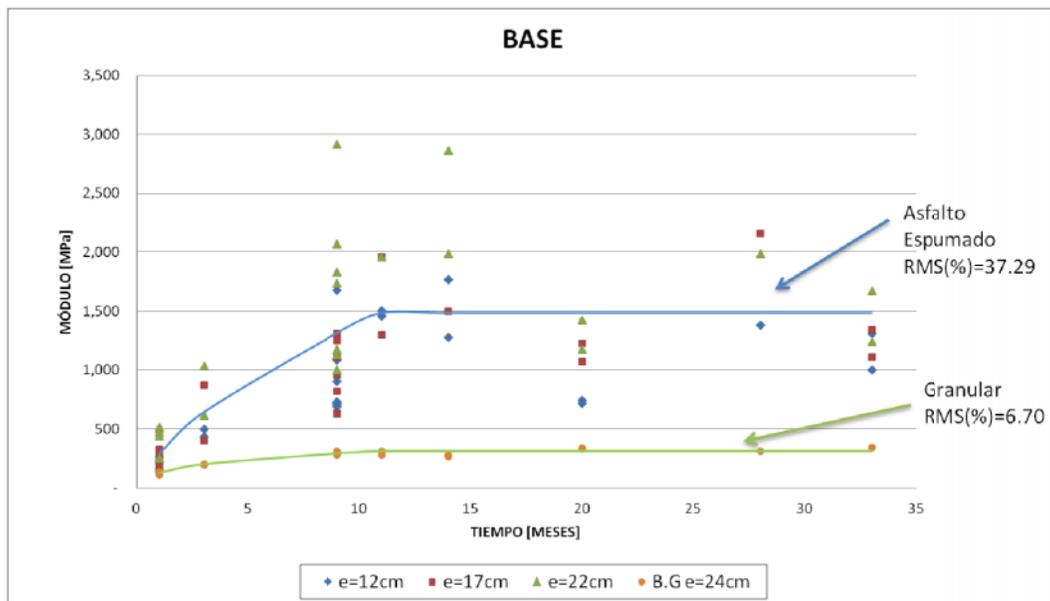
Con este método se dio coincidencia en el desarrollo de la línea tendencia del asfalto espumado, con lo obtenido en la base granular, resultando un valor de módulo para la carpeta asfáltica cercano a los 20.000 MPa.

Llama la atención que en la primera medición (mes1) se obtuvo un valor promedio cercano a 15.000 MPa, bajando un 35% en la siguiente medición (mes 3), contrario al comportamiento esperado. Posiblemente el hecho que el pavimento de base espumada se encontraba en un período de curado origine mayor dispersión en los resultados, afectando los valores calculados. El efecto mencionado anteriormente no ocurrió en el pavimento con base tradicional, la que sigue una tendencia casi lineal en el período previo a la consolidación.

Revisando en forma gráfica los resultados obtenidos en la carpeta asfáltica, se puede observar una gran dispersión. Al igual que en el modelo de WSDOT, la variación en los módulos elásticos se justifica con el poco espesor de la capa y la múltiple cantidad de soluciones que puede adoptar el programa para representar el cuenco.

3.1.2.2 BASE ESPUMADA

GRÁFICO 3.1.2.2-1
MÓDULO BASE ESPUMADA, EVERCALC



Inicialmente el comportamiento es lo esperado, con un desarrollo de la resistencia y consecuente aumento en el módulo, pero oscila en el último período. Esta tendencia es acorde con las deflexiones mostradas en el capítulo anterior, en que se observaba la misma conducta, con una disminución de la deflexión en el mes 28 en comparación a los meses 20 y 33.

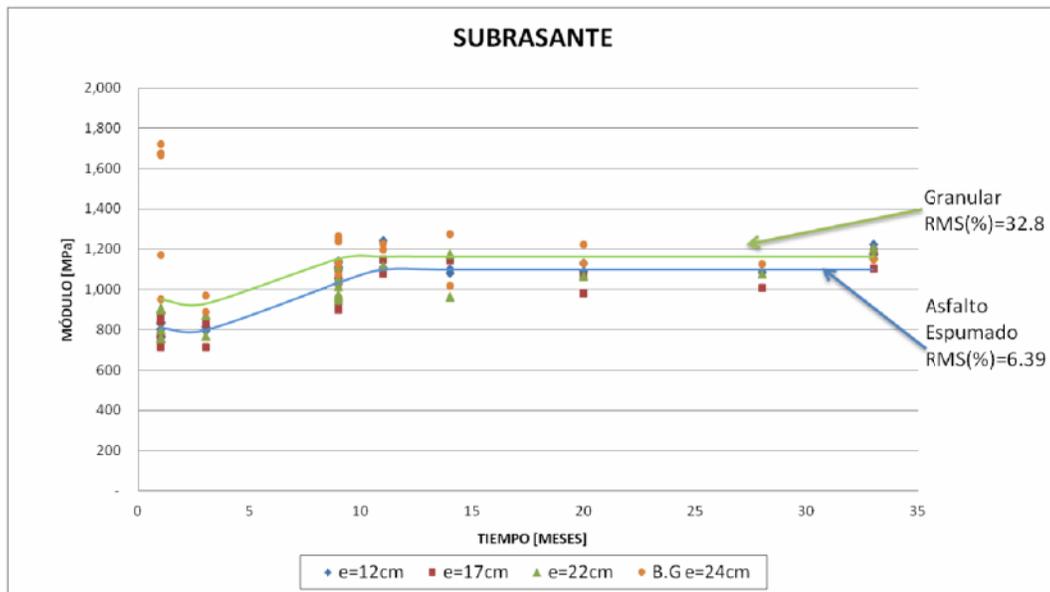
Del retrocálculo se desprende un valor de 1.480 MPa para el módulo de la base espumada.

Se sigue teniendo gran dispersión en los resultados, menor al caso de la carpeta asfáltica, pero aún significativa. Era de esperar que el incluir módulos semilla al programa y acotar los rangos de salida ayudara a converger los valores, pero no fue el caso.

No es posible determinar una concordancia entre los distintos espesores de base espumada, pero si una tendencia. El análisis no fue capaz de dissociar el espesor de la capa con los valores del módulo.

3.1.2.3 SUBRASANTE

GRÁFICO 3.1.2.3-1
MÓDULO SUBRASANTE, EVERCALC



En este caso los resultados se comportan en forma uniforme, con poca variación, muy similar a WSDOT.

Se obtiene un valor cercano a 1.100 MPa, superior en 20% respecto al obtenido en WSDOT.

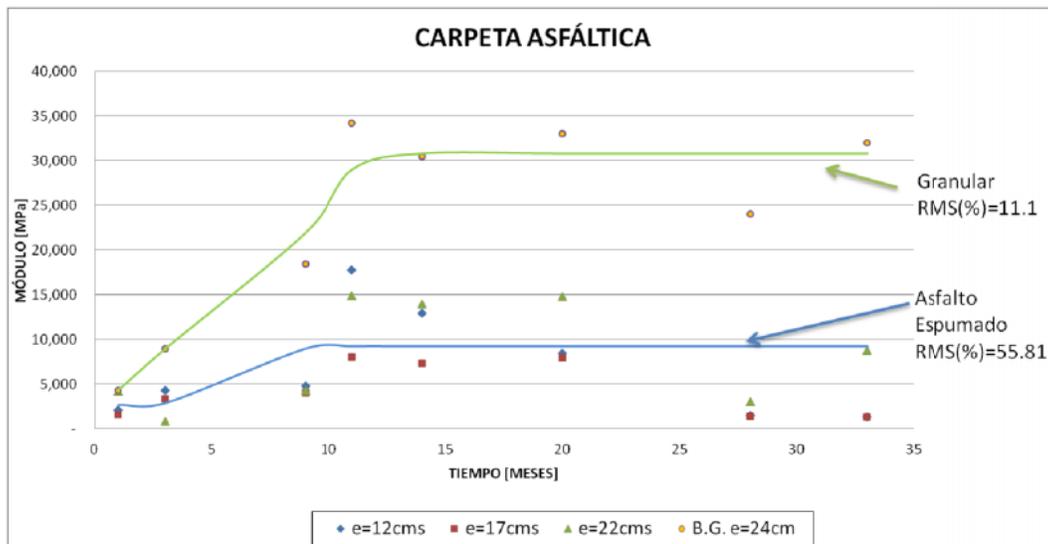
3.1.3 MODTAG

MODTAG es un programa de retrocálculo que, al igual que EVERCALC, es considerado en el grupo de los FWD Pavement Moduli Backcalculation Program, diseñado específicamente para datos de FWD.

Desarrollado por el Virginia Department of Transportation and Cornell University, el método incorpora el desarrollo multicapa y la posibilidad de colocar una capa rígida para mejorar el cálculo. Modtag permite determinar los módulos de elasticidad de las distintas capas en base a módulos semilla. Inicialmente se utilizaron los resultados del retrocálculo realizado con EVERCALC, pero la experiencia en el programa confirmó la baja sensibilidad a las variaciones de este parámetro, debido principalmente a que el pavimento está conformado por pocas capas. El programa utiliza mejor los módulos semillas en pavimentos sobre tres capas, en otros casos, los resultados prácticamente se independizan del valor asignado.

3.1.3.1 CARPETA ASFÁLTICA

GRÁFICO 3.1.3.1-1
MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, MODTAG



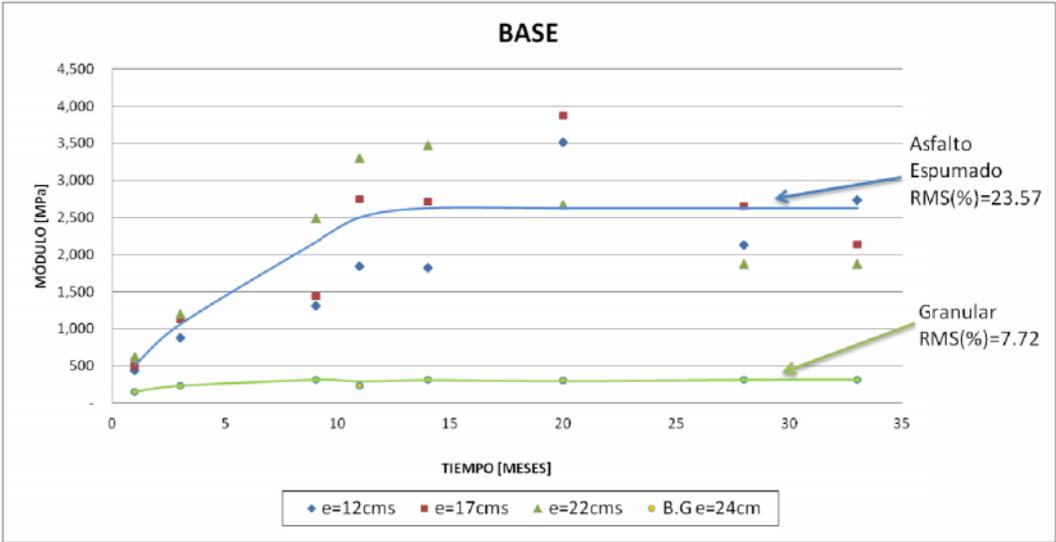
La carpeta tiene una dispersión importante, pero en este caso, con valores en un rango acotado y de menor magnitud, en comparación a los obtenidos con otro análisis. La tendencia arroja un valor cercano a los 8.200 MPa.

Los datos de la carpeta en el pavimento de base granular son más altos que los obtenidos en el espumado, con un resultado de 30.000 MPa. Los altos valores de la carpeta provocarán una disminución en los módulos del análisis de la base.

Al realizar el retrocálculo de algunos datos de Mayo 2009 y Febrero 2010, el programa entregó resultados absurdos, con módulos elásticos de carpeta en torno a 80 MPa y para la base espumada cercanos a 45.000 MPa. Para solucionar esta situación fue necesario fijar valores de carpeta asfáltica; se utilizaron los resultados promedio y se ajustó la curva, influyendo el análisis de las capas posteriores.

3.1.3.2 BASE

**GRÁFICO 3.1.3.2-1
MÓDULO BASE ESPUMADA, MODTAG**



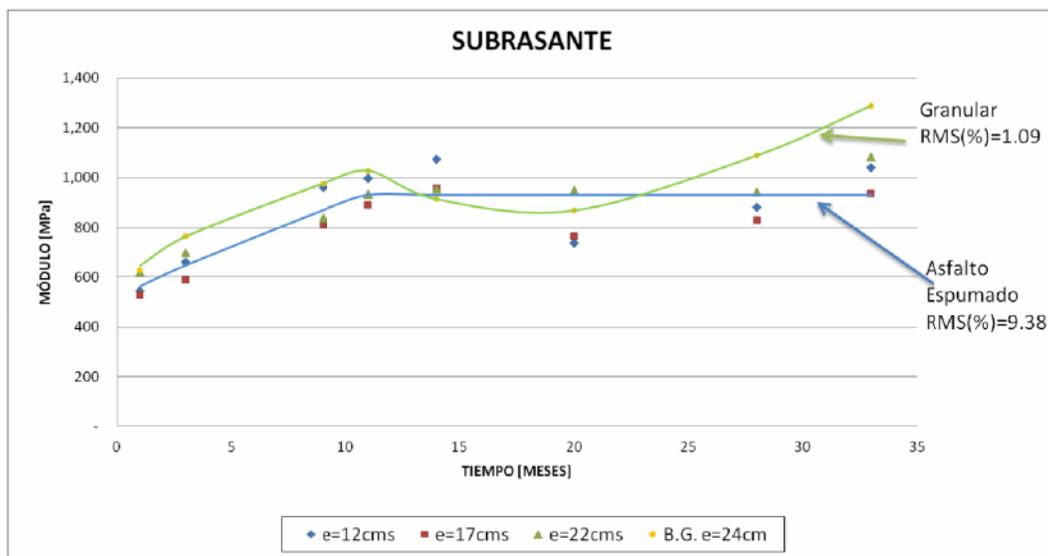
La base espumada retrocalculada con MODTAG, a diferencia de los otros métodos, presenta un aumento en los resultados de Febrero de 2010 (mes 20), esto puede ser originado por la corrección en el procedimiento de retrocálculo descrito en la carpeta asfáltica. Bajo esta consideración era esperado un aumento en los valores para la base espumada.

Para esta metodología, los módulos elásticos de la base granular son prácticamente constantes, con un valor promedio de 300 MPa, inferior a lo obtenido en la subrasante. Este efecto es explicado por la relación inversa que existe en los módulos del pavimento: mientras mayor sea en la carpeta, menor será el módulo de la base.

A diferencia de otros métodos, los resultados del retrocálculo de la base granular no mostraron un período de consolidación, permaneciendo prácticamente constantes desde el primer momento. Se puede deducir que el estado de consolidación inicial (anterior al mes 11) fue compensado por los resultados obtenidos en la subrasante y en la carpeta asfáltica.

3.1.3.3 SUBRASANTE

GRÁFICO 3.1.3.3-1
MÓDULO SUBRASANTE, MODTAG



Mientras los módulos resultantes del retrocálculo realizado en pavimento diseñado con base espumada siguen un estado prácticamente constante, acotado entre 800 y 1.100 MPa, los de la base granular muestra un desarrollo casi parabólico para el período consolidado. Anterior a esto, lo obtenido es similar a otros métodos, mostrando un aumento lineal en la resistencia.

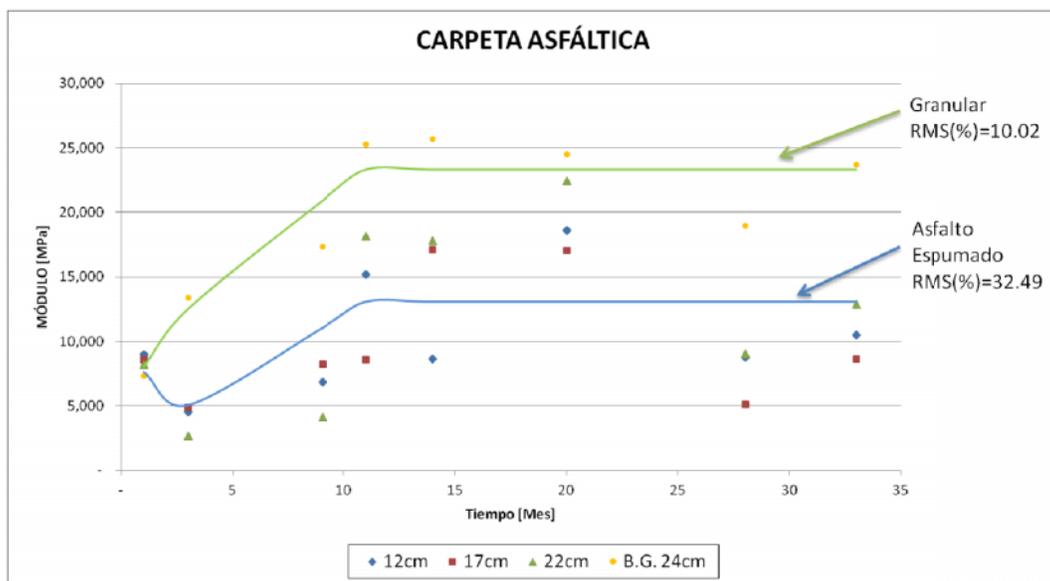
3.1.4 MICH PAVE

Fue desarrollado por el Departamento de Transporte de Michigan, y el Instituto de Investigación de la Universidad de Michigan. Michpave es una solución integral que incluye la rutina de retrocálculo MICHBACK, módulos de diseño AASHTO y rutinas de análisis y diseño mecanicista. La rutina de retrocálculo permite desarrollar estudios sobre las estaciones en forma individual, agrupadas en el promedio o en un modelo representativo del comportamiento total de los cuencos. En el caso de este estudio, se desarrolla el análisis punto a punto, aplicando la metodología expuesta en el punto 1.8 de este trabajo.

El programa tiene la ventaja de indicar los puntos donde no fue posible converger con las iteraciones y permite conocer las diferencias porcentuales entre el cuenco medido en terreno y el obtenido utilizando el sistema multicapa de CHEVRON. El método se basa en los mismos supuestos enunciados en EVERCALC.

3.1.4.1 CARPETA ASFÁLTICA

GRÁFICO 3.1.4.1-1
MÓDULO CARPETA ASFÁLTICA, MICHBACK



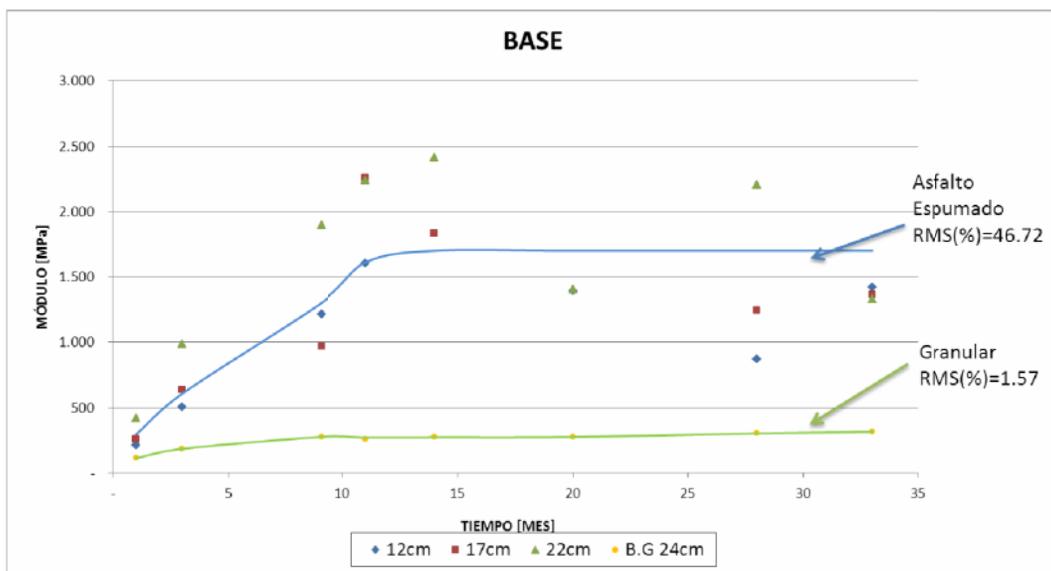
No coinciden los desarrollos de la línea tendencia entre el pavimento confeccionado con asfalto espumado y lo obtenido en el pavimento tradicional. Se aprecia un valor de módulo

cercano a 13.000 MPa para el pavimento con base espumada, en comparación a los 23.000 MPa de aquel que utiliza base granular.

Al igual que lo ocurrido con el retrocálculo de EVERCALC, los módulos de la carpeta disminuyeron un 35% entre el primer y el tercer mes, contrario al comportamiento esperado para el pavimento. Este efecto se origina por la gran cantidad de humedad presente en la base, la que provoca una lubricación entre partículas, disminuyendo la magnitud de la deformación en los puntos alejados del impacto del deflectómetro. Los métodos asocian la deformación a la resistencia; menor deformación implica mayor módulo, concepto errado de aplicar en las primeras instancias del curado.

3.1.4.2 BASE

GRÁFICO 3.1.4.2-1
MÓDULO BASE ESPUMADA, MICHBACK

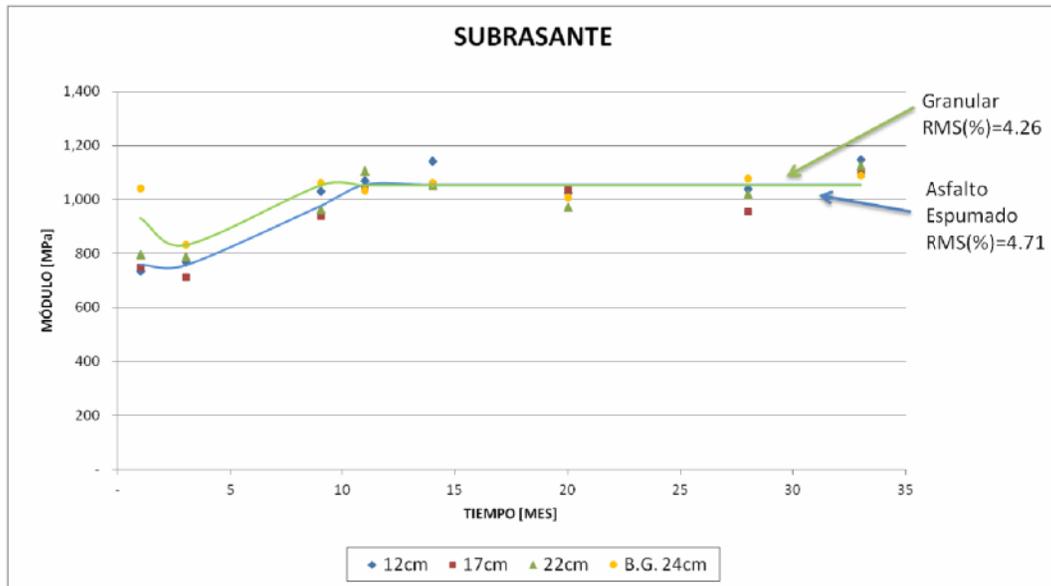


No se observa una tendencia constante, pero si una menor dispersión en comparación a los otros programas. Inicialmente el comportamiento es lo esperado, con un crecimiento de la resistencia y consecuente un aumento en el módulo, el que posteriormente se reduce, oscilando en torno a los 1.750 MPa con gran variación de los resultados de una misma fecha.

Es posible desprender un valor de 1.780 MPa para el módulo de la base espumada y de 280 MPa para la base granular tradicional.

3.1.4.3 SUBRASANTE

GRÁFICO 3.1.4.3-1
MÓDULO SUBRASANTE, MICHBACK



En este caso los módulos elásticos se comportan en forma uniforme, con poca variación, muy similar a los resultados obtenidos con WSDOT. Los valores de módulo calculados sobre el pavimento de base granular coinciden con el promedio de los valores determinados sobre el pavimento de base espumada. La curva tendencia manifiesta la diferencia del tiempo de curado final entre las bases.

La línea granular y la de base espumada prácticamente siguen la misma forma, con un valor ligeramente superior a 1.000 MPa, inferior solo en 10% respecto al obtenido en EVERCALC.

3.1.5 COMENTARIOS

De los resultados mostrados anteriormente, llama la atención las altas magnitudes de los módulos obtenidos en la subrasante, pero es aún más curioso que sean superiores a los obtenidos en la base granular. Solo el análisis con WSDOT invierte esa relación, pero arroja valores muy similares entre las bases con asfalto espumado y la base tradicional. Existe una clara diferencia en la metodología utilizada por WSDOT, ya que éste es más bien un retrocálculo empírico, en comparación a los otros que son considerados mecanicistas. El método asocia el valor de la deflexión medida, a un valor de módulo elástico en forma directa, despreciando el efecto del asfalto espumado en el material base.

Las grandes diferencias registradas entre los módulos de pavimento de base granular y los de base espumada, se deben principalmente al efecto que tiene la adherencia entre partículas provocadas por el bitumen, la que no es considerada por los distintos métodos empleados en el análisis. En el fondo, las diferencias son producto de lo expuesto en los gráficos de los sensores d60 y d90, donde el comportamiento del pavimento espumado deja de ser típico, manifestándose este hecho al contrastar los módulos obtenidos en la carpeta asfáltica. Se esperaba que los resultados tuvieran valores similares de módulo, pero mostraban diferencias importantes, principalmente originadas por el motor de cálculo de cada programa.

El programa MICHBACK fue el que tuvo menor RMS en cada medición. La aproximación entre el cuenco medido en terreno y el teórico tuvo una mayor diferencia porcentual en los sensores alejados del punto de impacto, lo que da a entender una buena correlación en los resultados de las primeras capas.

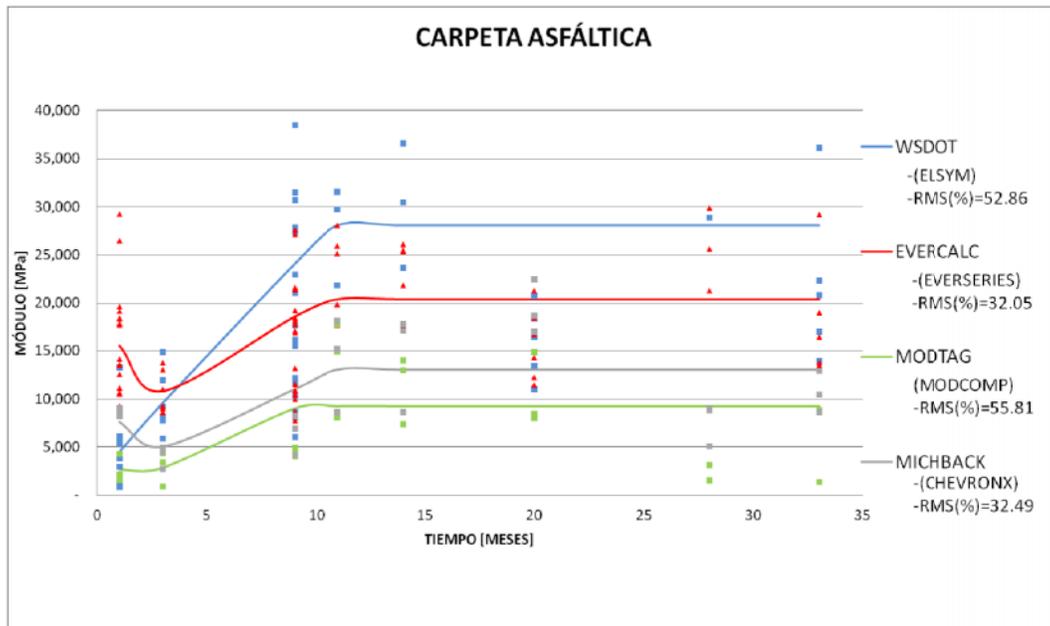
Al comparar los módulos de las distintas capas con los resultados mostrados en el capítulo 2, el método que mejor representa la relación entre el módulo y la deflexión, fue el EVERCALC.

3.2 COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS

Se expresa en forma gráfica los resultados obtenidos en el punto anterior, ilustrando la línea de tendencia de cada método.

3.2.1 CARPETA ASFÁLTICA

GRÁFICO 3.2.1-1
MÓDULO DE LA CARPETA ASFÁLTICA



Se observa paralelismo entre los resultados de WSDOT, EVERCALC y en menor medida MICHBACK. Este último, al igual que MODTAG, mostraron una baja en los valores de la medición del mes 28, dato que llama la atención, ya que es en esa fecha donde las deflexiones promedio tienen una disminución en su valor, lo que significa un aumento en el módulo del pavimento.

En las mediciones realizadas entre los 9 y 14 meses se aprecia un claro aumento de la resistencia medida; este efecto se debe al período de consolidación de la base espumada, la que otorga un medio más rígido bajo la carpeta de rodadura. El posterior decaimiento en los valores del módulo es debido a la disminución en la respuesta estructural en que cae la base espumada, afectando los módulos de las otras capas.

Los resultados obtenidos con EVERCALC son consistentes con lo obtenido en los gráficos de deflexión del capítulo dos, mostrando el incremento en la rigidez en el mes 28.

Los valores difieren en forma importante según el método de análisis, lo obtenido con MODTAG se asemeja mucho al módulo de laboratorio y es considerablemente menor a los resultados de los otros métodos, en este punto influye mucho la capacidad del programa.

Una de las mayores dificultades que presenta el estudio fue obtener valores precisos de la carpeta asfáltica. Los programas tienen gran dispersión en los resultados de una misma fecha, entregando puntos con módulos excesivamente altos y alejados de la realidad de un pavimento típico.

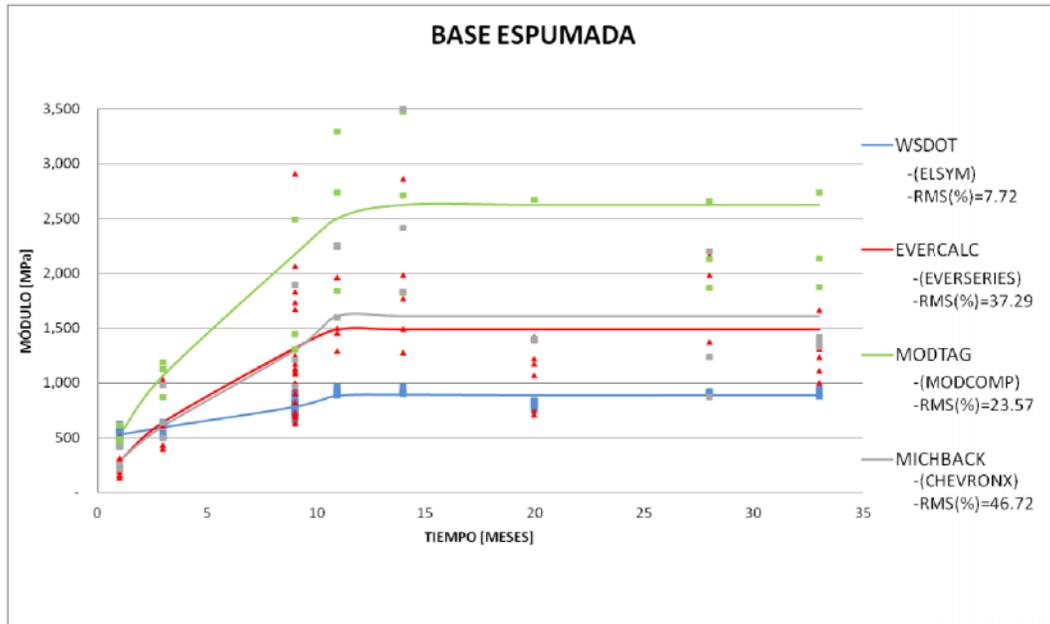
Ha sido ampliamente informado que la metodología de retrocálculo no puede determinar con precisión el módulo elástico en capas superiores delgadas; esto es, menores de un cuarto del área cargada. Generalmente se acepta como valor límite una capa de 75 mm para placas de 15 cm de radio. Esta limitación, propia de la teoría elástica aplicada es una falencia importante en este estudio, ya que solo se tienen 50 mm para el espesor de la carpeta asfáltica, y dado que el análisis se enfoca principalmente en la base, no fue posible agrupar dos capas en una representativa, como generalmente se trabajan las capas delgadas. Bajo esta consideración, destacan MICHBACK y EVERCALC, ya que fueron los que tuvieron una menor dispersión para los módulos de la carpeta.

Evercalc y Michback se presentan como las herramientas más poderosas y con mayor capacidad para adaptarse al problema planteado, en cambio Wsdot y Modtag son mucho más simples y diseñadas para problemas específicos.

Los resultados de Evercalc fueron más acotados y similares a los obtenidos en la carpeta del pavimento diseñado con base tradicional. Se considera el promedio aritmético de los módulos obtenidos en el período de deflexiones consolidadas aceptado como representativo del estudio, con un valor de 20.300 MPa.

3.2.2 BASE

GRÁFICO 3.2.2-1
MÓDULO DE LA BASE



Todos los métodos de análisis mostraron un incremento inicial del módulo, hasta lograr un punto máximo cercano al mes 14. El desarrollo de resistencia se debe principalmente a dos factores: pérdida de humedad y acomodo de partículas. Posterior al mes 14 el asfalto espumado muestra una baja, producida principalmente por efectos de la descompactación propio de los ciclos de carga-descarga a los que está sujeto el pavimento. Actualmente no se ha determinado una ley de fatiga para las bases espumadas, con la que se pudiera estimar el tiempo en que ocurre la pérdida de adherencia. Si dicha pérdida ocurre antes del tiempo de vida útil proyectado para el camino, el escenario cambia a una base con menor cohesión, pero con mayor ángulo de fricción interna, propiedad del material RAP que está incluido en la base.

El análisis evidenció el efecto de la humedad de compactación presente en la mezcla, la que afecta la interacción del asfalto con el material reciclado para la primera medición. Los módulos medidos en el mes 1 son casi idénticos entre la base granular tradicional y la que tiene asfalto espumado, lo que indica que la mayoría de la resistencia se atribuye a la interacción propia entre partículas que componen la base, mostrando el bajo efecto del

asfalto espumado en cuanto a módulos. En esta primera etapa la mejora se relaciona al filler de cemento, más que al asfalto espumado.

Para los cuatro análisis se aprecia una estabilización del material entre 800 y 2.500 MPa, dependiendo del método utilizado, lo que está dentro del rango esperado. Se asemejan los resultados entre Michback y Evercalc, que además corresponden a los programas que mostraron mejor adaptación a las condiciones del asfalto espumado. La guía de diseño “New Zeland Supplement to the Document, Pavement Design- A guide to the Structural Design of Road Pavements (AUSTROADS, 2004)” indica como valor de diseño 800 MPa para el asfalto espumado², el que puede ser utilizado como referencia, ya que corresponde al mínimo obtenido en este estudio.

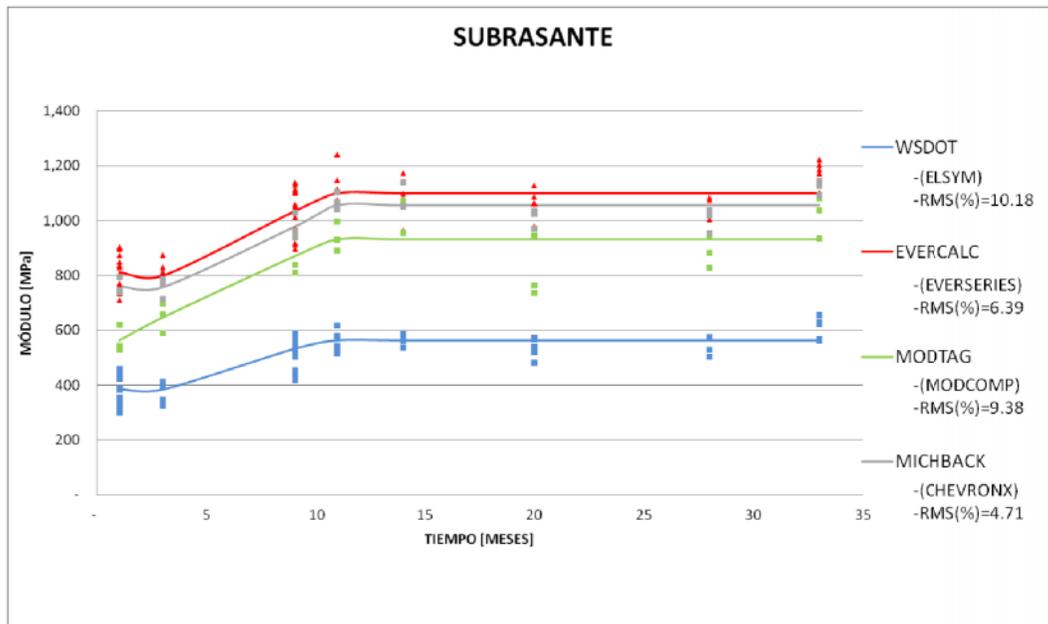
Los resultados del método WSDOT resultan con menor variación y prácticamente consolidando el material en 900 MPa, EVERCALC presentó una variación entre 1.000 y 2.000 MPa y MODTAG tiene resultado en torno a 2.500 MPa, pero sin un período claro. Los módulos retrocalculados con MICHBACK son muy parecidos a los obtenidos con EVERCALC, y prácticamente están en el mismo rango.

En base a estos gráficos y a los resultados obtenidos en la carpeta asfáltica, se puede establecer un módulo de diseño de 1.300 MPa para la base espumada, utilizando el software EVERSTRESS 5.0. El módulo propuesto como diseño considera el menor valor obtenido del intervalo de confianza en torno al promedio, para un $\alpha=0.05$, analizando los resultados obtenidos para el periodo consolidado del material. Como se indicó en la introducción, los resultados sólo son confirmados para el tramo de prueba.

² Bitumen 2.7-3%; Filler (cemento) 1.5%, especificaciones bajo diseño mecanicista

3.2.3 SUBRASANTE

GRÁFICO 3.2.3-1
MÓDULO DE LA SUBRASANTE



Para la subrasante, se incluye el retroanálisis realizado según el método AASHTO. Todos los métodos utilizados fueron similares en forma, variando la magnitud. El módulo calculado con MODTAG se puede aproximar a 900 MPa. Al igual que en la base espumada, los resultados de EVERCALC fueron coincidentes con los de MICHBACK, con una variación menor al 10%.

Una vez más, los resultados fueron muy similares en los programas EVERCALC y MICHBACK, que además son valores superiores en comparación a los otros métodos. Lo analizado con WSDOT es notoriamente inferior al resto, posiblemente se debe a las limitaciones del método, que resulta más básico que los otros y sólo utiliza dos puntos del cuenco para realizar el análisis.

Es importante considerar que el módulo resiliente retrocalculado no incluye el factor de ajuste, indicado en distintos métodos de análisis, por lo que se tendrán valores mayores a los que se obtendrían en ensayos realizados en el laboratorio.

Todos los métodos de estudio mostraron una estabilización del módulo a partir del año de construcción, lo que permite hablar de un comportamiento consolidado para la estructura

desde esa fecha. Si se compara con lo obtenido en la subrasante, se aprecia que ésta tiene una tendencia estable desde los ocho meses de la construcción, lo que justifica los resultados entre los 8 y 12 meses de edad del proyecto, donde se tuvo una mayor dispersión en los distintos módulos del pavimento y aumentó el error cuadrático de las mediciones.

3.3 RESUMEN DE DATOS

En el siguiente resumen se incluyen los valores de módulo promedio, los valores utilizados para formar el intervalo de confianza al 95% y la desviación estándar. El análisis es hecho solamente a los datos del periodo consolidado.

**TABLA 3.3-1
VALORES DE MÓDULO ELÁSTICO PROMEDIO, DISTINTOS MÉTODOS**

	CARPETA ASFÁLTICA			BASE ESPUMADA			SUBRASANTE		
	Promedio [MPa]	Intervalo [MPa]	Desviación Estándar	Promedio [MPa]	Intervalo [MPa]	Desviación Estándar	Promedio [MPa]	Intervalo [MPa]	Desviación Estándar
WSDOT	28.099	± 5.000	12.757	891	± 21	53	563	± 17	44
EVERCALC	20.395	± 2.216	5.654	1.486	± 187	478	1.110	± 22	71
MODTAG	8.283	± 2.861	5.653	2.623	± 342	676	931	± 100	100
MICHPAVE	13.046	± 2.593	5.373	1.780	± 417	914	1.055	± 29	62

En el caso de la carpeta asfáltica, pese a que Evercalc, Modtag y Michpave tienen distintas magnitudes promedio, los resultados tienen una desviación estándar muy similar. Esto confirma el paralelismo mostrado en los gráficos del punto 3.2 y la incidencia de los distintos motores de cálculo de cada programa.

Si se observan los módulos de cada capa, se puede comprobar que un mayor módulo elástico en la base espumada, provoca un menor módulo en la carpeta asfáltica (Ej. Modtag), caso contrario, si la base es muy baja, el método hace una compensación de esa disminución, aumentando los valores resultantes de la carpeta. Se puede concluir que los módulos recalculados de las distintas capas no son independientes entre ellos y existe una relación inversa que compensa y corrige los valores para aproximar las deflexiones teóricas con las reales

3.4 COMENTARIOS

El retrocálculo presenta variaciones importantes según las consideraciones del análisis utilizado para evaluar la condición real del pavimento. Tradicionalmente, los distintos métodos trabajan sobre un motor de cálculo base que procesa la información, dicho motor es propio del programa empleado y está afectado por condiciones empíricas aplicadas para mejorar los resultados, lo que origina que ante un mismo problema, se obtengan distintas soluciones, dependiendo del método de análisis.

La aproximación fundamental empleada en la mayoría de los métodos de retrocálculo, analiza los sensores alejados del punto de impacto determinando el módulo de la subrasante, la secuencia del cálculo progresa hacia el centro del cuenco mediante el “módulo conocido” de la capa inferior. Se repite este proceso en un ciclo iterativo, hasta obtener una solución que aproxime las deflexiones medidas con las calculadas. Los principios de los análisis se aplican a todos los tipos de pavimentos, pero algunos métodos de análisis son más apropiados para un tipo específico dado su motor de cálculo.

La precisión en los módulos determinados por retrocálculo se ve afectada por la tolerancia permitida en el procedimiento para determinar la concordancia entre las deflexiones medidas y las calculadas. La raíz cuadrada media del porcentaje de error (RMS(%)) utilizada por los programas como punto de comparación, evalúa la relación entre deflexiones medidas y las calculadas, sin discriminar en que sensores se producen las divergencias. Dado que los métodos de retrocálculo no son capaces de simular el comportamiento del asfalto espumado, los errores son, en general, mayores al 4% recomendado y por lo visto en los informes obtenidos de MICHPAVE, se encuentran en los sensores d45 y d60, propios de la base del pavimento. En futuros estudios del asfalto espumado será necesario establecer modelos más complejos que los usados tradicionalmente para pavimentos típicos. Se espera que avances en el método sudafricano, incluyan metodologías de retrocálculo específicas para pavimentos confeccionados con asfalto espumado.

En cuanto a los métodos iterativos utilizados, estos tienen algunos problemas en sus principios, el método multicapa se basa en el cálculo de los estados de esfuerzo y deformación, teniendo como base, que el pavimento flexible es un sistema multicapa

elástico lineal, lo que desprecia el efecto de la deformación permanente en comparación con la deformación resiliente.

En una base confeccionada con asfalto espumado, el conjunto experimenta anisotropía debido a las distintas formas, tamaños de partículas, compactación y adherencia de la mezcla. El asfalto espumado cubre solo las partículas finas, dejando los granulares expuestos, lo que produce áreas con menor adhesión. Esta condición ha sido reportada desde la década de los 70.

Por otro lado, las ecuaciones lineales elásticas que se utilizan, no tienen en cuenta que las mezclas asfálticas tienen comportamiento viscoso, lo que hace variar la respuesta en función de la magnitud y velocidad de la carga y de la temperatura. Para poder comparar los resultados obtenidos y minimizar este efecto, se realizaron correcciones por temperatura y se normalizaron las cargas a 50 kN, utilizando solo valores de carga entre 47,5 y 52,5 kN descartando otros datos, de esta forma se espera poder compensar los efectos de la variación de temperatura del pavimento y de la magnitud de la carga.

Al momento de comparar los resultados obtenidos en este estudio, con valores medidos en laboratorio o por medio de otras metodologías que determinen módulos elásticos, hay que tener en cuenta que al aplicar cargas dinámicas, las deformaciones medidas también son dinámicas, pero la teoría elástica multicapa realiza análisis estático y las deflexiones máximas se analizan como si fueran equivalentes en magnitud a las deflexiones que se presentarían para una carga de igual proporción, pero bajo condiciones estáticas.

Otros factores que influyen en la precisión de los módulos medidos son: el ruido o imprecisiones encontradas en los transductores de medición, deflexiones pequeñas que están en la magnitud de los errores propios del equipo y discontinuidades como grietas no advertidas.

Como principio general, al definir un método de retrocálculo, este debe ser compatible con los métodos de análisis que se utilizarán para el estudio de tensiones y el diseño de rehabilitación del pavimento, lo que se intenta establecer es que, si se utiliza un programa para definir módulos de capa, el mismo programa o su equivalente debe ser tomado como base para determinar las tensiones en el material. A modo de referencia para futuros estudios, se recomienda la utilización de Everseries o Michpave para el análisis de pavimentos confeccionados con base espumada.

Es importante destacar que el módulo de cada capa, calculado con este procedimiento, es bajo una condición específica de carga, para condiciones ambientales propias del momento de la medición y constituyen valores representativos del tramo de prueba.

CAPÍTULO 4.

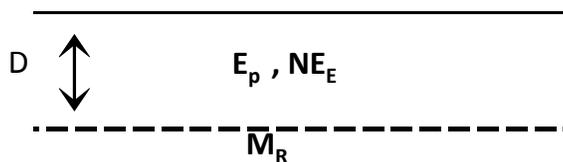
ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DEL ASFALTO ESPUMADO.

4.1 INTRODUCCIÓN

Es posible estimar el módulo resiliente mediante el retroanálisis de deflexiones obtenidas en la deflectometría de impacto FWD. La metodología consiste en usar una carga o una rueda de carga 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 deflecta. La cantidad de deflexión que ocurre bajo la carga y la forma del cuenco de deflexiones entrega un medio útil de evaluación de las propiedades del pavimento in-situ.

El método propuesto por AASHTO permite determinar el módulo resiliente de la subrasante M_R y el módulo efectivo del pavimento (E_p), modelando la estructura como un conjunto de dos capas, la subrasante y el pavimento sobre esta. Este método de retrocálculo no es capaz de separar el análisis y distinguir módulos por cada capa, pero entrega valores de módulo resiliente para la subrasante y el número estructural efectivo del conjunto de capas que forman el pavimento.

FIGURA 4.1-1
ESQUEMA AASHTO DE RETROCÁLCULO



En que:

- E_p : Módulo Elástico del pavimento.
- NE_E : Número estructural efectivo del pavimento.
- M_R : Módulo resiliente de la subrasante.
- D : Espesor del Pavimento.

MÓDULO RESILIENTE:

El módulo resiliente del suelo de fundación se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables (AASHTO 1993). El M_R representativo de la subrasante, definido mediante el análisis bicapa de deflexiones, es casi independiente de la estructura superior del pavimento y corresponde al módulo elástico del suelo después de haber sido sometidos a cargas cíclicas.

MÓDULO ELASTICO DEL PAVIMENTO

El módulo elástico del pavimento corresponde al módulo de deformación de la capa ubicada sobre la subrasante, después de haber sido sometida a cargas cíclicas.

4.1.1 NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO

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

Para el análisis se utilizan las siguientes relaciones:

$$NE_E = 0,0045 \cdot D \cdot \sqrt[3]{E_p} \quad \text{ECUACIÓN 4.1.1-1}$$

Donde:

- NE_E : Número estructural efectivo de la estructura de referencia, (pulgadas).
- D : Espesor total del pavimento sobre la subrasante (pulgadas).
- E_p : Módulo efectivo de todo el paquete estructural (Lb/pulg²)

A diferencia de los programas multicapa, que son capaces de analizar el pavimento en las distintas capas que lo componen, el retroanálisis AASHTO utiliza un modelo simplificado de dos capas según la siguiente relación:

$$M_R = \frac{2,4 \cdot P}{D_r \cdot r} \quad \text{ECUACIÓN 4.1.1-2}$$

Debiendo cumplirse que:

$$r \geq 0,7 \cdot a_e \quad \text{ECUACIÓN 4.1.1-3}$$

Con:

$$a_e = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2} \quad \text{ECUACIÓN 4.1.1-4}$$

$$d_0 = 1,5pa \left[\frac{1}{M_R + \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2}} + \frac{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}\right)}{E_p} \right] \quad \text{ECUACIÓN 4.1.1-5}$$

Donde:

- M_R : Módulo resiliente obtenido por retroanálisis (MPa).
- P : Carga aplicada (kN).
- d_r : Deflexión a la distancia r del centro de la carga (cm).
- r : Distancia desde el centro del plato de carga al transductor (cm).
- a_e : Radio del bulbo de tensiones en la interfaz subrasante (cm).
- a : Radio de la placa de carga (cm).
- D : Espesor total de las capas de pavimento sobre la subrasante (cm).
- E_p : Módulo efectivo de las capas de pavimento sobre la subrasante (MPa).
- d_0 : Deflexión medida en el centro de la placa de carga (cm).
- p : Presión de la placa de carga (MPa).

La resolución de este modelo es un proceso iterativo hasta obtener un ajuste aceptado entre las deflexiones calculadas y las medidas, logrando valores para los distintos parámetros.

Los datos serán procesados siguiendo la siguiente ecuación:

$$NE_E = a_1 D_1 + a_2 D_2 \quad \text{ECUACIÓN 4.1.1-6}$$

- a_1 : Coeficiente estructural carpeta asfáltica de rodadura.
- D_1 : Espesor de la carpeta asfáltica de rodadura.
- a_2 : Coeficiente estructural de la capa de asfalto espumado o base granular.
- D_2 : Espesor de la capa de asfalto espumado o base granular.

Del número estructural obtenido en el retrocálculo, se propone la siguiente expresión para obtener el a_1 del espumado y del granular:

$$a_2 = (NE_E - a_1 D_1) / D_2$$

ECUACIÓN 4.1.1-7

- a_2 : Coeficiente de la base.
 a_1 : Coeficiente de la carpeta de rodadura.
 D_1 : Espesor carpeta de rodadura.
 D_2 : Espesor base.

La expresión anterior viene de la ecuación de número estructural propuesto por AASHTO (M.C. 3.604.108.1) aplicada a un pavimento de la zona norte del país. Los resultados sólo son referenciales a este trabajo y bajo las consideraciones aquí expuestas. La utilización de coeficientes típicos de carpeta asfáltica y de base granular pretenden, dentro de otras cosas, dar un valor estimativo para el coeficiente de la base diseñada con asfalto espumado. No es necesariamente la única metodología para este propósito, pero considerando el nivel de este estudio, y los resultados obtenidos en el documento guía, se considera aceptada.

4.2 RESULTADOS AASHTO

El presente trabajo se centra principalmente en la capa reciclada con asfalto espumado. Se determinará en forma empírica un coeficiente estructural para la base espumada siguiendo la metodología de retroanálisis AASHTO, obteniendo el número estructural efectivo y derivando el coeficiente estructural, para una carga normalizada de 50 kn y con una corrección de temperatura a 20°C.

4.2.1 COEFICIENTE ESTRUCTURAL AASHTO

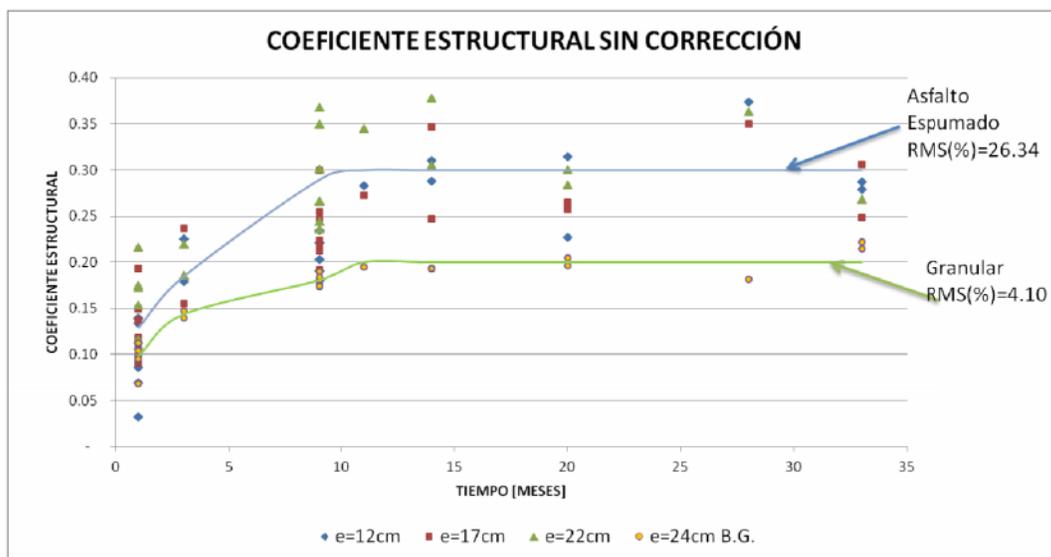
A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma directa por el método de retroanálisis de deflexiones AASHTO al aplicar la ecuación 4.1.1-7.

**TABLA 4.2.1-1
COEFICIENTE SIN CORRECCIÓN, AASHTO**

Fecha	Edad [mes]	a_i (e=12)	a_i (e=17)	a_i (e=22)	a_i (e=24)
jul-08	1	0,10	0,13	0,16	0,10
sep-08	3	0,20	0,20	0,20	0,14
mar-09	9	0,21	0,24	0,29	0,18
may-09	11	0,28	0,27	0,35	0,19
ago-09	14	0,30	0,30	0,34	0,19
feb-10	20	0,27	0,26	0,29	0,20
oct-10	28	0,37	0,35	0,36	0,18
mar-11	33	0,28	0,28	0,31	0,22

Los coeficientes de la base granular para el período de análisis son superiores a los 0,13 utilizados tradicionalmente en el diseño con este material. La diferencia corresponde principalmente a condiciones climáticas y de humedad de la zona norte, donde está construido el tramo de prueba. Se busca traspasar este mejoramiento que tuvieron los coeficientes del granular, a los resultados de la base espumada por medio de una corrección de los resultados, aplicando consideraciones incluidas en el documento “Foamed Asphalt Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Mid-Western Roads”, donde se compensa el coeficiente del asfalto espumado, en función de los coeficientes de la base granular.

GRÁFICO 4.2.1-1
COEFICIENTE ESTRUCTURAL SIN CORRECCIÓN, AASHTO



Del gráfico se puede verificar que existen períodos de oscilación en el asfalto espumado, los que no se manifiestan en la base granular, coincidiendo con los resultados expuestos en el gráfico 2.2.1-5.

4.2.2 COEFICIENTE ESTRUCTURAL AASHTO CORREGIDO

Los coeficientes de espumado se corrigieron a partir del coeficiente estructural de la base granular del tramo de estudio, siguiendo la siguiente ecuación:

$$a_{AE} = a_{2AE} * (a_{BG}/a_{2BG})$$

ECUACIÓN 4.2.2-1

Donde

- a_{AE} : Coeficiente estructural del asfalto espumado corregido.
- a_{2AE} : Coeficiente estructural del asfalto espumado obtenido por retrocálculo para cada subtramo.
- a_{2BG} : Coeficiente de la base granular obtenido por retrocálculo.
- a_{BG} : Coeficiente estructural de diseño de la base granular.

Este último paso se desarrolló como una normalización de los coeficientes obtenidos para el espumado, relacionando el comportamiento de la base granular, asumido como conocido, con lo que ocurre a la base tratada.

Según lo indicado en el Volumen 3 del Manual de Carreteras, se adoptan los siguientes valores para la ecuación 4.2.2-1.

BASE GRANULAR $a_{BG} = 0,13$
 CARPETA ASFALTICA $a_1 = 0,43$

Estos parámetros corresponden a un pavimento colocado en condiciones normales de diseño, con las especificaciones habituales de construcción.

**TABLA 4.2.2-1
 COEFICIENTE ESTRUCTURAL CORREGIDO POR BASE GRANULAR, AASHTO**

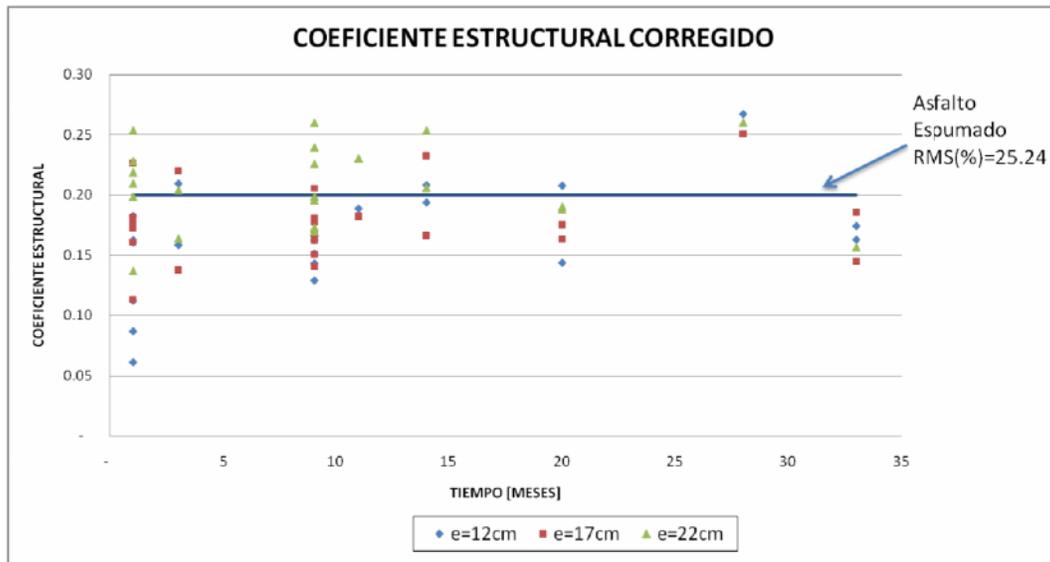
Fecha	Edad [mes]	ai e=12	ai e=17	ai e=22	Promedio	Desv. Estándar
jul-08	1	0,13	0,17	0,21	0,17	0,052
sep-08	3	0,18	0,18	0,18	0,18	0,033
mar-09	9	0,15	0,17	0,21	0,18	0,034
may-09	11	0,19	0,18	0,23	0,20	0,026
ago-09	14	0,20	0,20	0,23	0,21	0,030
feb-10	20	0,18	0,17	0,19	0,18	0,023
oct-10	28	0,27	0,25	0,26	0,26	0,008
mar-11	33	0,17	0,17	0,19	0,16	0,016
Promedio (Período de Análisis)					0,20	0,037

Las columnas promedio y desviación estándar indicada en la tabla anterior, corresponden a la obtenida en el total de los datos analizados por fecha y no a los resultados promedios por fecha mostrados para cada espesor.

Gráficamente se puede observar el efecto de la corrección aplicada en función del coeficiente de la base granular. Períodos donde los coeficientes de la base tradicional eran menores a 0,13, provocaban un aumento en los resultados del coeficiente del

espumado. Por el contrario, puntos donde se obtuvieron coeficientes mayores a 0,13, causaron que la corrección disminuyera los coeficientes de la base tratada, dejando una banda para los coeficientes del espumado en torno a 0,20. Se usó el promedio de las mediciones en el período de análisis como base para determinar el RMS(%).

GRÁFICO 4.2.2-1
COEFICIENTE ESTRUCTURAL CORREGIDO POR BASE GRANULAR, AASHTO



Los coeficientes de la base espumada, normalizados al valor utilizado en la base granular, disminuyen aproximadamente un 35%. Es necesario indicar que la base granular arrojó valores cercanos a 0,20, los que son aproximadamente 40% mayor al 0,13 usado normalmente en diseño.

Finalmente se adoptó como coeficiente de diseño para el tramo de prueba $a_2=0,20$, con un intervalo de confianza de ± 0.015 (al 95%). Para precisar este valor se descartó la utilización del mínimo de los valores obtenidos en el período de análisis, basando esta determinación en que los resultados del retrocálculo sin corrección no son menores a 0,26, por lo tanto, se definió el promedio aritmético de los coeficientes corregidos del período consolidado, como representativo del tramo de prueba.

Se observó que la corrección afecta a las mediciones iniciales, previas al período de consolidación, dejándolas en un valor que bordea el 0,20 de diseño, pero con una mayor dispersión, producto de las variaciones en las mediciones, las que, al tener mayores magnitudes, resultan más significante las diferencias en la respuesta estructural. Además,

se suma como causante de esta variación que los tiempos de pérdida de humedad de compactación sean distintos en cada espesor, ya que el área transversal por el que puede drenar es distinto. El espesor de 22 cm va a perder más rápido humedad de que el de 17 o el de 12, por lo tanto, adquiere resistencia con anterioridad, originando las diferencias medidas.

**TABLA 4.2.2-2
VALORES COEFICIENTES PROMEDIO, MÉTODO AASHTO**

	PROMEDIO	INTERVALO	DESV.ESTANDAR
COEFICIENTE	0,30	± 0,017	0,04
COEFICIENTE CORREGIDO	0,20	± 0,015	0,04

La desviación estándar se mantiene luego de la corrección, reflejando que las variaciones son constantes y consecuentes con el pavimento diseñado con base granular tradicional. Hay que indicar que las correcciones son por punto analizado, no un factor común al promedio, por lo tanto, pudo existir variación en la desviación.

Tal como se esperaba, el intervalo de confianza se reduce para el caso corregido, esto se debe al efecto de la corrección, que en cierta forma absorbe las distintas variaciones que han tenido los módulos a lo largo del tiempo, en función de lo que ocurre con la base tradicional, disminuyendo el intervalo.

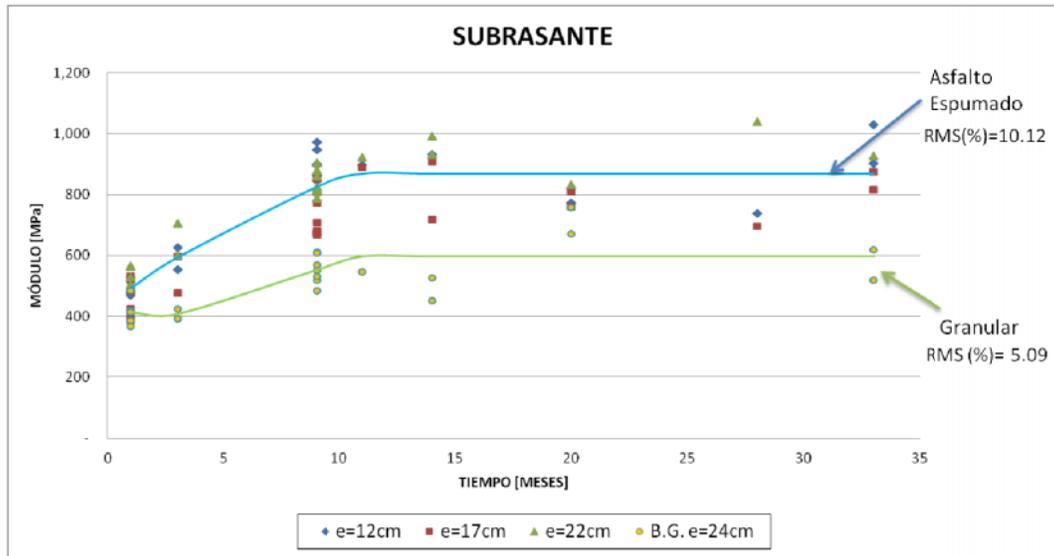
4.2.3 SUBRASANTE

El método permite obtener en forma directa el módulo de la subrasante. Se indican a continuación los valores promedios de las mediciones para cada espesor.

**TABLA 4.2.3-1
MÓDULO DEL SUELO:**

Fecha	Edad [Mes]	MR (e=12) [Mpa]	MR (e=17) [Mpa]	MR (e=22) [Mpa]	MR (e =24) [Mpa]
jul-08	1	492	456	532	413
sep-08	3	589	535	652	407
mar-09	9	903	737	840	552
may-09	11	898	889	922	545
ago-09	14	926	812	961	488
feb-10	20	795	785	831	713
oct-10	28	736	695	1.039	892
mar-11	33	965	845	1.021	568

**GRÁFICO 4.2.3-1
MÓDULO DEL SUELO**



Se observa una tendencia similar a la obtenida con otros métodos de retrocálculo. En promedio el asfalto espumado tiene un módulo para la subrasante de 820 MPa, diferente a los 620 MPa obtenidos para la base granular.

La adherencia que existe en la base espumada produce una mayor rigidez de la capa ubicada sobre la subrasante, provoca en el total de la estructura un comportamiento más compacto, por consecuencia, son mejorados los resultados de la subrasante. Este efecto se observa, en una menor escala, al comparar los módulos individuales de los subtramos, donde el de espesor 22 cm, resulta con mayores módulos resiliente.

El efecto de una capa más rígida sobre el material de la subrasante provoca un aumento en los módulos medidos, es por esto que existen diferencias importantes entre los resultados obtenidos del retrocálculo y los medidos en laboratorio. AASHTO considera este hecho, y propone coeficientes de corrección C que va desde 0,45 a 1,00 según el tipo de material analizado.

CAPÍTULO 5.

TRÁNSITO Y EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES

5.1 INTRODUCCIÓN

El tránsito solicitante es un factor fundamental en todos los métodos de diseño estructural de pavimentos. Las cargas de los vehículos son transmitidas a la estructura mediante apoyos multiruedas para distribuir la carga total solicitante sobre una superficie mayor, siendo posible reducir las tensiones y deformaciones que se producen al interior de la superestructura.

Para la proyección de los ejes equivalentes solicitantes se usará información de tres puntos censales, obteniendo el TMDA y la distribución por tipo de vehículo, en base a la información entregada por la Dirección de Vialidad. Para el desarrollo de este capítulo se estudiará el número y composición de los ejes pesados, que solicitarán al pavimento durante su vida de diseño. Se realizará la proyección del tránsito y la estimación del número de ejes equivalentes para el período de diseño. Se consideró el diseño para pavimentos flexibles empleando las ecuaciones de AASHTO 93 para el cálculo de ejes equivalentes.

En el cálculo de los ejes equivalentes se incluye el análisis de tránsito acumulado por tramo, para cada tipo de vehículo, en un período de diseño de 20 años, incluyendo el desarrollo a la mitad del período y el cálculo de los factores de equivalencia de carga por tipo de vehículo, a partir de la estratigrafía proporcionada.

5.2 TRÁNSITO DE DISEÑO

Los resultados de la Prueba de Carreteras AASHTO mostraron que el daño que produce un eje con una carga determinada puede representarse por el número de pasadas de un eje simple de 80 kN (8,16 t) de rueda doble, considerado como eje patrón, que produce un daño similar. Distintas configuraciones de ejes y cargas inducen daños diferentes en el

pavimento, pudiendo asociarse dicho deterioro al producido por un determinado número de ejes convencionales de 80 kN de carga por eje simple de rueda doble.

El tránsito solicitado en la estructura del pavimento está compuesto por un flujo variado de vehículos, los que se clasifican en los siguientes tipos:

- Vehículos livianos: automóviles y camionetas
- Buses
- Camiones de dos ejes
- Camiones de más de dos ejes (incluye remolques y semirremolques)

Para determinar el número de ejes equivalentes se estudia la información censal del Tránsito Medio Diario Anual utilizando la información disponible del Plan Nacional de Censos.

El TMDA representa el promedio aritmético de los volúmenes diarios de tránsito durante un año, previsibles o existentes en una sección dada de la vía. Se determina por razones prácticas en forma diferenciada para cada tipo de vehículo.

Para la estimación del TMDA se emplearon los siguientes puntos censales.

- 02-008-01-1
- 02-007-01-1
- 02-024-02-1

A continuación se muestra la tabla resumen con la información de los puntos. Se verificó que no existiera más de un 10% de diferencia entre los TMDA de cada punto. Más detalle de la información se agrega en el ANEXO B.

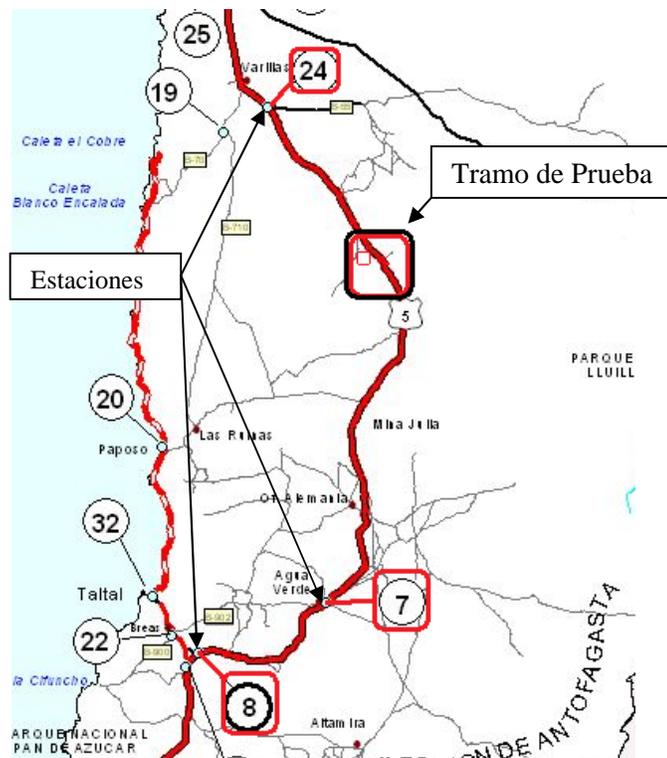
**TABLA 5.2-1
RESUMEN TMDA AÑO 2008**

ESTACIÓN	TMDA
02-008-01-1	1,839
02-007-01-1	1,701
02-024-02-1	1,721

Debido a que en los puntos de análisis el TMDA no varía en más de un 10%, se considera como válida la suposición de un único tramo entre las estaciones de censo.

En la figura 5.2-1 se ilustran los puntos censales pertenecientes al tramo. En esta oportunidad, el diseño no se realizará usando el mayor TMDA de tres puntos, se da por aceptado considerar el punto 02-024-02-1 como representativo del tramo de estudio, debido a que geográficamente esta mejor ubicado y contiene mejor la información esperada para el tramo de prueba.

**FIGURA 5.2-1
PLANO UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL DE TRÁNSITO N°24 N°7 Y N°8**



**TABLA 5.2-2
UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL**

Estación	Lugar	Km
02-008-01-1	BIF NORTE A TALTAL	1.100
02-007-01-1	AGUA VERDE	1.140
02-024-02-1	BIF. A SOCOMPA	1.320

Una vez identificados los tramos de estudio, es confeccionada la tabla de diseño para cada tramo.

**TABLA 5.2-3
TMDA TOTAL POR TIPO DE VEHÍCULO PARA EL AÑO 2008**

MEDICIÓN AÑO 2008		Autos y Camionetas		Camiones Simples 2 ejes		Camiones + dos ejes		Loc. Colectiva	
Estación	TMDA	%	TMDA	%	TMDA	%	TMDA	%	TMDA
02-008-01-1	1.839	34,19	628,75	6,45	118,62	46,69	858,63	12,64	232,45
02-007-01-1	1.701	29,47	501,28	5,82	99,00	52,01	884,69	12,68	215,69
02-024-02-1	1.721	30,88	531,44	7,45	128,21	48,65	837,27	12,99	223,56

Con información del año 2008 se realiza la proyección para el año inicial de diseño.

5.2.1 TASA DE CRECIMIENTO

Para determinar las tasas de crecimiento esperada por vehículo, se proyecta en función del PGB esperado siguiendo la forma:

$$ri = [(1 + \alpha)^\beta] - 1$$

ECUACIÓN 5.2.1-1

En que:

- ri : Tasa de crecimiento de vehículo tipo
- α : Tasa de crecimiento PGB
- β : Elasticidad del tipo de vehículo.

- **PGB**

**TABLA 5.2.1-1
PROYECCIÓN DE PGB³**

Año	PGB
2008	5
2009	4,9
2010	5
2011	5,1
2012-2018	4
2018-2020	3,5

³ Fuente: Ministerio de Hacienda.

- **ELASTICIDAD**

TABLA 5.2.1-2
ELASTICIDAD ⁴

Vehículo:	
Autos y camionetas	1,5
Camiones simples 2 ejes	0,5
Camiones + dos ejes	1,75
Loc. Colectiva	1,5

Con la ecuación 5.2.1-1 y los datos entregados en las tablas 5.2.1-1 y 5.2.1-2, se obtienen las tasas de crecimiento esperadas para cada tipo de vehículo.

- **TASAS DE CRECIMIENTO**

TABLA 5.2.1-3
TASA DE CRECIMIENTO ESPERADO POR AÑO

Vehículo:	2008	2009	2010	2011	2012-2018	2019-2028	
Autos y camionetas	1,5	7,6	7,4	7,6	7,7	6,1	5,3
Camiones simples 2 ejes	0,5	2,5	2,4	2,5	2,5	2,0	1,7
Camiones + dos ejes	1,75	8,9	8,7	8,9	9,1	7,1	6,2
Loc. Colectiva	1,5	7,6	7,4	7,6	7,7	6,1	5,3

5.2.2 TMDA

Se considerará como punto de puesta en servicio en Julio de 2008. Para conocer el volumen del año de puesta en servicio se utiliza la siguiente expresión:

$$T_b = T_a[1 + i]^{(b-a)} \quad \text{ECUACIÓN 5.2.2-1}$$

- T_a : Volúmenes año de información.
 i : Tasa de crecimiento anual.
 a : Año de información.
 T_b : Volumen año puesta en servicio.

Proyectando la información de la tabla 6.2.1-3, se obtienen los TMDA del año 2009.

⁴ Fuente: "El Parámetro Tránsito: Volúmenes"Curso Apuntes Diseño y Construcción de Firms CI62G, Universidad De Chile.

**TABLA 5.2.2-1
TMDA PROYECTADO AÑO INICIAL**

TRAMO	TMDA Total
02-008-01-1	1.983
02-007-01-1	1.839
02-024-02-1	1.858

Las siguientes tablas indican las proyecciones de TMDA para cada tipo de vehículo, separados por punto censal.

**TABLA 5.2.2-2
TMDA PROYECTADO POR PUNTO CENSAL ESTACIÓN 02-008-01-1**

Año	Vehículos Livianos	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Loc. Colectiva
2009	676	122	935	250
2010	727	124	1.017	269
2011	782	128	1.107	289
2012	843	131	1.208	312
2018	1.199	147	1.824	443
2028	2.009	175	3.330	743

**TABLA 5.2.2-3
TMDA PROYECTADO POR PUNTO CENSAL ESTACIÓN 02-007-01-1**

Año	Vehículos Livianos	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Loc. Colectiva
2009	540	101	965	232
2010	580	104	1.049	250
2011	624	107	1.143	269
2012	673	109	1.247	289
2018	958	123	1.882	412
2028	1.604	146	3.437	690

**TABLA 5.2.2-4
TMDA PROYECTADO POR PUNTO CENSAL ESTACIÓN 02-024-02-1**

Año	Vehículos Livianos	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Loc. Colectiva
2009	573	131	913	241
2010	615	135	993	259
2011	662	138	1.082	278
2012	713	141	1.180	300
2018	1.015	159	1.781	427
2028	1.701	189	3.253	715

5.2.3 TRÁNSITO ACUMULADO

El tránsito acumulado es calculado según la siguiente expresión:

$$T_{ac} = T_b \frac{[(1+i)^n - 1]}{i} \quad \text{ECUACIÓN 5.2.3-1}$$

- n = Número de años en servicio (intervalo)
 i = Tasa de crecimiento período
 T_b = Volumen año inicial
 T_{ac} = Volumen de tránsito acumulado en la vida de diseño

En cada uno de los puntos censales es calculado el volumen acumulado de vehículos proyectado por año de estudio.

**TABLA 5.2.3-1
VOLUMEN ACUMULADO ESPERADO POR TRAMO ESTACIÓN 02-008-01-1**

Año	Vehículos Livianos	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Locomoción Colectiva
2009	246.921	44.364	341.334	91.286
2010	512.211	89.802	712.473	189.364
2011	777.501	135.239	1.083.613	287.441
2012-2018	3.341.570	488.713	4.875.359	1.235.374
2018-2028	9.219.528	1.079.632	14.284.435	3.408.448

**TABLA 5.2.3-2
VOLUMEN ACUMULADO ESPERADO POR TRAMO ESTACIÓN 02-007-01-1**

Año	Vehículos Livianos	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Locomoción Colectiva
2009	197.143	37.044	352.281	84.824
2010	408.952	74.985	735.322	175.959
2011	620.761	112.926	1.118.364	267.094
2012-2018	2.667.929	408.081	5.031.711	1.147.925
2018-2020	7.360.926	901.506	14.742.533	3.167.171

**TABLA 5.2.3-3
VOLUMEN ACUMULADO ESPERADO POR TRAMO ESTACIÓN 02-024-02-1**

Año	Vehículos Livianos	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Locomoción Colectiva
2009	209.004	47.977	333.397	87.920
2010	433.557	97.115	695.905	182.380
2011	658.110	146.253	1.058.414	276.841
2012-2018	2.828.447	528.513	4.761.987	1.189.816
2018-2020	7.803.800	1.167.558	13.952.263	3.282.751

5.2.4 VOLUMEN POR PISTA DE DISEÑO

Como en todo diseño, se analizará la situación a 10 y 20 años de servicio. Además se incluye el año 2011 en el análisis, para poder estimar el número de ejes equivalentes que han pasado hasta la fecha de este estudio.

Se utilizó como factor de distribución porcentual un 100% para el tránsito pesado y un 50% del tránsito en cada dirección. Para facilitar el cálculo, no se consideran ampliaciones, ni variaciones de flujo por efectos extraordinarios (centros turísticos, nuevas carreteras, explosivo aumento de algún área productiva, etc.).

**TABLA 5.2.4-1
VOLUMEN ACUMULADO POR PISTA DE DISEÑO ESTACIÓN 02-008-01-1**

Año	Dist. sentido tránsito	Calzada Simple	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Locomoción Colectiva
2011	50%	100%	67.619	541.806	143.720
2018	50%	100%	244.356	2.437.679	617.687
2028	50%	100%	539.816	7.142.217	1.704.223

**TABLA 5.2.4-2
VOLUMEN ACUMULADO POR PISTA DE DISEÑO ESTACIÓN 02-007-01-1**

Año	Dist. sentido tránsito	Calzada Simple	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Locomoción Colectiva
2011	50%	100%	56.463	559.181	133.546
2018	50%	100%	204.040	2.515.855	573.962
2028	50%	100%	450.752	7.371.266	1.583.585

**TABLA 5.2.4-3
VOLUMEN ACUMULADO POR PISTA DE DISEÑO ESTACIÓN 02-024-02-1**

Año	Dist. sentido tránsito	Calzada Simple	Camiones Simples	Camiones +2 ejes	Locomoción Colectiva
2011	50%	100%	73.126	529.207	138.420
2018	50%	100%	264.256	2.380.993	594.908
2028	50%	100%	583.778	6.976.131	1.641.375

Con las proyecciones de tránsito esperado, es posible obtener el número de ejes equivalentes por medio de la estratigrafía de pesos por ejes.

5.2.5 ESTRATIGRAFÍA DE PESOS POR EJES

Corresponde a una tabulación que presenta la distribución de pesos por ejes de acuerdo a rangos de carga, para un número fijo de vehículos controlados. La estratigrafía es propia del camino y de cada zona, las variaciones dependen de las características productivas de la zona de influencia, viabilidad del camino, estación, época del año y consecuencias de las políticas de transporte.

Para este estudio se utilizó una estratigrafía con resultados muy similares a la indicada en el Manual de Carreteras para la plaza “La Negra”, ubicada a 100 km del tramo de prueba. Los datos de estratigrafías están adjuntos en el ANEXO C.

5.2.6 TRÁNSITO EQUIVALENTE

Para poder analizar vehículos con distintas configuraciones de ejes, se implementa el factor de equivalencia, el cual logra convertir el efecto que produce el paso de un determinado eje sobre la estructura de un pavimento, en el efecto que produce un eje tipo de 80 kN.

Con esto, es posible transformar el tránsito real, conformado por distintos tipos de vehículos, en un tránsito equivalente, formado por N pasadas de un tránsito tipo.

Para el pavimento flexible se utilizan las siguientes expresiones.

$$\log f = -4.79 \log(18 + 1) + 4.79 \log(L_x + L_2) - 4.33 \log(L_x) - \frac{Gt}{\beta_x} + \frac{Gt}{\beta_{18}} \quad \text{ECUACIÓN 5.2.6-1}$$

$$\beta_x = 0.40 + 0.08 \frac{(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad \text{ECUACIÓN 5.2.6-2}$$

$$Gt = \log \left(\frac{4.2 - Pt}{4.2 - 1.5} \right) \quad \text{ECUACIÓN 5.2.6-3}$$

Donde:

- F : Factor de equivalencia.
- Pt : Índice de serviciabilidad final.
- Lx : Peso del eje en Kips (Kilo Libras).
- L2 : Código del eje.
- Sn : Número estructural.

Con 18: Valor de x para Lx= 18 kip y L2= 1

Para este trabajo se proyecta el pavimento hasta una serviciabilidad final $pt=2,0$ y se utilizan factores de equivalencia del asfalto.

TABLA 5.2.6-1
FACTOR DE EQUIVALENCIA DE ASFALTO POR TRAMO DE CARGA

Rango [t]	Lx [Kips]	Bx	Factor	EJES SIMPLES
< 5	9,92	0,42	0,09	
5 - 6	12,13	0,43	0,2	
6 - 7	14,33	0,45	0,4	
7 - 8	16,54	0,48	0,71	
8 - 9	18,74	0,51	1,17	
9 - 10	20,94	0,56	1,81	
10 - 11	23,15	0,61	2,65	
11 - 12	25,35	0,68	3,73	
12 - 13	27,56	0,77	5,09	
13 - 14	29,76	0,87	6,78	
14 - 15	31,97	0,99	8,86	
15 - 16	34,17	1,12	11,41	
Rango [t]	Lx [Kips]	Bx	Factor	EJES TÁNDEM
<11	22,05	0,42	0,18	
11 - 12	25,35	0,43	0,33	
12 - 13	27,56	0,44	0,46	
13 - 14	29,76	0,46	0,64	
14 - 15	31,97	0,47	0,85	
15 - 16	34,17	0,48	1,12	
16 - 17	36,38	0,5	1,43	
17 - 18	38,58	0,52	1,81	
18 - 19	40,79	0,54	2,25	
19 - 20	42,99	0,57	2,75	
20 - 21	45,2	0,6	3,33	
21 - 22	47,4	0,63	3,98	
22 - 23	49,6	0,67	4,72	
23 - 24	51,81	0,7	5,56	
24 - 25	54,01	0,75	6,49	
25 - 26	56,22	0,79	7,53	

De la estratigrafía se obtiene el número de ejes por vehículo, para cada uno de los pesos mostrados en los rangos anteriores. El número de ejes es sobre un total de 1.000 vehículos.

**TABLA 5.2.6-2
ESTRATIGRAFÍA POR EJE, TIPO DE VEHÍCULO (1000 UNIDADES)**

Rango [t]	Eje Simples	Rango [t]	Eje Tándem	Rango [t]	Eje Simples	Rango [t]	Eje Simples	Rango [t]	Eje Tándem
< 5	805	<11	28	< 5	1370	< 5	1875	<11	330
5 - 6	247	11 - 12	28	5 - 6	150	5 - 6	492	11 - 12	21
6 - 7	123	12 - 13	11	6 - 7	89	6 - 7	344	12 - 13	30
7 - 8	209	13 - 14	11	7 - 8	69	7 - 8	156	13 - 14	36
8 - 9	280	14 - 15	11	8 - 9	65	8 - 9	200	14 - 15	52
9 - 10	109	15 - 16	28	9 - 10	82	9 - 10	304	15 - 16	57
10 - 11	51	16 - 17		10 - 11	70	10 - 11	326	16 - 17	69
11 - 12	35	17 - 18		11 - 12	52	11 - 12	245	17 - 18	60
12 - 13	25	18 - 19		12 - 13	34	12 - 13	91	18 - 19	60
13 - 14		19 - 20		13 - 14	8	13 - 14	18	19 - 20	30
14 - 15		20 - 21		14 - 15	7	14 - 15	10	20 - 21	19
15 - 16		21 - 22		15 - 16	4	15 - 16	7	21 - 22	17
		22 - 23						22 - 23	17
		23 - 24						23 - 24	14
		24 - 25						24 - 25	14
		25 - 26						25 - 26	10

La siguiente tabla indica los valores obtenidos para el factor de equivalencia en asfalto. Se realizó el cálculo por tipo de vehículo sobre una muestra de 1.000 elementos.

**TABLA 5.2.6-3
EJES EQUIVALENTES POR TIPO DE VEHÍCULO PARA ASFALTO (1.000 UNIDADES)**

		BUSES		Camión 2 ejes		Cam. + 2 ejes			
Rango[t]	Factor f	Ejes 1000	f * n° ejes	Ejes 1000	f * n° ejes	Ejes 1000	f * n° ejes		
< 5	0,085	805	69	1370	116	1116	95	EJES SIMPLES	
5 - 6	0,197	247	49	150	30	293	58		
6 - 7	0,396	123	49	89	36	205	82		
7 - 8	0,711	209	149	69	50	93	67		
8 - 9	1,173	280	329	65	77	119	140		
9 - 10	1,809	109	198	82	149	181	328		
10 - 11	2,649	51	136	70	186	194	514		
11 - 12	3,727	35	131	52	194	146	545		
12 - 13	5,086	25	128	34	173	54	275		
13 - 14	6,775		0	8	55	11	75		
14 - 15	8,859		0	7	63	6	54		
15 - 16	11,41		0	4	46	4	46		
Rango[t]	Factor	Ejes 1000	f * n° ejes			Ejes 1000	f * n° ejes		EJES TÁNDEM
<11	0,182	28	6			330	60		
11 - 12	0,327	28	10			21	7		
12 - 13	0,463	11	6			30	14		
13 - 14	0,637	11	8			36	23		
14 - 15	0,853	11	10			52	45		
15 - 16	1,117	28	32			57	64		
16 - 17	1,434					69	99		
17 - 18	1,808					60	109		
18 - 19	2,245					60	135		
19 - 20	2,749					30	83		
20 - 21	3,326					19	64		
21 - 22	3,982					17	68		
22 - 23	4,723					17	81		
23 - 24	5,556					14	78		
24 - 25	6,489					14	91		
25 - 26	7,531					10	76		

TOTAL 1310 TOTAL 1175 TOTAL 3.376

**TABLA 5.2.6-4
RESUMEN DE EJES EQUIVALENTES POR TIPO DE VEHÍCULO PARA ASFALTO**

Tipo de Vehículo	EE/vehículo
Buses	1.31
Camión 2 ejes	1.18
Cam. + 2 ejes	3.38

Una vez conocido el número de EE por tipo de vehículo, es posible obtener el número de ejes equivalentes esperados para el período de diseño sobre el tramo de prueba.

**TABLA 5.2.6-5
DETALLE EE POR ESTACIÓN PARA ASFALTO, ESTACIÓN 08**

Estación 02-008-01-1

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2011	Loc. Colectiva	143.721	1,31	188.273
	Cam. Simples	67.620	1,18	79.453
	Cam+2 ejes	541.806	3,38	1.829.138
TOTAL EE =				2.097.900

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2018	Loc. Colectiva	617.687	1,31	809.170
	Cam. Simples	244.356	1,18	287.118
	Cam+2 ejes	2.437.680	3,38	8.229.606
TOTAL EE =				9.325.900

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2028	Loc. Colectiva	1.704.224	1,31	2.232.533
	Cam. Simples	539.816	1,18	634.284
	Cam+2 ejes	7.142.218	3,38	24.112.126
TOTAL EE =				26.979.000

**TABLA 5.2.6-6
DETALLE EE POR ESTACIÓN PARA ASFALTO, ESTACIÓN 07**

Estación 02-007-01-1

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2011	Loc. Colectiva	133.546	1,31	174.946
	Cam. Simples	56.463	1,18	66.344
	Cam+2 ejes	559.181	3,38	1.887.798
TOTAL EE =				2.129.100

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2018	Loc. Colectiva	573.962	1,31	751.890
	Cam. Simples	204.040	1,18	239.747
	Cam+2 ejes	2.515.855	3,38	8.493.527
TOTAL EE =				9.485.200

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2028	Loc. Colectiva	1.583.586	1,31	2.074.497
	Cam. Simples	450.753	1,18	529.634
	Cam+2 ejes	.7371.267	3,38	24.885.396
TOTAL EE =				27.489.500

**TABLA 5.2.6-7
DETALLE EE POR ESTACIÓN PARA ASFALTO, ESTACIÓN 24**

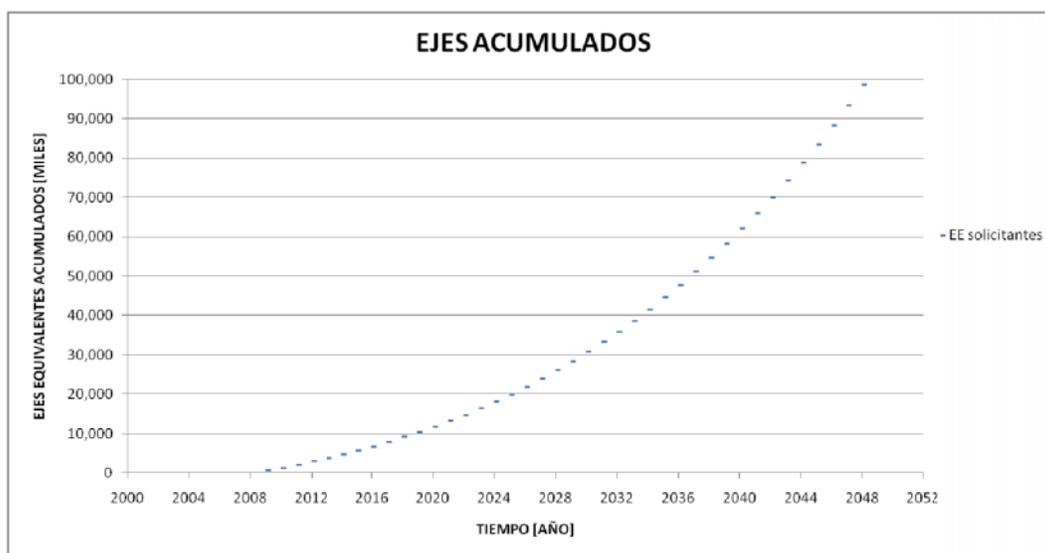
Estación 02-024-02-1				
Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2011	Loc. Colectiva	138.420	1,31	181.330
	Cam. Simples	73.126	1,18	85.923
	Cam+2 ejes	529.207	3,38	1.786.603
TOTAL EE =				2.053.800

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2018	Loc. Colectiva	594.908	1,31	779.329
	Cam. Simples	264.257	1,18	310.501
	Cam+2 ejes	2.380.993	3,38	8.038.233
TOTAL EE =				9.128.100

Año:	Vehículo	Vol. Acum.	EE/Vehículo	Total EE
2028	Loc. Colectiva	1.641.376	1,31	2.150.202
	Cam. Simples	583.779	1,18	685.940
	Cam+2 ejes	6.976.132	3,38	23.551.420
TOTAL EE =				26.387.600

Con la información obtenida es posible confeccionar un gráfico con la evolución de los ejes acumulados proyectados para el tramo de prueba. Este gráfico será utilizado para contrastar los ejes admisibles del pavimento y para la predicción del tiempo de vida útil de los distintos espesores del pavimento.

**GRÁFICO 5.2.6-1
EJES ACUMULADOS PARA PISTA DE DISEÑO**



5.2.7 RESULTADOS

De la tabla 5.2-1, es posible verificar que la diferencia de TMDA que existe entre distintos puntos censales no es significativa, lo que permite asumir que constituyen una misma vía, sin grandes variaciones en su solicitud.

En la siguiente tabla se resumen los valores de ejes equivalentes obtenidos para cada uno de los puntos analizados. Se incluye el año 2011 para estimar la cantidad de ejes que han pasado hasta la fecha por el tramo.

**TABLA 5.2.7-1
DETALLE EE POR TRAMO PARA ASFALTO**

ESTACIÓN	AÑO	EE ASFALTO
02-008-01-1	2011	2.097.000
	2018	9.326.000
	2028	26.979.000
02-007-01-1	2011	2.130.000
	2018	9.485.000
	2028	27.490.000
02-024-02-1	2011	2.054.000
	2018	9.129.000
	2028	26.388.000

Para conocer la variación que existe entre los distintos puntos analizados y validar el uso de la información obtenida en la estación 02-024-02-1 como representativa para el diseño del tramo de prueba, se le asigna un 100% y se compara con los otros puntos de estudio.

**TABLA 5.2.7-2
VARIACIÓN PORCENTUAL POR ESTACIÓN**

ESTACIÓN	VARIACIÓN %
02-008-01-1	102%
02-007-01-1	104%
02-024-02-1	100%

Se aprecia que la diferencia es solo de 4% para el punto 02-007-01-1 y de solo un 2% con el punto 02-008-01-1, lo que indica poca variación en el tránsito, ratificando el supuesto de un tramo único y la posibilidad de usar los resultados de 02-024-02-1 para el diseño.

5.3 DETERMINACIÓN DE EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES USANDO METODOLOGÍA AASHTO

El método de diseño AASHTO está basado en análisis empíricos y se encuentra desarrollado en la publicación AASHTO "Guide for Design of Pavement Structures". El procedimiento que se describe en la guía, es el resultado de ensayos realizados en pistas de prueba construidas bajo zonas ambientales y con suelos de características definidas. El Manual de Carreteras del MOP adapta el método mediante algunas precisiones y complementos para ajustarlo más a la realidad chilena.

El método relaciona el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras.

La fórmula general de diseño relaciona los ejes equivalentes con el número estructural. La relación es la siguiente:

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} 10^{-(16,40+ZRxSo)} M_R^{2,32} \left[\frac{p_i - p_f}{p_i - 1,5} \right]^{1/\beta} \quad \text{Ec. M.C. - 3.604.101.1}$$

$$\beta = 0,4 + \left[\frac{97,81}{NE+25,4} \right]^{5,19} \quad \text{Ec. M.C. - 3.604.101.2}$$

Con:

- EE : Ejes equivalentes de 80 kN acumulados durante la vida de diseño.
- NE : Número estructural (mm).
- NE = $a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot m_2 \cdot h_2 + a_3 \cdot m_3 \cdot h_3$.
- a_1, h_1 : Coeficiente estructural y espesor (mm) de cada una de las capas asfálticas o tratadas que componen pavimentos.
- m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje de las capas no tratadas.
- S_o : Desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.
- M_R : Módulo resiliente del suelo de la subrasante (MPa).
- p_i : índice de serviciabilidad inicial.
- p_f : índice de serviciabilidad final.

5.3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

5.3.1.1 SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad de un pavimento está definida como su habilidad para servir al tipo de tráfico que usa el camino. También es llamada PSI (Present Serviciability Index), el cual varía entre cero, camino imposible, y cinco, camino perfecto. Es necesario implantar un índice inicial y un índice final como parámetros de proyecto.

Para el diseño se establece un índice de serviciabilidad inicial de 4.2 tal como lo recomienda el manual de carreteras. El índice de serviciabilidad final será 2.0, siguiendo las bases de proyectos actuales.

Índice De Serviciabilidad Inicial (Pi) 4,2

Índice De Serviciabilidad Final (Pf) 2,0

5.3.1.2 SOLICITACIONES

Las solicitudes que afectan la estructura se expresan como ejes equivalentes acumulados durante el período de vida de diseño definido.

El pavimento se diseña para una sola etapa y para una vida útil de 20 años, siguiendo indicaciones de la tabla MC-3.604.103^a - "VIDA DE DISEÑO".

Del capítulo 6 se obtiene el número de ejes equivalentes para diseño tal como se muestra en la siguiente tabla.

**TABLA 5.3.1.2-1
EJES EQUIVALENTES**

Año	EE
2018	9.128.065
2028	26.387.563

5.3.1.3 CONFIABILIDAD

La confiabilidad en el diseño, representa la probabilidad de que la sección de pavimento diseñada bajo un proceso, se comporte satisfactoriamente. El grado de confiabilidad se controla por el factor de confiabilidad F_R , que es un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal Z_R .

Según el Numeral 3.604.4 del MC-V3 el nivel de confianza se recomienda en 60%, independiente del camino a proyectar. La información siguiente corresponde a los parámetros relacionados con la confiabilidad, conforme a lo señalado en la tabla incluida en Numeral 3.604.104.A del MC-V3

Confiabilidad :	60%
ZR :	0,253
So :	0,45

El valor de S_0 incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, determinado principalmente por el tránsito y la variación de suelos. Considerando que la subrasante del tramo de prueba fue construida bajo condiciones controladas, con baja dispersión de los parámetros retrocalculados del suelo, es posible adoptar para el diseño un valor $S_0=0,45$

El factor de confiabilidad F_R se determinan según la siguiente expresión:

$$F_R = 10^{-Z_R \cdot S_0} \qquad \text{MC-3.603.204.1}$$

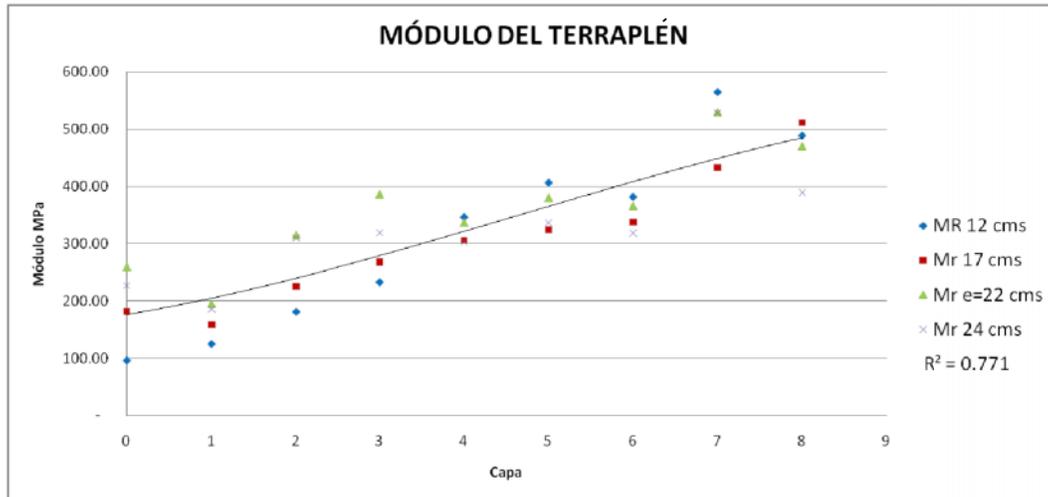
Obteniendo: $F_R=1.299$

5.3.1.4 MÓDULO RESILIENTE

El método de diseño de estructuras de pavimentos propuesto por AASHTO, incorpora al módulo resiliente como parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de fundación del camino. Para el desarrollo del modelo de comportamiento de los pavimentos flexibles, la prueba AASHTO definió el módulo resiliente (M_R) mediante la ejecución de ensayos triaxiales dinámicos con cargas repetidas, por lo cual la guía de diseño recomienda este método para determinar esta propiedad (AASHTO T-294). No obstante y considerando que el equipo requerido para este ensaye es de un costo bastante alto y de operación compleja, la misma guía ofrece alternativas para determinar este parámetro de diseño.

Siguiendo las recomendaciones de la guía, se optó por realizar deflexiones en el terraplén, previo a la construcción del pavimento, de esta forma, los resultados no serán afectados por la rigidez de la estructura en la medición.

GRÁFICO 5.3.1.4-1
EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DEL TERRAPLÉN



Se observa la evolución del módulo en función de la capa aplicada. El aumento en el valor retrocalculado se debe a que el bulbo de presiones deja de afectar el suelo propio del sector y las distintas capas van sufriendo una densificación gradual en el proceso de construcción de la capa siguiente. Se observa una estabilización en torno a los 470 MPa.

De acuerdo a los antecedentes contenidos en la Guía AASHTO 1993 y el documento complementario “Design Pamphelt for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures”, publicado en 1997, los valores obtenidos mediante el uso del Deflectómetro de Impacto, resultan más altos que los obtenidos en laboratorio, por lo que es necesario aplicar un factor de ajuste.

Módulo resiliente retrocalculado: 470 MPa
 Factor de ajuste⁵: 0,45
 Módulo Resiliente de Diseño: 200 MPa

El factor de ajuste en este caso es extremo, el método permite un ajuste de 0,77 para las condiciones del tramo de prueba, pero de todas formas los resultados corregidos fueron mayores a 200 MPa, utilizado comúnmente como valor máximo para el módulo de subrasante en los diseños, por lo tanto, se adoptó el máximo como valor de diseño.

⁵Valor crítico obtenido en: “Relación Entre Módulo Resiliente Determinado Mediante Deflectómetro De Impacto Y El De Laboratorio; Miguel Petersen, Carlos Wahr, Gabriel Palma, Leonardo Castro, Jorge Albornoz”

5.3.1.5 COEFICIENTE DE DRENAJE

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

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

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

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

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

Para el caso del tramo de prueba, el Manual de Carreteras del MOP define la utilización de un coeficiente de drenaje para la base, condicionado por la ubicación del tramo, de $m_i=1,4$ (MC-3.604.4)

5.3.1.6 COEFICIENTE ESTRUCTURAL

La versión del método AASHTO enfatiza la conveniencia de asignar el coeficiente estructural adecuado a cada capa de pavimento. Los coeficientes estructurales dependen

directamente del módulo elástico del material que compone la capa. Los coeficientes han sido desarrollados para ciertos materiales de pavimentos para ser utilizados en el diseño.

El Manual de Carreteras define, para condiciones normales de diseño, una serie de coeficientes estructurales, los que se indican en la siguiente tabla:

**TABLA 5.3.1.6-1
COEFICIENTES ESTRUCTURALES**

CAPA	CARACTERÍSTICA	COEFICIENTE ESTRUCTURAL
Subbase Granular	CBR=40%	0,12
Base Granular	CBR=80%	0,13
Base Asfáltica Grad. Gruesa	6.000 N	0,33
Base Asfáltica Grad. Abierta		0,28
Grava-Emulsión		0,30
C.Asfáltico, Capa Interm.	8.000 N	0,41
C.Asfáltico de Superficie	9.000 N	0,43
Mezclas Drenantes		0,32
Microaglomerado discontinuo en caliente		0,40
Mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt)		0,43

- **Carpeta de Rodadura**

Según lo indicado en el Volumen 3 del Manual de Carreteras, se adopta un valor $a_1=0,43$ como coeficiente estructural para la carpeta asfáltica de rodadura, dado que este análisis es realizado a un pavimento construido bajo condiciones normales de diseño y siguiendo especificaciones habituales de construcción.

- **Base Granular**

El presente trabajo se centra principalmente en el estudio de los coeficientes estructurales de la capa de espumado. Se ha determinado en forma empírica un coeficiente estructural para la capa de asfalto espumado siguiendo la metodología de retroanálisis AASHTO, obteniendo el número estructural efectivo para carga normalizada en Chile de 50 kN y con una corrección de temperatura a 20°C según se indica en el método descrito en el Numeral 8.502.5 del MC-V8 y aplicando la metodología desarrollada en el documento: "Foamed Asphalt Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Mid-Western Roads" (Romanoschi, Heitzman y Gisi, 2003),.

Del capítulo cuatro fue posible definir un coeficiente estructural para la base espumada de 0,20. El coeficiente ha sido corregido en función de los resultados de la base granular retocalculada, por lo tanto, sufrieron una disminución de su valor.

5.3.1.7 RESUMEN DE PARAMETROS DE DISEÑO

Se confeccionó la siguiente tabla resumen con los parámetros de diseño requeridos por AASHTO 93.

**TABLA 5.3.1.7-1
PARÁMETROS DE DISEÑO AASHTO.**

ITEM	Unidad	Valor
MC 3.604.102 Serviciabilidad		
Índice de Serviciabilidad Inicial (p_i)		4,20
Índice de Serviciabilidad Final (p_f)		2,00
MC 3.604.103 Solicitaciones:		
Año 2018	EE	9.128.000
Año 2028	EE	26.387.000
MC 3.604.104 Confiabilidad		
Confiabilidad	%	0,60
Z_R		-0,25
S_o		0,45
F_R		1,30
MC 3.604.105 Módulo Resiliente		
M_R	MPa	200
MC 3.604.106 Coeficiente de Drenaje		
m_i		1,40
MC 3.604.107 Coeficientes Estructurales		
Capa de Asfalto de Superficie		0,43
Base Estabilizada Con Asfalto Espumado		0,20

5.4 DETERMINACIÓN DE EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES

Como una forma de predecir la respuesta estructural del pavimento y verificar el las consideraciones hechas en este trabajo, se determinó la cantidad de ejes equivalentes admisibles correspondiente a cada pavimento, siguiendo las ecuaciones M.C.3.604.101.1 y M.C.3.604.101.2. Se pretende realizar el cálculo en un sentido contrario al que normalmente se hace en los diseños tradicionales, en esta oportunidad, ante una estructura conocida, determinar el número de ejes solicitantes que es capaz de soportar.

A continuación, en la tabla 5.4-1 indica el número estructural obtenido para las distintas configuraciones de pavimento, los ejes equivalentes admisibles, el año pronosticado con

la pérdida de serviciabilidad $p=2,2$, el total de años de servicio y el porcentaje de ejes equivalentes que han transitado a la fecha, en relación al número de ejes equivalentes admisibles. Como parámetro comparativo, se hace una referencia al espesor equivalente considerando el diseño con una base granular tradicional, para un mismo número de ejes solicitantes.

**TABLA 5.4-1
DISEÑO AASHTO**

	Asfalto Espumado				Base Granular
	e=12cm	e=17cm	e=22cm	e=18cm	e=24cm
Número Estructural	56	70	84	76	65
EE Admisibles (miles)	4.646	19.827	67.352	33.090	12.450
Año Final	2014	2025	2041	2028	2020
Total Años de Servicio	6	17	33	20	12
Espesor Equivalente B.G (cm)	19	27	35	29	-
Porcentaje de EE a la fecha (%)	44.2	10.3	3.1	6.2	16.5

Es posible observar los puntos de intersección con el gráfico de ejes solicitantes obtenido en el punto 5.2.6.

**GRÁFICO 5.4-1
DISEÑO AASHTO**



Los pavimentos ubicados en la zona norte, construidos bajo condiciones controladas, generalmente muestran un mejor comportamiento que el esperado para otras zonas. Los factores de diseño indicados en el manual de carreteras tienen considerado este efecto,

pero no está registrado específicamente para el asfalto espumado y mucho menos, en subrasantes de terraplén con módulos tan altos.

Basándose en los resultados obtenidos por el método AASHTO, se espera lograr una pérdida de serviciabilidad de 2,2 en un período de 6 años, pero debido a las características de la subrasante, y a las correcciones de los coeficientes realizadas, que disminuyeron los valores efectivos en casi un 35%, es difícil realizar una predicción confiable del comportamiento del pavimento.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusión del estudio, se propone un coeficiente estructural de 0,20 para futuros diseños empíricos en que se utilice asfalto espumado. El texto en que se basa esta investigación, “Foamed Asphalt Stabilized Base in Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Midwestern Roads”, señala que bajo condiciones similares de construcción, se estima el coeficiente estructural en 0,18 para la base espumada, lo que es 10% menor a lo obtenido en el presente trabajo. En efecto, la diferencia entre los coeficientes, anteriormente señalada, se debe entre otros factores, a las características de la subrasante utilizada en el tramo de prueba, ya que ésta posee un módulo elástico promedio de 820 MPa, lo que es mayor a la utilizada en el documento guía, que sólo tiene 130 MPa, parámetro que claramente incide en el proceso de retrocálculo (Ecuación 4.1.1-5).

Sin perjuicio de lo anterior, y como se reseñó en el capítulo uno, un elemento importante en el desarrollo de la resistencia del material estabilizado con asfalto espumado, tiene relación con los procesos de compactación realizados en la construcción. De mejorar las especificaciones para este ítem, es posible superar el 0,20 estimado en este estudio. Es importante considerar que coeficiente de 0,20 propuesto adhiere todas las consideraciones que ya se han hecho en bases granulares tradicionales, y que han sido efectivas en el país.

Otro punto considerado en este trabajo y que no fue incluido en el texto guía, se refiere al módulo elástico representativo para el asfalto espumado, el que se puede acotar a valores entre 890 y 2.500 MPa, dependiendo del método utilizado para el análisis, siendo 1.480 MPa aquel que se ajustó más a la realidad del pavimento. Los resultados coinciden con valores determinados anteriormente en laboratorio.

Mientras no sea estudiada una ley de fatiga que describa el comportamiento del material tratado con asfalto espumado, el uso de metodología mecanicista debe ser realizado en forma cautelosa. Por ahora, sólo es aconsejada para estimaciones preliminares del

espesor de la capa de material tratado, para este efecto, se recomienda la utilización del paquete de análisis Everseries, ya que fue el que tuvo mejor comportamiento.

En cuanto a la validez del diseño de pavimentos con bases espumadas, hay que tener presente que son dos los mecanismos principales de pérdida de serviciabilidad, que se intentan controlar en la metodología empírica AASHTO (y también en las mecanicistas): fatiga y exceso de deformación permanente. La fatiga ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores altos de deformación por tracción en la zona inferior de la capa. Este tipo de deformación, es asociado a la respuesta que presenta la estructura cuando se mueven las cargas vehiculares. La deformación permanente es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos, la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento. Un aspecto importante de analizar, es que, para el caso de estructuras flexibles, la deformación permanente total es la suma de la deformación producida en cada una de las capas del pavimento, pero el método AASHTO supone que tal deformación se ocasiona sólo en la capa subrasante, generando una de sus principales limitaciones. Lo anterior, se basa en que la subrasante es la capa más susceptible a la deformación, debido a que tiene una menor rigidez en comparación a las otras capas, y a una mayor probabilidad de presentar altos contenidos de agua. Es decir, la metodología empírica no considera que la base espumada tenga un papel importante en la generación de deformación permanente.

Por otro lado, en un diseño tradicional de pavimentos para altos volúmenes de tránsito, la carpeta asfáltica tiene una doble función estructural: trabajan la tracción producida por cargas verticales y la compresión, producida por el peso del vehículo, por otro lado, la base sólo es encargada de soportar las cargas rodantes por medio de esfuerzos de compresión, pero en el caso de las bases tratadas con asfalto espumado, se agrega además una componente horizontal, producida por la adherencia ejercida por el mortero asfáltico sobre la partícula de mayor tamaño, lo que origina una nueva variable de falla en la parte inferior de la base, τ , que puede ser descrita en una ley de fatiga. Esta nueva forma de falla no está considerada en el método de diseño empírico, no obstante, es evidente que constituye un factor a considerar. Se espera que nuevos avances en el estudio del espumado, describan leyes de fatiga que se ajusten al comportamiento

interpartícula de la base espumada, de forma que permitan realizar diseños mediante metodología mecanicista.

En el caso particular del tramo de prueba, el diseño ha sido determinado por la buena calidad de la subrasante utilizada, la que ha visto mermado su valor efectivo, pasando de módulos elásticos sobre los 600 MPa, medidos en el retrocálculo, a un valor de entrada en el diseño de 200 MPa. Para futuros estudios de diseño con espumado, se recomienda colocar el pavimento sobre una subrasante débil, a fin de controlar de mejor forma el comportamiento de la base espumada en un contexto desfavorable y comprobar la utilización de las relaciones que aparecen en el manual de carreteras.

Como se vio en el desarrollo del capítulo dos, el comportamiento consolidado del pavimento, se logró después de los 11 meses desde la construcción del mismo. El retraso en el curado se debe principalmente a la humedad presente en el material base. Surge la necesidad de evaluar la metodología implementada para determinar la humedad óptima de compactación, la que privilegia la trabajabilidad de la mezcla, por sobre la velocidad de curado del material.

Existe evidencia de la acción del agua sobre bases tratadas con asfalto espumado, pero al estar ubicado el material en examen en una capa inferior, la observación directa es difícil, debiendo recurrirse a ensayos de estabilidad, permeabilidad y resistencia al agua, los que deben ser incluidos en futuros estudios. Por otro lado, es importante considerar las posibles relaciones que existan entre el CBR y el coeficiente estructural (MC-3.604.107.4) y la eventual realización de ensayos de módulo de reacción (placa de carga) y estudios de módulos resiliente utilizando la prensa NAT, a fin de contrastar los módulos obtenidos en este estudio. Si bien se consiguieron valores representativos del módulo elástico del asfalto espumado, será necesario que futuras investigaciones amplíen el conocimiento en este ámbito, tratando de conseguir relaciones entre el coeficiente estructural y el módulo elástico (M.C. 3.604.107) que consideren como eje principal la vida efectiva de la capa tratada.

Los resultados de este estudio, referidos tanto al coeficiente estructural como al módulo elástico, fomentan la implementación de esta tecnología en nuestro país. Si se continúa el estudio de éste método en materia de reciclaje, necesariamente se afinarán los procesos constructivos, se determinarán de mejor forma las circunstancias para realizar reciclado y

consecuencialmente se disminuirán los costos. Mayores estudios permitirán afinar conocimientos relacionados a la permeabilidad del material y condiciones de drenaje óptimos a utilizar.

La utilización de asfalto espumado en el reciclado de pavimentos debe ser investigada aún más, profundizando su estudio para seguir las tendencias actuales de desarrollo sustentable. Se hace necesario adoptar nuevos parámetros en diseños viales, que especifiquen la utilización de materiales, considerando el reciclado, adoptando soluciones que vayan más allá del período de serviciabilidad de un camino. El reciclado y la re-utilización de materiales deben ser componentes esenciales en la construcción y mantenimiento de la infraestructura vial, por ello resulta apropiado impulsarlo enérgicamente.

BIBLIOGRAFÍA:

AASHTO. Guide For The Design Of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials Washington D.C., 1993.

New Zealand Supplement to the Document, Pavement Design- A guide to the Structural Design of Road Pavements AUSTROADS, New Zealand, 2004.

Romanoschi S.A., Hossain M. , Michael Heitzman M., Gisi A.J. **Foamed Asphalt Stabilized Base in Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Midwestern Roads.** Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, IA, August, 2003.

Basic Asphalt Recycling Manual. Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA). Annapolis, Maryland, USA, 2001.

Horak, E. **Aspects Of Deflection Basin Parameters Used In Mechanistic Rehabilitation Design Procedures For Flexible Pavement In South Africa.** PhD Thesis, University of Pretoria, Pretoria, South Africa, 1988.

Jenkins, K.J., Collings, D.C., Theyse, H.L., and Long F.M. **Interim Technical Guideline TG2: The Design And Use Of Foamed Bitumen Treated Materials.** Edited by Les Sampson of Asphalt Academy (publishers), ISBN 0-7988-5543-6. Asphalt Academy, Pretoria, South Africa, 2002.

Rondon A., Reyes F.: **Comportamiento Resiliente De Materiales Granulares En Pavimentos Flexibles: Estado Del Conocimiento.** Revista de Ingenierías Universidad de Medellín, Julio-Diciembre, año/vol. 6, número 011, Medellín, Colombia.[s.a.]

Ministerio de Obras Públicas, (2003) **Manual de Carreteras**, Volumen N°3, N°5, N°7 y N°8, 2010.

<http://www.vialidad.cl> Página web de la Dirección Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.[s.a.]

Pérez A., Garnica S., Gómez J.A., Itandehui G.E. **Uso Y Calibración De Deflectómetros De Impacto En La Evaluación Estructural De Pavimentos**, Instituto Mexicano del transporte, México.[s.a.]

Alex K. Apeageyi, Ph.D., P.E. Brian K. Diefenderfer, Ph.D. **Analysis Of Full-Depth Reclamation Trial Sections In Virginia P.E. Research Scientist**, Virginia.[s.a.].

<http://foam101.info/> University of California Pavement Research Center. Proyecto: "Foam 101".

ANEXOS

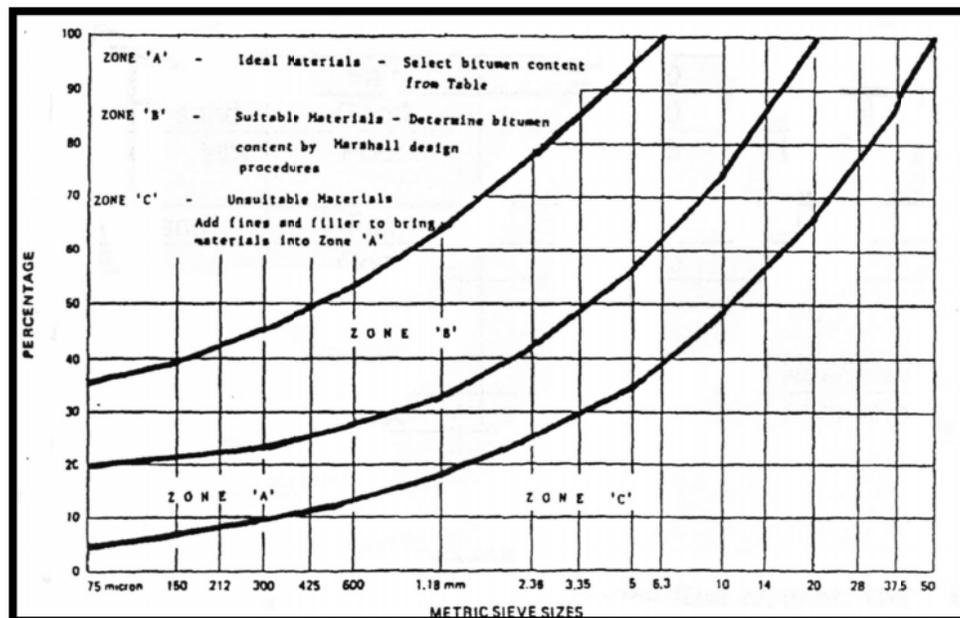
ANEXO A. PROPIEDADES ASFALTO ESPUMADO.

TABLA A-1
RESUMEN DE PROPIEDADES ASFALTO ESPUMADO

Propiedad	Referencia
Cantidad de agua	1 a 2% del peso de asfalto
Temperatura del asfalto - Abel (1978)	149°C (160-180°C)
Viscosidad del Asfalto - Brennen et al. (1983)	No relaciona en forma concluyente
Recipiente de espumado en laboratorio - Ruckel et al (1982)	Dependencia del tamaño
Razón de Expansión - Macarrone et al. (1994)	entre 8 y 15
Vida Media - Macarrone et al. (1994)	15 segundos
Humedad - Bowering-Ruckel et al. Lee Bissada (1970, 1981,1982, 1987)	75% (65-85%) Humedad Óptima de Compactación Proctor Modificado
Óptimo de Asfalto - CSIR Transportek (1999)	1-3% de asfalto (Maximiza la tracción Indirecta Saturada)
Reducción de susceptibilidad a la humedad - Castedo, Wood y Lewis (1983-1998)	Adición de cal o cemento como filler
Temperatura de Mezclado - Bowering y Martin (1986)	13 - 26 °C
Contenido de Finos - Ruckel et al (1982)	5%
Angulo de Roce	44.7 °
Cohesión	245 kPa

Cemento - Wirtgen GMBH (1998)	Dependencia del IP
Indice de Plasticidad	Cantidad de Cemento (% del agregado)
Ip < 10	1.0%
10 < IP < 16	1.5%
Ip > 16	3.0%

GRANULOMETRÍA Akeroyd y Hicks - Mobil Oil (1988)



ANEXO B. INFORMACIÓN CENSAL POR ESTACIÓN

**TABLA B-1
INFORMACIÓN CENSO 2008**

ESTACION	NOMBRE DEL CAMINO		CAMINO		Autos	Camionetas	Camiones	Camiones	Semi	Remolques	Remolques	Buses	TOTAL	Tránsito
			ROL	ASIMILABLE		Station	Simples de 2 Ejes	Simples más de 2 Ejes	Remolques			Taxibuses	24 HORAS	Anterior
02-008-01-1	CAMINO	LONGITUDINAL NORTE		***	V	729	288	117	46	629	87	281	2,177	1,430
2	DE/A	ANTOFAGASTA	5	***	I	183	261	114	82	740	117	196	1,693	1,615
3	LUGAR	BIF NORTE A TALTAL		***	P	166	260	125	98	681	97	221	1,648	1,394
TMDA	1,839			DISTRIBUCION %		19.53	14.66	6.45	4.09	37.15	5.45	12.64	TASA	11.46
02-007-01-1	CAMINO	LONGITUDINAL NORTE			V	689	176	114	17	684	81	201	1,962	1,373
2	DE/A	DIRECTO	5		I	163	184	93	148	525	320	247	1,680	1,280
3	LUGAR	AGUA VERDE			P	156	136	90	26	708	145	199	1,460	1,330
TMDA	1,701			DISTRIBUCION %		19.75	9.72	5.82	3.74	37.57	10.70	12.68	TASA	13.17
02-024-02-1	CAMINO	LONGITUDINAL NORTE			V	683	245	172	45	739	107	257	2,248	1,304
2	DE/A	COPIAPO	5		I	108	255	122	444	288	91	229	1,537	1,236
3	LUGAR	BIF. A SOCOMPA			P	166	138	91	94	619	85	185	1,378	1,411
TMDA	1,721			DISTRIBUCION %		18.53	12.35	7.45	11.29	31.88	5.48	12.99	TASA	14.31

ANEXO C. ESTRATIGRAFÍA PESOS POR EJES

TABLA C-1
ESTRATIGRAFÍA POR EJES

Rango	BUSES		Camión 2 ejes		Cam +2ejes	
	Ejes simples	Ejes 1000	Ejes simples	Ejes 1000	Ejes simples	Ejes 1000
< 5	437	805	1529	1370	1875	1116
5 - 6	137	247	167	150	492	293
6 - 7	70	123	99	89	344	205
7 - 8	119	209	77	69	156	93
8 - 9	152	280	73	65	200	119
9 - 10	59	109	92	82	304	181
10 - 11	22	51	78	70	326	194
11 - 12	16	35	58	52	245	146
12 - 13	11	25	38	34	91	54
13 - 14			9	8	18	11
14 - 15			8	7	10	6
15 - 16			4	4	7	4
Rango	Ejes Tándem	Ejes 1000			Ejes Tándem	Ejes 1000
<11	15	28			554	330
11 - 12	15	28			35	21
12 - 13	6	11			50	30
13 - 14	6	11			60	36
14 - 15	6	11			87	52
15 - 16	15	28			96	57
16 - 17					116	69
17 - 18					101	60
18 - 19					101	60
19 - 20					50	30
20 - 21					32	19
21 - 22					29	17
22 - 23					29	17
23 - 24					24	14
24 - 25					24	14
25 - 26					17	10

ANEXO D. DEFLEXIÓN FWD

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS PROMEDIO DE LAS DISTINTAS DEFLEXIONES INCLUIDAS EN ESTE ESTUDIO.

TABLA D-1
DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 12cm

BASE e=12cm							
TIEMPO [Mes]	d0 [μm]	d20 [μm]	d30 [μm]	d45 [μm]	d60 [μm]	d90 [μm]	d120 [μm]
1	282,57	128,29	84,43	46,00	29,00	19,14	15,14
1	288,50	133,10	81,90	43,50	27,80	18,00	15,00
1	343,90	134,30	82,20	42,70	27,40	19,00	14,40
1	336,60	133,90	76,50	38,80	25,10	17,90	14,90
1	531,90	159,20	83,00	38,20	24,20	18,40	15,80
1	369,50	161,60	87,50	39,40	24,90	18,20	15,40
3	252,90	106,70	67,10	37,50	27,30	18,90	15,00
3	255,10	106,90	69,60	38,00	27,80	18,40	14,80
9	125,80	69,90	45,40	26,50	18,80	13,90	11,80
9	123,00	65,44	45,78	29,00	20,33	14,89	12,56
9	165,10	79,10	47,90	28,30	19,40	13,40	12,30
9	146,90	76,50	47,30	27,60	18,90	14,30	11,50
9	173,70	76,60	47,80	28,80	20,10	14,70	12,20
9	154,40	70,60	43,70	26,70	19,40	14,60	12,30
9	175,60	71,80	42,30	25,50	19,10	13,80	12,10
11	128,80	71,00	46,00	28,80	20,40	14,40	12,60
11	119,80	67,80	45,60	28,60	19,40	13,60	11,40
14	123,60	70,20	46,00	27,40	19,80	14,20	11,60
14	113,00	67,20	47,20	30,20	21,20	14,20	12,60
20	158,80	75,40	53,60	27,80	20,00	14,60	12,40
20	165,80	74,00	49,80	25,80	19,00	13,80	12,00
28	129,20	67,80	60,60	28,00	20,20	14,80	12,60
33	127,00	63,40	44,00	24,20	18,40	14,40	12,20
33	133,50	65,75	45,00	24,00	17,50	13,50	11,75

TABLA D-2
DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 17cm

BASE e=17cm							
TIEMPO [Mes]	d0 [μm]	d20 [μm]	d30 [μm]	d45 [μm]	d60 [μm]	d90 [μm]	d120 [μm]
1	273,50	144,60	97,30	54,90	34,30	18,70	16,10
1	288,20	127,10	75,60	39,30	25,00	17,10	15,60
1	346,30	139,80	92,40	52,00	32,10	18,40	14,90
1	327,50	128,80	73,10	37,40	24,60	17,20	14,20
1	490,90	179,20	98,70	49,30	28,50	17,00	14,50
1	427,20	157,30	81,70	35,80	22,20	16,40	14,30
3	283,40	124,50	82,30	47,70	34,20	19,90	15,30
3	202,10	92,60	65,30	39,10	28,40	17,50	13,50
9	126,60	76,40	55,00	35,60	24,80	15,70	11,80
9	141,90	78,90	57,60	37,60	26,00	16,00	12,60
9	153,70	84,20	57,40	37,40	25,70	16,30	12,50
9	151,00	78,50	49,30	29,90	20,30	13,60	11,60
9	202,40	91,60	56,30	34,10	23,50	16,00	13,00
9	191,20	82,90	48,90	28,60	19,70	13,90	11,70
9	172,40	74,80	48,80	30,20	20,70	14,20	11,80
11	118,60	70,40	51,20	34,60	24,60	15,80	13,00
11	127,80	69,40	46,00	28,20	20,00	14,00	11,40
14	124,20	67,20	44,80	27,00	20,60	14,00	12,00
14	103,40	67,00	51,20	35,80	25,20	16,20	12,40
20	148,60	76,40	54,00	32,40	23,40	15,40	12,40
20	141,40	66,60	48,20	28,20	20,80	14,60	12,00
28	106,80	63,40	54,40	31,20	22,80	15,60	13,00
33	125,20	67,00	48,20	28,80	20,60	14,60	12,20
33	140,00	67,00	46,60	25,20	18,60	13,40	11,80

TABLA D-3
DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 22cm

BASE e=22cm							
TIEMPO [Mes]	d0 [μm]	d20 [μm]	d30 [μm]	d45 [μm]	d60 [μm]	d90 [μm]	d120 [μm]
1	231,45	119,45	85,18	53,00	34,73	18,36	15,09
1	233,50	117,10	70,10	36,70	23,90	15,70	13,30
1	263,10	117,60	82,40	51,40	33,80	17,90	13,30
1	261,20	108,70	65,60	38,00	25,00	15,90	12,90
1	437,00	152,90	90,30	49,90	31,20	16,80	12,60
1	393,10	148,40	80,00	38,40	23,40	14,90	12,70
3	238,30	106,80	73,30	45,70	32,20	18,70	14,40
3	184,18	81,00	58,09	37,73	27,45	17,09	13,09
9	79,40	55,30	44,80	33,30	24,90	16,20	11,40
9	109,30	65,40	52,30	36,60	25,80	15,20	11,60
9	102,90	63,50	48,80	35,00	25,20	16,20	11,70
9	111,70	62,00	44,60	30,10	21,70	13,60	11,10
9	152,00	74,90	51,80	34,10	23,70	14,70	11,60
9	157,70	74,70	49,20	30,40	21,00	14,00	11,50
9	147,70	67,00	46,40	30,50	20,80	13,90	11,20
11	116,00	72,20	51,20	34,40	24,40	15,00	11,40
11	97,60	59,80	44,00	30,60	21,60	13,60	11,40
14	97,20	57,20	41,60	26,80	20,40	13,20	11,40
14	81,00	55,20	45,60	32,60	25,00	16,00	12,00
20	145,20	76,00	58,40	30,40	21,60	14,40	11,40
20	123,60	62,00	52,80	28,60	20,80	14,20	11,80
28	96,20	58,20	47,80	30,00	21,80	14,20	11,20
33	110,00	62,40	46,00	28,80	20,40	13,40	10,60
33	128,00	63,40	44,40	25,20	18,20	12,80	10,80

TABLA D-4
DEFLEXIÓN MEDIDA SEGÚN FECHA Y SENSOR. ESPESOR 24cm.(BASE GRANULAR)

BASE e=24cm							
TIEMPO [Mes]	d0 [μm]	d20 [μm]	d30 [μm]	d45 [μm]	d60 [μm]	d90 [μm]	d120 [μm]
1	518,50	252,70	128,50	36,60	9,50	12,40	13,20
1	487,80	216,00	100,10	22,50	5,50	11,60	13,20
1	546,70	232,20	99,50	20,80	5,90	11,10	12,80
1	539,82	209,18	87,64	20,18	6,45	12,27	12,82
1	774,80	298,80	117,60	17,40	5,00	6,30	10,40
1	528,40	225,10	107,40	28,50	8,20	11,50	12,50
3	357,30	191,70	103,70	40,60	21,20	16,20	13,90
3	373,80	177,60	94,60	35,40	17,20	13,40	12,70
9	223,50	134,30	82,20	38,10	19,10	12,70	11,50
9	254,90	136,70	70,50	29,00	16,30	13,90	11,40
9	238,40	133,00	76,00	33,80	17,80	12,20	11,00
9	236,20	132,20	74,90	31,90	16,00	10,80	10,40
9	266,20	140,10	72,60	30,20	16,00	12,30	11,40
9	268,33	139,67	68,67	24,00	12,00	10,67	10,67
9	256,80	129,50	66,40	27,70	14,60	11,00	10,90
11	234,00	138,40	82,20	36,60	18,20	12,60	11,80
11	226,40	133,80	78,40	34,20	16,60	11,40	11,00
14	236,60	140,00	80,40	31,40	15,60	10,80	10,80
14	230,00	142,20	87,00	37,60	19,60	13,20	12,20
20	221,40	123,40	83,40	33,20	16,60	13,80	12,00
20	225,40	122,80	74,60	26,80	15,40	12,40	11,00
28	216,00	128,00	94,40	31,00	17,40	13,40	11,80
33	214,00	125,40	78,80	31,40	17,20	13,60	11,60
33	199,60	114,80	71,00	26,80	14,80	12,00	11,00

ANEXO E. CERTIFICADOS DE LABORATORIO.

CERTIFICADO N° _____/

Informa análisis de control de material de base granular, utilizada en construcción de tramo de prueba, determinación módulo de base reciclada con asfalto espumado, en sector KM: 1266,980 a KM: 1267,380.

OBRA : REPOSICION PAVIMENTO RUTA 5, NUEVO 2007
CAMINO : LOS VIENTOS-ROSARIO
SECTOR : DM 1.254,500 - DM 1.278,000
REGIÓN : SEGUNDA - PROVINCIA ANTOFAGASTA
RESOLUCIÓN : DRV.II N° 054, DEL 09.07.2007
PROGRAMA : SECTORIAL
CONSTRUYE : EMPRESA CONSTRUCTORA FE GRANDE S.A.
ÍTEM : 5.302-1 BASE GRANULAR, CBR 80% (m³)

Muestreo y análisis efectuado por el personal del Laboratorio Regional de Vialidad, II Región Antofagasta.

1.- IDENTIFICACIÓN

Muestra N°	:	01	02
Material	:	Base Granular	Base Granular
Procedencia	:	Planta	Planta
Ubicación Pozo	:	Ruta 5, Km. 1.298	Ruta 5, Km: 1.298
Lugar de Muestreo	:	Acopio Planta	Km: 1.267,300
Control Proctor de Km:	:	-	1.267,280
A Km:	:	-	1.267,380
Fecha de Muestreo	:	12.11.07	21.06.08
Fecha de Ensaye	:	19.11.07	30.06.08
Fecha certificado	:	26.11.07	12.09.08

2.- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (LNV-65) (8.202.3)

(% que pasa en peso)

Tamiz (mm)	U.S.		
50	2"	100	100
40	1 1/2"	92	98
25	1 "	76	92
20	3/4"	66	86
10	3/8"	48	71
5	N° 4	35	56
2	N° 10	26	44
0.5	N° 40	16	26
0.08	N° 200	6	12

ESPECIFICACIÓN

**TM-50c
(LNV-102)**

100
--
70 - 100
60 - 90
40 - 75
30 - 60
15 - 45
10 - 30
0 - 15

3.- RELACIÓN DENSIDAD/HUMEDAD (LNV-95) (8.102.7)

D.M.C.H.	(Kg/m ³)	2.215	2.351
Hum. Opt.	(%)	4,3	5,9
D.M.C.S.	(Kg/m ³)	2.124	2.220

4.- CUBICIDAD DE PARTÍCULAS (LNV-3) (8.202.6)

Partículas Chancadas			
o Angulosa Natural.	(%)	100	100
			Min. 50%

5.- LÍMITES DE CONSISTENCIA (LNV-89/90) (8.102.3) (8.102.4)

Límite Líquido	(%)	--	--	Máx. 25 %
Índice Plasticidad	(%)	N.P.	N.P.	Máx. 6 %



6.- <u>DESGASTE DE LOS ÁNGELES (LNV-75) (8.202.11)</u>			
Resistencia al Desgaste (%)	10	17	Máx. 35 %
7.- <u>DETERMINACIÓN DE SALES (LNV-76) (8.202.18)</u>			
Sales solubles Totales (%)	0,9	1,0	Máx. 4 %
8.- <u>EQUIVALENTE DE ARENA (LNV-71) (8.202.9)</u>			
Equivalente de Arena (%)	40	35	Mín . 25 %
9.- <u>ANÁLISIS C.B.R. (LNV-92) (8.102.11)</u>			
Capacidad de soporte, medido al 95% de la D.M.C.S. a 0.2" de penetración, sin inmersión(%)	97	+100	Mín. 80 %

10.- **OBSERVACIÓN**

- Base granular de e= 0,20 m en un tramo de 100 metros, sobre la cual va concreto asfáltico en e= 0,05 m.

MANUEL LUTTINO ROJAS
Ingeniero (E) Industrial
JEFE LABORATORIO REGIONAL
VIALIDAD II REGION

MLR/ECP/soo

DISTRIBUCION

- Director Regional Vialidad II Región
- Ing. Jefe Laboratorio Nacional Vialidad Santiago
- Ing. Jefe Depto. Contratos Vialidad II Región
- Inspector Fiscal, Sr. Günther Seiltgens López
- Empresa Constructora, FE GRANDE S.A
- Correlativo Contratos
- Archivo.

Cer_100
12.09.08

2/2

PROCESO N°



Paihuano 409, Antofagasta/Chile
Fono: (56-55)422311 / Fax: (56-55)453146
www.vialidad.cl
email: soledad.orrego@moptt.gov.cl



GOBIERNO DE CHILE
LABORATORIO REGIONAL DE VIALIDAD II REGION

ANTOFAGASTA,

CERTIFICADO N° _____ /

Informa análisis de control de material de terraplén, utilizado en construcción de tramo de prueba, determinación módulo de base reciclada con asfalto espumado, en sector KM: 1266,980 a KM: 1267,380.

OBRA : REPOSICION PAVIMENTO RUTA 5, NUEVO 2007
CAMINO : LOS VIENTOS-ROSARIO
SECTOR : DM 1.254,500 - DM 1.278,000
REGIÓN : SEGUNDA - PROVINCIA ANTOFAGASTA
RESOLUCIÓN : DRV.II N° 054, DEL 09.07.2007
PROGRAMA : SECTORIAL
CONSTRUYE : EMPRESA CONSTRUCTORA FE GRANDE S.A.
ÍTEM : 5.205-1 FORMACIÓN Y COMPACTACIÓN DE TERRAPLENES (m³)

Muestreo y análisis efectuado por el personal del Laboratorio Regional de Vialidad, II Región Antofagasta.

1.- **IDENTIFICACIÓN**

Muestra N°	:	01	02
Material	:	Terraplén	Terraplén
Capa	:	1ª Capa	5ª Capa
Procedencia	:	Pozo Km: 1268	Pozo Km: 1268
Lugar de Muestreo	:	Corte en capa	Cordón
Km. Muestreo	:	1.267,060	1.267,240
Control Proctor De:	:	1.266,980	1.266,980
A:	:	1.267,380	1.267,380
Fecha de Muestreo	:	30.05.08	09.06.08
Fecha de Ensayo	:	04.06.08	10.06.08
Fecha certificado	:	12.09.08	12.09.08

2.- **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (LNV-65) (8.202.3)**

(% que pasa en peso)

Tamiz (mm)	U.S.		
63	2 1/2"	100	100
50	2"	96	96
40	1 1/2"	92	91
25	1"	83	84
20	3/4"	81	82
10	3/8"	73	75
5	N° 4	67	67
2	N° 10	57	56
0.5	N° 40	29	30
0.08	N° 200	9	10

ESPECIFICACIÓN
T.MÁX 3"

3.- **RELACIÓN DENSIDAD/HUMEDAD (LNV-95) (8.102.7)**

D.M.C.H.	(Kg/m ³)	2.360	2.339
Hum. Opt.	(%)	6,8	6,9
D.M.C.S.	(Kg/m ³)	2.210	2.188

4.- **ANÁLISIS C.B.R. (LNV-92) (8.102.11)**

Capacidad de soporte, medido al 95% de la D.M.C.S. a 0.2" de penetración, sin inmersión (%)

	97	+100	Mín. 30 %
--	----	------	------------------

MANUEL LUTTINO ROJAS
Ingeniero (E) Industrial
JEFE LABORATORIO REGIONAL
VIALIDAD II REGION

MLR/ECP/soo

DISTRIBUCION

- Director Regional Vialidad II Región
- Ing. Jefe Laboratorio Nacional Vialidad Santiago
- Ing. Jefe Depto. Contratos Vialidad II Región
- Inspector Fiscal, Sr. Günther Seiltgens López
- Empresa Constructora, FE GRANDE S.A.
- Correlativo Contratos
- Archivo.

Cer_101

12.09.08

PROCESO N°

1/1



GOBIERNO DE CHILE
LABORATORIO REGIONAL DE VIALIDAD II REGION

Paihuano 409, Antofagasta/Chile
Fono: (56-55)422311 / Fax: (56-55)453146
www.vialidad.cl / email:
soledad.orrego@moptt.gov.cl

CERTIFICADO N° _____/

Informa análisis de control material sello de fundación, a una cota de -2,0 m respecto la subrasante de proyecto, correspondiente al suelo natural en sector tramo de prueba, determinación de módulo de base reciclada con asfalto espumado Ruta 5, Km: 1.266,980 a Km: 1.267,380.

OBRA : REPOSICION PAVIMENTO RUTA 5, NUEVO 2007
CAMINO : LOS VIENTOS-ROSARIO
SECTOR : DM 1.254,500 - DM 1.278,000
REGIÓN : SEGUNDA - PROVINCIA ANTOFAGASTA
RESOLUCIÓN : DRV.II N° 054, DEL 09.07.2007
PROGRAMA : SECTORIAL
CONSTRUYE : EMPRESA CONSTRUCTORA FE GRANDE S.A.
ÍTEM : SELLO DE FUNDACIÓN

Muestreo y análisis efectuado por el personal del Laboratorio Regional de Vialidad, II Región Antofagasta.

1.- **IDENTIFICACIÓN**

Muestra N°	:	01		02
Material	:	Sello de fundación		Sello de Fundación
Procedencia	:	Existente		Existente
Lugar de Muestreo	:	Corte en sello		Corte en sello
Km. Muestreo	:	1.267,200		1.267,300
Fecha de Muestreo	:	28.05.08		28.05.08
Fecha de Ensaye	:	29.05.08		30.05.08
Fecha certificado	:	12.09.08		12.09.08

2.- **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (LNV-65) (8.202.3)**

ESPECIFICACIÓN

(% que pasa en peso)			
Tamiz (mm)	U.S.		
40	1 1/2"		100
25	1 "	100	99
20	3/4"	99	98
10	3/8"	97	97
5	N° 4	93	94
2	N° 10	91	90
0.5	N° 40	74	74
0.08	N° 200	35	35

3.- **RELACIÓN DENSIDAD/HUMEDAD (LNV-95) (8.102.7)**

D.M.C.H.	(Kg/m ³)	2.169	2.187
Hum. Opt.	(%)	9,6	10,1
D.M.C.S.	(Kg/m ³)	1.979	1.986

4.- **DETERMINACIÓN DE SALES (LNV-8) (8.202.18)**

Sales solubles Totales	(%)	4	4
------------------------	-----	---	---

5.- **ANÁLISIS C.B.R. (LNV-92) (8.102.11)**

Capacidad de soporte, medido al 95% de la D.M.C.S. a 0.2" de penetración, sin inmersión	(%)	74	85
--	-----	----	----

MANUEL LUTTINO ROJAS
Ingeniero (E) Industrial
JEFE LABORATORIO REGIONAL
VIALIDAD II REGION

MLR/ECP/soo

DISTRIBUCION

- Director Regional Vialidad II Región
- Ing. Jefe Laboratorio Nacional Vialidad Santiago
- Ing. Jefe Depto. Contratos Vialidad II Región
- Inspector Fiscal, Sr. Günther Seiltgens López
- Empresa Constructora, FE GRANDE S.A.
- Correlativo Contratos
- Archivo.

Cer_102

12.09.08

PROCESO N°

1/1



CERTIFICADO DE ENSAYE N° 122

Camino : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007
Sector : Los Vientos – Rosario, II Etapa. Dm 1.254,500 – Dm 1.278,000
Región : II Región
Resolución : DRV II N° 55 del 09-07-2007
Contratista : Empresa Constructora Fe Grande S.A
Ensaye : **VISACION MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO**
Dosificación : Informe N° 72513-A de 12-11-2007 Dictuc
Muestreo : Realizado por personal del LRV II Región
Referencia : Ord. N° 09 de 17-01-08
Fecha recepción en LNV : 24-01-08

1.- DOSIFICACION DE MATERIALES EN PESO

RAP : 41,2 %
BASE : 58,8%

Nota: Esto Equivale a un reciclado a 17 cm. De los cuales 7 cm corresponden a carpeta asfáltica y 10 cm a Base Granular.

2.- VISACION

Se visa dosificación según fórmula de trabajo propuesta:

- CA 24P (%ref. Material reciclado seco)	: 2,7
- Temperatura de espumación (°C)	: 170
- Agua de espumación (% Ref. peso del Asfalto)	: 1,1
- Cemento (%Ref. Material reciclado seco)	: 1,0
- Contenido Agua de Compactación (%)	: 5,8

LA FLORIDA, 26 FEB. 2008

GSP/RVA/gsp

Distribución:

- Director de Vialidad II Región
 - Inspección Fiscal
 - Laboratorio Regional II Región
 - Empresa Constructora Fe Grande S.A.
 - Sub-Departamento Asfalto LNV
 - Ingeniero Visitador LNV
 - Archivo
- 18-02-2008
1829880

VICTOR ROCO HERRERA
Ingeniero Jefe
Laboratorio Nacional
Dirección de Vialidad

N° Proceso 1893571/160
Laboratorio Nacional de Vialidad





GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN DE VIALIDAD

CERTIFICADO DE ENSAYE N° 649

Contrato : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007, Los Vientos – Rosario.
Región : II
Resolución : D.R.V.II N° 054 del 09.07.2007
Contratista : Empresa Constructora Fe Grande S. A.
Ensaye : **ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN GRADO DE VISCOSIDAD**
Ligante : **CA 24** Procedencia: Asfalchile S. A.
Referencia : Ord. N° 263 del 12.08.2008

Análisis N°	:	1	
Muestra N°	:	70	
N° de Guía	:	271149	Tabla
Fecha de Muestreo	:	20.07.08	8.301.1.A
Fecha recepción muestra en LNV	:	19.08.08	Vol. 8 – M.C.
Fecha ensaye	:	01.10.08	
Penetración, 25°C, 100g, 5s, (0.1mm)	:	58	Informar
Viscosidad Absoluta a 60°C, 300 mm Hg, (P)	:	2760	Mín. 2400
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	:	+99	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	:	+232	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	:	50	Informar
Viscosidad Cinemática a 135°C (P)	:	4,9	Informar
Índice de Pfeiffer	:		-1.5 +1.0
Ensaye de la Mancha:			
- Heptano/Xilol (%Xilol)	:	<25	Máx. 30
Película Delgada Rotatoria:			
- Pérdida por Calentamiento (%)	:	0,0	Máx. 0.8
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
- Viscosidad Abs. a 60°C 300 mm Hg (P)	:	6000	Informar
- Índice de Durabilidad	:	2,2	Máx. 3.5

LA FLORIDA, 07.10.2008

Victor Roca
VÍCTOR ROCA HERRERA
Ingeniero Jefe
Laboratorio Nacional
Dirección de Vialidad

RZC
RZC/JSF/lpv
Distribución:

- Director Regional de Vialidad, II Región
 - Inspector Fiscal
 - Laboratorio Regional de Vialidad, II Región
 - Constructora Fe Grande S. A.
 - Química
 - Archivo
- NP2302143
07.10.2008



GOBIERNO DE CHILE

LABORATORIO NACIONAL VIALIDAD
Rutanao 202 - La Florida



ANTOFAGASTA, 04 AGO. 2008

085

CERTIFICADO N° _____

Informa análisis de control de material de sello fundación existente. Este

material procede de calicata abierta en sector deformado Km. 1.256,230

OBRA : REPOSICION PAVIMENTO RUTA 5, NUEVO 2007
 CAMINO : LOS VIENTOS-ROSARIO
 SECTOR : DM 1.254,500 - DM 1.278,000
 REGIÓN : SEGUNDA - PROVINCIA ANTOFAGASTA
 RESOLUCIÓN : DRV.II N° 054, DEL 09.07.2007
 PROGRAMA : SECTORIAL
 CONSTRUYE : EMPRESA CONSTRUCTORA FE GRANDE S.A.
 ÍTEM : SELLO DE FUNDACIÓN

Muestreo y análisis efectuado por el personal del Laboratorio Regional de Vialidad, II Región Antofagasta.

1.- IDENTIFICACIÓN

Muestra N° : 01
 Material : Sello de fundación
 Procedencia : Existente
 Lugar de Muestreo : Corte carpeta
 Km. Muestreo : 1.256,230
 Fecha de Muestreo : 04.07.08
 Fecha de Ensaye : 21.07.08
 Fecha certificado : 01.08.08

2.- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (LNV-65) (8.202.3)

(% que pasa en peso)

Tamiz (mm)	U.S.	
40	1 1/2"	100
25	1 "	99
20	3/4"	98
10	3/8"	92
5	N° 4	82
2	N° 10	71
0.5	N° 40	53
0.08	N° 200	24

ESPECIFICACIÓN

3.- RELACIÓN DENSIDAD/HUMEDAD (LNV-95) (8.102.7)

D.M.C.H. (Kg/m³) 2.081
 Hum. Opt. (%) 11,6
 D.M.C.S. (Kg/m³) 1.864

4.- DETERMINACIÓN DE SALES (LNV-76) (8.202.18)

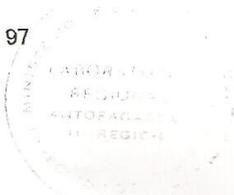
Sales solubles Totales (%) 3

Máx. 4 %

5.- ANÁLISIS C.B.R. (LNV-92) (8.102.11)

Capacidad de soporte,
 medido al 95% de la
 D.M.C.S. a 0.2" de
 penetración, sin inmersión(%)

97



(Signature)
 MANUEL LUTTINO ROJAS
 Ingeniero (E) Industrial
 JEFE LABORATORIO REGIONAL
 VIALIDAD II REGION

**MLR/ECP/soo
DISTRIBUCION**

- Director Regional Vialidad II Región
- Ing. Jefe Laboratorio Nacional Vialidad Santiago
- Ing. Jefe Depto. Contratos Vialidad II Región
- Inspector Fiscal, SR. GUNTHER SEILTGENS LOPEZ
- Empresa Constructora, FE GRANDE S.A.
- Correlativo Contratos
- Archivo.

Cer_085
04.08.08

PROCESO N° 7781079



ANTOFAGASTA,

04 AGO. 2008

CERTIFICADO N° _____ /

Informa análisis de control de material de base granular existente. Este

material procede de calicata abierta en sector deformado Km. 1.256,230

OBRA : REPOSICION PAVIMENTO RUTA 5, NUEVO 2007
 CAMINO : LOS VIENTOS-ROSARIO
 SECTOR : DM 1.254,500 - DM 1.278,000
 REGIÓN : SEGUNDA - PROVINCIA ANTOFAGASTA
 RESOLUCIÓN : DRV.II N° 054, DEL 09.07.2007
 PROGRAMA : SECTORIAL
 CONSTRUYE : EMPRESA CONSTRUCTORA FE GRANDE S.A.
 ÍTEM : BASE GRANULAR

Muestreo y análisis efectuado por el personal del Laboratorio Regional de Vialidad, II Región Antofagasta.

1.- IDENTIFICACIÓN

Muestra N° : 01
 Material : Base granular
 Procedencia : Existente
 Lugar de Muestreo : Corte carpeta
 Km. Muestreo : 1.256,230
 Fecha de Muestreo : 04.07.08
 Fecha de Ensaye : 23.07.08
 Fecha certificado : 01.08.08

2.- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (LNV-65) (8.202.3)

ESPECIFICACIÓN

(% que pasa en peso)

Tamiz (mm)	U.S.	
40	1 1/2"	100
25	1"	96
20	3/4"	92
10	3/8"	78
5	N° 4	63
2	N° 10	52
0.5	N° 40	28
0.08	N° 200	10

TM-25
(LNV-102)

100	
70 - 100	
50 - 80	
35 - 65	
25 - 50	
10 - 30	
0 - 15	

3.- RELACIÓN DENSIDAD/HUMEDAD (LNV-95) (8.102.7)

D.M.C.H. (Kg/m³) 2.241
 Hum. Opt. (%) 6,8
 D.M.C.S. (Kg/m³) 2.098

4.- ANÁLISIS C.B.R. (LNV-92) (8.102.11)

Capacidad de soporte,
 medido al 95% de la
 D.M.C.S. a 0.2" de
 penetración, sin inmersión(%) **+100**

Mín. 80 %



(Handwritten signature)

MANUEL LUTTINO ROJAS
 Ingeniero (E) Industrial
 JEFE LABORATORIO REGIONAL
 VIALIDAD II REGION

MLR/ECP/s00
DISTRIBUCION

- Director Regional Vialidad II Región
- Ing. Jefe Laboratorio Nacional Vialidad Santiago
- Ing. Jefe Depto. Contratos Vialidad II Región
- Inspector Fiscal, SR. GUNTHER SEILTGENS LOPEZ
- Empresa Constructora, FE GRANDE S.A.
- Correlativo Contratos
- Archivo.

Cer_086
 04.08.08

PROCESO N° 2281100



CERTIFICADO DE ENSAYE N° 678

Contrato : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007, Los Vientos – Rosario.
 Región : II
 Resolución : D.R.V.II N° 054 del 09.07.2007
 Contratista : Empresa Constructora Fe Grande S. A.
 Ensaye : **ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN GRADO DE VISCOSIDAD**
 Ligante : CA 24 Procedencia: Asfalchile S. A.
 Referencia : Ord. N° 227 del 04.07.2008.

Análisis N°	:	1	Tabla
Muestra N°	:	57	8.301.1.A
N° de Guía	:	270560	Vol. 8 – M.C.
Fecha de Muestreo	:	28.06.08	
Fecha recepción muestra en LNV	:	11.07.08	
Fecha ensaye	:	30.09.08	
Penetración, 25°C, 100g, 5s, (0.1mm)	:	57	Informar
Viscosidad Absoluta a 60°C, 300 mm Hg, (P)	:	4000	Mín. 2400
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:		Mín. 100
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	:	99,7	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	:	+232	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	:	50,6	Informar
Viscosidad Cinemática a 135°C (P)	:	7,6	Informar
Índice de Pfeiffer	:	-0,2	-1.5 +1.0
Ensaye de la Mancha:			
- Heptano/Xilol (%Xilol)	:	<25	Máx. 30
Película Delgada Rotatoria:			
- Pérdida por Calentamiento (%)	:	0,3	Máx. 0.8
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	100	Mín. 100
- Viscosidad Abs. a 60°C 300 mm Hg (P)	:	6800	Informar
- Índice de Durabilidad	:	1,7	Máx. 3.5

LA FLORIDA, 30 de Septiembre del 2008


VICTOR ROCO BARRERA
 Ingeniero Civil
 Laboratorio Nacional
 Dirección de Vialidad


RZC/JSF/lpv
 Distribución:

- Director Regional de Vialidad, II Región
 - Inspector Fiscal
 - Laboratorio Regional de Vialidad, II Región
 - Constructora Fe Grande S. A.
 - Química
 - Archivo
- NP2212654
06.10.2008





CERTIFICADO DE ENSAYE N° 651

Contrato : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007, Rosario – Varillas
Región : II
Resolución : D.R.V. II N° 058 del 17.07.2007
Contratista : Empresa Constructora Fe Grande S. A.
Ensaye : **ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN GRADO DE VISCOSIDAD**
Ligante : **CA 24** Procedencia: Asfaltos Chilenos S. A.
Referencia : Ord. N° 205 del 23.06.2008.

Análisis N°	: 1	Tabla
Muestra N°	: 106	8.301.1.A
N° de Guía	: 269785	Vol. 8 – M.C.
Fecha de Muestreo	: 11.06.08	
Fecha recepción muestra en LNV	: 08.07.08	
Fecha ensaye	: 22.09.08	

Penetración, 25°C, 100g, 5s, (0.1mm)	: 64	Informar
Viscosidad Absoluta a 60°C, 300 mm Hg, (P)	: 2800	Mín. 2400
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	: +100	Mín. 100
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	: 99.9	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	: +250	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	: 51	Informar
Viscosidad Cinemática a 135°C (P)	: 5,6	Informar
Índice de Pfeiffer	: -0,3	-1.5 +1.0

Ensaye de la Mancha:
- Heptano/Xilol (%Xilol) : -30 Máx. 30

Película Delgada Rotatoria:
- Pérdida por Calentamiento (%) : 0,1 Máx. 0.8
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm) : +100 Mín. 100
- Viscosidad Abs. a 60°C 300 mm Hg (P) : 5970 Informar
- Índice de Durabilidad : 2,1 Máx. 3.5

LA FLORIDA,


VICTOR HUGO HERRERA
Ingeniero Civil
Laboratorio Regional
Dirección de Vialidad

RZC/JSF/lpv

Distribución:

- Director Regional de Vialidad, II Región
 - Inspector Fiscal
 - Laboratorio Regional de Vialidad, II Región
 - Constructora Fe Grande S. A.
 - Química
 - Archivo
- NP2195124
29.09.2008





CERTIFICADO DE ENSAYE N° 653

Contrato : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007, Rosario – Varillas.
Región : II
Resolución : D.R.V. II N° 058 del 17.07.2007
Contratista : Empresa Constructora Fe Grande S. A.
Ensaye : **ANALISIS EMULSION IMPRIMANTE**
Ligante : Emulsión Imprimante Procedencia: Química Latinoamericana S. A.
Referencia : Ord. N° 205 del 23.06.2008.

Tabla 5.401.201.A

		Vol. 5 – M.C.	
		Mín.	Máx.
Análisis N°	: 1		
Muestra	: 108		
N° de Guía	: 88080		
Fecha de Muestreo	: 10.06.08		
Fecha Recepción Muestra en LNV	: 08.07.08		
Fecha ensaye	: 02.09.08		
Viscosidad SSU a 25°C	: 38	20	100
Punto de Inflamación (°C)	: +100	90	
Densidad (Kg/cc)	: 965	960	980
Destilación :			
- Residuo (%)	: 46	20	
- Aceite (%)	: 12		15
Flotación a 50°C, (s)	: 174	60	

LA FLORIDA, 11 de Septiembre 2008

VICTOR ROCA ACUÑA
Ingeniero
Laboratorio Nacional
Dirección de Viabilidad

RZC/JSF/lpv

DISTRIBUCION :

- Director Regional Vialidad, II Región
- Inspección Fiscal
- Laboratorio Regional Vialidad, II Región
- Constructora Fe Grande S. A.
- Química
- Archivo
- NP2195124
- 29.09.2008



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN DE VIALIDAD

CERTIFICADO DE ENSAYE N° 624

Contrato : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007, Rosario – Varillas.
Región : II
Resolución : D.R.V. II N° 058 del 17.07.2007
Contratista : Constructora Fe Grande S. A.
Ensaye : **ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN GRADO DE VISCOSIDAD**
Ligante : **CA 24** Procedencia: Química Latinoamericana S. A.
Referencia : Ord. N° 152 del 15.05.2008

Análisis N°	:	1	Tabla
Muestra N°	:	72	8.301.1.A
N° de Guía	:	87770	Vol. 8 – M.C.
Fecha de Muestreo	:	04.05.08	
Fecha recepción muestra en LNV	:	29.05.08	
Fecha ensaye	:	21.08.08	
Penetración, 25°C, 100g, 5s, (0.1mm)	:	60	Informar
Viscosidad Absoluta a 60°C, 300 mm Hg, (P)	:	3820	Mín. 2400
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	:	99.8	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	:	+250	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	:	50	Informar
Viscosidad Cinemática a 135°C (P)	:	7.4	Informar
Índice de Pfeiffer	:	-0.1	-1.5 +1.0
Ensaye de la Mancha:			
- Heptano/Xilol (%Xilol)	:	30	Máx. 30
Película Delgada Rotatoria:			
- Pérdida por Calentamiento (%)	:	0.06	Máx. 0.8
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
- Viscosidad Abs. a 60°C 300 mm Hg (P)	:	8030	Informar
- Índice de Durabilidad	:	2.1	Máx. 3.5

LA FLORIDA,


GABRIELA ROJAS
Ingeniero en Civil
Laboratorio Nacional
Dirección de Vialidad

RZC/JSF/lpv

Distribución:

- Director Regional de Vialidad, II Región
 - Inspector Fiscal
 - Laboratorio Regional de Vialidad, II Región
 - Constructora Fe Grande S. A.
 - Química
 - Archivo
- NP2098238
01.09.2008



CERTIFICADO DE ENSAYE N° 625

Contrato : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007, Rosario – Varillas
 Región : II
 Resolución : D.R.V. II N° 058 del 17.07.2007
 Contratista : Constructora Fe Grande S. A.
 Ensaye : **ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN GRADO DE VISCOSIDAD**
 Ligante : CA 24 Procedencia: Asfaltos Chilenos S. A.
 Referencia : Ord. N° 152 del 15.05.2008

Análisis N°	:	1	Tabla
Muestra N°	:	77	8.301.1.A
N° de Guía	:	268623	Vol. 8 – M.C.
Fecha de Muestreo	:	04.05.08	
Fecha recepción muestra en LNV	:	29.05.08	
Fecha ensaye	:	21.08.08	
Penetración, 25°C, 100g, 5s, (0.1mm)	:	60	Informar
Viscosidad Absoluta a 60°C, 300 mm Hg, (P)	:	3420	Mín. 2400
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	:	99.9	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	:	+250	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	:	50	Informar
Viscosidad Cinemática a 135°C (P)	:	6.2	Informar
Índice de Pfeiffer	:	-0.1	-1.5 +1.0
Ensaye de la Mancha:			
- Heptano/Xilol (%Xilol)	:	30	Máx. 30
Película Delgada Rotatoria:			
- Pérdida por Calentamiento (%)	:	0.06	Máx. 0.8
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
- Viscosidad Abs. a 60°C 300 mm Hg (P)	:	7180	Informar
- Índice de Durabilidad	:	2.1	Máx. 3.5

LA FLORIDA,



GABRIELA MUÑOZ ROJAS
Ingeniera en Geotecnia
Laboratorio Regional
Dirección de Viabilidad

2008.09.03
RZC/JSF/lpv

Distribución:

- Director Regional de Viabilidad, II Región
 - Inspector Fiscal
 - Laboratorio Regional de Viabilidad, II Región
 - Constructora Fe Grande S. A.
 - Química
 - Archivo
- NP2098238
01.09.2008





CERTIFICADO DE ENSAYE N° 626

Contrato : Reposición Pavimento Ruta 5, Nuevo 2007, Los Vientos – Rosario.
 Región : II
 Resolución : D.R.V. II N° 054 del 09.07.2007
 Contratista : Constructora Fe Grande S. A.
 Ensaye : **ANÁLISIS DE CEMENTO ASFÁLTICO SEGÚN GRADO DE VISCOSIDAD**
 Ligante : **CA 24** Procedencia: Asfaltos Chilenos S. A.
 Referencia : Ord. N° 176 del 28.05.2008

Análisis N°	:	1	
Muestra N°	:	33	
N° de Guía	:	269162	
Fecha de Muestreo	:	18.05.08	
Fecha recepción muestra en LNV	:	23.06.08	
Fecha ensaye	:	21.08.08	
Penetración, 25°C, 100g, 5s, (0.1mm)	:	64	Informar
Viscosidad Absoluta a 60°C; 300 mm Hg, (P)	:	3410	Mín. 2400
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	:	99.9	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	:	+250	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	:	50	Informar
Viscosidad Cinemática a 135°C (P)	:	7.0	Informar
Índice de Pfeiffer	:	-0.1	-1.5 +1.0
Ensaye de la Mancha:			
- Heptano/Xilol (%Xilol)	:	30	Máx. 30
Película Delgada Rotatoria:			
- Pérdida por Calentamiento (%)	:	0.03	Máx. 0.8
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min (cm)	:	+100	Mín. 100
- Viscosidad Abs. a 60°C 300 mm Hg (P)	:	6740	Informar
- Índice de Durabilidad	:	1.9	Máx. 3.5

LA FLORIDA,

GABRIELA MUÑOZ BOJAS
 Ingeniera en Geotecnia
 Laboratorio Nacional
 Dirección de Vialidad

RZC/JSF/lpv

Distribución:

- Director Regional de Vialidad, II Región
 - Inspector Fiscal
 - Laboratorio Regional de Vialidad, II Región
 - Constructora Fe Grande S. A.
 - Química
 - Archivo
- NP2122677
01.09.2008

