



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**IMPACTO DE LA APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE
SELLADO CON CAPA DE PROTECCIÓN ASFÁLTICA, EN LOS
PLAZOS, COSTOS Y CALIDAD DE CONSTRUCCIÓN
DE CAMINOS SECUNDARIOS EN CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CRISTIAN MANUEL VILLAVICENCIO FIGUEROA

PROFESOR GUÍA:

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DAVID CAMPUSANO BROWN

GABRIELA MUÑOZ ROJAS

**SANTIAGO DE CHILE
2015**

RESUMEN

El presente trabajo analiza el impacto en la durabilidad, los plazos de ejecución y los costos por kilómetro construido, que genera el empleo de nuevas tecnologías de aplicación de sellos de capa de protección asfálticos del tipo Tratamiento Superficial Simple (TSS), Doble Tratamiento Superficial (DTS), Cape Seal (TSS + Lechada Asfáltica) y Microaglomerados en Frio, en las obras de caminos básicos e intermedios de la red nacional de caminos secundarios de Chile.

Las tecnologías constructivas que se estudian son las siguientes:

- a) Sellado de Grava Sincrónico (Synchronous Chip Sealing), que permite la aplicación simultánea de emulsión asfáltica y gravas pétreas en la ejecución de Tratamientos Superficiales.
- b) Micro-pavimentación Slurry, que permite aplicar sellos asfálticos superficiales con sistema Slurry en espesores de 5 mm a 15 mm y en capas múltiples.

Se revisa también las mejoras recientes de la tecnología emulsiones asfálticas, producto de la introducción de mayores porcentajes de polímeros (SBS) y látex (SBR) en su formulación, y su impacto en la durabilidad y la estabilidad de capa de protección.

La revisión de estudios realizados principalmente por agencias gubernamentales y centros de desarrollo tecnológico y mantención de carreteras de EE.UU., Nueva Zelandia, Australia y China, permite concluir que las nuevas tecnologías vienen a consolidar las ventajas de los sellos de protección como las soluciones efectivas para el problema de preservación de la inversión vial y desarrollo de caminos nuevos de tránsito medio y bajo – hasta 3000 vehículos por día.

En cuanto a la preservación de pavimentos existentes, es notoria la ventaja que muestran los Microaglomerados en Frio, ejecutados con emulsiones modificadas con polímeros y/o látex, como solución para la preservación de pavimentos existentes en adecuada condición estructural, por sus cortos plazos de ejecución y apertura al tránsito, su menor costo anual equivalente y su bajo impacto ambiental. En capas de protección nuevas aplicadas en caminos secundarios de tránsito bajo con carpeta granular, cuyo propósito es aumentar la cobertura de caminos con buen estándar de tránsito en países con déficit de infraestructura vial pavimentada, las diferencias no son notorias entre las distintas tecnologías disponibles en cuanto a costo anual equivalente y tiempos de ejecución. Sin embargo al incorporar criterios como la velocidad de crecimiento de la cobertura vial pavimentada – cuyo impacto económico es mucho mayor que la inversión vial en preservación – y el impacto ambiental, la balanza se inclina hacia las capas de protección asfáltica de tipo Tratamiento Superficial y Cape Seal con cubierta de microaglomerado en frío.

La revisión de la experiencia internacional y la evolución de la experiencia en construcción de sellos a nivel nacional, indica que las capas de protección de tipo Microaglomerado en frío, aplicado sobre Tratamientos Superficiales Simples, y los Tratamientos Superficiales Dobles (DTS) son las que ofrecerán los menores costos anuales equivalentes y en consecuencia los mayores retornos sobre la inversión vial en caminos nuevos.

A mis padres, don Jorge y doña Vilma, por su amor y esfuerzo,

.... y a mi corona de gloria, Lorreine, junto a nuestros hijos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de terminar este trabajo. Me entregó una mujer excepcional, Lorreine, una casa que nos reúne y que para su honra día a día se llena de la vida de nuestros dos hijos maravillosos, Roberto y Analía. Sin su diaria compañía, su sacrificio y su amor, esta empresa no podría haber terminado.

Doy gracias también por haber aprendido a obedecer a mis padres ya pasadas las cuatro décadas. “Honra a tu padre y a tu madre, para que tus días sean prolongados en la tierra que el Señor tu Dios te da” (Ex 20:12). Al fin lo entendí. Bien saben Uds. que sin escuchar consejo hace dieciséis años decidí inventar mi propio camino en ansias de un éxito fantasmal. Pero hoy con inmensa felicidad puedo decirle a Ud. don Jorge y a Ud. doña Vilma, que siempre tuvieron razón. Suyo más que mío es el fruto de estas páginas que les entrego con humildad y amor. Espero poder retribuir en parte su esfuerzo de toda una vida y su apoyo incondicional.

Agradezco a los profesores que participaron en este trabajo, en especial a don Federico Delfín, por su enorme paciencia, entendimiento y disposición. A don David Campusano por su consejo y gran preocupación. A los profesores de la comisión, doña Gabriela Muñoz, por su contribución en las mejoras finales, y a don Gerardo Echeverría, por su ayuda para el cierre de este trabajo.

Muchas otras personas han ayudado a que se concrete este momento. Y no puedo concluir estas palabras sin dejar de mencionar a dos. Pastor Sam Mateer quien me ha enseñado el gran valor de hacer lo correcto (*to act justly*), aunque sea tarde. Y a la Tía Margarita, que lamentablemente no alcanzo a ver más completo al hombre que siempre quiso más de lo que se merecía. En su hijo, mi gran amigo Miguel Ángel, le doy gracias.

Debo agradecer también a mis hermanos Jorge y Natalia. Por su paciencia y entendimiento. Simplemente por ser mis hermanos, se lo difícil que es.... Ahora les tocara a Uds.

A ellos y muchos otros que me han enseñado les doy las gracias.

Soli Deo gloria, Jesus Rex

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION.....	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	<i>Objetivos Generales.....</i>	<i>3</i>
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>3</i>
1.2	METODOLOGIA.....	4
1.3	RESULTADOS	5
2	DESARROLLO DE CAMINOS BASICOS EN CHILE	9
2.1	Estado General de los Caminos en Chile.....	10
2.2	Desarrollo de Caminos Rurales en el Extranjero (Nueva Zelandia)	13
2.3	El Programa de Caminos Básicos – Chile 2011.....	17
2.4	Niveles de Inversión del Programa de Caminos Básicos.....	21
2.5	Tipos de Capas de Protección Utilizadas en Chile.....	26
2.5.1	<i>Tratamiento Superficial Simple (TSS) – Primera Capa (First Coat)</i>	<i>26</i>
2.5.2	<i>Doble Tratamiento Superficial (DTS)</i>	<i>28</i>
2.5.3	<i>Tratamientos Superficiales sobre Pavimento Existente (Recapados).....</i>	<i>30</i>
2.5.4	<i>Cape Seal – Tratamiento Superficial Simple con Lechada Asfáltica</i>	<i>30</i>
2.5.5	<i>Cape Seal – Tratamiento Superficial Simple con Micropavimento Slurry.....</i>	<i>32</i>
2.5.6	<i>Capas Cape Seal sobre Pavimento Existente</i>	<i>33</i>
2.6	Comentarios del Capítulo.....	34
3	TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	36
3.1	ASPECTOS GENERALES DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES.....	38
3.1.1	<i>LOS BITUMENES EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES</i>	<i>45</i>
3.1.2	<i>EL AGREGADO (GRAVA) PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES</i>	<i>49</i>
3.2	MEJORES PRACTICAS EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	53
3.3	TIPOS DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN CHILE	58
3.3.1	<i>TRATAMIENTO SUPERFICIAL SIMPLE (TSS).....</i>	<i>59</i>
3.3.2	<i>DOBLE TRATAMIENTO SUPERFICIAL (DTS)</i>	<i>63</i>
3.4	Comentarios del Capítulo.....	67
4	SELLOS ASFALTICOS CON SISTEMA SLURRY.....	70
4.1	ANTECEDENTES GENERALES DE LOS SELLOS CON SISTEMA SLURRY.....	72

4.1.1	BREVE RESEÑA HISTORICA.....	74
4.1.2	TIPOS DE SELLOS ASFALTICOS SLURRY	74
4.1.3	APLICACIONES MÁS COMUNES	78
4.2	LECHADA ASFALTICA (SLURRY SEAL).....	80
4.2.1	MATERIALES PARA APLICACIONES DE LECHADAS ASFALTICAS	81
4.2.2	ASPECTOS CLAVES EN SELLO DE LECHADA ASFALTICA	85
4.3	MICROAGLOMERADO EN FRIO (SLURRY MICROSURFACING)	90
4.3.1	MATERIALES PARA APLICACIONES DE MICROAGLOMERADOS	93
4.3.2	ASPECTOS CLAVES EN MICROAGLOMERADOS EN FRIO	95
4.4	SELLO TIPO CAPE SEAL (TSS CON TERMINACION SLURRY)	101
4.4.1	MATERIALES PARA APLICACIONES DE CAPE SEAL	103
4.4.2	ASPECTOS CLAVES EN SELLOS TIPO CAPE SEAL	103
5	NUEVAS TECNOLOGIAS EN SELLOS DE CAPA ASFÁLTICA	111
5.1	SELLADO DE GRAVA SINCRONICO.....	112
5.1.1	EQUIPO SELLADOR DE GRAVA SINCRONICO.....	112
5.1.2	IMPACTO DE TECNOLOGIA SELLADO SINCRONICO	115
5.2	MICROPAVIMENTACION CON MEZCLA SLURRY	120
5.2.1	EQUIPO MICROPAVIMENTADOR DE MEZCLA SLURRY	121
5.2.2	IMPACTO DE TECNOLOGIA MICROPAVIMENTACION SLURRY.....	122
5.3	EMULSIONES ASFALTICAS MODIFICADAS.....	128
5.3.1	GENERALIDADES.....	128
5.3.2	EMULSIONES MODIFICADAS EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES.	128
5.3.3	EMULSIONES MODIFICADAS EN MEZCLAS SLURRY.....	129
6	ANALISIS COMPARATIVO DE SELLOS DE CAPA DE PROTECCION.....	134
6.1.1	INVERSION INICIAL, COSTO DIRECTO TOTAL POR KM	136
6.1.2	EFFECTIVIDAD, COSTO DIRECTO ANUAL EQUIVALENTE POR KM.....	137
6.1.3	ESTIMACION DEL VALOR ECONOMICO DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DE CAMINOS BASICOS EN CHILE	139
6.2	ANALISIS TECNICO	144
6.2.1	COMPLEJIDAD TECNICA DE LA CONSTRUCCION DE SELLOS	144
6.2.2	TIEMPOS DE EJECUCION Y PUESTA EN SERVICIO.....	145
6.2.3	PRINCIPALES RIESGOS CONSTRUCTIVOS	147
6.3	ANALISIS DE ECO-EFFECTIVIDAD.....	148

7	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	151
	BIBLIOGRAFIA	157
	ANEXO I.....	159

CAPITULO I

INTRODUCCION

1 INTRODUCCION

El desarrollo económico del país a tasas importantes exige una conectividad terrestre más expedita y segura, que disminuya los tiempos de traslado y favorezca la productividad del país.

Si se considera que el flujo de automóviles aumenta de forma continua año tras año, que las velocidades de circulación se incrementan con las mayores potencias en los vehículos y que por falta de control, el transporte pesado en rutas secundarias con frecuencia se realiza con sobrecargas importantes, la probabilidad de que los caminos se destruyan antes que la vida útil proyectada es muy alta.

Se debe evaluar la aplicación de nuevas tecnologías tanto en la construcción de la carpeta de rodado como en la preservación del pavimento que permita una alta eficiencia en tiempos de ejecución y la reducción de los costos de conservación de la inversión vial. Las nuevas tecnologías y la reducción de costos permitirán abordar también de manera efectiva problemas de mantenimiento y recuperación de pavimentos que en la actualidad se dejan de lado por no ser prioridad o socialmente poco rentables. Sin embargo sus impactos más relevantes serán: una mejor calidad de los sellos de protección construidos; mayores vidas en servicio de los sellos; y un mayor desarrollo de la red de caminos secundarios con buen estándar de tránsito.

El Programa de Caminos Básicos de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas establece niveles de inversión de alrededor de US\$ 8 dólares por metro cuadrado como costo directo en la ejecución de un sello de protección asfáltico para la carpeta de rodado de un camino secundario nuevo. Una solución tipo Tratamiento Superficial Doble o Tratamiento Superficial Simple con Cape Seal requiere cerca de US\$ 5 para materias primas y US\$ 3 para amortizar la maquinaria y cubrir los costos de personal durante la ejecución. Lo anterior presiona al contratista a buscar aumentos en la eficiencia de la técnica empleada en la ejecución del sello asfáltico y a aumentar la velocidad de avance de la ejecución en faena.

Con las tecnologías tradicionales intensivas en mano de obra, altas tasas de rendimiento en la aplicación del sello se ven limitadas por las características de los equipos y la coordinación entre el personal encargado de los trabajos. La necesidad de rendimiento produce un relajamiento en el control de la correcta ejecución, perjudicando la calidad final de la carpeta de rodado terminada. Todos los estudios revisados indican como un factor determinante en el éxito final de estas aplicaciones la experiencia y capacidad técnica del constructor.

Actualmente las calidades de terminación observadas son muy variadas, existiendo aplicaciones de sellos de protección asfáltica que presentan un deterioro importante de la carpeta de rodado al primer año de uso y otros cuyo estándar de tránsito se mantiene en niveles aceptables por sobre los 4 años desde la entrega en servicio.

Uno de los medios más rápido, práctico y económico para la ejecución de sellos asfálticos del tipo tratamiento superficial es la tecnología síncrona de sellado con grava (Synchronous Chip Sealing) – que se presenta y analiza en este estudio –, la cual permite un alto rendimiento y una menor intervención de mano de obra, contribuye a homogeneizar la aplicación, mejorar su calidad y aumentar el retorno de la inversión en la construcción. Esta técnica constructiva puede emplearse tanto a nivel de la superficie de la carpeta de rodado (TSS y DTS) como en el sellado con grava de recubrimiento en la capa inferior (sello asfáltico en dos capas con terminación superior de mezcla Slurry o Cape Seal).

Se estudia además las nuevas tecnologías para la Micropavimentación con sistema Slurry (Microaglomerados en Frio). Esta técnica a diferencia de las lechadas asfálticas tradicionales (monocapa) permite instalar mezcla slurry en espesores de 8 mm a 20 mm terminados, y en más de una capa según necesidad. Al emplearse con emulsiones asfálticas modificadas con polímeros o látex, de mayor calidad, se puede ejecutar en capas múltiples favoreciendo la durabilidad del sello. Los sellos slurry se han aplicado en Chile desde la década de 1990, pero en espesores delgados y generalmente con emulsión estándar de quiebre lento tipo CSS-1H. Aún su aplicación en mantención de rutas principales y carreteras concesionadas ha sido limitada, lo que contrasta con la experiencia observada en países más desarrollados. Factor ha sido la falta de experiencia de los constructores, lo cual evidencia la existencia de una brecha técnica y tecnológica importante para el desarrollo de la mantención vial nacional.

Este estudio busca también evaluar el impacto de la aplicación de Microaglomerados en frío para mejorar la terminación superficial, reducir el ruido de tránsito, y prolongar la vida de carpetas de TSS y DTS. Se compara su empleo con los recubrimientos tradicionales tipo lechada asfáltica de bajo espesor y menor costo. La documentación revisada muestra que los Microaglomerados en frío han desplazado a las lechadas asfálticas debido a que con un costo levemente mayor, el aumento en la vida útil de servicio que logra el pavimento intervenido muestra ser más del doble. Además por las mejoras en propiedades constructivas de los Microaglomerados, el espectro de problemas de deterioro del pavimento en el que pueden intervenir es más amplio, permitiendo corregir las pequeñas deformaciones presentes en la superficie, el ahuellamiento de la calzada, y controlar el avance de los agrietamientos superficiales.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Generales

Analizar el impacto de nuevas tecnologías en los plazos de ejecución, los costos de construcción y la calidad de las capas de protección asfálticas empleadas en el desarrollo y la mantención de la red nacional de caminos secundarios de Chile.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Recopilar y estudiar los antecedentes disponibles respecto a la aplicación de estas tecnologías en el país y en el extranjero, correspondientes al uso e impacto de las tecnologías de Sellado de Grava Sincrónico (Synchronous Chip Sealing) y a la Micropavimentación Slurry o Cape Seal, en la efectividad y calidad de los sellos asfálticos en cuya construcción intervienen.
- ii. Analizar y evaluar si la utilización de estas nuevas tecnologías conlleva una mejora sustancial en el estándar de ejecución de los sellos asfálticos con respecto de los procesos de ejecución tradicionales que actualmente se utilizan en el país, específicamente en relación a su impacto en los costos y tiempos de ejecución de la construcción nueva y mantenimiento de caminos secundarios de la red vial chilena.
- iii. Estudiar, analizar y exponer nuevos antecedentes, junto con criterios de evaluación, que consideren el impacto en costos y en efectividad del uso de estas nuevas tecnologías, y así facilitar las decisiones de inversión vial cuando se comparan las distintas opciones económicamente viables para la construcción nueva de caminos secundarios y su mantenimiento.

1.2 METODOLOGIA

- a) Recopilar toda la información relativa a las nuevas tecnologías, Sellado de Grava Sincrónico - Synchronous Chip Sealing - y Micro-pavimentación Slurry.
- b) Recopilar información acerca del estado de desarrollo y la utilización de estas tecnologías en otros países. Estudios de evaluación de resultados y especificaciones técnicas.
- c) Recopilar información acerca de la aplicación de estas tecnologías en Chile y sus resultados. Especificaciones técnicas, estudios relacionados y definiciones de política de desarrollo vial relacionadas.
- d) Recopilar información sobre los grados de aceptación que presentan estas tecnologías, y sus antecesoras, en la construcción de sellos de protección asfálticos en el país.
- e) Recopilar la información sobre la difusión y resultados de éstas soluciones de sello asfáltico en otros países.
- f) Recopilar información sobre la evolución de estos tipos de sellado asfáltico en los países donde presentan mayor desarrollo.
- g) Estudio comparativo de costos por tipo de sellos asfáltico. Evaluación del costo anual equivalente para cada tipo y comparación con el costo anual equivalente de un estándar tradicional de carpeta delgada con mezcla asfáltica en caliente.
- h) Recopilar información conducente a nuevos criterios de evaluación de las soluciones estudiadas que sean complementarios e incorporen las tendencias actuales.
- i) Análisis y estudio de las tendencias mundiales en sellos de protección asfáltica y su aplicación.
- j) Propositiones y conclusiones.

1.3 RESULTADOS

- i. El presente estudio muestra que la tecnología síncrona de sellado con grava (Synchronous Chip Sealing) permite reducir los costos directos de equipos en más de un 30% y los tiempos de ejecución por kilómetro construido en un 50%, para aplicaciones de Tratamiento Superficial Simple (TSS) y Doble Tratamiento Superficial (DTS).
- ii. Se concluye además que la tecnología síncrona de sellado con grava contribuye a mejorar la calidad de terminación de sellos de protección asfálticos del tipo Tratamiento Superficial Simple (TSS) y Doble Tratamiento Superficial (DTS), en cuanto a:
 - a. una mayor homogeneidad de la aplicación de grava,
 - b. un mayor control y aprovechamiento de las temperaturas de trabajo en las emulsiones – lo cual permite una mayor adherencia de la grava,
 - c. un menor desperdicio de materias primas,
 - d. un mejor control de las dosificaciones de emulsión – lo cual reduce el riesgo de exudación.
- iii. Un impacto positivo no previsto del uso de la tecnología síncrona de sellado con grava es que al ser menos dependiente de la Mano de Obra, reduce el riesgo de calidad final deficiente por mala operación y/o ejecución en terreno. De acuerdo a los estudios internacionales consultados, el factor “experiencia del contratista”, que incluye la coordinación en terreno del equipo que aplica el sello y el conocimiento técnico de los encargados de terreno, es el factor técnico no controlable que más incide en la calidad final lograda para un sello de este tipo.
- iv. El estudio muestra que la Micropavimentación Slurry en espesores de 8 mm a 15 mm mejora significativamente la calidad de terminación y durabilidad de sellos de protección asfálticos del tipo Cape Seal. Si se le compara con las terminaciones de Cape Seal con lechada asfáltica tradicional, de espesores entre los 3 mm y los 8 mm, su durabilidad es al menos un 50% más en tiempo de servicio, para un costo solo un 20% mayor.
- v. El estudio muestra que el sello de protección asfáltico tipo Cape Seal modificado, que combina una primera capa de TSS con emulsión modificada con polímeros, por las mejores propiedades mecánicas que incorporan las emulsiones tipo CRS-2 modificado, más una segunda capa de Microaglomerado en Frio Tipo C1 (cuya especificación técnica exige emulsión modificada con polímeros) en espesor de 8 mm a 15 mm, es la solución que presenta una mejor relación costo-efectividad para los presupuestos actuales de inversión

del Programa de Caminos Básicos de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile – medido en términos de costo directo anual equivalente.

- vi. La solución de Cape Seal mencionada en el punto v. anterior, permite aumentar la cobertura en Km. de caminos nuevos en un 50%, respecto de la solución de Asfalto en Caliente de Espesor Delgado (MAC de 5 cm. De espesor), para un mismo presupuesto de inversión vial, y su vida en servicio es equivalente. De acuerdo a un estudio del Banco Mundial sobre el impacto de la inversión en caminos de China durante el periodo 1985-2002, cada peso invertido en el aumento de la cobertura en Km de pavimentos básicos en caminos rurales no pavimentados, generó un impacto 4 veces mayor medido en crecimiento económico del área de influencia del camino intervenido. Por lo anterior un 50% más de cobertura en Km generará un 200% más de crecimiento económico en el área de influencia del camino.
- vii. La simulación de estrategias para el desarrollo de caminos básicos muestra que la alternativa de mayor retorno, o valor presente neto, es la que considera un primer sello del tipo TSS, seguido de mantenciones preventivas regulares en Micropavimento a partir del segundo año de servicio. Esta alternativa muestra un Valor Presente casi tres veces superior a la segunda estrategia con mejor retorno económico.
- viii. La misma simulación muestra que la necesidad de capital de trabajo para colocar en funcionamiento las alternativas de desarrollo fue menor al retorno económico para las tres alternativas de sello de capa de protección asfáltico analizadas: TSS, DTS y Cape Seal. Es decir las tres son alternativas de inversión rentables para caminos básicos.
- ix. Si bien los resultados numéricos de retorno marginal empleados en la simulación anterior no tienen mayor respaldo en los datos de la economía chilena, un descubrimiento importante fue constatar que la estrategia de desarrollo más eficiente es muy similar a la política de desarrollo de caminos rurales que se ha empleado por años en Nueva Zelandia. Dados los buenos indicadores de desarrollo económico y social de ese país, se puede concluir que una política de desarrollo vial que ponga el énfasis en el avance en kilómetros de cambio de estándar – de grava a pavimentado – por sobre el tipo de pavimento, privilegiando las soluciones económicas y la adecuada mantención de éstas inversiones, genera mayores beneficios económicos que el cambio a un pavimento más duradero pero mucho más costoso.
- x. Las contribuciones de las nuevas tecnologías de aplicaciones de sellos de capa de protección asfáltica estudiados en este informe al progreso de la técnica, son:

- a. Mayor estandarización de los procesos constructivos en los sellos de capa asfáltica (TSS, DTS y Cape Seal), reduciendo la alta dependencia en la experiencia y conocimiento del constructor que demanda la técnica tradicional.
 - b. Mayor control en la ejecución de los sellos y mejor utilización de los materiales.
 - c. Reducción de los tiempos de ejecución.
 - d. Mejor calidad de terminación y mayor duración en servicio de los sellos tipo TSS, DTS y Micropavimento con mezcla slurry.

- xi. La técnica de aplicación de Primera Capa de TSS o DTS, sobre una superficie de granular preparada, empleada en Nueva Zelanda y en EE.UU. no considera la aplicación de riegos de imprimación previos a la primera capa. El sello se aplica directamente sobre la capa granular compactada con una dosificación de emulsión que considere un porcentaje de absorción de la emulsión por parte de la superficie granular. Las ventajas de ésta práctica son:
 - a. Se logra proteger rápidamente la base granular después de su preparación, evitando su deterioro estructural por la adición de agua en exceso. Esto contribuye a la durabilidad del sello.
 - b. Se reduce en 1 día el tiempo de construcción del sello por cada tramo de construcción. No se requiere esperar entre la aplicación de la imprimación y la aplicación de la primera capa de TS.
 - c. Especialmente cuando se trabaja sobre bases granulares de graduación abierta, al aplicar el sello directo sobre la capa granular se logra una mayor compenetración y adherencia entre el la superficie de ésta y el sello asfáltico.

- xii. Finalmente, un estudio de Eco-eficiencia presentado por BASF en el año 2010 (Takamura K. , 2010), muestra que un sello de Microaglomerado en Frio Tipo C1, consume un 50% menos de energía, demanda un 50% menos de materias primas, y genera un 50% menos de residuos que una aplicación de una carpeta de Mezcla Asfáltica en Caliente de 5 cm.

CAPITULO II

DESARROLLO DE CAMINOS BASICOS

GENERALIDADES

2 DESARROLLO DE CAMINOS BASICOS EN CHILE

Este capítulo tiene por objetivo introducir el problema del desarrollo de la infraestructura vial rural en Chile. La revisión de la realidad nacional se hace en base a la información pública relacionada con el Programa de Caminos Básicos que en el año 2003 comenzó a implementar la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (Dirección de Vialidad MOP, 2014), que durante el año 2009 tuvo una evaluación detallada por parte de la Dirección de Presupuestos (DIPRES) publicada en el Informe Final de Evaluación del Programa de Caminos Básicos (DIPRES - Gobierno de Chile, 2009), y que se formalizó en Resolución D.V. N°1076 de 04.03.2011, donde la Dirección de Vialidad instituyó oficialmente el programa.

Nuestro enfoque de desarrollo de caminos rurales se contrasta con la experiencia internacional de desarrollo vial rural en un país como Nueva Zelanda, de geografía y clima similar respecto a la zona central y sur de Chile, que siendo una economía fundamentalmente agropecuaria y con una población tres veces menor a la chilena, fue capaz de desarrollar una red vial con más de 60.000.- Km de caminos pavimentados (más de 80% con capas de protección). Esta comparación permitirá establecer relaciones útiles para evaluar la efectividad de las prácticas constructivas y de los programas de desarrollo de infraestructura rural nacionales.

LONGITUD DE CAMINOS RED VIAL NACIONAL, SEGUN REGION Y TIPO DE CARPETA - DIC. 2013
(Longitud en km.)

Región	Red Vial Pavimentada					Red Vial No Pavimentada				TOTAL	
	Asfalto	Hormigón	Asfalto / Hormigón	Asfalto / Ripio	CCBB Intermedi	Solucion Basica		Sin Tratamiento			
						Capa Proteccion	Granular Estabilizad	Ripio	Tierra		
I	1.055	0	-	-	-	284	271	381	1.516	3.507	
II	1.852	3	-	-	-	126	676	406	2.562	5.625	
III	1.087	5	-	-	-	295	2.221	697	2.571	6.875	
IV	1.300	41	10	-	31	97	797	1.886	830	4.992	
V	1.132	211	23	-	2	1.053	-	493	263	3.177	
VI	1.181	71	49	-	-	642	-	830	767	3.540	
VII	1.499	166	75	-	79	306	325	2.861	1.617	6.927	
VIII	2.055	147	30	-	-	376	90	4.787	1.576	9.061	
IX	1.448	101	99	-	-	318	362	7.172	2.500	12.000	
X	1.385	146	50	-	-	389	1	5.008	436	7.414	
XI	227	151	-	-	-	20	191	2.106	203	2.898	
XII	27	586	-	-	-	124	157	2.175	279	3.347	
R.M.	1.183	189	87	-	37	748	1	352	173	2.769	
XIV	650	61	99	-	3	229	-	1.778	300	3.121	
XV	433	0	-	-	-	153	235	149	1.229	2.199	
Total	16.514	1.878	521	-	152	5.160	5.326	31.081	16.820	77.451	
Subtotal 2	Total red Pavimentada Tradicional					19.065	CCBB	10.486	Sin Trat.	47.901	77.451
Subtotal 3	Total Red Pavimentada + Capa Protección Asfáltica					24.225	Total Sin Pavimentar	53.227			77.451

Tabla. 2.1.- Composición Red Nacional de Caminos. Diciembre 2013.

2.1 Estado General de los Caminos en Chile

Como se aprecia en la Tabla 2.1., la red nacional de caminos está compuesta por aproximadamente 77.500.- Km de rutas, de los cuales unos 24.200.- Km presentan algún tipo de pavimento en su capa de rodadura.

El detalle de la red muestra que en Chile contamos con cerca de 16.500.- Km de caminos de asfaltos (de los cuales unos 2.500.- corresponden a rutas concesionadas). Los caminos pavimentados se completan con 1.900.- Km de caminos construidos con carpetas de hormigón, a los cuales se debe agregar los 500 Km de rutas mixtas (hormigón/asfalto) y 152 Km de Caminos Básicos Intermedios.

La costumbre de desarrollo vial en Chile indica que desde el punto de vista constructivo las capas de protección en la red de caminos básicos no son parte de la red pavimentada. Sin embargo en la documentación se expresa que desde el punto de vista de los usuarios una capa de rodadura del tipo capa de protección si puede considerarse como pavimento. A diciembre de 2013, la red nacional contabilizaba 5.300.- Km.- de caminos con algún tipo de capa de protección asfáltica.

En la figura 2.1 se resume la evolución de la red pavimentada chilena durante el decenio comprendido entre el año 2004 al año 2013.

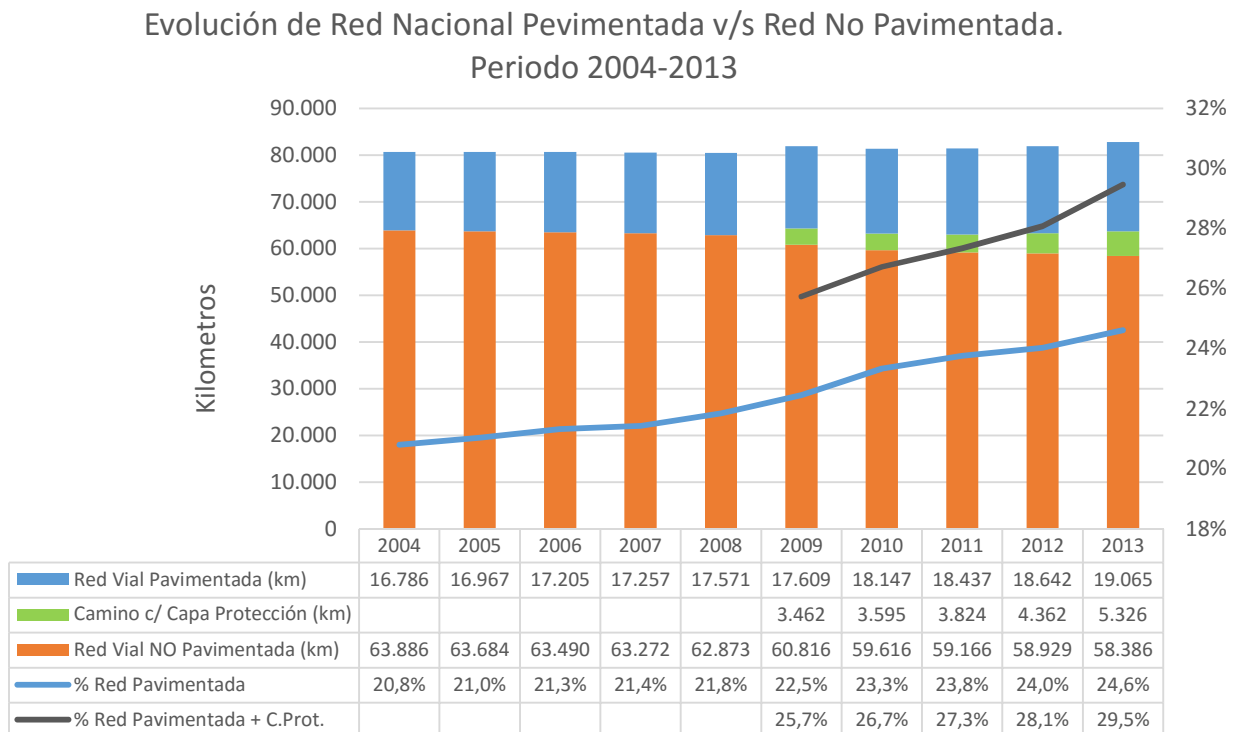


Fig. 2.1.- Evolución Red Nacional de Caminos.

Como muestra la figura 2.1 para el quinquenio 2004-2008 no existe información desagregada respecto de la cantidad kilómetros cubiertos con capas de protección. La estadística agregada de la Dirección de Vialidad hasta el día de hoy considera que las capas de protección no son parte del conjunto de soluciones consideradas como kilómetros pavimentados de red. Sin embargo a partir del año 2009, cuando el programa de caminos básicos comienza a incrementar sus inversiones en capas de protección – no en estabilización con adición de sales –, se muestran los datos desagregados. El énfasis de la política nacional de desarrollo vial y sus inversiones ha estado históricamente en las soluciones tradicionales de mezcla asfáltica en caliente y hormigón.

Una posible causa para esta clasificación de las capas de protección fue que la aplicación de estos sellos surgió como un innovador método para reducir los costos de mantenimiento periódico en la red de caminos básicos y no pavimentados. En un principio el fuerte de la inversión del programa de caminos básicos se destinó al control del polvo en suspensión y la disminución de necesidades de mantención periódica en caminos rurales. Esto se lograba a través con la adición de sales estabilizadoras en capas granulares de rodadura, técnica empleada desde principios de los años '90. Sin embargo a medida que el programa maduró, la inversión se fue concentrando en capas de protección de mayor duración y bajo costo relativo, como las del tipo Tratamiento Superficial, Simple (TSS) y Doble (DTS o TSD), la aplicación de sellos slurry directos o mixtos, tipo Cape Seal. Como resultado el balance a Diciembre de 2013 muestra que un quinto de la totalidad de las superficies pavimentadas o cubiertas con capas asfálticas son del tipo capa de protección.

Respecto del valor del patrimonio vial, a Diciembre de 2009 este ascendía a MM USD\$ 29.928.- valorado al máximo teórico que representa el costo de mantener la red cercana a su condición de servicio inicial (Dirección de Vialidad, MOP, 2010). Se escoge esta valorización teórica porque representa mejor el costo de construcción de la red. El detalle muestra que el valor teórico de los 15.202.- Km de rutas con carpeta de asfalto tradicional y hormigón llegaba al año 2009 a unos MM USD\$ 9.840.- con un costo promedio por km de USD\$ 650.000.- Por su parte los 2.407.- km de rutas concesionadas (que incluyen prácticamente la totalidad de las dobles vías del país) se valorizaban a MM USD\$ 6.417.- con un costo promedio por km de USD\$ 2.666.000.- El costo de desarrollo de los 57.355.- Km de caminos no pavimentados, tanto de ripio como de tierra, se valorizaban a MM USD\$ 13.152.- equivalentes a un costo promedio por km de USD\$ 230.000.- Por último los 3.461 Km de caminos con capa de protección, que existían a esa fecha, se valorizaron a MM USD\$ 519.- equivalentes a un costo promedio por Km de USD\$ 150.000.- Ver fig. 2.2.-

Como es imposible que el costo patrimonial total por Km de un camino con capa de protección sea inferior al costo del camino sin pavimentar en condición de ripio o tierra, los datos anteriores indican que la valorización patrimonial se hace en base al costo de construcción del último cambio de estándar de la carpeta de rodadura del camino, no adicionando a este costo el valor

del camino sin pavimentar. Se debe ajustar el valor patrimonial total adicionando a los km de la red pavimentada el costo de desarrollo del camino en su primera condición de tránsito, que fue de tierra o ripio. Para esto se debe agregar MM USD\$ 4.850.- al valor patrimonial total, lo cual equivale al costo histórico original de la red no pavimentada que se cubrió con algún tipo de pavimento (USD 230.000.- por Km de pavimento o capas de protección).

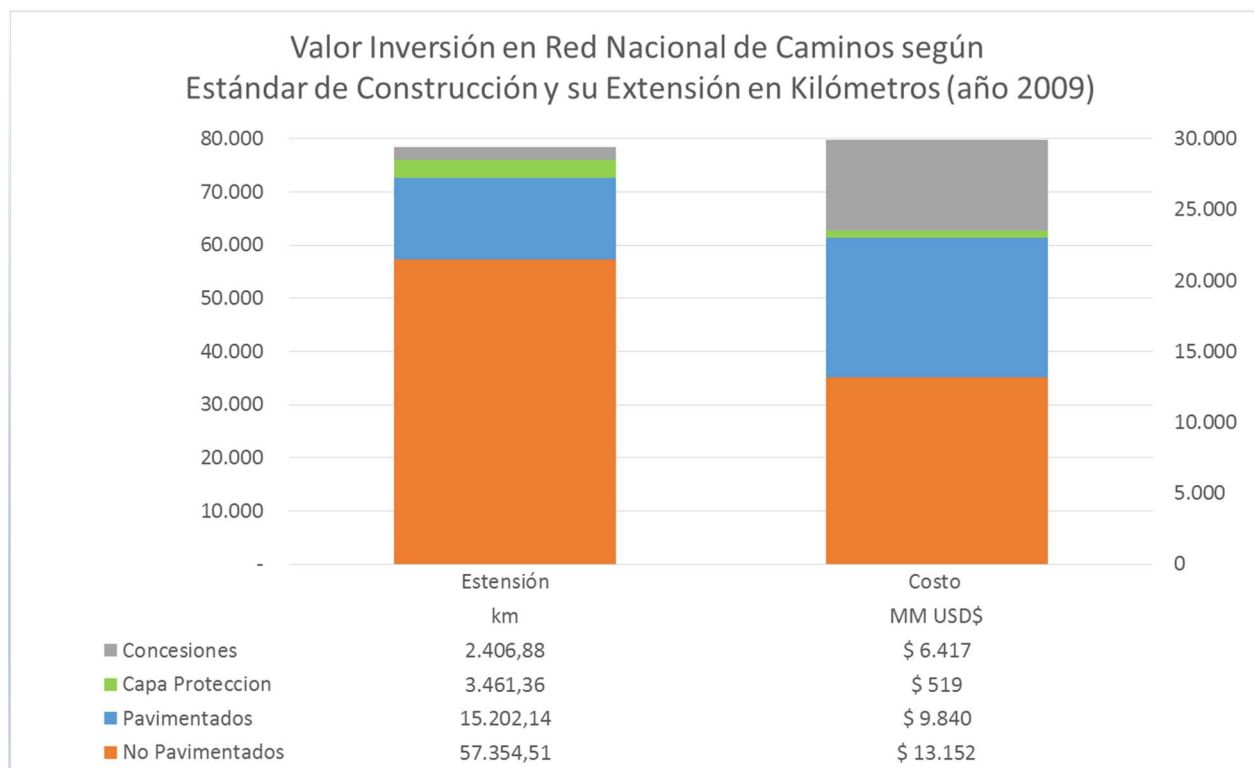


Fig. 2.2.- Valorización Patrimonio Vial Red Nacional de Caminos en Dólares de 2009.

Por lo anterior surge la pregunta de cuál sería el valor patrimonial de toda la nuestra red nacional de caminos rurales. Es decir, cuánto costaría pavimentar la red no pavimentada y llevarla a un estándar mínimo de tránsito seguro y expedito para los usuarios. En qué plazo se puede plantear este objetivo, bajo un plan de inversión en pavimentación de nuevos caminos que mantenga los niveles de los últimos tres años. Y que aspecto es más conveniente priorizar en la política vial nacional: acelerar la cobertura con soluciones económicas – mediante el empleo de capas de protección, o privilegiar un alto estándar de servicio con soluciones de mezcla asfáltica en caliente con buen nivel de saneamiento – que alargan la vida de servicio de los caminos. En lo que sigue de este estudio se pretende avanzar en la respuesta a estos planteamientos.

2.2 Desarrollo de Caminos Rurales en el Extranjero (Nueva Zelanda)

Nueva Zelanda cuenta con una red de caminos de más de 92.000.- km. De estos unos 60.000.- están pavimentados y casi en su totalidad han sido desarrollados con cubiertas superficiales del tipo Tratamiento Superficial (Chipseal). Este tipo de sello es la solución dominante en el país y es empleada en un rango amplio de situaciones, cubriendo las necesidades de servicio presentes en caminos rurales, carreteras nacionales, calles suburbanas y autopistas. Las mezclas asfálticas tienden a ser usadas solo en autopistas urbanas de alto tráfico, calles urbanas y, en general, en las situaciones de alto tráfico y esfuerzo de corte superficial, donde los tratamientos superficiales han mostrado desempeños pobres. (Gundersen, 2008).

La experiencia neozelandesa en tratamientos superficiales es de más de 80 años de desarrollo y aplicación de la técnica. En la década de 1930 se presenta en este país un estudio de ingeniería que definió el método de diseño y construcción de Tratamientos Superficiales, constituyendo el primer antecedente técnico del método de *Chipseal* (tratamiento superficial) mundialmente conocido (Hanson, 1935), que es el fundamento de definiciones posteriores (McLeod, 1969). Este dato es relevante ya que Nueva Zelanda, al igual que Chile, es un país cuyo éxito económico se basa en la buena explotación de sus recursos naturales y agropecuarios.

Evolución de Red de Caminos en Nueva Zelanda.
Periodo 2004-2013



Fig. 2.3.- Evolución Red de Caminos en Nueva Zelanda. (New Zealand Transport Agency, 2014)

La economía neozelandesa registró el 2013 un PIB de MM USD 182.590.- con una población estimada de 4,5 millones de personas. Su PIB per cápita fue de USD 41.842. Geográficamente Nueva Zelandia cuenta con una superficie de 268.680 Km² repartidos principalmente en dos islas mayores que concentran un 90% de ésta superficie. La morfología del territorio es alargada, con unos 1.300 km aprox. de longitud, y un ancho promedio aproximado de 200 km. Para dotar esta geografía de una adecuada comunicación terrestre por caminos y carreteras, actualmente se contabilizan más de 94.000 Km de rutas, de las cuales un 67% esta pavimentado. Los indicadores de desarrollo vial muestran que el país tiene 20,8 Km de caminos por cada 1000 habitantes, de los cuales 14,0 Km están pavimentados. Espacialmente el país cuenta con 349.5 Km de caminos por 1.000 Km² de superficie, de los cuales 2/3 están pavimentados. Ver fig. 2.3.-

Como comparación nuestra economía alcanzó el año 2013 un PIB de MM USD 277.200 con una población estimada en 17,7 millones de personas. El PIB per cápita de Chile fue de USD 15.732 el año 2013 (Banco Mundial, 2014). Si bien Chile continental cuenta con 756.000.- Km² de superficie, 240.000 Km² corresponden a las regiones XI y XII que están prácticamente desconectadas del resto del territorio. De esta forma la extensión del territorio chileno entre la I y la X región es de aproximadamente 2.700 Km. con un ancho promedio aproximado de 150 Km, geomorfología similar a la neozelandesa. Nuestros indicadores de desarrollo vial muestran 4,5 Km de caminos por cada 1000 habitantes, de los cuales 1,4 Km están pavimentados. Espacialmente, sin considerar las dos regiones extremas del sur de Chile, el país cuenta con 150,4 Km de caminos por cada 1.000 Km² de territorio, de los cuales menos de 1/3 están pavimentados.

Los datos de la fig. 2.3.- también muestran un lento crecimiento de la red vial pavimentada durante la última década en Nueva Zelandia. Tan solo 3.408 Km de caminos locales con capas de protección y menos de 50 km de autopistas. Lo anterior se explica en que a medida que aumenta la cobertura de la red pavimentada, aumentan también las necesidades de mantenimiento preventivo de la misma. El grueso de la inversión vial en este país se destina al mantenimiento de la inversión en su red vial.

En Nueva Zelandia los Tratamientos Superficiales (TS) han sido empleados exitosamente en un amplio rango de solicitudes de tránsito – hasta 20.000 vehículos por calzada por día (TMDA) e incluso más. En Auckland se observa una autopista semiurbana con cubierta de TS multicapa, de tres calzadas por dirección, que ha resistido por más de 19 años un tránsito que se ha incrementado desde 90.000 vehículos por día a más de 160.000 vehículos por día. Las limitaciones al uso de TS en este país se dan más por condiciones particulares de excesivo esfuerzo de corte superficial (shear traffic stress) que por razones de alto número de vehículos que transitan por día.

La decisión de construir una capa de protección de tipo TS para una determinada condición de proyecto, y cual tipo construir, se basa en un modelo de decisión técnico-económico denominado

RAMM (Road Asset Maintenance Management system - sistema de Administración de Mantenimiento de Inversión Vial) desarrollado en base a los abundantes datos del desempeño histórico de los TS existentes en el país. Este resultado se ajusta en la práctica por la experiencia y criterios ingenieriles del administrador de la red vial, del diseñador y del constructor a cargo de los trabajos.

La tabla 2.2. muestra las vidas de servicio antes de la falla de la capa de sello típicamente observadas, según el manual RAMM. Es notorio el mejor desempeño de las soluciones de dos capas (DTS) respecto de las soluciones monocapa (TSS), tanto como primeras aplicaciones sobre bases granulares así como cuando se aplican como recapados de carpetas de pavimentos envejecidos o en regular estado. Esta característica hace que los DTS se hayan constituido en la solución de capa de protección dominante en el país, preferencia que se repite en Chile aunque con vidas útiles observadas muy inferiores a los resultados neozelandeses.

VIDAS DE SERVICIO ESPERADAS EN TS PARA DISTINTOS VOLUMENES DE TRANSITO

Fuente manual RAMM – NZ 2004

Tipo de Tratamiento Superficial	Transito 1 (<100 TMDA)	Transito 2 (100-500 TMDA)	Transito 3 (500-2000 TMDA)	Transito 4 (2000-4000 TMDA)	Transito 6 (4000-10000 TMDA)	Transito 6 (10000-20000 TMDA)
	<i>Vida de Servicio (años)</i>					
PRIMERA CAPA SOBRE BASE GRANULAR (First Coat)						
TSS - 9,5 mm máx	1	1	1	1	1	1
TSS - 13 mm máx	3	2	1	1	1	1
TSS - 16 mm máx	4	3	2	1	1	1
DTS - 14 y 7 mm máx	6	4	3	2	2	1
DTS - 16 y 9,5 mm máx	8	6	5	4	3	2
DTS - 19 y 13 mm máx	10	8	6	5	4	3
RECAPADO DE SUPERFICIE (Reseals)						
TSS - 9,5 mm máx	8	7	6	5	4	3
TSS - 13 mm máx	12	10	8	7	6	5
TSS - 16 mm máx	14	12	10	9	8	7
DTS - 14 y 7 mm máx	14	12	10	9	8	6
DTS - 16 y 9,5 mm máx	16	14	12	11	10	8
DTS - 19 y 13 mm máx	18	16	14	13	12	10

Tabla. 2.2.- Vida de Servicio esperada por nivel de tránsito soportado por TS. NZ RAMM Manual.

De acuerdo a la experiencia sintetizada en el RAMM, los indicios de que un TS ha llegado al fin de su vida de servicio son principalmente:

- Lavado de la superficie (flushing). Excesivo desprendimiento de grava que deja el bitumen expuesto, debido a la pérdida de la macrotextura de protección.
- Agrietamiento (cracking). Debido a la oxidación del bitumen que lo hace perder su flexibilidad y resquebrajarse.
- Reducción del índice de fricción. Debido al pulido de la macrotextura del camino.
- Agrietamiento y lavado superficial debido a fallas de la capa estructural.

Nueva Zelanda tiene la particularidad que todos los trabajos de construcción y mantenimiento de caminos son llevados a cabo por contratistas, ya que ninguna institución gubernamental está autorizada para llevar a cabo este tipo de trabajos. Además todo el diseño y la supervisión de los contratos deben ser hechos por consultores independientes y corporaciones gubernamentales no dependientes del nivel central.

Esta característica explica que los contratos de construcción y mantenimiento de la red vial tiendan a dejar la responsabilidad por desempeño de la solución del lado del contratista, estableciendo mecanismos de premios y sanciones asociados al buen o mal comportamiento de los caminos, definido como desviaciones respecto de los mínimos aceptable establecidos en el proyecto. Los tipos de contratos dominantes son:

1. **Por especificaciones basadas en el método constructivo.** Corresponde a la forma tradicional de contratar donde el ingeniero está a cargo del diseño y la supervisión de los trabajos. Las garantías de correcta ejecución se extienden por seis meses o un año.
2. **Por especificaciones basadas en el desempeño.** Aquí los requerimientos de materiales son mínimos pero se define una vida de servicio mínima esperada para la capa desde la fase de diseño. El diseño y la construcción de la solución son responsabilidad del constructor, quien debe presentarlas para su aprobación respecto de los mínimos exigidos. Se establece un periodo de prueba para la capa de sello de 11 meses, al cabo de los cuales se hacen mediciones en terreno de indicadores de desempeño del camino y de su sello que permiten extrapolar su vida probable en servicio con el empleo de un modelo de deterioro. Si la vida iguala o excede a la vida de diseño, se reintegran al contratista las garantías y retenciones. De ser deficiente el resultado, el contratista debe corregir.

Dado que gran parte de la responsabilidad sobre el diseño final del sello tipo TS y del desempeño del camino en explotación recaen en el contratista, al año 2008 Nueva Zelandia solo contaba con 24 contratista calificados para la construcción de carreteras nacionales (Gundersen, 2008).

2.3 El Programa de Caminos Básicos – Chile 2011

El año 2003 la Dirección de Vialidad (D.V.) comenzó a implementar el programa Caminos Básicos, el cual cambió significativamente el concepto tradicional de conservación de la red vial no pavimentada del país. Este programa reorganizó y dio prioridad a una serie de iniciativas individuales de las direcciones regionales de la D.V. las cuales desde inicios de la década de 1990 venían innovando con soluciones no tradicionales para la mantención de la red no pavimentada. En la Región de Atacama se habían aplicado sales disminuyendo ostensiblemente el polvo y la frecuencia de las intervenciones, lo que luego se adopta como una forma regular de conservación. Por otro lado en la Región de Valparaíso se venían aplicando capas de protección asfáltica delgadas con los mismos fines.

El desafío que se impone la Dirección de Vialidad el año 2003 fue mejorar la superficie de rodadura de 5.000 Km de caminos de bajo tránsito con soluciones económicas adecuadas a sus bajas solicitudes. Así surgió el Programa Caminos Básicos 5.000 que se promocionó como la “segunda revolución vial” – la política de Concesiones se consideraba la primera. El plazo para la meta fue Marzo de 2006, y fue cumplida en Octubre de 2005 con cinco meses de anticipación. La gran mayoría de estos 5.000 primeros kilómetros solo consideraron la utilización de estabilización de la carpeta granular con la adición de sales para controlar el polvo en suspensión y reducir la necesidad de mantención periódica de las capas granulares.

En el año 2007, la Dirección de Vialidad se autoimpuso una segunda meta que fue continuar con otros 5.000 km para completar 10.000 Km antes de Marzo de 2009. Esta meta se cumplió a tiempo aunque de los 10.000 km intervenidos en el periodo 2003-2009 solo un 38% consideró algún tipo de capa de protección asfáltica.

La figura 2.2 muestra esta evolución de los resultados del programa de Caminos Básicos en los últimos 4 años. Desde el 2009 en adelante la tendencia ha sido concentrar la inversión en soluciones de sello con capa de protección asfáltica o con mezclas de asfalto en caliente en espesor delgado. Se puede observar que los kilómetros totales de avance (mezcla asfáltica y capa de protección) han sido unos 830 Km por año, para el cuatrienio 2010-2013. A este ritmo de avance en pavimentación, los casi 53.227 Km de red no pavimentada se cubrirían en un plazo de 64 años. Además del total de km pavimentados un 56% se pavimentó con algún tipo de capa de protección asfáltica. Esta tendencia hacia un mayor empleo de sellos se ha acentuado en los

últimos dos años donde el porcentaje de kilómetros de sellos de capa respecto del total pavimentado fue mayor al 70%.

Sin embargo, como se comenta el punto 2.4.- medido en pesos, las soluciones de mezcla de asfalto en caliente siguen concentrando la inversión.

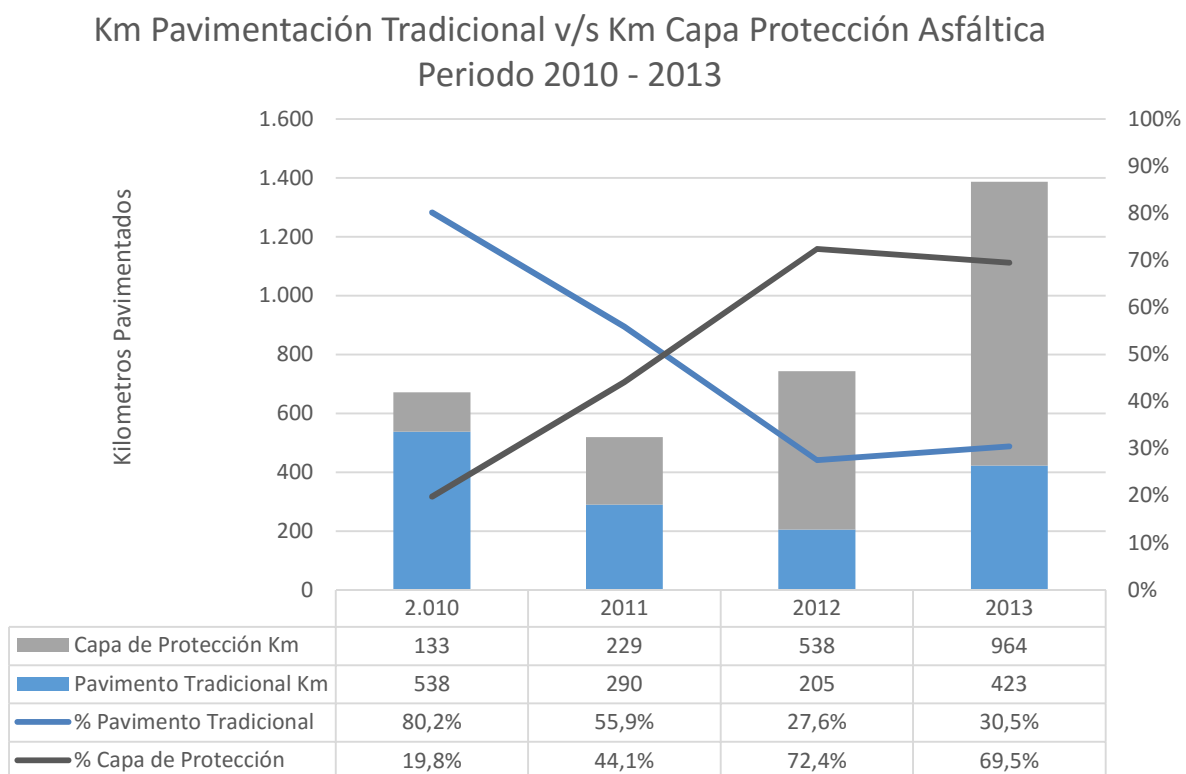


Fig. 2.3.- Evolución empleo de Mezcla Asfáltica Tradicional v/s Capa de Protección.

Durante el año 2009 la Dirección de Presupuestos realizó una evaluación del programa de Caminos Básicos que sintetizó sus logros y debilidades, concluyendo en una serie de indicaciones que comienzan a traducirse en modificaciones formales al programa a partir del segundo semestre del año 2010. Ese año, producto de las necesidades de recuperación de la infraestructura vial principal derivadas de las devastadoras consecuencias del terremoto de Febrero de 2010, el 80% de los kilómetros mejorados se ejecutó por medio de técnicas tradicionales de pavimentación con carpetas de asfalto en caliente. Sin embargo a partir del 2011 las capas de protección asfálticas comienzan a recuperar su importancia.

Con la Resolución de la Dirección de Vialidad No 1076 del 04.03.2011, se instituye oficialmente el Programa de Caminos Básicos (CCBB), tomando en cuenta las indicaciones hechas el año 2009

por la Dirección de Presupuestos. Se distinguen dos tipos de desarrollo de caminos básicos, uno denominado “CCBB por Conservación” y el otro denominado “CCBB Intermedios”.

De acuerdo a la documentación generada para la aplicación del programa (Dirección de Vialidad - MOP, 2011), los objetivos de ambos tipos de intervención en caminos básicos son:

- Proveer una superficie de rodadura confortable de mayor durabilidad que la tradicional,
- Disminuir o eliminar el polvo generado por los vehículos,
- Brindar una mejor calidad de vida a la gente que habita en los sectores rurales,
- Eliminar el efecto nocivo del polvo en los cultivos de los sectores aledaños al camino,
- Reducir la cantidad de intervenciones de conservación,
- Crear condiciones propicias para el desarrollo local.

Las intervenciones del tipo CCBB por Conservación pueden considerar tanto capas de protección asfáltica como adiciones de supresores de polvo. Sin embargo en este caso se actúa sobre el mismo camino existente con mínimas modificaciones, generalmente de geometría, lo cual no alcanza a considerarse un mejoramiento que considere un cambio de estándar respecto de la situación original.

Por su parte las intervenciones del tipo CCBB Intermedios persiguen los mismos beneficios que los anteriores solo que al aplicarse sobre caminos en condiciones más precarias, consideran necesariamente obras de mejoramiento en las componentes de geometría, estructura, saneamiento y/o seguridad vial. Por su grado de intervención mayor esta tipología se considera un mejoramiento o cambio de estándar del camino básico existente. De los 53.227 Km de red nacional No Pavimentada de caminos existe un alto porcentaje, sino la totalidad, que requieren intervenciones que las hacen candidatas a desarrollos del tipo CCBB Intermedios.

En la Fig. 2.4.- se aprecia el perfil transversal tipo de un camino rural desarrollado bajo este programa, con sus distintos sectores y elementos básicos de saneamiento lateral.

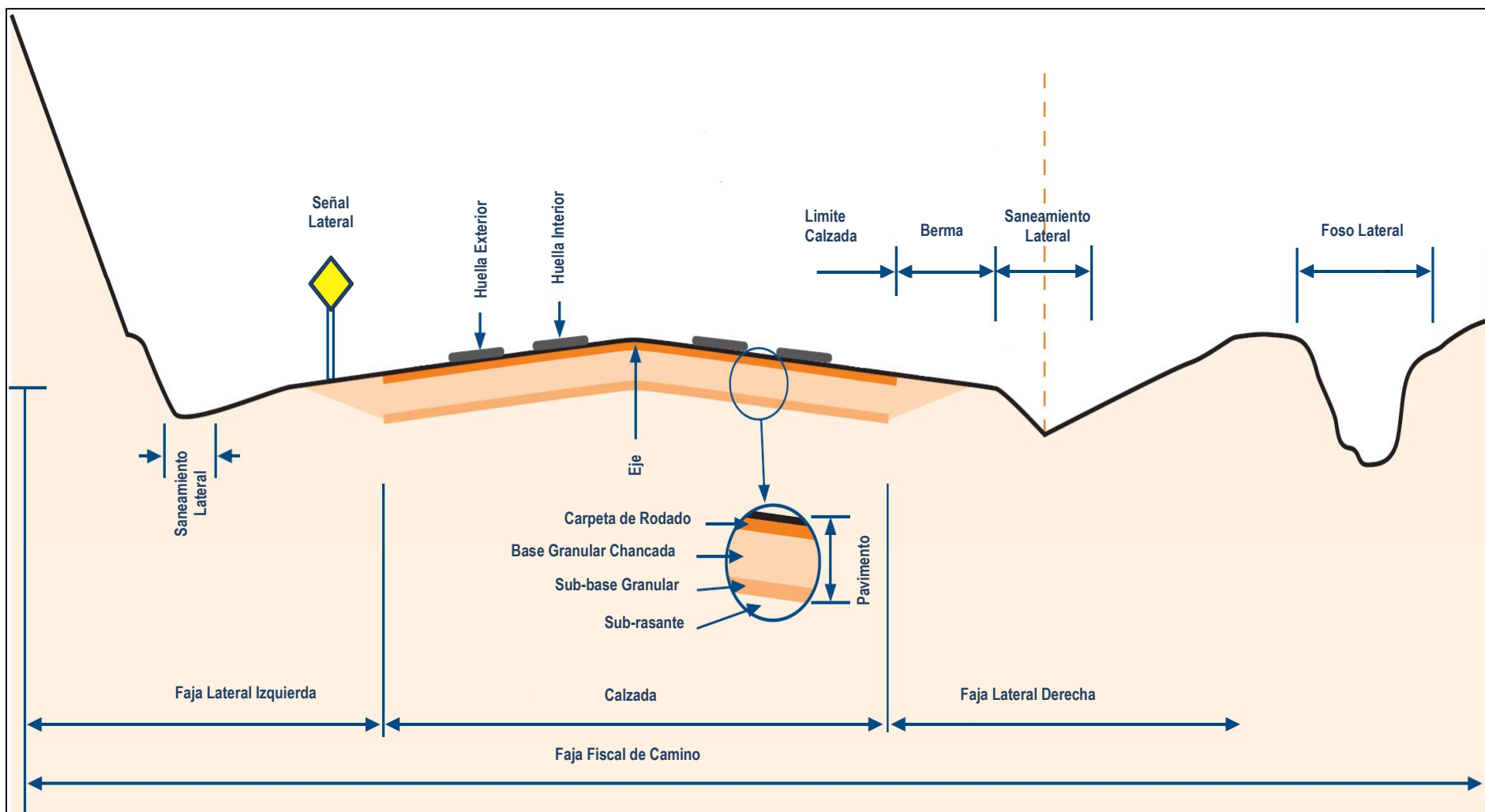


Fig. 2.4.- Perfil Transversal Tipo de camino rural desarrollado bajo el programa de caminos básicos.

Finalmente, los CCBB Intermedios son en general intervenciones en caminos de bajo nivel de tránsito (menores a 500 TMDA) y consideran:

- Ajustar el saneamiento para dar una condición de mayor durabilidad al camino con obras de arte transversales y longitudinales, drenes, etc.
- Incorporar capas granulares estructurales como bases y sub-bases para permitir que el camino soporte adecuadamente el tránsito actual y el generado producto de la mejora de estándar.
- Modificar la geometría con movimientos de tierra por ensanches, cortes, terraplenes y pequeños cambios de trazado, que permitan mejorar la seguridad vial al nuevo nivel de tránsito y velocidades de desplazamiento.
- Si la disponibilidad espacial y el presupuesto lo permitan, considerar un estándar mínimo de tránsito para peatones y ciclistas.

2.4 Niveles de Inversión del Programa de Caminos Básicos

La Fig. 2.5.- muestra los niveles de inversión promedio por kilómetro de camino construido para los distintos estándares presentes en la red nacional de caminos de Chile. Se puede observar que los caminos No Pavimentado muestran un costo por kilómetro mayor al de las capas de protección. Esto se debe a que la valorización considera los costos de desarrollo del último cambio de estándar del camino, y estos no se suman a la inversión en el estándar anterior. La forma de contabilización considera poco relevante los ahorros de construir el nuevo estándar de camino sobre una ruta antigua que debe sufrir importantes modificaciones en su geometría para adecuarse al nuevo estándar de tránsito y velocidades. Sin embargo en el caso de los desarrollos del programa de caminos básicos, con capas de protección asfáltica y mezclas en caliente de espesor delgado que se aplican sobre la ruta original sin grandes modificaciones geométricas, la inversión del desarrollo inicial debiera sumarse a la inversión del cambio de estándar.

Los costos por kilómetro de construcción de soluciones del tipo Capa de Protección están acotados por los límites de inversión que acepta el programa de Caminos Básicos según lo dispuesto en los respectivos instructivos¹. Como ejemplo (Fig. 2.6), un camino básico con un tránsito medio diario anual (TMDA) de 200, en la Zona Central (regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule), tiene un límite máximo de inversión de \$ 110.000.000.- con

¹ Instructivo Para Postulación de Caminos Básicos Intermedios, en base a RES D.V. 1076 del 04.03.2011

IVA (USD 200.000.- aprox.), según muestra la figura 2.6. En las Zonas Norte y Sur del país este límite de inversión baja para un mismo TMDA, ya que la densidad de población menor reduce considerablemente el beneficio social esperado que se estima en el modelo de evaluación económica del camino.

Costo Promedio Histórico por Kilómetro de Camino Construido, su Importancia en la Red Nacional en Extensión y Costos (año 2009)

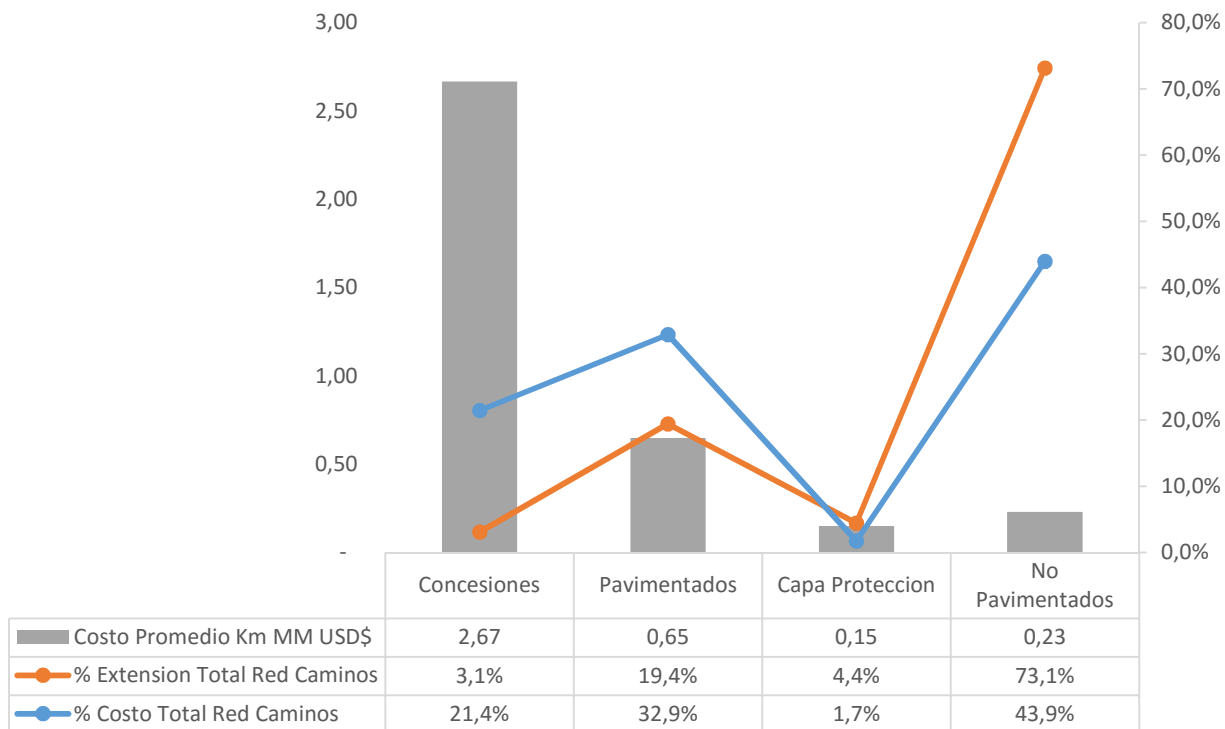


Fig. 2.5.- Costo Promedio Histórico por Km de Construcción de Caminos en Chile. Dólares 2009.

El método establece solo el nivel máximo de inversión, sin limitarla inferiormente. Por lo anterior las direcciones locales de vialidad tratan de maximizar la cantidad de kilómetros de avance para una inversión dada. Esta tendencia a la subinversión puede explicar parte la falencia que muestran los proyectos sobre todo a nivel de bases y sub-bases, lo cual afecta la duración final de los sellos. La inversión promedio histórica es de USD 150.000.- por kilómetro.

Para impulsar el desarrollo de caminos rurales, no solo será necesario considerar el valor TMDA. El modelo de evaluación empleado en Chile deberá ser ajustado para incorporar otros factores relevantes que justifique la inversión, considerando todos los impactos del proyecto.

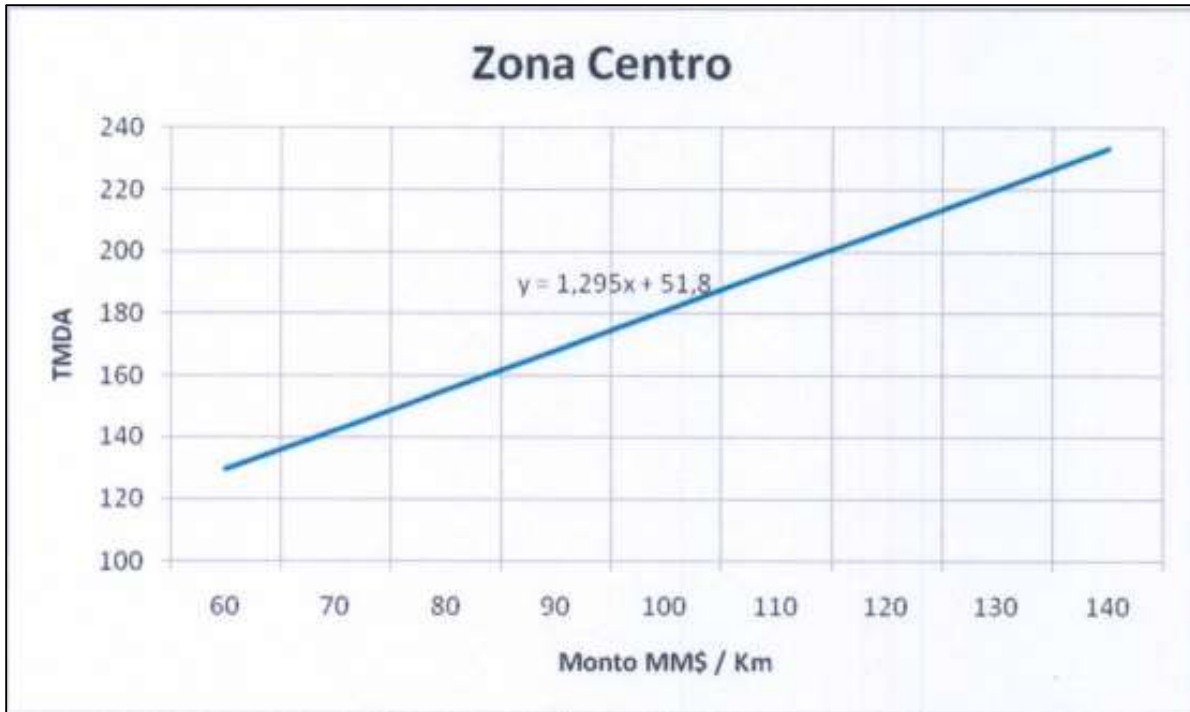


Fig. 2.6.- Límites de Inversión según TMDA de camino en Zona Centro y Zona Sur.²

² Instructivo Para Postulación de Caminos Básicos Intermedios, en base a RES D.V. 1076 del 04.03.2011

“Road Development, Economic Growth and Poverty Reduction in China (Desarrollo de Caminos, Crecimiento Económico y Reducción de la Pobreza en China)” (Shenggen Fan, 2005) es una extensa investigación que muestra que la inversión en caminos rurales tuvo retornos económicos muy superiores que los mostrados por la inversión vial en carreteras principales para el periodo 1980-2002. El impacto económico del cambio de estándar de un camino rural sobre la población residente en el área de influencia del camino no solo está en la mejora de la producción agrícola del sector y los menores costos de transporte. Más importante muestra ser la generación de PIB indirecto. Este estudio indica que la infraestructura vial es el principal factor que explica las diferencias en el ritmo de desarrollo entre las distintas regiones rurales de China. Las principales fuentes de incremento en el PIB del área de influencia de un camino rural son:

- Mayor producción agropecuaria del sector, por la facilidad de conexión con nuevos mercados y consumidores.
- Menores costos económicos asociados a contaminación por partículas en suspensión.
- Menores costos de transporte, por facilidad de acceso y menor deterioro de los vehículos.
- Expansión de los mercados.
- Menores tiempos de desplazamiento.
- Incremento de la competitividad entre los productores y en los mercados locales.
- Nuevos servicios asociados a los distintos recursos del sector y su explotación.
- Mejores posibilidades de educación.
- Mejor acceso a servicios de salud.
- Mayores posibilidades de transferencias de conocimientos y tecnología.

Las carreteras de mayor estándar, “expressway”, de China pasaron de 147 Km en 1988 a 25.130 Km en 2002, a una tasa de crecimiento promedio del 44% anual. Las carreteras de alto estándar (clase 1 y 2) pasaron de 34.644 Km a 224.611 en el mismo periodo, a una tasa de crecimiento promedio de 21%. Por cada USD 1 invertido en este tipo de infraestructura vial de alto estándar China recibió un retorno de USD 1,57 en PIB.

Por su parte los caminos rurales (clase 3 y 4) en el mismo periodo pasaron de 159.376 Km a 384.756 Km, creciendo sólo a una tasa promedio anual del 5%. Sin embargo por cada 1 USD invertido en caminos rurales, la economía China recibió casi USD 6 en crecimiento del PIB. Estos y otros aspectos se analizan en el capítulo 6.

Finalmente, respecto del escenario de desarrollo de caminos rurales en Chile, se puede concluir:

1. Valorados al Costo Promedio Histórico, los 1.387 Km pavimentados el 2013 significaron una inversión de MM USD\$ 419,55.-, de los cuales un 65 % se destinó al desarrollo de los 423 Km de camino pavimentados en alto estándar y un 35% se destinó a los 964 Km de caminos con capa de protección.
2. A este ritmo anual de pavimentación de la red, 1.387 Km anuales, los 53.227 Km de caminos no pavimentados cambiarían su estándar a pavimentados en unos 38 años. Al final de este periodo tendríamos 15.918 Km adicionales de pavimentos de alto estándar y 37.259 Km adicionales de pavimentos con capa de protección. El costo final de la inversión sería MM USD\$ 15.968.-
3. Si se aplicara una nueva estrategia de pavimentación – cambiando el énfasis para destinar un 35% de los fondos al desarrollo de caminos de alto estándar y un 65% de los recursos al desarrollo de caminos con capas de protección asfáltica – los 53.227 Km de caminos no pavimentados subirán su estándar a pavimentados en unos 26 años, al cabo de los cuales contaríamos con 5.883 Km adicionales de pavimentos de alto estándar y 47.344 Km adicionales de pavimentos con capa de protección. El costo final de la inversión sería MM USD\$ 10.925.-
4. En el escenario del punto 3 precedente, el cual prioriza la inversión en soluciones económicas para reducir los tiempos y costos de pavimentación de caminos rurales, el tiempo de ejecución de la pavimentación de toda la red no pavimentada y los costos asociados a este programa se reducen en un 32% respecto del escenario probable de la estrategia actual descrito en el punto 2 anterior.

2.5 Tipos de Capas de Protección Utilizadas en Chile

Los tipos de capa de protección asfáltica que en Chile se emplean tanto para los Caminos Básicos (CCBB) por Conservación como en los CCBB Intermedios, definidos dentro del programa de caminos básicos considera las siguientes soluciones:

- Imprimación reforzada,
- Tratamiento Superficial Simple (TSS).
- Doble Tratamiento Superficial (DTS).
- Lechada Asfáltica.
- Cape Seal.
- Otta Seal.

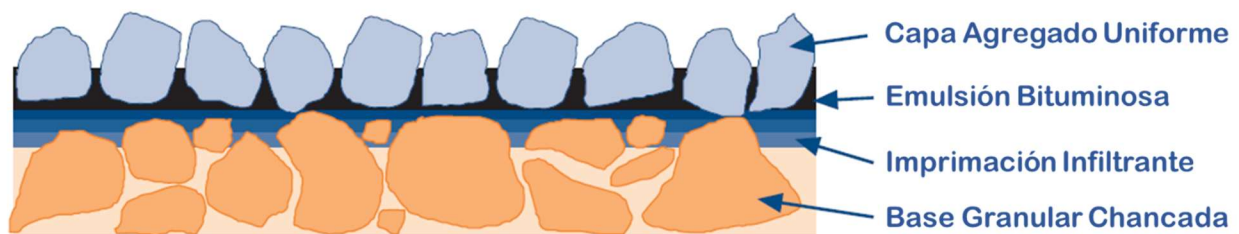
La imprimación reforzada se empleó mayoritariamente en la V Región. Sin embargo ha perdido relevancia ya que su costo es parecido al de un TSS pero su duración menor, sobre todo en condiciones de mayor volumen de tránsito. Por su parte el Otta Seal, que es el sello de mayor costo de ejecución debido al tipo de asfalto empleado y las temperaturas de trabajo, se cree que es el tipo de capa que trabaja mejor a bajas temperaturas. Por lo anterior en Chile ha sido empleado en la XII región. Sin embargo la experiencia nacional e internacional indica que sus tasas de retención de agregado y desempeño a largo plazo son incluso inferiores que las que muestran un DTS con emulsión modificada en las mismas condiciones climáticas.

A continuación describimos brevemente cada una de las soluciones que en la actualidad se emplean con frecuencia en el programa de caminos básicos de la Dirección de Vialidad.

2.5.1 Tratamiento Superficial Simple (TSS) – Primera Capa (First Coat)

Un Tratamiento Superficial Simple es una primera capa de sello asfáltico inicialmente aplicado sobre una superficie no pavimentada previamente preparada, que normalmente corresponde a una base granular chancada. Los TSS deben estar diseñados para proporcionar impermeabilización a la capa estructural de la base y sub-base. Es el primer tratamiento sobre la superficie granular y su principal objetivo debe ser preparar la superficie para el tratamiento principal que generará la superficie de rodado más duradera. Idealmente el diseño de un TSS debiese considerar las futuras capas que se aplicarán sobre él, asegurando la compatibilidad de tamaños de agregado y tipos de emulsiones. Los TSS como primera capa asfáltica sobre una base granular chancada tienen un vida útil de diseño de 1 año, aunque en condiciones de bajo volumen de tránsito pueden durar bastante más.

Tratamiento Superficial Simple TSS / Primera Aplicación DTS



2.7.- Esquema de Tratamiento Superficial Simple (Transit NZ et al, 2005).

Por especificación del Manual de Carreteras en nuestro país tanto los TSS como DTS aplicados sobre bases granulares requieren de una imprimación asfáltica previa. En países como Nueva Zelanda y EE.UU., con más experiencia en la técnica, el uso de emulsiones de imprimación ya no es una práctica común. Por razones ambientales, y para evitar un costo adicional que aporta muy poco al resultado final, se prefiere construir el primer sello directamente sobre la Base granular compactada, empleando una mayor dosis de un bitumen lo suficientemente fluido como para penetrar en la base y adherirse a las partículas de ésta capa, aunque no tan fluido como para perder significativamente su capacidad de retención de las partículas de agregado que se esparcen sobre él durante la primera aplicación.

El buen resultado y la durabilidad de un TSS es el reflejo de la calidad estructural de la Base granular y de su terminación superficial al momento de la aplicación. Los mejores resultados se obtienen con una base granular compactada, bien trabada, de superficie pareja, con poca o nula humedad superficial, donde se aprecien los granos de piedra pero sin material suelto.

El Tratamiento Superficial Simple es apropiado para caminos con bajos niveles de tránsito, aunque bien construido puede soportar sin problemas un tránsito moderado. Sus principales ventajas son:

- Bajo costos. Es el de menor costo entre las capas de protección generalmente empleadas en Chile.
- Puede proveer una muy buena impermeabilización de la superficie.
- Genera una macrotextura rugosa que mejora el índice de rugosidad del camino y facilita el drenaje de agua sin provocar pozas superficiales.
- Es un sistema de protección económico y simple de construir.
- Rápida ejecución.

- Bien construido puede mostrar buenos resultados incluso en situaciones de estrés superficial (alto esfuerzo de corte en la superficie por el contacto con el neumático, zonas de frenado, aceleración o giro cerrado), como son las zonas de pendientes, intersecciones y cruces.

Las principales limitaciones del TSS son:

- Su baja resistencia al esfuerzo de corte en la superficie por el contacto con el neumático.
- No entrega buenos resultados cuando la superficie sobre la cual se aplica tiene una terminación dispareja y no homogénea.

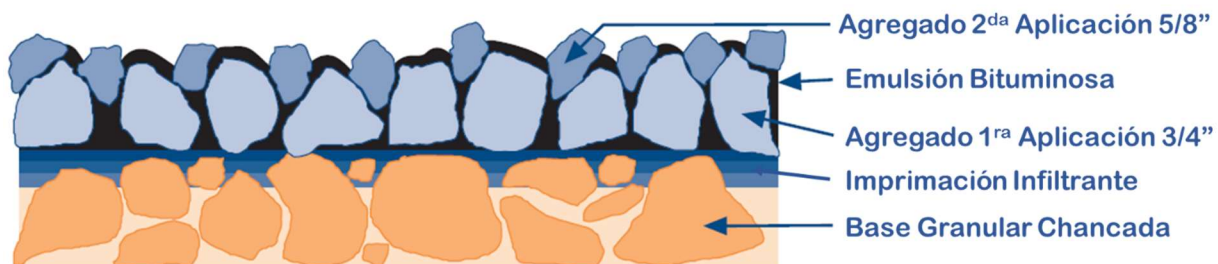
Dadas estas características, los TSS constituyen una solución muy efectiva en costos y la elección por defecto en situaciones de bajo tránsito y baja intensidad de frenadas, aceleraciones bruscas y giros cerrados.

2.5.2 Doble Tratamiento Superficial (DTS)

Un Tratamiento Superficial Doble consiste en la aplicación de dos capas de bitumen y dos capas de agregado, aplicados siguiendo el siguiente método:

1. Primero se esparce una capa bitumen seguida inmediatamente de la distribución de una capa de agregado de gran tamaño.
2. Luego se esparce una segunda capa de bitumen seguida inmediatamente de la distribución de una capa de agregado de aproximadamente la mitad del tamaño del agregado de la primera aplicación.
3. EL tiempo entre la primera y la segunda aplicación puede ser muy poco o nada.

Doble Tratamiento Superficial DTS



2.8.- Esquema de Doble Tratamiento Superficial (Transit NZ et al, 2005).

Cualquier aplicación de tratamiento superficial que considera más de una capa de bitumen y de agregado se clasifica dentro de los tratamientos múltiples.

Por sus características un DTS puede ser una buena solución en condiciones de tránsito medio y medio alto, hasta 20.000 TMDA. Con este tipo de capa se logra un mejor desempeño de la superficie en condiciones donde el esfuerzo de corte superficial es considerable. Es una solución que muestra muy buenos resultados cuando se aplica con bitúmenes modificados con polímeros o látex. Debido a que considera mayores dosis de bitumen, puede ser aplicado sin un pretratamiento de la superficie inferior, para sellar la porosidad. Debido a que su macrotextura es más fina que la de un TSS, es más resistente al despeje de la nieve.

De esta manera las principales ventajas de un DTS son:

- Es mucho más resistente que un TSS en situaciones de alto esfuerzo de corte en la superficie de contacto con el neumático, como son las zonas de frenado, aceleración o de giro cerrado, las zonas de pendientes, intersecciones y cruces.
- Permite corregir pequeñas irregularidades presentes en la superficie inferior.
- Su vida de servicio pueden ser entre 4 a 8 veces mayores que las de un TSS.

Las principales limitaciones del DTS son:

- Es entre un 50% a un 100% más costoso que un TSS.
- Durante la construcción e incluso varios meses después de la entrega en servicio se genera una importante cantidad de agregado suelto en la superficie del camino.
- La apariencia y desempeño de un DTS depende mucho de la técnica y experiencia del constructor.
- La calidad del resultado final está directamente relacionado con las cantidades de bitumen y el tipo de agregado seleccionado para cada capa del sello.
- Debido a que el de la segunda capa se aplica sobre las partículas de mayor tamaño, el tránsito intenso y con alta carga tiende a marcar las huellas de los vehículos a medida que el sello envejece, ya sea por excesiva pérdida del agregado de segunda capa como por afloramiento de la emulsión debido a la disminución de los huecos del agregado.
- El ruido que genera el tránsito en la superficie depende directamente de los tamaños de agregados seleccionados y las técnicas de construcción empleadas.

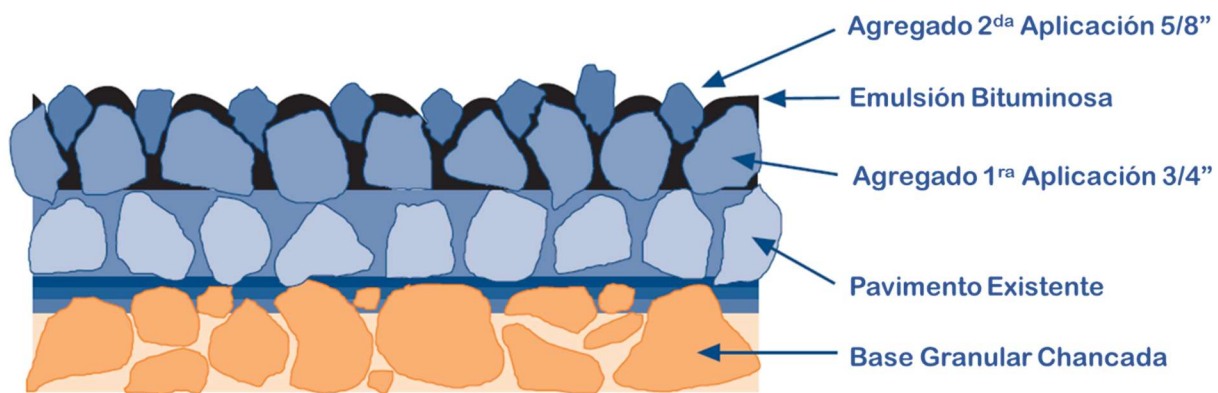
Aunque el DTS es un método de construcción de sellos de capa que muestra una complejidad mucho mayor que un TSS, es una solución mucho más apropiada para caminos de tráfico

intermedio. Su duración es mucho mayor observándose sellos DTS de más de 10 años de antigüedad en lugares donde el volumen de tráfico ha crece sostenidamente cada año.

2.5.3 Tratamientos Superficiales sobre Pavimento Existente (Recapados)

Tanto los TSS como los DTS pueden ser aplicados también como sellos de rejuvenecimiento de pavimentos existentes. Este tipo de aplicación escapa al ámbito de éste trabajo por no corresponder a una capa de protección que se aplique en el desarrollo de nuevos pavimentos en la red de caminos rurales de Chile. Sin embargo a medida que los km de caminos pavimentados o con capas de protección aumenten su participación en el total de la red vial nacional, la problemática de mantención vial con recapado se hará cada vez más relevante. Ver fig. 2.9.

Tratamiento Superficial TSS / DTS sobre Pavimento Existente



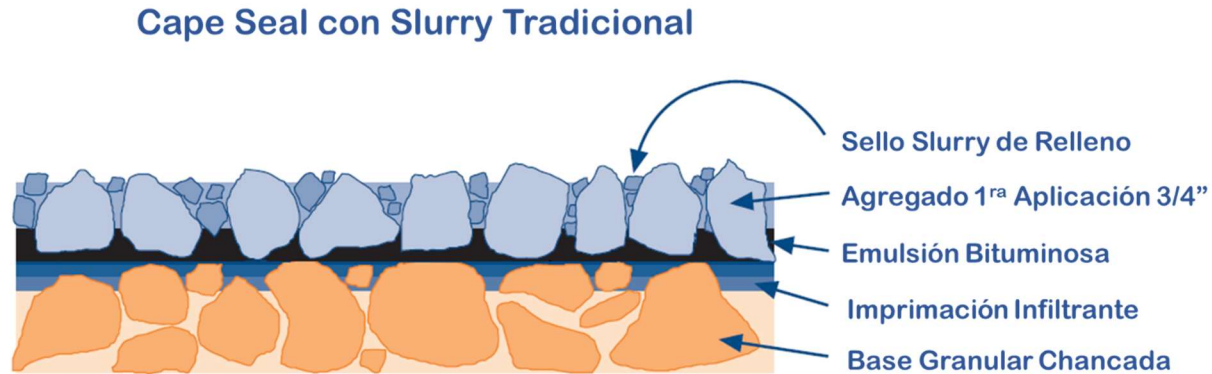
2.9.- Esquema de Tratamiento Superficial sobre pavimento existente (Transit NZ et al, 2005).

2.5.4 Cape Seal – Tratamiento Superficial Simple con Lechada Asfáltica

El manual de carreteras de la Dirección de Vialidad del MOP, define como Cape Seal a un tratamiento de sello superficial en dos capas constituido por una primera capa del tipo TSS cubierta por una segunda capa del tipo sello Slurry, siendo el objetivo principal de ésta rellenar la textura rugosa y abierta del TSS.

Como se verá en mayor detalle en el capítulo 4 un sello Slurry es una mezcla de agregados chancados de tamaño pequeño y bien graduados, con un bitumen emulsificado y con aditivos. Se aplica a una cubierta en espesores que van entre los 3 mm y 8 mm.

En términos de costos y desempeño, el Cape Seal es una alternativa equivalente a los DTS. Como el agregado pequeño se aplica en una fase bastante acuosa, se introduce fácilmente en los intersticios que deja el agregado del TSS de la primera aplicación, y llena mejor estos espacios si se compara con la terminación que se logra con la segunda aplicación en un DTS. Esta característica mejora la terminación superficial del sello TSS, reduce significativamente la pérdida de agregado, y disminuye el ruido por tránsito.



2.10.- Esquema de Cape Seal con sello slurry tradicional (Transit NZ et al, 2005).

Las principales ventajas de un Cape Seal son:

- Tiene mayor capacidad para soportar el esfuerzo de corte superficial en zonas de frenado, aceleración y cruces.
- Por lo anterior puede ser aplicado en condiciones urbanas.
- Una vez curado es difícil que presente exudación.
- Mejora la retención del agregado.
- Bajo ruido de tránsito comparado con el que muestran los TSS y DTS.
- Mejora el índice de fricción de la superficie.
- Entrega más textura superficial que una mezcla asfáltica tradicional.
- Es una solución con menor impacto ambiental por las temperaturas de trabajo de las emulsiones y la menor emisión de kerosene presente en ellas.

Las limitaciones de este tipo de aplicación son:

- No pueden ser aplicadas sobre TSS nuevos o de menos de 2 años cuando estos fueron contruidos con asfalto cortado con diluyentes o kerosene, ya que se producirá exudación superficial.

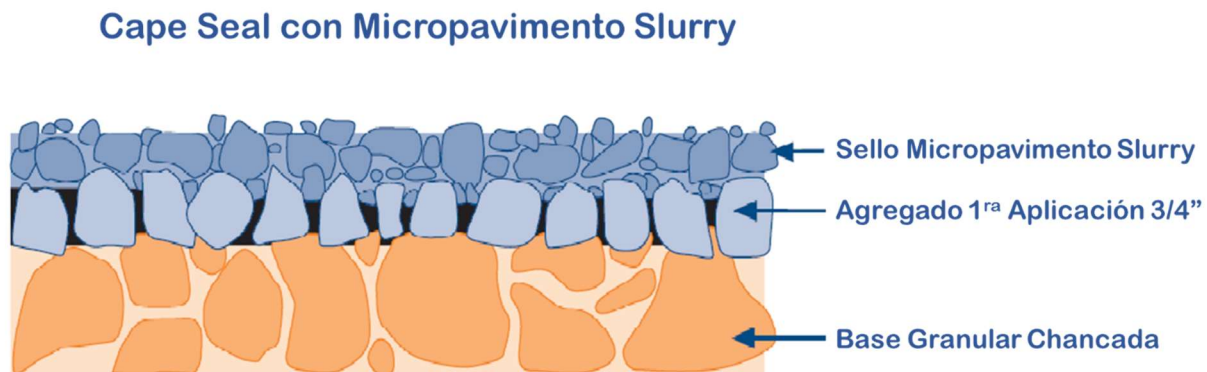
- Los sellos slurry tradicionales, por las características de las emulsiones empleadas, requieren de temperaturas superiores a 10°C al momento de la aplicación y en los días siguientes. De no cumplirse esta condición existe riesgo de mal curado y falla temprana.
- Se requiere disponer de dos tipos de equipos, para TSS y para sello slurry, lo cual hace la construcción más compleja.

Pese a estas limitaciones las capas de protección tipo Cape Seal han ganado terreno como la opción por defecto en varias regiones del país, principalmente debido a su buena apariencia superficial y a los menores niveles de ruido por tránsito.

Adicionalmente existe la posibilidad de mejorar la especificación para el sello slurry, con emulsiones modificadas con polímeros y agregados de mayor tamaño.

2.5.5 Cape Seal – Tratamiento Superficial Simple con Micropavimento Slurry

Cuando el sello slurry aplicado sobre la aplicación TSS se construye con emulsiones de curado (quiebre) controlado modificadas con polímeros y/o látex, se está en presencia de un Cape Seal con Micropavimento en Frio. Ver fig. 2.11.



2.11.- Esquema de Cape Seal con Micropavimento.

Como se mencionó con anterioridad, el manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad no hace diferencia explícita entre un sello Cape Seal construido con mezcla slurry tradicional tipo lechada, o un Cape Seal construido con segunda capa en micropavimento slurry. Sin embargo debido al mejor desempeño del microapavimento respecto de la lechada asfáltica tradicional, en cuanto a durabilidad y resistencia al esfuerzo de corte superficial, hacen necesario considerar una definición separada para ambas técnicas de aplicación.

En el sello Cape Seal con microaglomerado, la capa del sello slurry presenta propiedades que le permiten instalarse en un espesor mayor al tamaño de la mayor partícula del agregado empleado. Así se generan capas de microaglomerado que pueden llegar fácilmente a los 15 mm por sobre la corona del agregado del TSS inferior. Como resultado se obtiene un sello de apariencia superficial equivalente a una mezcla asfáltica tradicional, a una fracción del costo de ésta. En el capítulo 4 se detallan las características de éste sello y su aplicación.

Las principales ventajas de la capa de protección del tipo Cape Seal con Microaglomerado son:

- Tiene mayor espesor terminado por lo cual aumenta su capacidad para soportar el esfuerzo de corte superficial en situaciones de alto tránsito, fuertes frenadas y aceleraciones y cruces de calles, incluso urbanos. Es la mejor alternativa de capa superficial para estos problemas.
- Puede ser aplicado con éxito en condiciones urbanas.
- Al emplear emulsiones modificadas solamente, sus propiedades mecánicas mejoran sustancialmente, prolongando la vida en servicio del sello.
- Mejora la retención del agregado.
- Bajo ruido de tránsito comparado con el que muestran los TSS y DTS.
- Mejora sustancialmente el índice de fricción de la superficie.
- Entrega más textura superficial que una mezcla asfáltica tradicional.

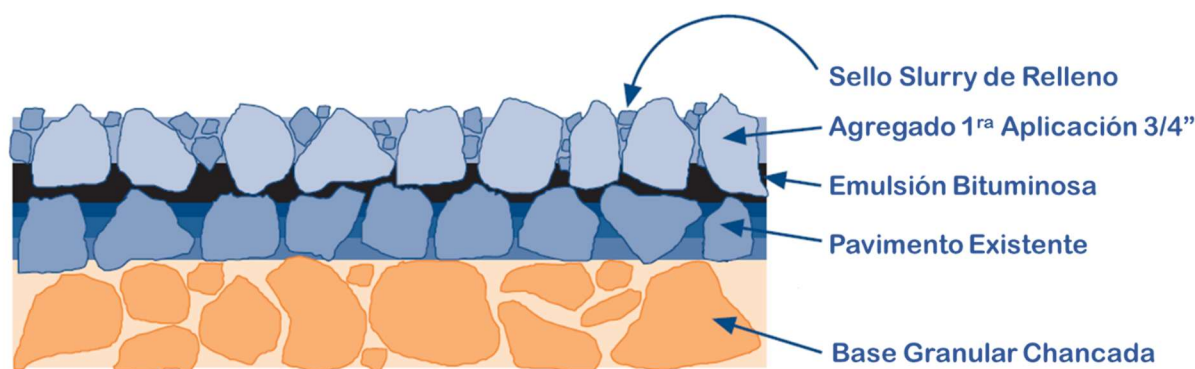
Las limitaciones de este sello son las mismas que para el Cape Tradicional y adicionalmente:

- Es la técnica de sellado con capa de protección más costosa, pero a la vez una de las más duraderas.
- Requiere de una adecuada experiencia y preparación en quienes ejecutan el trabajo.

2.5.6 Capas Cape Seal sobre Pavimento Existente

Al igual que los TSS y los DTA, una capa de protección tipo Cape Seal puede ser aplicada como sellos de rejuvenecimiento de pavimentos existentes. Este tipo de aplicación escapa al ámbito de éste trabajo por no corresponder a una capa de protección que se aplique en el desarrollo de nuevos pavimentos en la red de caminos rurales de Chile. Sin embargo en la fig. 2.12. se puede ver un esquema de la aplicación.

Cape Seal con Slurry Tradicional sobre Pavimento Existente



2.11.- Esquema de Cape Seal sobre pavimento existente

2.6 Comentarios del Capítulo

De la información resumida en este capítulo se puede concluir que el desarrollo de caminos rurales, y su cambio de estándar a un nivel mínimo de pavimentación, ha sido la prioridad en países cuyo desarrollo económico ha sido sobresaliente en las últimas décadas.

Las tasas de desarrollo de caminos en China han sido muy superiores al crecimiento de su PIB. Si bien los caminos rurales no fueron prioridad por mucho tiempo, en los últimos años la inversión vial en ellos se está fortaleciendo generando retornos económicos importantes para el país.

Nueva Zelanda sorprende por su alta densidad de caminos y el alto grado de pavimentación de éstos. El tipo de solución predominante en su red son los TSS y DTS, tanto para caminos rurales como para carreteras de mayor tránsito.

En Chile el énfasis en el desarrollo de la red rural se evidencia a partir del año 2003. El Programa de Caminos Básicos del año 2011 da un nuevo impulso a esta política de desarrollo vial. Sin embargo todavía se observa una red vial altamente subdesarrollada en densidad y grado de pavimentación, si se le compara con Nueva Zelanda, y de lento crecimiento, si se le compara con China.

Las preguntas que surgen son: ¿Cuál es el énfasis que debe tener el Programa de Caminos Básicos respecto del tipo de cubierta de pavimentación a construir? ¿Cuál es la solución más conveniente en términos de costo-efectividad dentro de las alternativas actuales para el programa?

A ésta y otras preguntas se espera responder en los capítulos siguientes.

CAPITULO III

SELLO TIPO TRATAMIENTO SUPERFICIAL

3 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Los Tratamientos Superficiales (TS), también denominados sellos asfálticos de capa de grava o sellos de armadura, son un tipo de capa de protección asfáltica que puede ser aplicado tanto sobre una base granular chancada, para sellar la superficie de rodadura y elevar el estándar de tránsito, como sobre un pavimento existente para mejorar sus propiedades. Consiste en cubrir con un sello bituminoso la superficie para impedir la filtración de agua a los estratos inferiores, seguido de la aplicación de una capa granular que aumenta el índice de fricción de la superficie y protege al bitumen de un temprano deterioro por el contacto directo con el tránsito.



Fig. 2.1.- Arriba, la técnica de Tratamiento Superficial hacia 1890. Abajo a la izquierda el proceso de TS actual tradicional, a la derecha el nuevo proceso de TS sincrónico.

El concepto constructivo de los TS busca aprovechar las características apropiadas de dos materiales de naturaleza distinta y compensar las falencias constructivas de cada uno con las

buenas propiedades del otro. Por un lado el bitumen permite generar una capa impermeable sobre la cubierta del camino pero su adherencia impide el tránsito directo sobre ella por un largo tiempo. Además una vez curado el bitumen, la cubierta resultante es poco resistente a la fricción y su índice de fricción muy bajo. Por su parte un agregado pétreo homogéneo y chancado aprovecha la alta adherencia del bitumen para evitar su propia segregación, generando una cubierta rugosa y resistente que puede ser transitada al poco tiempo de ser construida.

La técnica actual de TS consiste en la aplicación de un ligante bituminoso seguido inmediatamente por la instalación de una capa de agregado pétreo del tipo grava chancada de alta cubrición en su forma, mono tamaño y muy uniforme. El agregado rápidamente se incrusta en el ligante por medio de compactación neumática. Este sello se puede aplicar en capas múltiples, con varios tipos de aglutinantes, y en distintos tamaños de agregado. Los tamaños medios de agregados habitualmente empleados son 19 mm (3/4") para primera aplicación y 9,5 mm (3/8") para segunda aplicación. En aplicaciones monocapa generalmente se emplea un tamaño intermedio de 13 mm. En todos los casos la efectividad de la solución escogida dependerá de los problemas específicos que se quiera corregir en la superficie existente, las intensidades de tráfico que el sello deberá soportar, la correcta selección de las emulsiones asfálticas, para el tipo de aplicación y clima, y las buenas prácticas constructivas.

Los tratamientos superficiales de sello con capa de grava, permiten evitar que el agua superficial penetre a la base granular o por las grietas de un pavimento envejecido, contribuyen significativamente a mejorar la resistencia al deslizamiento (índice de fricción), y permiten rehabilitar pavimentos asfálticos deteriorados superficialmente.

Cuando un tratamiento superficial pierde su funcionalidad o presenta un desprendimiento generalizado, significa que ha fallado. Las fallas más comunes en un tratamiento superficial son el desprendimiento excesivo de grava y la exudación de la emulsión hacia la superficie. En el primer caso generalmente el origen del problema es una mala elección, preparación y/o aplicación del bitumen, aunque afectan también problemas estructurales y exceso de humedad presentes en la base del estrato inferior. En el segundo caso la causa más común es el exceso de bitumen aplicado y la excesiva presencia de diluyentes en la composición del bitumen. También generan exudación temprana un alto nivel de tránsito y el excesivo peso de los vehículos, por la alta reducción de los huecos presentes en el agregado que cubre el bitumen.

La duración y calidad de un tratamiento superficial varía mucho, dependiendo de:

- a) El tipo de la emulsión empleada y su calidad (porcentaje de residuo, con o sin polímeros/elastómero),
- b) la calidad y limpieza de los agregados pétreos empleados,
- c) la capacidad y dominio de la técnica del constructor,
- d) y las condiciones climáticas al momento de la aplicación.

Adicionalmente se debe poner especial cuidado a la terminación superficial, espesor y capacidad estructural de la base, y la capacidad de soporte de la sub-base existente a nivel de subrasante.

En Estados Unidos este tipo de sello se ha empleado principalmente en la construcción y preservación de caminos rurales y de bajo nivel de tránsito desde la década de 1970. En Australia, Nueva Zelandia y Sudáfrica, los tratamientos superficiales como los conocemos hoy han sido empleados extensivamente, en caminos rurales y urbanos, desde la década de 1930 (Hanson, 1935).

En general los tratamientos superficiales muestran ser considerablemente más baratos que las alternativas de carpeta con concreto asfáltico, incluso cuando ésta última se ejecuta en capa de espesor delgado, pero su duración en servicio es menor, aunque bien contruidos pueden durar más que una solución MAC en espesor delgado³. Sin embargo la baja inversión inicial y la posibilidad de aumentar considerablemente los kilómetros de cobertura para un mismo presupuesto de desarrollo de caminos básicos, hacen que los tratamientos superficiales sean una herramienta central para que las agencias gubernamentales de transportes puedan abordar las crecientes necesidades de mantenimiento, restauración y construcción de caminos.

3.1 ASPECTOS GENERALES DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Por definición un Tratamiento Superficial bituminoso (TS) consiste en una capa de bitumen asfáltico sobre la cual se aplica una capa de agregado pétreo, limpio y de tamaño muy uniforme. El asfalto proporciona un sello impermeable de la capa inferior, mientras que el agregado proporciona una capa de protección sobre al asfalto y genera una macrotextura que mejora el índice de fricción de la superficie de rodado.

³ Mezcla de Asfalto en Caliente (MAC) en espesores iguales o inferiores a 5 cm.

Siendo una de las técnicas de sello bituminoso más antiguas y ampliamente ocupada (en Nueva Zelandia desde 1880), en la actualidad se emplea tanto para la construcción de superficies nuevas sobre caminos de grava así como también para la mantención de asfaltos envejecidos. El proceso se divide básicamente en dos partes:

- 1) Una aplicación de asfalto cortado o emulsión se esparce por la superficie que se desea sellar, e inmediatamente,
- 2) Una capa uniforme de granos de grava se distribuya sobre el asfalto y se compacta neumáticamente hasta dejarlas embebidas en el bitumen en un 50% a 70% de la altura media de los granos.

Aplicada en una capa única de granos sobre el bitumen el proceso se conoce como tratamiento superficial simple (TSS – “single shot” Bituminous Surface Treatment [BST]). En países con alto desarrollo de infraestructura vial pavimentada, este tratamiento simple es una de las técnicas más aplicadas en mantención de cubiertas de asfaltos o sellos asfálticos antiguos. Cuando el proceso se repite una segunda vez, agregando una segunda capa de asfalto y granos, hablamos de tratamiento superficial doble (DTS - “double shot” Bituminous Surface Treatment [BST]). Si se llega a aplicar una tercera capa de bitumen y grava, se trataría de un triple tratamiento superficial (TTS - “triple/multiple shot” Bituminous Surface Treatment [BST]).

La técnica actual empleada en Nueva Zelandia considera la aplicación de las segundas y terceras capas inmediatamente después de terminada la compactación de la capa de agregado anterior. La técnica empleada en Chile, definida en el Manual de Carreteras Vol. 5, establece un periodo de espera de un día entre la aplicación de cada capa. Esto para permitir un quiebre de la emulsión que evite el excesivo desprendimiento de granos en la etapa de barrido que se exige antes de proceder con la siguiente aplicación. El problema de esta técnica es que el quiebre completo de la emulsión y la máxima adherencia con los granos se puede producir varios días después de la aplicación del sello, dependiendo de las condiciones de clima y temperatura. Por lo anterior aunque se espere un día para barrer el exceso de agregado, se corre el riesgo de que este proceso, al ejecutarlo tempranamente, sea perjudicial para la calidad final del sello.

La experiencia revisada muestra como técnica de aplicación, más apropiada para asegurar la vida en servicio del sello, la ejecución de un método como sigue:

- 1) Aplicación de la emulsión asfáltica, esparcida por la superficie que se desea sellar en la dosis establecida como apropiada para cubrir el 50% a 70% del tamaño medio de grano, e inmediatamente,

- 2) Esparcido de una capa uniforme de granos de grava que se distribuya sobre el asfalto en una dosis ajustada en terreno para generar poca presencia de granos libres (no adheridos) después de la compactación, la cual se compacta neumáticamente hasta dejar las partículas bien embebidas en el bitumen.
- 3) Luego de la compactación, y la constatación de la adecuada incrustación de las partículas, se procede a repetir los puntos 1) y 2) para la segunda capa (y tercera capa).
- 4) El barrido del exceso de granos sueltos presentes en la superficie se hace varios días después de la aplicación del sello, cuando se constata en terreno que la emulsión ha quebrado por completo y las partículas embebidas están bien adheridas.

Las primeras aproximaciones a los sellos de TS que conocemos hoy aparecen hacia 1880 en Nueva Zelanda. Por esos años los caminos eran casi en su totalidad carpetas de rodadura granulares, que presentaban todas las deficiencias de estas cubiertas en cuanto a poca calidad de tránsito, deterioro rápido, alto riesgo de deslizamiento y alta generación de partículas en suspensión. En la medida que los vehículos aumentaron en velocidad y capacidad de desplazamiento, los requerimientos de los usuarios aumentaron también. Se necesitó construir caminos con cubiertas resistentes al agua, más seguros, que generaran menos polvo en suspensión, y más rápidos de transitar. Aparecieron las técnicas de control de partículas en suspensión por la aplicación de un riego de alquitrán, y así rápidamente se comenzó a esparcir grava de tamaño uniforme sobre el bitumen de alquitrán, compactándolo inmediatamente para lograr la adherencia, y generar una cubierta más duradera. Este concepto constructivo no ha sufrido variación, sin embargo con los años se ha avanzado en la definición de una metodología científica asociada a la técnica, con el objetivo de disminuir la dependencia de la experiencia del constructor y de su visión particular sobre lo que se debe entender por calidad en un sello TS.

Hacia 1935 el ingeniero neozelandés F.M. Hanson fue el primero en presentar un enfoque científico para el diseño y construcción de Tratamientos Superficiales con su publicación “El tratamiento superficial bituminoso de caminos rurales” (Hanson, 1935). En su trabajo define el concepto de tratamiento superficial, rescatando una teoría de la experiencia que pudo documentar a esa fecha, en cuanto a cómo y porque funcionaba efectivamente este sello bituminoso sobre capas granulares pétreas. Sus criterios y conceptos permanecieron casi inalterados durante 50 años. A continuación los resumimos:

1. Los granos pétreos son esparcidos sobre el sello bituminoso en una cantidad tal que les permitirá acomodarse hombro con hombro formando una monocapa compacta del

tamaño de un grano de espesor. El porcentaje de huecos en el estado suelto de la grava es de aproximadamente un 50% (equivalente al que se observa en agregados pétreos monotamaño y uniformes en estado suelto). Este se reduce a alrededor de un 30% por el paso de los rodillos de compactación y a un 20% final por el tránsito de los vehículos.

2. La cantidad de bitumen que es necesario aplicar queda definida por una relación con el volumen de huecos presente en el agregado compactado, estableciéndose que la cantidad debe ser la necesaria para llenar entre un 60% y un 70% de los espacios entre los granos de la capa final compactada.
3. El espesor promedio de la capa de agregado sobre el bitumen, después de la compactación con rodillos y de la compactación por tráfico, será muy parecida al diámetro menor promedio de los granos aplicados. Esto debido a que después de la compactación y en servicio los granos tienden a recostarse de manera que se apoyan en el plano de sus ejes mayores, dejando el eje menor orientado de manera normal al plano del camino.

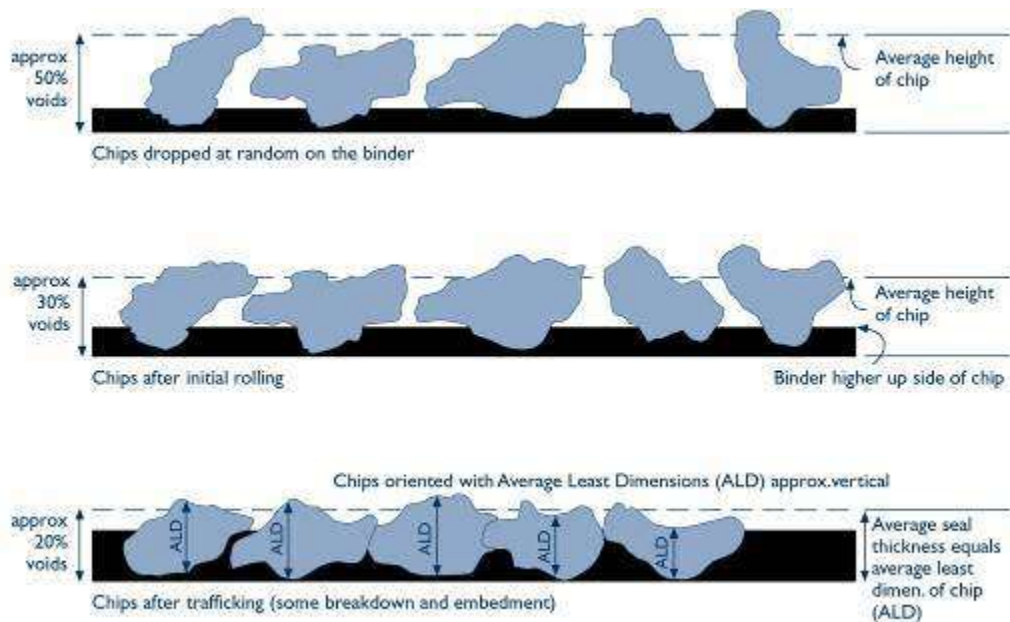


Figure I-2 States of embedment of sealing chips in binder (from NRB Manual 1968).

Fig. 2.2.- Etapas del proceso de acomodamiento del recubrimiento de agregados en TS.

El estudio “Mejores Prácticas en Tratamientos Superficiales – Síntesis de las Prácticas en Caminos” (Douglas Gransberg, David M.B. James, 2005) considero la revisión extensiva de la

literatura relevante, con el fin de identificar los conceptos teóricos y las mejores prácticas en la técnica. Cubrió casi 80 años de investigaciones identificando más de 120 publicaciones con aportes significativos para la comprensión de la técnica. Una conclusión importante del estudio fue que los procedimientos de mayor desarrollo técnico para el diseño y construcción de tratamientos superficiales se encontraron en las prácticas de Nueva Zelandia, Australia, Sudáfrica y el Reino Unido, en ese orden. Las experiencias en estos países coincidían en haber obtenido resultados consistentes de tratamientos superficiales de excelencia en caminos de alto y bajo volumen de tránsito. Este aspecto contradice la creencia habitual de que las soluciones de sellos bituminosos son solo aplicables a caminos de bajo volumen de tránsito – criterio muy expandido dentro de las oficinas técnicas de países con menor desarrollo y preparación en la técnica. La síntesis de mejores prácticas del estudio concluyó que los aspectos más relevantes para la práctica de ésta técnica son:

- a. Métodos de diseño,
- b. Administración de proyectos,
- c. Selección de materiales,
- d. Preparación de la construcción y equipos,
- e. Prácticas constructivas,
- f. Medición de desempeño, y
- g. Excelencia e innovación en los contratos por desempeño.

En general la documentación revisada muestra la creciente necesidad de introducir una metodología científica para el diseño y construcción de tratamientos superficiales, así como la necesidad de mejorar las tecnologías para su aplicación. Los TS cumplen un rol central en los sistemas de mantenimiento de pavimentos en EE.UU. – algunas agencias de transporte gubernamentales reportan que casi un 50% de su presupuesto para operaciones de mantenimiento se emplea en la construcción de recapados en TS –, sin embargo los resultados muestran una gran variabilidad y los criterios no son uniformes entre sus practicantes. Algunas agencias locales aplican estos sellos de grava en sectores y condiciones donde la agencia federal de transportes no los recomienda. Se requiere seguir profundizando en el conocimiento técnico y desarrollando la ingeniería asociada a los TS, para estandarizar criterios y disminuir la dependencia que hoy tiene la técnica en el conocimiento empírico.

Como destaca el informe NCHRP Synthesis 342 (Douglas Gransberg, David M.B. James, 2005) “La visión de que un sello de grava (TS) es un arte, no una ciencia, es sostenido por agencias que no lo usan en sus programas de mantenimiento de pavimentos. Otra visión es que la mantención con tratamiento superficial puede ser aplicada exitosamente solo en caminos de bajo volumen

de tránsito, sin considerar toda la evidencia técnica de países como Australia y Nueva Zelandia que indica lo contrario.”

Estas “visiones” persisten porque el desarrollo de la metodología de tratamiento superficial en EE.UU. terminó esencialmente en 1970 con la introducción del método de McLeod (McLeod, 1969), adoptado por el Instituto de Asfalto. Este método se basa en medidas cualitativas para el diseño y ajustes en terreno de las tasas teóricas de bitumen y agregado. Aunque se ha aplicado con extensivo éxito desde entonces, requiere de personal experimentado en la práctica de la aplicación de TS, tanto por parte de la agencia gubernamental como por parte del contratista, generando otro factor de variabilidad en una tecnología ya muy sensible. Otros países por el contrario (Australia, Nueva Zelandia y Sudáfrica) han sido muy proactivos en el desarrollo y concepción de una técnica científica para la práctica de tratamiento superficial, y han desarrollado un importante número de avances en la ingeniería del proceso de diseño, en la metodología de aplicación y en las tecnologías para la aplicación. Otros países como China han aportado con mucha experiencia reciente de la práctica en terreno, que les ha permitido adaptar y desarrollar tecnología de punta para la aplicación de éstos sellos (Sellador Sincrónico de Grava - Synchronous Chip Sealing).

En Chile Manual de Carreteras en su Volumen 5 apartado 5.405.- “Sellos Bituminosos” define el procedimiento y los estándares para los TS diseñados en nuestro país. En diseño este manual se basa en la metodología de Hanson mejorada por McLeod en 1969. Por lo cual, se hace extensivo en este caso la conclusión del informe NCHRP Synthesis 342 (Chip Seal Best Practices), en cuanto a que la técnica definida adolece de poca precisión científica y no se ajusta al estado de avance actual de la técnica.

En cuanto a las emulsiones aceptadas por el Manual de Carreteras, en su apartado 8.301.- la norma chilena cubre casi la totalidad de las caracterizaciones de emulsiones que actualmente se emplean con éxito en los países pioneros en la técnica. Sin embargo este amplio rango de alternativas de bitúmenes no se traduce en mayores alternativas técnicas al seguir las definiciones del método constructivo definido en su Volumen 5 apartado 5.405.- “Sellos Bituminosos”. Limitando el avance real de la práctica en el país.

La interpretación tradicional del Manual de Carreteras en cuanto a la metodología constructiva definida para “Sellos Bituminosos”, que coloca el énfasis en el control del proceso de construcción definido, limitando significativamente las posibilidades de empleo de innovaciones constructivas. El uso del Sellador Sincrónico de Grava se ha cuestionado en Chile por no permitir

el control en ejecución por separado de la dosis de emulsión respecto de la cuantía de grava que se esparce sobre la superficie. A su vez el empleo de emulsiones modificadas que permitan reemplazar el riego de imprimación por una mayor dosis de emulsión en primera aplicación, es una técnica que no se puede introducir en el país por quedar fuera del proceso definido en la norma. La misma causa imposibilita aplicar la segunda capa de TS inmediatamente después de terminar la compactación de la capa anterior, sin barrer.

La principal consecuencia de estas restricciones son mayores tiempos de ejecución. Más tiempo sin terminar el sello significa retardar la protección de la base granular chancada inferior y, en consecuencia, perjudica la conservación de las propiedades logradas al terminar su preparación y compactación. Un mayor tiempo de ejecución también impacta negativamente en la calidad del sello terminado, por cuanto expone más tiempo las capas intermedias del sello a las condiciones climáticas y al riesgo de suciedad por polvo y otros agentes.

La protección de la base constituye el objetivo central de los sellos bituminosos. El uso de imprimaciones con alto contenido de agua (aproximadamente 2 de 3 partes) incorpora humedad adicional a la base que al no evaporarse completamente antes de la aplicación de la primera aplicación de TS puede alterar considerablemente las propiedades de la capa granular. Si se trata de base de graduación cerrada (alto porcentaje de finos) esta humedad puede mantenerse por mucho tiempo, con riesgo de daño estructural y en el sello superior. La interpretación tradicional del Manual de Carreteras hace muy difícil que se pueda reemplazar el uso de CRS2, estándar o modificado, por otra emulsión. Este criterio conservador limita la posibilidad de experimentar con otras emulsiones en situaciones donde el CRS2 no ha mostrado resultados óptimos.

En cuanto al procedimiento constructivo en TS los alcances de la norma chilena ponen énfasis en la calidad de los equipos, el cuidado en que los desfases entre el momento de la distribución de bitumen y el esparcido de la grava sean mínimos, así como también en que la compactación neumática debe hacerse con rapidez, como lo sugiere en general toda la experiencia internacional.

A continuación se sintetizan los aspectos más relevantes que el ingeniero debiera considerar en las distintas etapas de un proyecto de diseño y construcción de un Tratamiento Superficial, de acuerdo al estado de la práctica actual y a las conclusiones de las agencias de transporte de los países con mayor experiencia en la aplicación de la solución.

3.1.1 LOS BITUMENES EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Si la estructura de un camino cumple las condiciones mínimas requeridas – comentadas en el punto 2.1.3. – la selección de los bitúmenes a emplear en el sello de TS, o en las distintas capas de tratamientos múltiples, es la decisión más importante para el éxito de la aplicación. Esta selección debe ser hecha después de considerar todos los factores bajo los cuales el sello se construirá y deberá cumplir su vida en servicio. Se debe tener en cuenta que el primer objetivo de un sello TS es impedir la infiltración de agua a la estructura inferior del pavimento y a la vez generar una cubierta de rodado que mejore las propiedades superficiales del camino, mejorando la fricción y evitando el rápido deterioro de la cubierta.

El Instituto de Asfaltos de EE.UU. en su publicación “Tratamientos Superficiales de Asfalto – Técnicas de Construcción” (Asphalt Institute, 1998) resume los siguientes requerimientos generales para la selección y utilización de bitúmenes en TS:

- El bitumen no debe exudar cuando es aplicado en la cantidad adecuada.
- Al momento de la aplicación el bitumen debe ser suficientemente fluido como para cubrir uniformemente la superficie, y a la vez suficientemente viscoso como para no derramar fuera de la cubierta de la calzada intervenida.
- El bitumen debe generar rápidamente la adhesión necesaria para mantener le agregado firme en la superficie.

Son dos las familias de bitumen que se emplean en tratamientos superficiales: cementos asfálticos y emulsiones asfálticas. Adicionalmente estos bitúmenes pueden ser modificados con la adición de polímeros o elastómeros. La selección del bitumen a utilizar debe considerar la temperatura de la superficie al momento de la aplicación, el tipo de agregado y su afinidad con el bitumen, y el clima de la región durante el periodo de construcción del sello (McLeod, 1969).

Algunas experiencias internacionales han mostrado buenos resultados en la utilización de cemento asfáltico (CA). Asfalto blando es recomendado en aplicaciones de TS, así como también la adición de agentes que faciliten la retención del agregado en el bitumen. La principal ventaja de la utilización de CA es que se reduce el tiempo de apertura al tráfico del camino sellado. Sin embargo como desventajas se identifican la alta temperatura de aplicación (sobre los 120°C), la sensibilidad a la presencia de humedad en el agregado y en la superficie del camino, y la necesidad de mayor compactación. Las altas temperaturas de aplicación significan también mayores riesgos en la seguridad de los operadores.

Las emulsiones asfálticas – comentadas en mayor profundidad en el punto 5.3 – por su parte se aplican normalmente a temperaturas menores a los 80°C. En términos generales están constituidas por cemento asfáltico, un agente emulsificante y agua. El cemento asfáltico (bitumen) permanece suspendido en el agua por la acción del agente emulsificante. Una vez evaporada el agua la celda se rompe y se libera el bitumen, lo que se denomina quiebre. La mayor ventaja de este mecanismo es que la adhesión entre el bitumen y el agregado es menos sensible a la presencia de humedad en el agregado y en el ambiente. La mayor desventaja es que la distribución del agregado sobre la emulsión debe realizarse antes que esta quiebre, para dar tiempo a que la compactación se realice antes del quiebre también. La otra desventaja es que en algunos casos, por la poca afinidad entre el agregado y la composición de elementos presentes en la solución emulsificada, el quiebre total y la liberación completa del bitumen puede tomar varias horas e incluso días.

El estudio “Evaluación TxDOT de desempeño de bitúmenes para TS usando información de sistemas de mantenimiento de pavimentos y mediciones de terreno en el distrito de San Antonio, TX” (Gransberg, 2008) evaluó el desempeño de TS construidos con bitúmenes del tipo asfalto cortado (AC) y otros construidos con bitúmenes de asfaltos emulsificados. Las conclusiones de este trabajo mostraron que si bien no se observaron diferencias en las mediciones de parámetros de desempeño de ambos tipos de sellos en la etapa temprana de su vida de servicio, si se observaba una tasa más rápida de pérdida de textura en los sellos construidos con AC. Esto se puede deber a la mayor tendencia a la exudación del cemento asfáltico. Al aplicar el criterio cuantitativo utilizado en Nueva Zelanda para medir la profundidad de textura superficial al cabo de un año de servicio, dos de los cinco caminos construidos con AC hubieran fallado el test, mientras que todos los caminos construidos con emulsiones pasaban el test. Finalmente este estudio indicaba que los caminos construidos con emulsiones mostraron ser más eficientes en términos de costo-efectividad que los caminos de AC para todos los criterios de comparación. De esta manera, este estudio ratifica la tendencia actual a la mayor utilización de emulsiones, especialmente las modificadas, y explica la poca efectividad de los sellos de capa tipo Otta Seal.

Variaciones más recientes en la tecnología de emulsiones incluye el desarrollo de “emulsiones de alta flotación” (High Float Emulsions – HF). Las ventajas de esta tecnología es que los agentes emulsificadores empleados tienen la capacidad de penetrar en el polvo de las partículas de agregado permitiendo la adherencia con agregados con mayor suciedad (hasta 5% pasando la malla ASTM N°200). Adicionalmente se observa que la película de asfalto residual en las partículas es más gruesa. Estas propiedades aumentan la efectividad de estas emulsiones en climas fríos y húmedos, por lo cual son muy empleadas en Canadá y los estados del norte de

EE.UU. Sin embargo estas mismas propiedades les podrían restar efectividad para ser utilizadas como primer sello sobre base granular, cuando este se aplica directo sobre la base.

Los resultados del estudio “Revisión del desempeño de los Tratamientos Superficiales” (Duval Engineering LLC - Dep. Transp. Washington County OR, USA, 2011) indican que el cambio de la especificación hecho el año 2008 en relación al tipo de bitumen empleado en primera aplicación directa sobre la base granular – sin imprimación previa –, el cual paso de un asfalto cortado tipo MC-250 previo al año 2009 a una emulsión aniónica HFMS-2SP a partir del año 2009, fue un factor en el deterioro prematuro y las fallas tempranas observadas en los caminos construidos en TS múltiple a partir de ese año. Debido a que la emulsión empleada en las segundas y terceras aplicaciones de TS no vario del uso de emulsión aniónica HFE-90-1S, cuyo desempeño había sido evaluado como bueno por varios años, el menor desempeño se asoció a la primera capa TS. Las observaciones cualitativas detectaron que el MC – 250, al ser un asfalto cortado con solvente generalmente tipo kerosene, podía penetrar más en la superficie de la base y generar una fase de unión más firme entre la primera aplicación de TS y la superficie de la grava. Por su parte la emulsión HFMS-2SP al ocupar bastante menos solvente y estar diluido en agua con agentes emulsificadores, perdía la capacidad de penetración inicial y en el tiempo, generando una fase de unión más débil entre la base y la primera aplicación de TS.

Los resultados de campo del estudio Síntesis 342 - NCHRP (Douglas Gransberg, David M.B. James, 2005), muestran que la tecnología de bitúmenes más empleada en la actualidad son las emulsiones modificadas, siendo su alto costo (alrededor de un 20% más) la única limitación a una utilización mayor. Su popularidad se extendió por la mayor parte de EE.UU. y hoy son también ampliamente empleadas en Nueva Zelandia, donde se originó la tecnología TS tradicional, pese a toda la tradición en el uso de cementos asfálticos de éste último país. Las investigaciones muestran como ventajas de las emulsiones modificadas su menor susceptibilidad a la temperatura y las condiciones climáticas al momento de la aplicación, su mejor adherencia con la superficie sobre la cual se aplica el sello, su capacidad de retención del agregado, aportan una mayor flexibilidad al sello y reducen los tiempos de apertura al tráfico.

Las propiedades de las emulsiones también se mejoran con la adición de otros aditivos como son caucho, latex, poliuretano y otros. En Australia se acostumbraba a agregar caucho en tasas de un 16% a 20% en volumen. Sin embargo su elevado costo limitó su utilización. Actualmente se adicionan compuestos sintéticos más modernos como latex SBR y poliuretano SBS. El desarrollo de la tecnología de emulsiones y su impacto en la construcción de sellos bituminosos se detalla en el punto 5.3.

Respecto de la determinación de las cantidades de bitumen que es necesario aplicar en una superficie que se quiere sellar con TS, el método de McLeod (McLeod, 1969) define un procedimiento para determinar dosificaciones iniciales según el tipo de tratamiento superficial y las características del agregado seleccionado. Este método establece además la necesidad de ajuste en las dosificaciones teóricas de emulsiones durante la aplicación en terreno, considerando la absorción observada de bitumen por la superficie inferior. Sin embargo los métodos de diseño modernos que se emplean en Nueva Zelanda y Australia, principalmente, determinan cuantitativamente la dosificación de bitumen apropiada basada en una caracterización cuantitativa de la superficie inferior, sobre la base de factores de absorción, condiciones de tráfico, condiciones climáticas, tipo de agregado y tipo de sello de tratamiento superficial. Todos los métodos tienen como objetivo que los granos de grava queden cubiertos a una altura de entre un 50% y 70% de la dimensión menor promedio de los granos del agregado.

Una diferencia fundamental del método constructivo neozelandés para TS sobre bases granulares, aplicados como primeros sellos, respecto de la técnica que se utiliza en Chile, es que en nuestro país se solicita la aplicación de una capa de un imprimante sobre la superficie de la base antes de la aplicación de TS. En Chile se define un residual mínimo de asfalto en piso antes de la aplicación de la primera capa de TS, el cual se aporta con el riego de una emulsión altamente acuosa.

En Nueva Zelanda, el país con mayor experiencia en TS, rara vez se emplean sellos de imprimación (Gundersen, 2008) por razones de: a) seguridad, ya que los “primer” son diluciones de asfaltos con un alto porcentaje de componentes volátiles que son contaminantes y limitan las temperaturas de trabajo a un máximo de 60°C; b) limitaciones de clima y humedad, alta humedad en la superficie de la base y bajas temperaturas inhiben la capacidad de penetración de este tipos de líquidos y aumentan considerablemente sus tiempos de curado, c) Riesgos ambientales, los “primer” tienen baja densidad y flotan en agua, aumentando los riesgos de contaminación lateral. Adicionalmente la capacidad de penetración de un “primer” se logra a expensas de su capacidad de adherencia por lo cual sus tiempos de curado son bastante mayores y su contribución a la adherencia del TS con la base es muy baja.

La efectividad de ésta técnica se ratifica en el estudio de Duval Engineering LLC para el condado de Washington (Duval Engineering LLC - Dep. Transp. Washington County OR, USA, 2011), donde se observaron largas vidas de servicio en tratamientos superficiales aplicados directamente sobre bases granulares en caminos rurales, sin un riego de imprimación previo (Prime coat). La utilización de un asfalto cortado (MC-250) o emulsión con menor viscosidad, mayor penetración

y con aditivos que faciliten la buena adherencia con los granos del sello y la superficie de la base granular muestran ser prácticas adecuadas para estos primeros sellos directos.

Gundersen (Gundersen, 2008) en su resumen también menciona que para facilitar la penetración del bitumen en la base granular, y evitar la utilización de imprimación, en Nueva Zelanda se especifican bases de graduación abierta y se diseña el primer sello con emulsiones de menor viscosidad pero igualmente con un buen contenido residual de asfalto y alta capacidad de adhesión de partículas. En Chile este cambio de práctica permitiría ejecutar tratamientos superficiales triples (Duval Engineering LLC - Dep. Transp. Washington County OR, USA, 2011) a un costo muy cercano a los tratamientos superficiales dobles actuales, que consideran imprimación previa sobre la base granular. La técnica nacional ganaría en rapidez de ejecución, al no tener que esperar el quiebre de la imprimación; menores interrupciones de tránsito, ya que una vez curado el primer sello se puede transitar sobre él (a velocidades controladas); mejor calidad de construcción, ya que las bases terminadas rápidamente se cubren con el primer sello de capa protegiéndolas del deterioro; y rentabilidad sobre la inversión, ya que se pueden diseñar tratamiento triples a costos equivalente a los actuales tratamiento dobles.

Por la alta sensibilidad de la técnica de TS a la calidad y características de los bitúmenes utilizados, se hace necesario que en Chile se fomente el estudio y dominio de la tecnología de emulsiones. Profundizar el conocimiento, generar tecnología propia y permitir el desarrollo de productos mejor adaptados a nuestras realidades de agregados y climas, debiera ser parte integrante de los objetivos de la política nacional de desarrollo vial y del programa de caminos básicos. La posibilidades de combinación de tipos de bitúmenes y agentes potenciadores de las características de las emulsiones son casi ilimitadas, por lo cual siempre será factible desarrollar un producto mejorado. En el punto 5.3 del presente informe se comentan los principales avances recientes en emulsiones para sellos asfálticos.

3.1.2 EL AGREGADO (GRAVA) PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

Junto a la selección del bitumen, el tipo de agregado es el otro aspecto fundamental para el diseño de un TS exitoso. La selección de un bitumen apropiado está directamente relacionado con el tipo y la calidad del agregado a emplear, y de estos dos materiales dependen aspectos constructivos específicos que sea necesario definir para la correcta ejecución del sello. La durabilidad de la solución está directamente relacionada a estas consideraciones.

La calidad del agregado se define básicamente en torno a una serie de parámetros. En la tabla 3.1.- se muestran las exigencias para el agregado de acuerdo al Manual de Carreteras de Chile comparado con su equivalente neozelandés. Por otro lado parte importante de la calidad de los agregados es el ajuste de éstos a las definiciones de tamaños y graduación que establece la norma de construcción. En la tabla 3.2 se muestran las curvas granulométricas exigidas por el MC 2013 para Chile. En la tabla 3.3 se resume la especificación del manual RAMM 2004 de Nueva Zelanda. Resalta el hecho que la norma neozelandesa solo considera agregados monotamaño para los TS de mayor tamaño. Además esta norma es mucho más estricta en cuanto a forma de partículas controlando específicamente parámetros asociados a cubicidad y uniformidad que no controlamos en Chile.

TIPO ENSAYO	Propiedades Generales Agregado Pétreo			
	M.C. Vol.5 y Vol.8 - 2013		RAMM NZ - 2004	
	Especificación	Método	Especificación	Método
Desgaste Los Ángeles	Máximo 25%	8.202.11	Máximo 25%	Test especial
Desintegración con S. de Sodio	Máximo 12%	8.202.17	Máximo 10%	Test especial
Resistencia Compresión	-	-	> 230 kN	Test especial
Adherencia Método Estático	Mínimo 95%	8.302.29	-	-
Árido Chancado	Mínimo 70%	8.202.6	-	-
Lajas	Máximo 10%	8.202.6	-	-
Índice de Lajas	Máximo 30%	8.202.7	-	-
Forma de Partículas	-	-	AGD/ALD \leq 2,25	*
Uniformidad de Partículas	-	-	ALD +/- 2,5 mm	**
Fino por lavado	Máximo 0,5%	8.202.4	Máximo 0,5%	Test especial

* Nota: AGD = Average Greatest Dimension (Dimensión más grande promedio)

** Nota: ALD = Average Least Dimension (Dimensión más pequeña promedio)

Tabla. 3.1.- Ensayos para Agregados TS, MC Vol.5 y Vol.8 - 2013 y NZ RAMM 2004.

TAMIZ (ASTM)	PROCENTAJE EN PESO QUE PASA (%)						
	MC - V5 TN	MC - V5 TN	MC - V5 TN	MC - V5 TN	MC - V5 TN *	MC - V5 TN *	MC - V5 TN *
	25-12,5	20-10	12,5-5	10-2,5	20-12,5 a	20-12,5 b	10-6,3 a
1"	90-100	100	-	-	100	100	-
3/4"	20-55	90-100	100	-	85-100	95-100	-
1/2"	0-10	20-55	90-100	100	0-20	0-20	100
3/8"	0-5	0-10	40-70	85-100	0-7	0-5	95-100
1/4"	-	-	-	-	-	-	0-40
N°4	-	0-5	0-15	10-30	-	-	0-5
N°8	-	-	0-5	0-10	0-1	-	-
N°16	-	-	-	-	-	0-1	0-1
N°200	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5

* Nota: Estas bandas granulométricas se consideran monotamaño y la exigencia de porcentaje de partículas chancadas sube al 95%.

Tabla. 3.2.- Granulometría de Materiales para TS, MC Vol.5 2013. (Dirección de Vialidad, 2013)

GRADO / Tipo NZ RAMM 2004	ALD *	Tamaño Tamiz (aproximado)	Definición Imperial (Tamaño 100% Pasa)
2	9,5 mm – 12,0 mm	19 mm máx.	3/4 pulgada
3	7,5 mm – 10,0 mm	16 mm máx.	5/8 pulgada
4	5,5 mm – 8,0 mm	13 mm máx.	1/2 pulgada
5	-	9,5 mm – 5,0 mm (graduado)	3/8 pulgada
6	-	6,3 mm – 3,0 mm (graduado)	1/4 pulgada

* Nota: ALD = Average Least Dimension (Dimensión más pequeña promedio)

Tabla. 3.3.- Granulometría de Materiales para TS, NZ RAMM 2004

La función de la cubierta de agregado es transmitir la carga del tránsito a la carpeta granular inferior. Debe además entregar un buen índice de fricción para evitar los deslizamientos de los vehículos, debiendo resistir también el deterioro producto del clima y producto del tránsito diario. Normalmente la limitación a la exigencia del árido viene de las posibilidades de conseguirlo relativamente cerca de la zona de trabajo. En EE.UU. esta consideración limita en la

mayoría de los casos el tipo de agregado definido en un diseño de sello TS. Sin embargo países como Australia y Nueva Zelandia ponen tanto énfasis en la calidad del agregado que no es raro que éste sea transportado largas distancias hasta los lugares de trabajo. En Chile disponemos de rocas de buena calidad a lo largo de todo el territorio. Nuestra dificultad está en el adecuado proceso de chancado, selección y lavado.

El tamaño del agregado se escoge de acuerdo al volumen de tráfico, el tipo de terminación superficial deseada, y la cantidad de capas a aplicar. Los agregados de mayor tamaño presentan duraciones mayores y son menos sensibles a variaciones en la dosis de bitumen aplicado. Sin embargo si no se compactan bien y no se tiene cuidado de barrer adecuadamente los excedentes sueltos, a mayor tamaño de agregado mayores será la probabilidad de que los vehículos que transiten por el camino recién construido sufran algún tipo de daño. A medida que la terminación es más rugosa producto de la utilización de agregados mayores, el ruido por tránsito aumenta.

La experiencia internacional indica que en la medida que el agregado presente mayor uniformidad, este más limpio y sus partículas sean chancadas y de alta cubicidad, mejores serán los resultados finales observados en un sello de Tratamiento Superficial.

La forma de las partículas de grava influye mucho en la durabilidad del sello, la retención del agregado y el comportamiento del sello TS. La alta cubicidad de las partículas es una característica deseada ya que hacen que el tránsito no tenga un gran efecto en la orientación final de las partículas. Además la cubicidad ayuda a que los granos de agregado se entrelacen y traben, con lo cual se observa una relación positiva que indica que a mayor cubicidad de partículas, mayor será la duración y estabilidad de sello TS. Por el contrario, si las partículas tienden a ser de formas alargadas o lajas, la orientación final producto del tránsito hará que éstas se acomoden dejando su dimensión más pequeña en la dirección normal a la superficie, quedando completamente cubiertas por el bitumen, y generando la exudación del sello. Por último es deseable que las partículas del agregado presente varias caras fracturadas, al menos más de dos, de manera que se asegure una mínima trabazón de los granos.

El polvo adherido a la superficie de los granos del agregado es probablemente el principal factor en los problemas de retención de agregado. EL polvo se define como el material que pasa bajo la malla ASTM N°200. Todas las normas restringen los finos bajo este tamiz a un máximo tolerable del 1%. EL MC Vol. 5 limita la presencia de finos a un 0,5%. Si bien la norma es bastante estricta el problema en la práctica se reduce al seguimiento de buenas prácticas en la fase de

construcción del sello, de manera de asegurar la limpieza del agregado en los procesos de producción, acopio y conservación previo a su aplicación.

3.2 MEJORES PRACTICAS EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

De la revisión de la literatura se identificaron las mejores prácticas en tratamientos superficiales que pueden tener un impacto importante en la construcción de caminos secundarios en Chile, las cuales se listan a continuación:

- I. Mejores prácticas en la definición de proyectos, diseño y selección de materiales:
 - A. En los estudios de definición de los proyectos buscar la alternativas más eficientes económicamente para subir el estándar de caminos con cubierta granular, considerando los mejores métodos de construcción para la técnica de acuerdo al estado de avance de la tecnología TS en ese momento. Los sellos de capa de grava no solo son una de las soluciones de sello bituminoso que requiere menor inversión inicial, sino que habitualmente son la mejor alternativa económica en el tiempo.
 - B. El tratamiento superficial podrá ser aplicado con éxito sobre capas granulares de base con alta capacidad de soporte, con terminación superficial cerrada, libres de arcillas y libres de sedimentos.
 - C. El tratamiento superficial puede ser aplicado en caminos con volumen de tránsito medio y medio alto, siempre que el diseño estructural se adecúe a la solicitud de trabajo, considerando estrictos requisitos mínimos para la calidad estructural de las bases y la sub-base (existente), en sus capacidades de soportes, espesores, y su terminación (base).
 - D. En diseño considerar el volumen de tránsito que se generará después del cambio de estándar de la cubierta, el cual en el caso de caminos rurales aumentará abruptamente solo por el cambio de camino de capa granular a camino con sello bituminoso.
 - E. Realizar una buena caracterización de la terminación de la superficial de la base, en cuanto a textura, la penetración de la imprimación (o primera aplicación de emulsión directa) y la adherencia de ésta con la capa de sello bituminoso y grava del TS.

- F. Hacer prueba de carga eléctrica al agregado seleccionado para asegurar su compatibilidad con la emulsión escogida.
 - G. Hacer análisis de costos que consideren los ciclos de vida esperados de las distintas soluciones de sello posibles, que considere las necesarias operaciones de mantenimiento del sello en cada caso, en horizontes no menores a 20 años.
 - H. Especificar detalladamente los tipos de agregados escogidos, que sean uniformemente graduados, de alta resistencia a la trituración, alto grado de cubricidad de granos, fracción chancada superior al 70%, tolerancia de contenido máximo de finos arenosos muy baja, y contenido máximo de arcillas y otros sedimentos muy bajo.
 - I. Considerar el uso de filamentos de fibras sintéticas aplicadas con el agregado en sectores donde se espera mayor daño probable, asociado a tráfico pesado.
 - J. Fomentar en lo posible el uso de emulsiones modificadas con polímeros o látex – u otros avances que mejoren las propiedades del sello – por sus mejores características que retardan el deterioro de la cubierta, mejoran la flexibilidad del sello, reducen el deterioro por rayos UV, y facilitan la adherencia de las partículas del agregado (ver Capítulo 4, punto 4.3).
 - K. En caminos de alto volumen de tránsito considerar solo el uso de emulsiones modificadas con polímeros.
- II. Mejores prácticas en la etapa constructiva de tratamientos superficiales:
- A. Para mejores resultados aplicar todos los tipos de sellos TS en condiciones climáticas favorables o muy favorables, siempre cumpliendo como mínimo:
 - i. Temperatura del aire al momento de la aplicación 10°C y subiendo cuando se usan emulsiones – puede aceptarse 5°C y subiendo cuando se usan emulsiones modificadas siempre que se tenga especial cuidado en aplicar una buena compactación neumática y control de apertura al tránsito.
 - ii. Temperatura del aire al momento de la aplicación de 20°C y subiendo cuando se usan cementos asfálticos.

- iii. En todos los casos el pronóstico meteorológico debe indicar una máxima diaria por sobre los 20°C, la humedad ambiente bajo el 60%, y sin lluvias al menos durante las 24 hrs. posteriores a la aplicación.
 - iv. Para resultados óptimos se recomienda que la temperatura de la superficie donde se aplicará el sello este por sobre los 20°C y no más de 54°C. De no cumplirse la condición mínima se recomienda elevar la temperatura de aplicación de la emulsión – no pasando el máximo definido por el fabricante – y reducir al mínimo el tiempo entre la distribución de la emulsión, la distribución de la grava, y la primera compactación (rodillo neumático).
- B. En el caso de aplicaciones sobre pavimentos deteriorados, completar la ejecución de parches al menos 6 meses antes y el sello de fisuras al menos 3 meses antes de la aplicación del sello TS.
- C. Aplicar el agregado tan rápido como sea posible, tanto cuando se emplea emulsión como cuando se emplea cemento asfáltico.
- D. Hacer que el operador más experimentado chequee las dosificaciones sobre la superficie de trabajo, instruyendo los últimos ajustes necesarios en las dosificaciones y en la repartición de las tareas en terreno.
- E. En sectores donde se espera una mayor sollicitación por frenado de vehículos y mayores sollicitaciones por giro de los mismos, disponer de la aplicación de un leve exceso de agregado para reducir los problemas de desprendimiento.
- F. Reforzar las exigencias de compactación de agregado sobre el bitumen. Definir los requerimientos técnicos sobre los compactadores neumáticos, el procedimiento de compactación, los ciclos de compactación mínimo y los tiempos de compactación mínimo por tramos de avance.
- G. Determinar cuantitativamente la cantidad de compactadores neumáticos requeridos para la ejecución del sello, como una función de la producción esperada del equipo esparcidor de grava por hora de trabajo, de manera que durante ese mismo tiempo se asegure ejecutar el número de ciclos mínimos de compactación por punto.
- H. Mantener los equipos de compactación tan cerca del equipo esparcidor de grava como sea posible.

- I. Mantener tráfico vehicular restringido y control de velocidad sobre el tratamiento por el mayor tiempo posible. Al menos no permitir el tránsito antes del quiebre de la emulsión y controlar la velocidad por las siguientes 6 horas.
- III. Mejores prácticas en equipamiento para tratamientos superficiales y en aseguramiento de calidad:
- A. Requerir que los equipos empleados en tratamientos superficiales sean actualizados a los avances de la práctica (ver Capítulo 4, punto 4.1).
 - B. Sustituir la etapa de imprimación de la superficie granular de la base por una primera aplicación directa de TS ejecutada con emulsión de menor viscosidad y buen residual de asfalto – disuelta en solvente y con aditivos que faciliten la penetración.
 - C. En caminos nuevos, para un mejor retorno de la inversión inicial, ejecutar tratamientos dobles como mínimo, siendo los triples la técnica recomendada – esta práctica se ve facilitada con la sustitución de la imprimación por una primera aplicación directa (punto III.B.- anterior) que hace posible el agregar una nueva capa de sello de grava a un costo marginalmente mayor.
 - D. Siempre chequear que los equipos de compactación neumática estén en perfecto estado de operación, con todos sus neumáticos con presión pareja y sin riesgo de fallas.
 - E. Usar equipos de controlados por computador para la distribución de emulsión o asfalto en calientes.
 - F. Usar equipos barredores con cepillos plásticos (no metálicos) para reducir el desprendimiento de agregado en el proceso de barrido de excedentes.
 - G. Usar un control periódico de los equipos en la etapa de construcción junto con una inspección permanente en terreno.
 - H. Calibrar regularmente tanto el distribuidor de bitumen como el esparcidor de grava, al menos cada día antes de comenzar la operación.
 - I. Asegurar que el bitumen tenga la temperatura mínima de trabajo en todo momento durante la operación.

J. Testear cada día antes de la operación la calidad del bitumen tanto en el estanque del distribuidor como en el tanque de almacenamiento, a fin de verificar que este en buena condición de trabajo.

IV. Finalmente se resumen las mejores prácticas para la administración de contratos y medidas de desempeño de los sellos ejecutados:

A. Promover proyectos de un tamaño tal que incentiven la especialización y atraigan contratistas que puedan desarrollar la técnica con tecnología de punta y personal altamente calificado en la tecnología.

B. Generar una asociación entre las agencias gubernamentales para la transferencia de la tecnología hacia y entre los contratistas, así como también instancias regulares de capacitación de nuevos operadores y contratistas.

C. Promover contratos de Tratamiento Superficial de una envergadura económica y temporal tal que permitan trabajar en base a garantías de desempeño que cubran una vida útil en servicio mínima para el sello. La vida útil debe estar definida en base a parámetros de calidad objetivo (ver puntos E. y F. siguientes).

D. En estos contratos de desempeño garantizado, el contratista debe tener la facultad de determinar y proponer su solución más apropiada para el éxito del sello, en cuanto a tipos de bitumen a emplear, tipo de agregado elegido, metodología de trabajo y equipos a emplear. La agencia debe verificar que se cumplen los mínimos establecidos en la normativa técnica y experiencia internacional.

E. Utilizar el método del parche de arena para medir la macrotextura del sello de tratamiento superficial. Servirá como medida objetiva de desempeño de la solución.

F. Implementar un modelo de medición y seguimiento del deterioro del sello TS, como el empleado por la agencia de transportes de Nueva Zelandia, con el fin medir con principios ingenieriles el desempeño de los sellos (ver Capítulo 4, punto 4.4.).

3.3 TIPOS DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN CHILE

En el punto 5.407 del Manual de Carreteras Vol.5, se especifican los requerimientos nacionales para la construcción de sellos de capa del tipo Tratamiento Superficial.

La descripción del procedimiento es general y establece que de acuerdo al número de aplicaciones de riego de asfalto y de áridos, los TS se clasificarán en:

- a. Tratamiento Superficial Simple (TSS). Aplicación monocapa en la que generalmente se emplea un agregado pétreo uniforme de tamaño máximo 13 mm (1/2”).
- b. Doble Tratamiento Superficial (DTS). Aplicación en dos capas que se construye generalmente con una primera capa de agregado pétreo uniforme de tamaño medio 19 mm (3/4”) seguida de una segunda aplicación en 9,5 mm (3/8”).
- c. Triple Tratamiento Superficial (TTS). Aplicación en tres capas muy poco empleada por sus costos.

Los requisitos para los asfaltos que se permite utilizar en estos TS se definen en el numeral 5.405.201 del mismo manual. Normalmente se solicita una emulsión catiónica de quiebre rápido del tipo del tipo CRS-2 sin polímero o del tipo CRS-2P modificada con polímeros. Cabe destacar que en la práctica los diseños de TS empleados en Chile se concentran en una solución que pese a entregar resultados buenos y aceptables en muchas condiciones de proyectos, puede no ser la óptima en ciertos tipos de agregados, climas y terreno, presentes en el país. Las definiciones de la norma nacional para emulsiones, Vol. 8, incluyen la especificación de casi la totalidad de los tipos de emulsiones que actualmente se emplean en otros países para distintos climas.

La tendencia actual en los proyectos de caminos básicos muestra una inclinación al diseño de TS con emulsiones modificadas, aunque signifique costos mayores, debido a su mejor desempeño y mayor durabilidad. En el futuro se esperaría que se comiencen a emplear soluciones con definiciones más específicas para distintos escenarios de clima y agregados.

Respecto del procedimiento constructivo en la aplicación del sello, el MC Vol.5 sección 5.407.305 indica que

“Una vez aplicado el asfalto sobre la superficie a sellar, se deberá proceder de inmediato a cubrirlo con áridos. La distribución del árido deberá efectuarse de manera que las ruedas del esparcidor, en ningún momento entren en contacto con el material bituminoso recién aplicado.....

Un rodillo neumático deberá operar en todo momento detrás del equipo esparcidor de áridos, efectuando la compactación inicial del tratamiento superficial con traslapes de rodillo de mínimo 0,3 m, hasta cubrir el total de la superficie. La faena de rodillado deberá continuar utilizando equipo complementario, incluyendo el rodillo liso, hasta lograr un perfecto acomodo y planchado de las partículas. En todo caso, la faena de rodillado consistirá en un mínimo de tres pasadas completas de rodillo sobre la misma superficie, incluyendo el rodillado inicial.”

El procedimiento descrito es general, sobre todo respecto de los equipos requeridos para la distribución del bitumen asfáltico y el esparcido del agregado pétreo. Por lo anterior la norma chilena permite introducir innovaciones en esta etapa del proceso constructivo, como es el caso de la tecnología de “Sello de capa sincrónico” descrita en detalle en el capítulo 5 de este estudio. La dificultad para su aplicación está en el proceso de control durante la ejecución, que no le permite controlar por separado la dosis de emulsión de la cuantía de grava esparcida.

Respecto del proceso de rodillado, que es fundamental para el buen resultado del sello, el MC chileno exige la compactación con rodillo liso. La experiencia internacional recomienda evitar su empleo para evitar la fractura de los granos del agregado.

A continuación se resumen las características de los sellos de capa de capa TS del tipo simple y doble.

3.3.1 TRATAMIENTO SUPERFICIAL SIMPLE (TSS)

DESCRIPCION

El Tratamiento Superficial Simple (TSS) es una aplicación de ligante del tipo bitumen asfáltico seguido de una capa uniforme de agregado pétreo triturado de tamaño uniforme (entre 8 y 13 mm.) y alta cubrición en su forma. Se puede utilizar como una primera capa bituminosa sobre la superficie de una base granular chancada, así como un tratamiento de conservación del pavimento existente para proporcionar una nueva superficie antideslizante más resistente, corregir pequeños desprendimientos, y sellar grietas menores. Para lograr una mejor terminación superficial es recomendable aplicar un sello tipo Fog Seal con aporte de material fino tipo arena, polvo de roca, o una combinación de ambos. La fig. 2.3 muestra sus componentes.

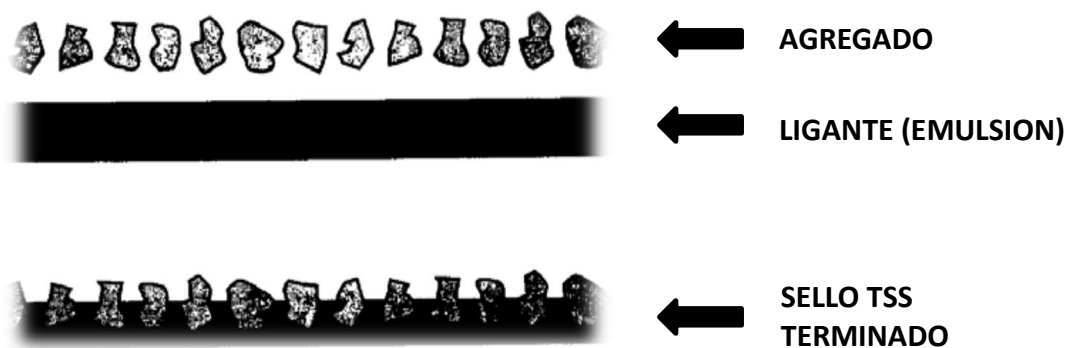


Fig. 2.3.- Esquema de Tratamiento Superficial Simple

DESEMPEÑO Y VIDA UTIL ESPERADA

Estudios de los sellos TSS en servicio en la red de caminos de Nueva Zelanda, entregan como vidas de servicio para los distintos grados de agregado seleccionado, los siguientes valores:

VIDA DE SERVICIO ESPERADA EN TS PARA DISTINTOS VOLUMENES DE TRANSITO

Fuente manual RAMM – NZ 2004

Tipo de Tratamiento Superficial	Transito 1 (<100 TMDA)	Transito 2 (100-500 TMDA)	Transito 3 (500-2000 TMDA)	Transito 4 (2000-4000 TMDA)	Transito 6 (4000-10000 TMDA)	Transito 6 (10000-20000 TMDA)
	Vida de Servicio (años)					
PRIMERA CAPA SOBRE BASE GRANULAR (First Coat)						
TSS - 9,5 mm máx	1	1	1	1	1	1
TSS - 13 mm máx	3	2	1	1	1	1
TSS - 16 mm máx	4	3	2	1	1	1

Tabla. 3.4.- Vida de Servicio esperada por nivel de tránsito para un sello TSS. NZ RAMM Manual.

Los caminos intervenidos bajo el programa de caminos básicos casi siempre presentan valores de TMDA menores a 500, por lo cual para el cálculo de costo anual equivalente se emplean estas vidas esperadas. Por otro lado el diseño típico de TSS empleado en Chile considera agregado de tamaño máximo 13 mm. De esta forma se estima que la vida de servicio del sello será de 2 años.

COSTO DIRECTO UNITARIO COMO PRIMER SELLO

E.1 - ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ITEM CODIGO M.C. *	5.407	DESIGNACIÓN	TRATAMIENTO SUPERFICIAL SIMPLE (TSS) MODIFICADO CON POLIMERO
UNIDAD DE MEDIDA	m2	CANTIDAD ANALIZADA	1

* Según Manual de Carreteras Volumen 5 - Versión Año 2013

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)	PORCENT. INCIDENCIA
--------	--------	-----------------	---------------------	-----------------------------	------------------------

MATERIALES

Transporte Aridos		50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total		
Imprimante	lts	1,2		\$ 400	\$ 400	\$	480 18,6 %
Emulsión DTS	lts	1,6		\$ 505	\$ 505	\$	808 31,3 %
Emulsión Fog Seal	lts	0,5		\$ 445	\$ 445	\$	223 8,6 %
Gravilla 7-12 mm	m3	0,015	\$ 7.500	\$ 12.000	\$ 19.500	\$	293 11,3 %
Polvo Roca	m3	0,005	\$ 7.500	\$ 13.000	\$ 20.500	\$	103 4,0 %
SUB-TOTAL MATERIALES						\$	1.906 73,8 %

EQUIPOS

Rendimiento Promedio		250 m2/hr					
Camión Gravillador *	hr	0,004		\$ 45.979		\$	184 7,1 %
Camión Imprimador	hr	0,004		\$ 31.620		\$	126 4,9 %
Retroexcavadora	hr	0,004		\$ 23.510		\$	94 3,6 %
Rodillo Neumático	hr	0,004		\$ 25.594		\$	102 4,0 %
Barredora Industrial	hr	0,004		\$ 27.128		\$	109 4,2 %
SUB-TOTAL EQUIPOS						\$	615 23,8 %

MANO DE OBRA

Capataz Asfaltos	hr	0,004		\$ 5.859		\$	23 0,9 %
Maestro Terreno	hr	0,004		\$ 3.581		\$	14 0,6 %
Ayudante	hr	0,008		\$ 2.930		\$	23 0,9 %
SUB-TOTAL MANO DE OBRA						\$	61 2,4 %

COSTO DIRECTO (CD)		\$	2.583
G. GENERALES	0% cr CD)	\$	-
UTILIDADES	0% cr CD)	\$	-
IMPREVISTO	0% cr CD)	\$	-
PRECIO UNITARIO ITEM	(PUI)	\$	2.583
COSTO TOTAL ITEM SELLO		\$	2.583
BASE CHANCADA TM25		\$	3.989
COSTO TOTAL ITEM (SELLO + BASE)		\$	6.572

COSTO ANUAL EQUIVALENTE

Un sello de tipo TSS construido con agregado de tamaño máximo 13 mm, de acuerdo a los antecedentes revisados entrega los siguientes costos anuales equivalentes promedio (C.A.Eq.) por m² de sello y por m² de capa de protección más base:

A. TSS como sello, vida útil esperada de 2,0 años:

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 2.583.-}{2,0 \text{ años}} = 1.292.- (\$/año)$$

B. TSS como solución de camino básico, capa de protección más base chancada TM25, vida útil esperada de 2,0 años:

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 6.572.-}{2,0 \text{ años}} = 3.286.- (\$/año)$$

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Sus principales ventajas son:

- Bajo costo inicial como sello de protección. Es el sello que requiere la menor inversión inicial entre las capas de protección generalmente empleadas en Chile.
- Puede proveer una muy buena impermeabilización de la superficie.
- Genera una macrotextura rugosa que mejora el índice de fricción del camino y facilita el drenaje de agua sin provocar pozas superficiales.
- Es un sistema de protección económico y simple de construir.
- Rápida ejecución.
- Bien construido puede mostrar buenos resultados incluso en situaciones de mayor esfuerzo de corte superficial, como son las zonas de pendientes.

Las principales limitaciones del TSS son:

- La apariencia, calidad y desempeño de un TSS depende mucho de la técnica y experiencia del constructor.
- Su alto costo si se considera la base granular como parte de la solución de camión. Esto se debe a su corta vida de servicio, 2 años.
- Su baja resistencia al esfuerzo de corte superficial. Zonas de frenado y cruces.
- No entrega buenos resultados cuando la superficie sobre la cual se aplica tiene una terminación dispareja y no homogénea.

3.3.2 DOBLE TRATAMIENTO SUPERFICIAL (DTS)

DESCRIPCION

El sello asfáltico tipo Doble Tratamiento Superficial (DTS) es el más sencillo y a la vez más empleado de los sellos múltiples o de armadura de capas. Está constituido por dos aplicaciones de ligante bituminoso y dos capas de agregado, generalmente terminadas con un riego de neblina con y sin aporte de finos pétreos, dependiendo de la textura final deseada.

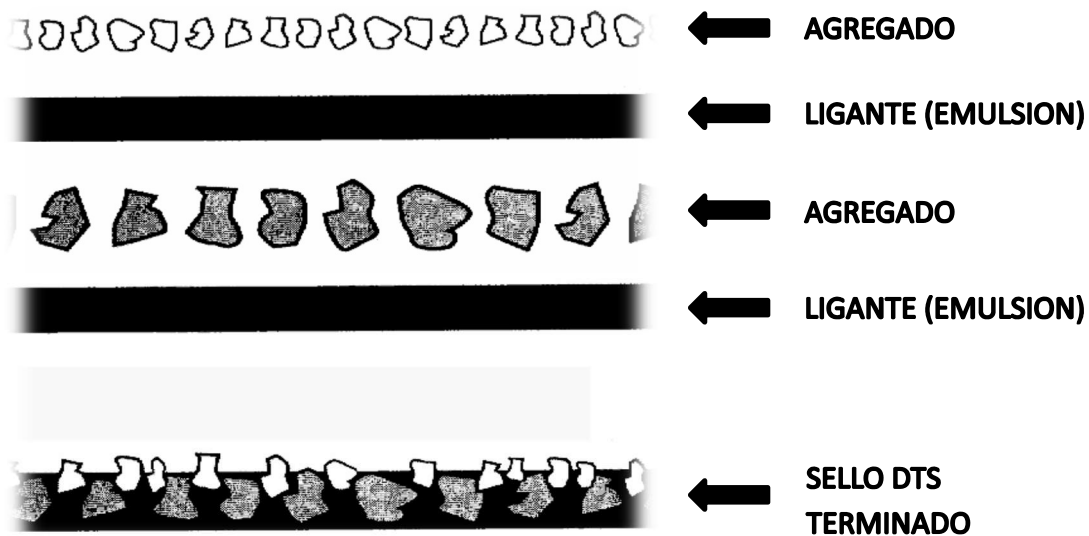


Fig. 2.2.- Esquema de Doble Tratamiento Superficial.

DESEMPEÑO Y VIDA UTIL ESPERADA

Estudios de los sellos DTS en servicio en la red de caminos de Nueva Zelanda, entregan como vidas de servicio los valores que se presentan en la Tabla 3.5.-

Los caminos intervenidos bajo el programa de caminos básicos casi siempre presentan valores de TMDA menores a 500, por lo cual para el cálculo de costo anual equivalente se emplean estas vidas esperadas. Los diseños de los DTS construidos en Chile consideran áridos de tamaño máximo 19 mm (3/4") en primera aplicación y 10 mm (3/8") en segunda. De esta forma se estima que la vida de servicio del sello será de 6 años.

COSTO DIRECTO UNITARIO COMO PRIMER SELLO

E.1 - ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ITEM CODIGO M.C. *	5.407	DESIGNACIÓN	DOBLE TRATAMIENTO SUPERFICIAL PM (DTS) CON ELAST.	
UNIDAD DE MEDIDA	m2	CANTIDAD ANALIZADA	1	

* Según Manual de Carreteras Volumen 5 - Versión Año 2013

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)	PORCENT. INCIDENCIA
--------	--------	-----------------	---------------------	-----------------------------	------------------------

MATERIALES

Transporte Aridos		50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total		
Imprimante	lts	1,0		\$ 400	\$ 400	\$	400 10,6 %
Emulsión DTS	lts	2,9		\$ 505	\$ 505	\$	1.465 38,7 %
Emulsión Fog Seal	lts	0,5		\$ 445	\$ 445	\$	223 5,9 %
Gravilla 10-20 mm	m3	0,022	\$ 7.500	\$ 10.000	\$ 17.500	\$	385 10,2 %
Gravilla 7-12 mm	m3	0,014	\$ 7.500	\$ 12.000	\$ 19.500	\$	273 7,2 %
Polvo Roca	m3	0,005	\$ 7.500	\$ 13.000	\$ 20.500	\$	103 2,7 %
SUB-TOTAL MATERIALES						\$	2.848 75,2 %

EQUIPOS

Rendimiento Promedio		180 m2/hr					
Camión Gravillador *	hr	0,006		\$ 45.979		\$	255 6,7 %
Camión Imprimador	hr	0,006		\$ 31.620		\$	176 4,6 %
Retroexcavadora	hr	0,006		\$ 23.510		\$	131 3,4 %
Rodillo Neumático	hr	0,006		\$ 25.594		\$	142 3,8 %
Barredora Industrial	hr	0,006		\$ 27.128		\$	151 4,0 %
SUB-TOTAL EQUIPOS						\$	855 22,6 %

MANO DE OBRA

Capataz Asfaltos	hr	0,006		\$ 5.859		\$	33 0,9 %
Maestro Terreno	hr	0,006		\$ 3.581		\$	20 0,5 %
Ayudante	hr	0,011		\$ 2.930		\$	33 0,9 %
SUB-TOTAL MANO DE OBRA						\$	85 2,2 %

COSTO DIRECTO (CD)		\$	3.788
G. GENERALES	0% cr CD)	\$	-
UTILIDADES	0% cr CD)	\$	-
IMPREVISTO	0% cr CD)	\$	-
PRECIO UNITARIO ITEM	(PUI)	\$	3.788
COSTO TOTAL ITEM SELLO		\$	3.788
	BASE CHANCADA TM25	\$	3.989
COSTO TOTAL ITEM (SELLO + BASE)		\$	7.777

VIDAS DE SERVICIO ESPERADAS EN TS PARA DISTINTOS VOLUMENES DE TRANSITO

Fuente manual RAMM – NZ 2004

Tipo de Tratamiento Superficial	Transito 1 (<100 TMDA)	Transito 2 (100-500 TMDA)	Transito 3 (500-2000 TMDA)	Transito 4 (2000-4000 TMDA)	Transito 6 (4000-10000 TMDA)	Transito 6 (10000-20000 TMDA)
	Vida de Servicio (años)					
PRIMERA CAPA SOBRE BASE GRANULAR (First Coat)						
DTS - 14 y 7 mm máx	6	4	3	2	2	1
DTS - 16 y 9,5 mm máx	8	6	5	4	3	2
DTS - 19 y 13 mm máx	10	8	6	5	4	3

Tabla. 3.5.- Vida de Servicio esperada por nivel de tránsito para un sello DTS. NZ RAMM Manual.

COSTO ANUAL EQUIVALENTE

Un sello de tipo DTS construido con áridos de tamaño máximo 19 mm en primera aplicación y 10 mm en segunda aplicación, de acuerdo a los antecedentes revisados entrega los siguientes costos anuales equivalentes promedio (C.A.Eq.) por m² de sello y por m² de capa de protección más base:

- A. DTS aplicado como sello de rehabilitación, vida útil esperada de 6,0 años.

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 3.788.-}{6,0 \text{ años}} = 631.- (\$/año)$$

- B. DTS como solución de camino básico nuevo, capa de protección más base chancada TM25, vida útil esperada de 6,0 años.

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 7.777.-}{6,0 \text{ años}} = 1.296.- (\$/año)$$

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

De esta manera las principales ventajas de un DTS son:

- Al considerar la vida útil esperada de la solución el DTS pese a requerir una mayor inversión inicial, entrega un menor costo anualizado en el tiempo de servicio del sello.
- Es mucho más tolerante al esfuerzo de corte superficial que un TSS.
- Permite corregir pequeñas irregularidades presentes en la superficie inferior.
- Su vida de servicio es 3 veces mayor que un TSS.

Las principales limitaciones del DTS son:

- La apariencia, calidad y desempeño de un DTS depende mucho de la técnica y experiencia del constructor.
- Durante la construcción e incluso varios meses después de la entrega en servicio se genera una gran importante cantidad de agregado suelto en la superficie del camino.
- Es entre un 50% a un 100%% más costoso que un TSS como inversión inicial.
- La calidad del resultado final está directamente relacionado con las cantidades de bitumen y el tipo de agregado seleccionado para cada capa del sello.
- Debido a que el bitumen se aplica sobre las partículas de mayor tamaño, las huellas de los vehículos tienden a marcarse a medida que el sello envejece, en la medida que las partículas se acomodan de manera que el plano que definen sus dimensiones mayores queda paralelo a la superficie del camino. Esto se corrige con mayor cubrición.
- El ruido que genera el tránsito en la superficie depende directamente de los tamaños de agregados seleccionados y las técnicas de construcción empleadas.

3.4 Comentarios del Capítulo

La experiencia revisada muestra que la técnica más apropiada en términos de costo-efectividad por Costo Anual Equivalente es el DTS con emulsión modificada. Para asegurar una buena vida en servicio del sello, la ejecución de un método como sigue:

- i. Aplicación de la emulsión asfáltica, esparcida por la superficie que se desea sellar en la dosis establecida como apropiada para cubrir el 50% a 70% del tamaño medio de grano, e inmediatamente,
- ii. Esparcido de una capa uniforme de granos de grava que se distribuya sobre el asfalto en una dosis ajustada en terreno para generar poca presencia de granos libres (no adheridos) después de la compactación, la cual se compacta neumáticamente hasta dejar las partículas bien embebidas en el bitumen.
- iii. Luego de la compactación, y la constatación de la adecuada incrustación de las partículas, se procede a repetir los puntos 1) y 2) para la segunda capa (y tercera capa).

El barrido del exceso de granos sueltos presentes en la superficie se hace varios días después de la aplicación del sello, cuando se constata en terreno que la emulsión ha quebrado por completo y que las partículas embebidas están bien adheridas.

De la práctica internacional en TS surgen también mejoras al método constructivo para Tratamientos Superficiales que se emplea en Chile. Se concluye que **la protección de la base constituye el objetivo central de estos sellos bituminosos**. Por lo anterior se sugiere que la normativa incorpore criterios que permitan favorecer la reducción de los tiempos de ejecución de los sellos de protección de la base granular, dentro de los cuales se identifican como importantes:

- i. Indicar que en el caso de utilización de Sellador de Capa Sincrónico, el control de la dosis de emulsión y las cuantías de grava se ejecute en la calibración del equipo. La sincronización del proceso no permite un control independiente durante la ejecución del sello – aunque la automatización de ambas descargas no lo hacen necesario. Esto reducirá los tiempos de ejecución, aprovechará la temperatura de la emulsión y evitará errores por descoordinación entre la distribución de la emulsión y el esparcido de la grava.
- ii. Permitir el empleo de emulsiones modificadas que permitan reemplazar el riego de imprimación por una mayor dosis de emulsión en primera aplicación que compense el residual de asfalto requerido en la superficie de la capa granular inferior. Con esto se reduce el tiempo de ejecución del primer sello, se acelera la protección de la base en su

mejor condición estructural, y se evita la incorporación de agua en exceso en el estrato superior de la base.

- iii. Permitir la aplicación de la segunda (y tercera) capa de TS inmediatamente después de terminar la compactación de la capa anterior, sin necesidad de esperar el quiebre y ejecutar un barrido de excedentes cuando los granos libres presentes sean mínimos. Esto acelera la terminación final del sello, evitando la exposición innecesaria de las capas intermedias del sello a las condiciones climáticas y al riesgo de suciedad por polvo y otros agentes nocivos. Además evita el daño que el barrido pueda provocar en una emulsión que no presenta un quiebre completo.
- iv. Aumentar la tolerancia de variación en terreno para las dosis de emulsión y cuantías de grava determinadas en diseño. Este criterio permitiría un rango mayor de ajuste durante la ejecución, reduciendo los riesgos de exudación y facilitando la corrección de los excesos de grava que obligan a un barrido entre aplicaciones de TS. Actualmente se establece un +/- 5% en un modelo teórico que siempre requiere ajustes a la realidad de las condiciones de ejecución. Se sugiere un 10% de tolerancia como aceptable (algunas condiciones especiales podrían requerir ajustes mayores).

CAPITULO IV

SELLOS ASFALTICOS CON SISTEMA SLURRY

4 SELLOS ASFÁLTICOS CON SISTEMA SLURRY

Los sellos asfálticos del tipo slurry corresponden a la Lechada Asfáltica (Slurry Seal) y al Microaglomerado en Frio (Microsurfacing). Estos sellos se vienen usando extensivamente en el mundo desde hace 40 años como soluciones efectivas para prolongar la vida del pavimento y como componentes principales de los sistemas de mantenimiento preventivo de caminos. En países como EE.UU., Canadá, Europa y China, estas tecnologías de sello cumplen una función central en los planes de conservación, mantenimiento y desarrollo de infraestructura vial.

En Chile su campo de aplicación actual es bastante amplio, incluyendo tanto la conservación y rehabilitación de pavimentos existentes como la construcción de primeros sellos en caminos rurales de la red nacional secundaria dentro del programa de caminos básicos. Para primeros pavimentos se emplean principalmente aplicaciones de sellos mixtos en doble capa – tipo Cape Seal.



Figura 4.1.- Aplicación de Cape Seal, TSS + Lechada Asf. (Ruta G-465 Las Melosas, Chile – Feb 2014).

No existe investigación extensiva en sellos con sistema slurry. Históricamente solo se ha considerado como una alternativa económica para la conservación de caminos existentes. Sin embargo los altos costos de los asfaltos y las crecientes necesidades de mantención y pavimentación de nuevas rutas, han hecho surgir un creciente interés por entender más las características de estas soluciones. El NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM de EE.UU. el año 2010 entregó una completa síntesis del estado del arte de estas tecnologías. En su introducción resume que la construcción de caminos con sellos del tipo slurry y microalomerados en frío continúa dependiendo más de la experiencia del contratista y del conocimiento del proveedor de la emulsión asfáltica, que de la información recopilada por la investigación y experiencia directa de las agencias gubernamentales responsables de la red vial de transporte y de las obras públicas. Esta característica se repite en Chile.

La ISSA (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010) incluye tanto las Lechadas Asfálticas como los Microaglomerados en Frío dentro de los sistemas Slurry de sellos asfálticos para la conservación de pavimentos. Destaca en sus definiciones las diferentes características en cuanto a emulsiones asfálticas empleadas en cada caso, las granulometrías de los agregados pétreos y los espesores de aplicación.

En Chile el Manual de Carreteras Volumen 5, en su sección 5.406.- y 5.419.- diferencia las Lechadas Asfálticas (Slurry Seal) de los Microaglomerados en Frío (Microsurfacing Slurry Seal) por el tipo de emulsiones que se acepta para cada caso y por las granulometrías solicitadas para los agregados pétreos. Sin embargo la especificación es menos precisa y no establece criterios que busquen cuantificar las diferentes cualidades de cada aplicación en cuanto a diseño de mezcla y forma de aplicación en terreno, como las características de los equipos requeridos, espesores de capa y kilos por m² para cada aplicación, ni tampoco una síntesis las propiedades físicas de cada mezcla, como son los tiempos de curado para apertura a tránsito y respuesta del quiebre en diferentes condiciones climáticas. Se entiende que nuestra definición se ajusta a la poca experiencia constructiva escasa difusión de los microaglomerados. En general en Chile se siguen solicitando lechadas asfálticas. La tendencia mundial muestra una fuerte tendencia a la utilización de microaglomerados por sobre las lechadas asfálticas, por su mejor relación costo-efectividad, por lo cual la escasa definición de la norma nacional puede ser una limitante al momento de querer fomentar la incorporación de innovaciones en microaglomerados slurry que mejoren las propiedades del sello y prolonguen su vida en servicio.

En lo que sigue de éste capítulo se detallan más antecedentes de las Lechadas Asfálticas y Microaglomerados en frío, resaltando sus diferencias técnicas y de desempeño. Luego se

describen los dos tipos de sello Cape Seal que se derivan de la combinación de cada una de estas tecnologías con una capa previa de TSS, por la importancia de este tipo de sello para los proyectos del programa de caminos básicos nuevos (Dirección de Vialidad - MOP, 2011). Finalmente se concluyen separadamente los costos, ventajas y limitaciones, del sello de capa tipo Cape Seal con Lechada Asfáltica y del sello Cape Seal con Microaglomerado, los cuales juegan un rol central en la pavimentación de la red de caminos rurales de Chile.

4.1 ANTECEDENTES GENERALES DE LOS SELLOS CON SISTEMA SLURRY

Los sellos asfálticos slurry consisten en una mezcla de emulsión asfáltica, estándar o modificada, agregados pétreos bien graduados con una gran cantidad de partículas chancadas, más una fracción de agua. En algunos casos se agrega también una pequeña cantidad de filler mineral (cemento o cal hidráulica) y aditivos para mejorar las características de la aplicación. El mezclado slurry es hecho en terreno por medio de una maquinaria especializada que mezcla los materiales continuamente a medida que los va depositando sobre la superficie del camino en una capa delgada de entre 5 a 15 mm, dependiendo del tipo de aplicación. La Figura 3.1 muestra esquemáticamente el proceso en una máquina para sello slurry.

El proceso mecánico de dosificación de ingredientes y mezclado provee un flujo continuo de mezcla slurry la cual se esparce en la superficie del camino por medio de una caja de difusión que trabaja usando espirales sinfines. La mezcla se hace en una consistencia tal que le permite quedar distribuida en una capa delgada de espesor regular. La función del asfalto emulsificado es permitir que la solución se active y quiebre al mezclarse con el agregado pétreo en un tiempo tal que permita que la mezcla se homogenice completamente y sea esparcida en la superficie. La mezcla aumenta su cohesividad y su dureza en la medida que se evapora el agua de la solución y/o en la medida que ésta reacciona químicamente con el agregado, liberando el bitumen. La importancia relativa de la evaporación natural del agua o de la reacción química en el endurecimiento de la mezcla depende del tipo de composición de la emulsión empleada.

Los sellos de lechada asfáltica slurry y microaglomerados en frío, por los pequeños espesores que generan (entre 5 mm y 15 mm), no aportan capacidad estructural al camino existente. Son sellos muy efectivos como tratamientos de preservación de pavimentos existentes en buena condición estructural, para la extensión de su vida útil como método de mantenimiento preventivo que recupera las propiedades superficiales de la carpeta de rodadura. Sus resultados como sistema de recuperación de propiedades estructurales del pavimento han sido muy limitados. Con nuevas

emulsiones con altos contenidos de polímeros ha mostrado resultados aceptables en el control del agrietamiento reflectivo y en la recuperación de carpetas que presentan superficie con piel de cocodrilo en un estado inicial. En condiciones estructurales deficientes sus resultados mejoran cuando se aplica como lechada asfáltica o microaglomerado sobre una capa de sello de armadura tipo Tratamiento Superficial Simple (TSS), conformando un sello mixto denominado Cape Seal. Esta es la razón por la cual esta última tecnología se transforma en una buena alternativa para la construcción de primeras capas asfálticas sobre bases granulares chancadas.

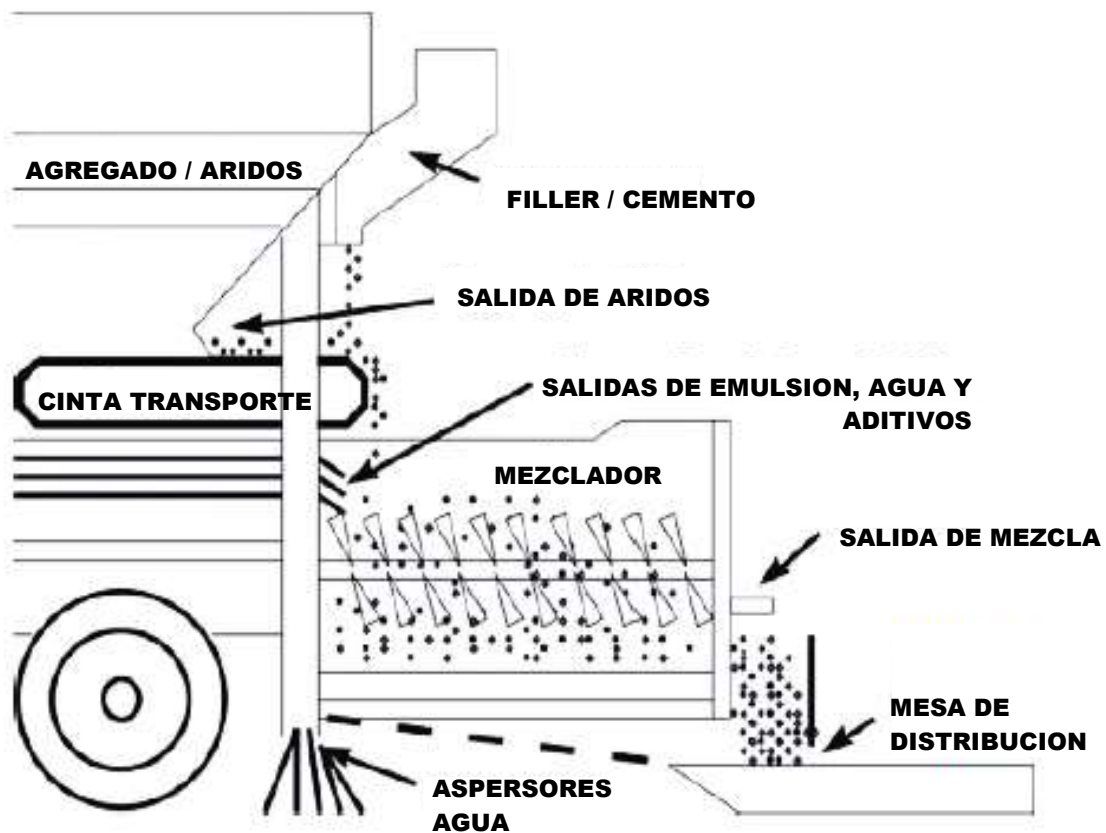


Figura 4.1.- Esquema de Máquina de Mezcla Slurry (ISSA 2010a).

Después de los sellos DTS, las aplicaciones tipo Cape Seal son las más solicitadas por los proyectos del programa de caminos básicos, cuyo objetivo es cambiar el estándar de tránsito de los caminos rurales de la red nacional. Se utilizan exclusivamente en caminos nuevos sobre una capa de Base Granular de CBR 100% y altamente compactada.

4.1.1 BREVE RESEÑA HISTORICA

Los sellos slurry se originaron en Alemania a principios de la década de 1930. Se les llamó “micro-concreto asfáltico” y consistían en una mezcla de un agregado pétreo muy fino y bien graduado, emulsión asfáltica y agua. La solución surgió como respuesta a las restricciones presupuestarias para la inversión pública en caminos en una Alemania fuertemente golpeada por la crisis económica de 1932. El siguiente gran avance en la técnica se produce a principios de la década de 1960 donde una breve crisis del petróleo del mar del norte (crudo Brent) hizo subir considerablemente el precio de materias primas y de los derivados del petróleo. Esta coyuntura obligó a buscar tecnologías que permitieran reducir los costos de pavimentación y así fomentar las políticas de desarrollo y mantenimiento vial. Durante este periodo se perfeccionó la maquinaria para la aplicación de mezcla slurry y se desarrollaron aditivos que mejoraron sustancialmente los resultados en terreno. Diez años más tarde, cuando la crisis del petróleo afecta a EE.UU., se comienza a experimentar con esta tecnología como alternativa para el mantenimiento vial en ese país.

En Chile estos sellos se vienen empleando como Lechadas Asfálticas desde hace unos 15 años. Actualmente la aplicación mixta del tipo Cape Seal es una de las técnicas de sellado de protección asfáltica más solicitada en los diseños de primeros asfaltos para caminos básicos de la red nacional de caminos secundarios.

Desde fines el año 2005 nuevamente nos encontramos experimentando un escenario de altos precios de materias primas y del petróleo. Por lo anterior ha crecido el interés en continuar perfeccionando esta técnica, y generar nuevas tecnologías para mantener la inversión vial y aumentar los kilómetros de caminos con buen estándar de tránsito. En este escenario los sellos de mezcla slurry están mostrando un fuerte avance por ser una solución económica y efectiva para la conservación vial y para la construcción de primeros pavimentos asfálticos.

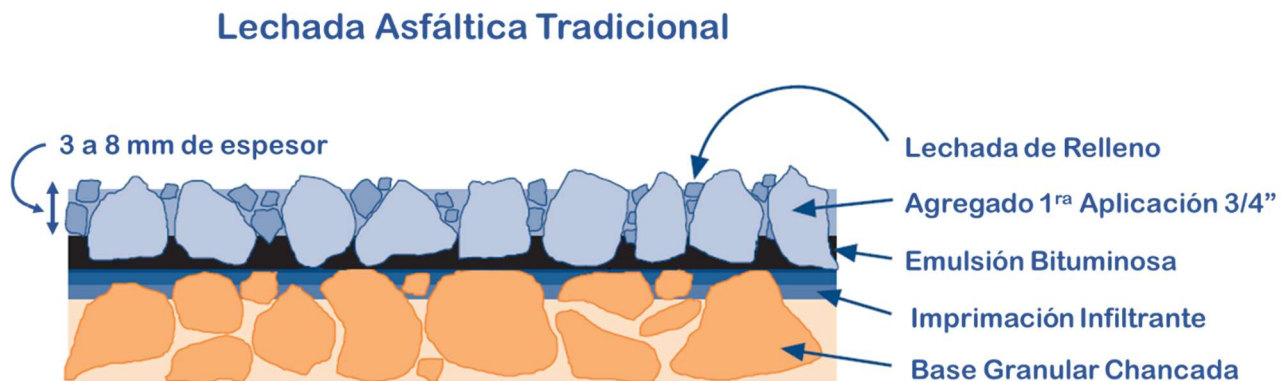
4.1.2 TIPOS DE SELLOS ASFALTICOS SLURRY

La diferencia entre los dos grandes tipos de aplicaciones de sellos asfálticos con sistema slurry, lechadas asfálticas y microaglomerados en frío con mezcla slurry, se encuentra en la granulometría del agregado empleado en cada caso y su equivalente de arena, el tipo de emulsión requerido, el porcentaje de agua en la mezcla y los espesores de instalación.

Los microaglomerados en frío son una evolución de la técnica de aplicación de lechada asfáltica, la cual considera estrictamente la utilización de emulsiones modificadas con polímeros, se instala en espesores mayores, y requiere de un equipo de mayor potencia para la instalación, con una mesa de distribución pesada y robusta, que dispone de dos líneas de sinfines giratorios. El uso de emulsiones de quiebre controlado modificadas con polímeros, la cual se mezcla con un agregado con mayor equivalente de arena y con una menor adición de agua para humectación, genera una mezcla espesa que escurre muy poco en la superficie de aplicación. Esto hace que el espesor del sello pueda ser mayor que el tamaño máximo de los granos de agregado, permitiendo también la aplicación en capas múltiples.

Estas diferencias tecnológicas y los distintos niveles de desempeño observado en las aplicaciones, ameritan clasificar ambos tipos de sellos de mezcla slurry como técnicas distintas. La ISSA en su Manual del Inspector de Sistemas Slurry del año 2010 hace la diferencia entre ambas técnicas según se detalla a continuación:

- 1. Lechada Asfáltica (Slurry Seal).** Es una mezcla de áridos bien graduados, generalmente bajo 7 mm (1/4"), asfalto emulsionado, agua y aditivos proporcionados adecuadamente. La mezcla se reparte en una superficie preparada adecuadamente. El Sello Slurry es aplicado en una mono-capa cuyo espesor se iguala al de la fracción de piedra de mayor tamaño del árido (sobre la base de la piedra más grande en la gradación).



Un caso especial de Lechada Asfáltica es la que emplea emulsión modificada.

- 1.1. Lechada Asfáltica Modificada con Polímero.** Es una lechada asfáltica diseñada con una emulsión de asfalto que se ha modificado con un polímero u otro aditivo con el propósito de mejorar las propiedades de la mezcla. Las modificaciones de las emulsiones pueden

mejorar la capacidad de unión entre el asfalto y el agregado, y pueden mejorar también la durabilidad y resistencia del sello.

- 2. Microaglomerado en Frio (Slurry Microsurfacing).** Es una mezcla de emulsión asfáltica catiónica modificada con polímeros, agregado con áridos 100% triturados mecánicamente, agua y otros aditivos. La mezcla se distribuye en una superficie previamente preparada, libre de partículas inapropiadas. Las características especiales de los polímeros y aditivos utilizados en estos microaglomerados permiten aplicaciones en mayores espesores que los de una lechada asfáltica, y también la aplicación de múltiples capas en proyectos con necesidades de nivelación y repavimentación. Además por las mejores propiedades de las emulsiones el tiempo de apertura a tránsito en mucho menor.

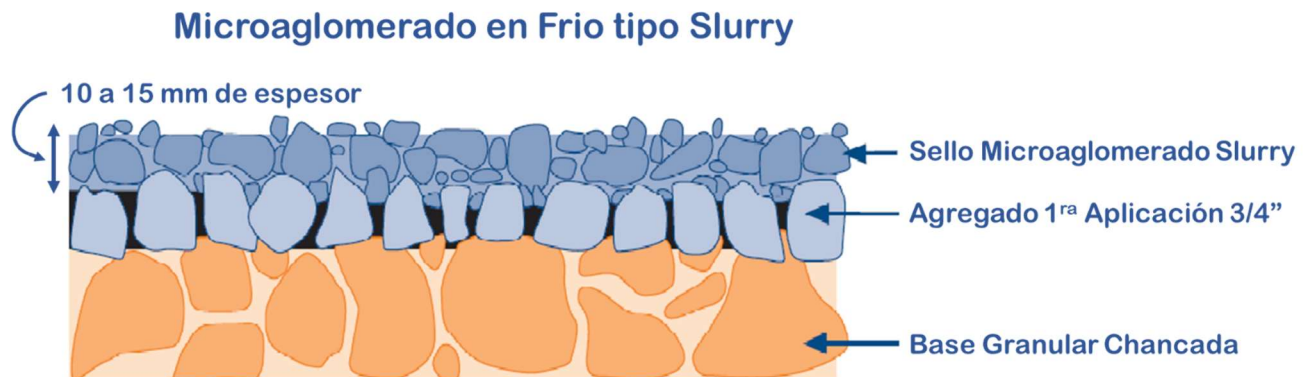


Fig 4.3.- Esquema de Cape Seal con Microaglomerado en Frio tipo Slurry.

Por último existe un grupo distinto de sellos de capa asfáltica tipo slurry, que considera la instalación de la mezcla sobre una superficie cubierta con un Tratamiento Superficial Simple recién construido. A ésta técnica se le denomina Cape Seal y la capa de sello slurry final puede ser una Lechada asfáltica, como lo indica el Manual de Carreteras en su Vol. 5 apartado 5.404, o bien un Microaglomerado en Frio, para lo cual no existe definición específica en el Manual de Carreteras de Chile. Debido a la importancia de estos tipos de sellos en el desarrollo del programa de pavimentación de caminos básicos rurales, en el presente estudio se analizan como soluciones separadas. Los desempeños de ambas técnicas son muy distintos, y por lo tanto las relaciones costo-efectividad distintas también.

- 3. Cape Seal.** Es un tratamiento de sello asfáltico que integra las mejores propiedades de los tratamientos superficiales con la buena terminación de los sellos slurry. La primera capa que se aplica consiste en un Tratamiento Superficial Simple en agregados monotamaño de

máximo de 19 mm (3/4”). La segunda capa es un sello slurry, generalmente con granulometría B1. Se incluye este sello mixto dentro de las tecnologías slurry ya que la terminación y las características finales de la superficie de rodado las proporciona la última capa aplicada. La principal ventaja de este sello respecto de los otros con sistema slurry es su mayor durabilidad, producto de sus propiedades mejoradas para transmitir la carga del tránsito a la capa de base granular inferior. Además permite la corrección y contención de los agrietamientos superficiales inferiores en su etapa temprana.

Se identifican 2 tipos de Cape Seal con sellos slurry:

3.1. Cape Seal con Lechada Asfáltica. Terminación delgada monocapa con ligante tradicional.

3.2. Cape Seal con Microaglomerado. Terminación gruesa monocapa o multicapa, con ligante modificado con polímero.

Diferencias en:	Lechada Asfáltica	Microaglomerado en Frio
Tipos de Emulsión Asfáltica	Puede emplearse o no emulsión modificada con polímeros de quiebre lento o quiebre controlado	Siempre con emulsión modificada con polímero y de quiebre controlado (tipo CQS-M/CRS-M/ERS-M)
Agregado Calidad / Graduación	Se puede trabajar con cualquiera de las granulométricas (A1, B1, C1 y D1)	Especificación estricta en cuanto al contenido de arena equivalente; trabaja con las granulometrías (B1, C1 y D1)
Aditivos / Quiebre	Quiebre y curado depende de buenas condiciones climáticas	Quiebre químico altamente independiente de las condiciones climáticas en la aplicación
Mezclado Rigidez / Equipos	Mezclado suave y emplea caja esparcidora de arrastre liviana en la cual un par de sinfines es suficiente	Mezclado fuerte con dos pares de sinfines en la caja de esparcido robusta, con un enrazado secundario al final
Aplicaciones	Corrige el fisuramiento temprano, sella pavimentos oxidados, mejora la condición de fricción	Las mismas aplicaciones de la lechada más la corrección de ahuellamiento, corrección de irregularidades menores y posibilidad de trabajo nocturno

Tabla 4.1.- Diferencias entre Lechada Asfáltica y Microaglomerado en Frio (Clatrans Division of Maintenance, 2009).

El Manual de Carreteras de Chile, en Vol. 5 apartado 5.404 “Tratamiento Superficial Simple con Lechada Asfáltica (Cape Seal)” no diferencia explícitamente entre una terminación de segunda capa hecha con Lechada Asfáltica tradicional de una hecha con Microaglomerados. Se define la aplicación estándar, generalmente aplicada con emulsión de quiebre lento del tipo CSS-1H sin modificar, con agregado en granulometría de banda B1 (MC Vol. 5.406) y en un espesor de 5 mm a 8 mm. Entrega la posibilidad de que a criterio de la Inspección Fiscal se puedan emplear emulsiones de quiebre controlado del tipo CQS-1H, las cuales pueden ser modificadas con polímeros. Es esta opción la que permitiría ejecutar la segunda capa como Microaglomerado en Frio, con emulsión modificada con polímero aplicada en un espesor mínimo de 10 mm seguida de compactación neumática para eliminar la pérdida de agregado, mejorando su adherencia y cohesión, antes de entregar el pavimento al tránsito.

Esta falta de definición hace difícil que un contratista solicite ejecutar la segunda capa como Microaglomerado en frío, ya que su costo es mayor y no se le exige. Aunque desde el punto de vista del sostenedor del camino, la Dirección de Vialidad, puede ser altamente aconsejable el actualizar la definición para fomentar el empleo de Microaglomerados como segundas capas en sellos tipo Cape Seal. De acuerdo a la experiencia internacional revisada la duración de vida en servicio de los sellos se incrementaría en un 50% o más.

4.1.3 APLICACIONES MÁS COMUNES

Las características de los sellos asfálticos tipo slurry les permiten poder abordar una amplia gama de necesidades de preservación, mantención y rehabilitación de pavimentos. Como solución tipo Cape Seal, que considera una terminación de Lechada Asfáltica o Micropavimento sobre una capa de Tratamiento Superficial Simple, se pueden abordar necesidades de primeras capas de protección asfálticas, sobre base granular con CBR 100% o superior, en caminos rurales y en caminos con necesidades de rehabilitación por condiciones de fisuramiento superficial extendido.

Dependiendo del espesor de la capa de slurry, del tipo y los aditivos de la emulsión empleada, y de la granulometría y calidad de los agregados pétreos, soluciones de sellos slurry son aplicables en distintas operaciones de mantenimiento, rehabilitación, y construcción de sellos nuevos, según se detallan a continuación agrupadas en tres grandes áreas de trabajo.

1. OPERACIONES DE MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS ENVEJECIDOS

Resultados esperados según tipo de aplicación

TIPO DE OPERACIÓN	TIPO DE APLICACIÓN	
	Lechada Asfáltica	Microaglomerado
• Control de fisuras superficiales (menores a 5 mm de ancho).	REGULAR	BUENO
• Control de la oxidación en pavimentos envejecidos.	BUENO	BUENO
• Mantención preventiva para prolongar la vida del pavimento y mejorar fricción superficial.	BUENO	BUENO
• Corrección de irregularidades menores en el perfil del camino (menores a 10 mm)	REGULAR	BUENO
• Corrección de ahuellamiento (menor a 10 mm)	REGULAR	BUENO

2. OPERACIONES DE REHABILITACION DE PAVIMENTOS DETERIORADOS

Resultados esperados según tipo de aplicación

TIPO DE OPERACIÓN	TIPO DE APLICACIÓN			
	Lechada Asfáltica	Microag. en Frio	Cape Seal c/Lechada	Cape Seal c/Microag.
• Control de grietas y fisuras reflectivas (hasta 10 mm). Previo tratamiento de sellado de grietas.	-	MALO (2 capas)	REGULAR	BUENO
• Corrección de grietas longitudinales y transversales Previo tratamiento de sellado de grietas.	-	BUENO (2 capas)	REGULAR	BUENO
• Corrección de irregularidades en el perfil del camino (hasta 25 mm)	-	BUENO (2 capas)	-	-
• Corrección de ahuellamiento (hasta a 25 mm)	-	BUENO (2 capas)	-	-
• Recuperación de superficies con piel de cocodrilo. Previo tratamiento de sellado de grietas y baches.	-	REGULAR (2 capas)	REGULAR	BUENO

3. OPERACIONES DE CONSTRUCCION DE PRIMEROS SELLOS

Resultados esperados según tipo de aplicación

TIPO DE OPERACIÓN	TIPO DE APLICACIÓN			
	Lechada Asfáltica	Microag. en Frio	Cape Seal c/Lechada	Cape Seal c/Microag.
• Sello nuevo sobre Base Chancada CBR > 100%, tamaño máximo bajo 1 1/4". TM25 MC Vol. 5	-	-	BUENO	BUENO
• Sello nuevo sobre Base Chancada CBR > 100%, tamaño máximo bajo 1 1/2". TM50 MC Vol. 5	-	-	REGULAR	BUENO
• Sello sobre Base Chancada 80% < CBR < 100%, tamaño máximo bajo 1 1/2". TM50 MC Vol. 5	-	-	MALO	MALO

Tabla 4.2.- Resultados probables por tipo de aplicación y tipo de operación.

4.2 LECHADA ASFÁLTICA (SLURRY SEAL)

Un sello de Lechada Asfáltica es una mezcla delgada de emulsión asfáltica, agregado pétreo bien graduado y triturado mecánicamente, filler mineral, agua y aditivos retardadores del curado. La característica diferenciadora de una lechada es que su fluidez es mucho mayor que la de los microaglomerados y se aplica en mono capa. El ajuste del quiebre de la emulsión se hace para grados de fluidez mayores, con un contenido porcentual de agua y emulsión mayor. Los agregados pétreos tienen contenido de finos mayor y su equivalente de arena típicamente está entre 45% y 55%.

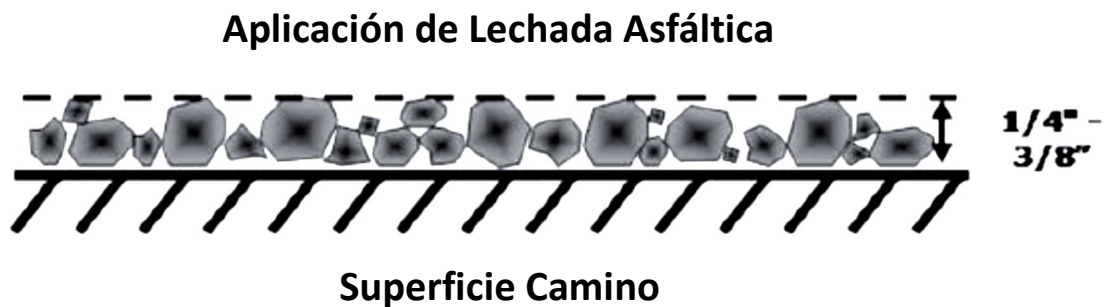


Fig. 4.4.- Esquema de Aplicación de Lechada Asfáltica.



Fig. 4.5.- Aplicación de Lechada Asfáltica.

4.2.1 MATERIALES PARA APLICACIONES DE LECHADAS ASFALTICAS

EMULSIONES ASFALTICAS

La emulsión asfáltica que se emplea en las lechadas asfálticas es generalmente de naturaleza catiónica. Las emulsiones que se ajustan para proporcionar un fraguado lento rompen principalmente por la evaporación del agua. Por su parte los conjuntos de emulsión de quiebre controlado incorporan emulsionantes que reaccionan químicamente con las superficies de los agregados pétreos, liberando el betún asfáltico. Las emulsiones de quiebre controlado siempre mantienen algún grado de ruptura química para generar la cohesión de la mezcla. No obstante la necesidad de fluidez de las lechadas asfálticas hace necesaria una importante presencia de agua en el mezclado y por consiguiente una alta necesidad de evaporación posterior con todos los tipos de emulsiones comúnmente empleadas.

En consecuencia para ambos conjuntos de emulsiones, lentas y de quiebre controlado, el curado de la mezcla estará fuertemente influenciado por las condiciones ambientales al momento de la aplicación. A altas temperaturas las emulsiones quiebran y curan más rápidamente que a temperaturas menores. La acción de la luz solar también mejora sustancialmente los tiempos de curado. La norma indica que la temperatura mínima al momento de la aplicación debe ser 10°C en la superficie del camino a sellar.

Las emulsiones usadas en sellos de lechada asfáltica se clasifican como de fraguado lento (SS - Slow Setting) o de fraguado rápido (QS – Quick Setting). Las emulsiones más comunes son:

- CSS1h (Cationic Slow Setting – Cationica de Quiebre Lento)
- CQS1h (Cationic Quick Setting – Cationica de Quiebre Controlado)
- SS1h (Anionic Slow Setting – Anionica de Quiebre Lento)
- QS1h (Anionic Quick Setting – Aniónica de Quiebre Controlado)

Estas emulsiones deben estar especialmente formuladas y calibradas para ser compatibles con el agregado pétreo a emplear. Además deben cumplir con los parámetros de diseño de mezcla adecuados exigidos por la norma técnica. Los diseños de emulsiones pueden ser modificados con polímeros (PM) o con latex (LM) para mejorar las propiedades de la superficie final y la durabilidad de la aplicación.

El objetivo del diseño y la selección de la emulsión correcta para cada aplicación de lechada asfáltica es que se logre una mezcla acuosa que produzca el quiebre liberador de betún en un

corto tiempo una vez se deposite el material en la superficie del camino. La emulsión debe ser lo suficientemente estable como para contener la liberación del betún en los primeros minutos de mezclado y lo suficientemente activa como para liberarlo una vez se deposite la mezcla en la superficie.

Los conjuntos de fraguado lento (SS) suelen requerir más tiempo para romper y curar, por lo cual son útiles cuando la reactividad (afinidad) entre el agregado y la emulsión es muy alta. A su vez, las emulsiones aniónicas son también menos reactivas que las catiónicas.

La propiedad de las lechadas asfálticas que las distingue de los microaglomerados es su mayor fluidez, que le entrega mayor trabajabilidad y facilidad de instalación de la mezcla. Esto se logra con un mayor contenido de agua en la mezcla final, el cual se aporta con la fase acuosa contenida en la emulsión y con el agua de amasado que se agregada al momento de la instalación. Los contenidos emulsión en la mezcla para una Lechada Asfáltica varían típicamente entre un 11% y un 13% en peso. Los contenidos de agua, por su parte, entre un 8% y un 10% en peso.

AGREGADO PETREO

La fracción pétreo es la más importante para la calidad final de una aplicación de lechada asfáltica. El desarrollo y utilización de la tecnología ha mostrado cuales son las propiedades de los áridos más determinantes:

- **Geología.** Las características geológicas propias de las rocas trituradas en la producción del agregado pétreo son determinantes del grado de compatibilidad de éste con la emulsión empleada y de las propiedades adhesivas y cohesivas de la mezcla. Algunas emulsiones pueden presentar baja adhesividad ante la presencia de áridos silíceos.
- **Graduación.** Es muy importante que el agregado pétreo sea de composición homogénea y bien graduado. Con una granulometría bien balanceada se logran mejores resultados.
- **Forma.** Los agregados pétreos deben tener caras fracturadas mecánicamente para facilitar la trabazón de la matriz mineral en la mezcla. Las propiedades mecánicas de la aplicación final mejoran en la medida en que sea mayor la fracción árida triturada mecánicamente. Una alta presencia de áridos redondeados disminuye también las propiedades antideslizantes de la aplicación. En toda aplicación de lechada se puede incorporar hasta un 20% en peso de arena natural.
- **Textura.** Los agregados pétreos de textura superficial rugosa se enlazan mejor con las emulsiones asfálticas que los con textura superficial suave.

- **Edad de producción.** Los áridos recién triturados tienen una mayor carga superficial que los áridos de producción antigua por lo cual su reactividad y afinidad es mayor. Esto reduce los tiempos de curado y mejora la cohesión de la mezcla final.
- **Limpieza.** Es muy importante que los áridos no tengan presencia de materia orgánica y de arcillas. La presencia de finos puede aumentar los requerimientos de agua en la mezcla y también dificultar la evaporación del agua. Además pueden provocar quiebres prematuros en las emulsiones aniónicas y reemulsificaciones destructivas en las emulsiones catiónicas. Se controla con el ensayo de Equivalente de Arena (E.A.). Para lechadas se exige un E.A. de mínimo 45%. Mientras más alto sea el valor de E.A. menos plásticos son los finos presentes en el agregado pétreo.
- **Resistencia a la abrasión.** Normalmente medido por el coeficiente de Desgaste de los Ángeles (D.A.), tiene directa relación con la degradación que experimentará la lechada en servicio. Cuanto mayor es el tamaño de árido empleado mayor debe ser la dureza solicitada y en consecuencia menor el D.A. máximo aceptado. A su vez a mayor sollicitación de tránsito mayor será la necesidad de áridos resistentes a la degradación.

Las bandas granulométricas aceptadas en Chile por el Manual de Carreteras Volumen 5 para aplicaciones de Lechadas Asfálticas, y sus equivalencias con la norma de Departamento de Transportes de EE.UU. (DOT Caltrans, 2006), se indican a continuación:

TAMIZ (mm)	PROCENTAJE EN PESO QUE PASA (%)						
	MC - V5 Chile	D.O.T. Caltrans	MC - V5 Chile	D.O.T. Caltrans	MC - V5 Chile	D.O.T. Caltrans	MC - V5 Chile
	A-1	Type I	B-1	Type II	C-1	Type III	D-1
12,5							100
10			100	100	100	100	85 - 100
5	100	100	85 - 100	94 - 100	70 - 90	70 - 90	62 - 80
2,5	85 - 100	90 - 100	62 - 80	65 - 90	45 - 70	45 - 70	41 - 61
1,25	60 - 80	60 - 90	45 - 65	40 - 70	28 - 50	28 - 50	28 - 46
0,63	40 - 60	40 - 65	30 - 50	25 - 50	18 - 34	19 - 34	18 - 34
0,32	25 - 42		18 - 35		12 - 25		11 - 23
0,16	15 - 30		10 - 24		7 - 17		6 - 15
0,08	10 - 20	10 - 20	5 - 15	5 - 15	5 - 11	5 - 15	4 - 9

Tabla 4.2.- Granulometrías de Áridos para Lechadas Asfálticas y Microaglomerados.

TIPO ENSAYO	Tipo Granulometría de Áridos			
	M.C. Vol 5 – 2013	D.O.T. – Caltrans - 2006		
	A1 – B1- C1 – D1	Type I	Type II	Type III
Equivalente Arena (min)	45% min.	45% min.	60% min.	65% min.
Desgaste los Ángeles	25% máx.	25% máx.	35% máx.	35% máx.
Índice Durabilidad	-	55	55	55

Tabla 4.3.- Características Generales de Áridos para Lechadas Asfálticas.

Respecto de las distintas granulometrías empleadas en Lechadas Asfálticas cabe mencionar que su mayor diferencia está en el tamaño de la fracción gruesa en cada caso. Esta característica repercute en la cantidad de asfalto residual mínimo necesario.

De acuerdo a la documentación revisada de DOT–Caltrans las lechadas de Tipo I son las que entregan una terminación más fina y han demostrado ser apropiadas en caminos de tráfico liviano y en parques de estacionamientos. Las de Tipo II, por ser más gruesas, han sido efectivas corrigiendo problemas de oxidación y corrigiendo el agrietamiento temprano en pavimentos existentes con niveles de tráfico medio. Las lechadas de Tipo III tienen la clasificación más gruesa de árido y son apropiadas para el llenado de irregularidades menores de la superficie, la corrección de fisuramiento temprano y la oxidación, junto con permitir la restauración de la capacidad de fricción de la superficie. Este último tipo se utiliza normalmente en las calles arteriales y en carreteras.

Los finos bajo de 0,08 mm (malla #200 - ASTM) son los responsables de formar el mortero de pega con las partículas de asfalto que se liberan después del quiebre de la emulsión, creando una pasta que al evaporarse el agua genera una aplicación impermeable y firme. Por lo anterior es importante que esta fracción siempre esté presente en los agregados pétreos seleccionados para cada proyecto.

FILLER Y OTROS ADITIVOS

En una aplicación de lechada asfáltica pueden darse condiciones de afinidad entre el agregado pétreo y la emulsión que aceleran el quiebre, reduciendo el tiempo disponible para generar la mezcla (excesiva afinidad), o bien retardan el quiebre (poca afinidad) con el consiguiente aumento del tiempo de apertura al tráfico.

Para el primer caso es recomendable la adición de un filler mineral del tipo cemento portland o cal hidráulica que permita retardar el quiebre de la emulsión y ayude a generar una mezcla de consistencia cremosa que facilita el esparcimiento en la superficie. El cemento también aporta material a la fracción más fina del agregado pétreo que aumenta la capacidad de absorción de agua, facilita la evaporación, y acelera el curado de la mezcla una vez esparcida en la superficie. Sin embargo una adición excesiva de cemento generará retracciones en el mortero de pega que fisuran la lámina al secarse, facilitando la destrucción del sello. Por lo anterior es altamente recomendable que el filler de cemento portland no supere el 2% del peso seco del agregado.

En caso de necesitar acelerar el tiempo de quiebre y curado de la mezcla slurry se pueden adicionar filler minerales que liberen iones que contrarresten la acción iónica del agente emulsificante en la mezcla. El aporte de iones de hidroxil es útil en estos casos.

Otros aditivos distintos a los mencionados pueden aportar otras características deseadas en la mezcla. La mayoría actúan como retardadores del quiebre de la emulsión al obstruir el acceso del agente emulsificador a las paredes del agregado pétreo. La mayoría de éstos aditivos se aportan diluidos en fase líquida, como el sulfato de aluminio y el bórax. Se emplean cuando la temperatura ambiente en el día puede ser muy alta, superior a 35°C.

4.2.2 ASPECTOS CLAVES EN SELLO DE LECHADA ASFALTICA

SELECCIÓN DE PROYECTO

La selección adecuada del proyecto y el momento en el cual se aplicará el sello de lechada asfáltica ha mostrado ser el factor más importante para el éxito de la solución en el tiempo. Las lechadas asfálticas han probado ser efectivas herramientas para la preservación de pavimentos como parte de programas de mantención vial que contemplen operaciones periódicas de rejuvenecimiento de pavimentos. Para lograr resultados óptimos previo a la aplicación de lechadas siempre será necesario corregir los baches en formación detectados en la carpeta a tratar, así como también sellar los agrietamientos superficiales.

Si bien las Lechadas Asfálticas por si solas rara vez se han empleado como primera capa asfáltica sobre bases granulares preparadas y compactadas, existe evidencia de pruebas hechas para evaluar su efectividad. De esta repasamos brevemente las principales consideraciones a tener en cuenta, previas a la ejecución del proyecto, en un sello de esta tipo:

- Evaluar el estado estructural de la superficie. Para aplicar lechadas se requiere que no existan evidencias de deterioro estructural de la base inferior en las superficies centrales ni en los hombros de la calzada.
- Evaluar el grado de deterioro del pavimento. Corrección de baches existentes y en formación, junto con el sellado de los agrietamientos superficiales.

Estas evaluaciones permiten definir si el deterioro que presenta la superficie a tratar puede ser abordado con éxito por un sello de lechada asfáltica. Los problemas del pavimento que se pueden abordar con éxito con esta aplicación son: corregir la alta porosidad por pérdida de material por tránsito en la superficie de la calzada, cubrir la oxidación y el agrietamiento fino en pavimentos antiguos, aumenta el índice de fricción del pavimento en calzadas antiguas o con alta demanda.

Sin embargo las lechadas asfálticas por ser aplicaciones de espesor mínimo que no aportan capacidad de soporte, y no son efectivas transmitiendo las cargas de tránsito a la base granular chancada, no han mostrado buenos resultados en: como primeras capas de protección sobre bases granulares chancadas, corrección de ahuellamiento avanzado (mayor a 10 mm), corrección de grietas profundas y reflectivas, frenar el avance de fallas que vienen desde la Base del pavimento, no corrigen ni frenan deformaciones plásticas por cizalle en carpetas de asfalto en caliente.

CONSTRUCCION DEL SELLO DE LECHADA ASFÁLTICA

El seguimiento de un proceso constructivo adecuado y la experiencia del contratista son aspectos fundamentales para el éxito y la calidad final de un proyecto de aplicación de lechada asfáltica. Por lo anterior se debe planificar al menos los siguientes aspectos en el proceso de construcción:

- **Logística y aprovisionamiento.** Es importante contar con una zona de acopio amplia, libre de obstáculos y posibles fuentes de contaminación. Esto permite una logística de aprovisionamiento fluida y limpia en el curso de la construcción.
- **Adecuada preparación de la superficie.** Se debe evaluar en detalle el estado de la calzada a tratar, y definir las operaciones de preparación necesarias para llevar la superficie al estándar mínimo aceptado para un tratamiento con lechada asfáltica.
- **Equipos y su operación.** Contar con todos los equipos necesarios en óptima condición operativa es requisito básico para que la intervención constructiva sea rápida y efectiva. Dados los tiempos de aplicación esta condición se debe chequear antes de cada inicio.

- **Condiciones de aplicación.** Se deben anticipar condiciones climáticas que pueden incidir en la calidad de la lechada asfáltica.
- **Tipo de aplicación.** El tipo de lechada asfáltica escogido para el proyecto debe ser el que más se adapta a las características del proyecto y clima evaluados en terreno.
- **Problemas de calidad.** Anticipar posibles problemas de terminaciones en las juntas longitudinales y transversales que se producirán al aplicar el sello, en los inicios de los tramos de instalación, en los términos y en las uniones laterales de los mismos. Evaluar y prevenir otros posibles problemas de calidad que se generen en estos puntos.

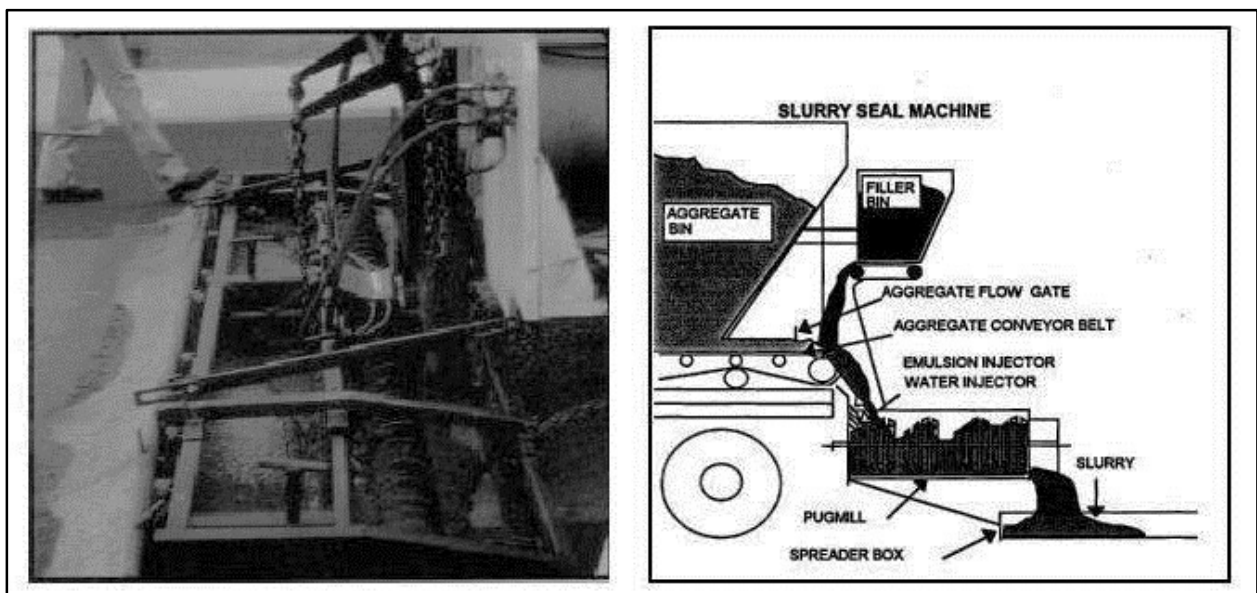


Fig. 4.6.-Equipo de Instalación de Lechada Asfáltica.

DESEMPEÑO Y VIDA UTIL ESPERADA

De acuerdo a un estudio realizado por Van Kirk en el estado de California EE.UU. , los sellos de tipo lechada mantienen condiciones adecuadas de servicio generalmente por periodos de 3 a 5 años. Sin embargo este mismo estudio indica casos en los cuales se han observado vidas de servicio larga (de hasta 15 años) cuando los sellos se aplicaron como verdaderos tratamientos de mantenimiento preventivo en las carpetas antiguas pero con condiciones estructurales sanas.

El tráfico no es la limitante principal de la vida útil en servicio de una lechada asfáltica. El desgaste existente en el pavimento original es mucho más incidente. Las fallas prematuras de las lechadas asfálticas siempre se producen en sectores con deterioros avanzados desde la base, en zonas con agrietamientos profundos que no fueron tratados antes de la aplicación de lechada, o debido a una mala limpieza de la superficie a tratar. Para efectos del cálculo del costo anual equivalente de una lechada asfáltica en Chile, que se empleará más adelante en el análisis comparativo de soluciones, se asume una vida útil en servicio del sello de 3 años.

COSTO DIRECTO UNITARIO

ANALISIS PRECIO UNITARIO

ITEM CODIGO M.C. *	5.406	DESIGNACIÓN	LECHADA ASFALTICA ESTANDAR - TIPO B1
UNIDAD DE MEDIDA	m2	CANTIDAD ANALIZADA	1

* Según Manual de Carreteras Volumen 5 - Versión Año 2013

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)	PORCENT. INCIDENCIA
--------	--------	-----------------	---------------------	-----------------------------	------------------------

MATERIALES

Transporte Aridos		50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total		
Riego Liga	lts	0,6		\$ 445	\$ 445	\$	267 17,0 %
Emul. Lechada Asf.	lts	1,5		\$ 445	\$ 445	\$	668 42,4 %
Polvo Roca	m3	0,010	\$ 7.500	\$ 13.000	\$ 20.500	\$	205 13,0 %
SUB-TOTAL MATERIALES						\$	1.140 72,4 %

EQUIPOS

Rendimiento Promedio		300 m2/hr					
Camión MP Slurry *	hr	0,003		\$ 41.711		\$	139 8,8 %
Retroexcavadora	hr	0,003		\$ 23.510		\$	78 5,0 %
Rodillo Neumático	hr	0,003		\$ 25.594		\$	85 5,4 %
Barredora Industrial	hr	0,003		\$ 27.128		\$	90 5,7 %
SUB-TOTAL EQUIPOS						\$	393 25,0 %

MANO DE OBRA

Capataz Asfaltos	hr	0,003		\$ 5.859		\$	20 1,2 %
Maestro Terreno	hr	0,003		\$ 3.581		\$	12 0,8 %
Ayudante	hr	0,003		\$ 2.930		\$	10 0,6 %
SUB-TOTAL MANO DE OBRA						\$	41 2,6 %

COSTO DIRECTO (CD)		\$	1.574
G. GENERALES	0% cr CD)	\$	-
UTILIDADES	0% cr CD)	\$	-
IMPREVISTO	0% cr CD)	\$	-
PRECIO UNITARIO ITEM	(PU)	\$	1.574
COSTO TOTAL ITEM		\$	1.574

COSTO DIRECTO ANUAL EQUIVALENTE.

En el cuadro anterior se muestran los parámetros del cálculo del costo directo por metro cuadrado (m²) para un sello del tipo Lechada Asfáltica.

El análisis de precios se hace para una emulsión corriente del tipo CSS-1H o CQS-1H, el cual arroja un costo directo por m² de \$ 1.574.- pesos.

Con este valor dividido por la vida de servicio esperada, se determina un costo anual equivalente promedio (C.A.Eq.) para las Lechadas Asfálticas aplicadas como sello de rehabilitación:

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 1.574.-}{3 \text{ años}} = 525.- (\$/año)$$

Para una solución de Sello sobre pavimento existente (rejuvenecimiento).

Cabe mencionar que las emulsiones modernas modificadas con polímeros y látex, aportan propiedades que mejoran la resistencia de la mezcla a la degradación por rayos UV, a la oxidación y la retracción por temperatura. Con estas emulsiones el costo directo de 1 m² de sello tipo lechada asfáltica puede ser un 10%-15% adicional. Sin embargo estas emulsiones modificadas pueden aumentar la vida útil en servicio del sello en al menos un 25%.

El análisis de costos unitarios con un aumento de un 20% en los costos de la emulsión generará un aumento de alrededor de un 8% (20% x 38,8% incidencia costo emulsión) en el costo de la aplicación del sello. Es decir con un 8% de inversión adicional se logra un 25% más de vida útil. Así la utilización de emulsiones modificadas tiene una mejor relación costo-efectividad.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Las principales ventajas de los sellos de lechadas asfálticas son:

- Extiende la vida útil de un pavimento existente con la menor inversión por m² dentro de las opciones de sellos de capa de protección.
- Permite recuperar las propiedades de la superficie de rodado sin necesidad de fresar el pavimento existente ni subir significativamente el nivel de la calzada.
- Corrige y mejora el estándar de conducción del camino.
- Aumenta el índice de fricción, mejorando la seguridad vial del camino.

- Mejora la impermeabilidad de la carpeta existente.
- Permite aplicar pigmentación que aporta a la delineación del camino.

Por su parte las principales limitaciones de esta aplicación son:

- La calidad de sus resultados todavía dependen mucho de la experiencia del contratista.
- Su mayor potencial de éxito está en su correcto empleo dentro de sistemas de mantenimiento vial preventivo, modelo poco utilizado en Chile.
- No se puede aplicar como sello en caminos nuevos, directamente sobre una carpeta de base granular chancada.
- No aporta estructura al pavimento existente por lo cual refleja rápidamente fallas por agrietamiento profundo y deformaciones plásticas de asfaltos existentes.
- Su eficacia radica en que se aplique como tratamiento preventivo temprano.
- Es muy sensible a la calidad de las emulsiones, de los agregados empleados y de la humedad de hidratación.
- No se pueden aplicar a bajas temperaturas menores a 12°C. Tampoco es apto para trabajos nocturnos. Ambas limitaciones restan efectividad a la solución y disminuyen su potencial como tecnología para el mantenimiento de la infraestructura vial urbana.

4.3 MICROAGLOMERADO EN FRIO (SLURRY MICROSURFACING)

Los microaglomerados están constituidos por una lámina delgada de mezcla slurry que se deposita sobre la superficie a tratar en un grosor que puede llegar a ser dos o tres veces el tamaño de las piedras más grandes del agregado pétreo empleado. El uso de emulsiones modificadas, con emulsificadores que aceleran su quiebre, y una baja adición de agua en el mezclado, hacen que la mezcla aplicada mantenga el grosor de instalación y no se esparza sobre la superficie por la acción de la gravedad.

La principal diferencia de los microaglomerados respecto de las lechadas asfálticas es que los primeros emplean emulsiones asfálticas modificadas de quiebre químico con mejores propiedades físicas debido a la presencia de polímero y/o látex. Además las características mecánicas potenciadas de los equipos que se emplean en su instalación permiten que la mezcla de microaglomerado en frío requiera de una menor fluidez, con menos contenido de agua de

hidratación, lo cual le permite ser instalada en espesores mayores – hasta 25 mm en corrección de ahuellamiento – reduciendo significativamente los tiempos de curado. Los tiempos de apertura al tráfico en microaglomerados son de 1 o 2 horas desde su instalación. Además el quiebre químico de la emulsión permite que la instalación sea altamente independiente de las condiciones climáticas y pueda ser ejecutada sin luz solar o de manera nocturna (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010) .

Un sello de Microaglomerado en Frio es una mezcla de emulsión asfáltica – siempre modificada con polímeros, látex natural o sintético – más un agregado pétreo triturado y bien graduado, agua y aditivos. Adicionalmente puede incorporarse un filler mineral. El ajuste del quiebre de la emulsión se hace para grados de fluidez menor, con un contenido porcentual de agua y emulsión menor en comparación a la Lechada Asfáltica. Se exige que los agregados pétreos sean de mejor calidad, con mayor resistencia a la abrasión, mayor índice de durabilidad, alto porcentaje de partículas chancadas – idealmente 100% chancado – y un contenido de finos bajo la malla N°200 bajo, expresado en un equivalente de arena típicamente superior a 60%.

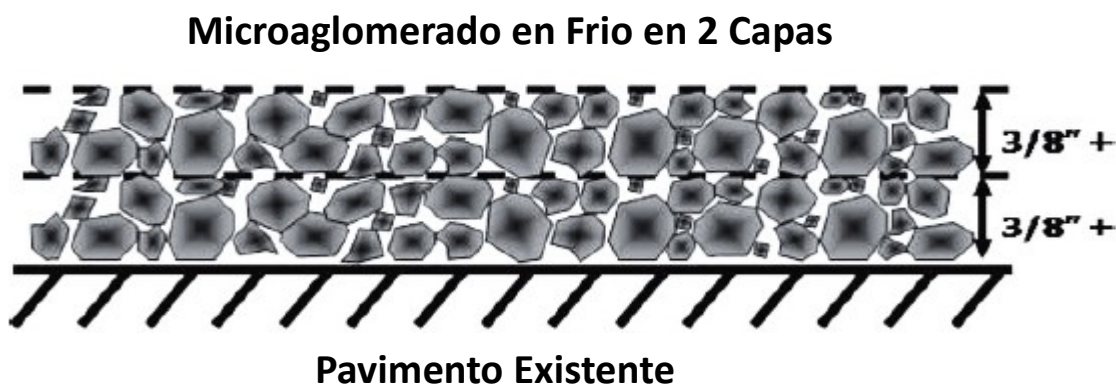


Figura 3.5.- Esquema de Aplicación de Microaglomerado en Frio.

Debido a las propiedades mejoradas que presenta el Microaglomerado en frío respecto de las mezclas de lechada asfáltica, esta solución es adecuada para abordar los mismos problemas pero además entrega resultados satisfactorios en:

- Sello corrector de irregularidades menores en el perfil de las calzadas.
- Corregir el ahuellamiento de la superficie de rodado – hasta 25 mm (en 2 capas).
- Sus características le permiten ser aplicada durante la noche y en condiciones climáticas de menor temperatura – 8°C y subiendo.

- Ha mostrado entregar una mayor durabilidad que las lechadas asfálticas en todas las aplicaciones en las cuales éstas muestra un buen desempeño.

Como los espesores de instalación son aún delgados, menores a 25 mm, los microaglomerados no aportan mayor capacidad estructural a las carpetas de rodado sobre la cual se instalan.



Figura 3.6.- Aplicación de Microaglomerado tipo Slurry (China 2011).

En años recientes las emulsiones han seguido evolucionando, aumentando las porciones de polímeros y látex que soporta una preparación. Si bien estos compuestos mejoran la resistencia a la deformación y la durabilidad del sello, aún se considera que los microaglomerados no retardan significativamente el avance del agrietamiento profundo que se refleja en la superficie de la calzada. Nuevos avances para abordar esta enfermedad común en pavimentos viejos y sometidos a sollicitaciones excesivas han sugerido la incorporación de filamentos de fibra en la mezcla del Microaglomerado en frío. La efectividad de esta solución está siendo evaluada. Los sellos mixtos del tipo Cape Seal con microaglomerado, han mostrado resultados aceptables como correctores de estas situaciones.

La investigación y seguimiento de las tecnologías de microaglomerados en frío es muy reciente. Desde la década de 1960 se viene experimentando con emulsiones modificadas en mezclas slurry, pero solo a partir de la década de 1990 se comienzan a diferenciar los microaglomerados en frío como técnica separada de las lechadas asfálticas. Por lo anterior solo en el año 2001 el DOT-Caltrans de EE.UU. ordena un seguimiento y estudio en detalle de las experiencias adquiridas en microaglomerados en frío y sus diferencias con los sellos slurry tradicionales. Este programa debe concluir su fase 3 este año, con la entrega final de definiciones completas en cuanto a diseño, construcción y aseguramiento de calidad para las aplicaciones de Microaglomerados. El año 2009 Caltrans aún consideraba en estado de piloto su programa de mantenciones con microaglomerados slurry. Asimismo solo a fines del año 2010 el Comité Ejecutivo en Transportes de la Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería de EE.UU., entregó un primer estudio sobre el estado de la práctica en Microaglomerados en Frío (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010), para su Programa Nacional de Investigación Cooperativa en Carreteras.

4.3.1 MATERIALES PARA APLICACIONES DE MICROAGLOMERADOS

EMULSIONES ASFÁLTICAS

Al igual que en las lechadas asfálticas, la emulsión asfáltica que se emplea en microaglomerados es generalmente de naturaleza catiónica. Sin embargo para este tipo de mezclas solo se aceptan emulsiones modificadas con polímero (Polymer-modified – PM), modificadas con latex (Latex-modified – LM) y de quiebre controlado o rápido (Quick Setting – QS). La calidad de la emulsión asfáltica es la principal determinante de la calidad de un microaglomerado en frío. Nomenclaturas de emulsiones comúnmente usadas para microaglomerados en EE.UU. son:

- PMCQS-1h (P. Modified Cationic Quick Setting – Cationica de Quiebre Rápido)
- PMQS-1h (P. Modified Anionic Quick Setting – Aniónica de Quiebre Rápido)
- MSE (Micro-Surfacing Emulsion – Caltrans 2002)

En Chile las nomenclaturas para las emulsiones varían según el proveedor, sin embargo todas deben cumplir con la especificación definida en el MC Vol.8 apartado 8.301.

Debido a que el látex tiene distinta densidad que la emulsión, éste tiende a separarse de la fase acuosa. Por esta razón es importante recircular periódicamente las emulsiones modificadas en los lugares de almacenamiento y especialmente antes de su utilización en terreno.

AGREGADO PETREO

En toda la familia de sellos de mezcla slurry las características de la fracción pétreo cumplen un rol fundamental en la calidad final de la solución. Las características generales de los áridos son las mismas que para las lechadas asfálticas en cuanto a Geología, Forma, Textura, Edad de Producción y Limpieza. Sin embargo los requerimientos son más estrictos y aparecen nuevos parámetros. En la tabla 4.5.- se detallan los requisitos exigidos tanto en el Manual de Carreteras de Chile como en las especificaciones estándar del DOT de EE.UU.

TIPO ENSAYO	Propiedades Generales Agregado Pétreo			
	M.C. Vol 5 y 8 – 2013		D.O.T. – Caltrans - 2006	
	Especificación	Método	Especificación	Método
Partículas Chancadas	100%	8.202.6	95%	CT 205
Desintegración por Sulfato de Sodio	Máximo 12%	8.202.17	-	-
Desgaste Los Ángeles	Máximo 25%	8.202.11	Máximo 35%	ASTM 211
Equivalente de Arena	Mínimo 60%	8.202.9	Mínimo 65%	CT 217
Índice de Durabilidad (hum./seco)	-	-	Mínimo 65%	CT 229
Índice de Plasticidad	N.P.	8.102.4	-	-
Adherencia Riedel - Weber	0 – 5	8.302.30	-	-
Adherencia Método Estático	Mínimo 95%	8.302.29	-	-

Tabla 4.5.- Requisitos para fracción de áridos en microaglomerados en frío (MC Vol 8 – DOT Caltrans).

Los requisitos de graduación del agregado pétreo que exige el Manual de Carreteras de Chile en su Vol.5 sección 5.406, especifican como granulometrías aceptadas para los microaglomerados en frío las de Tipo B-1 y Tipo C-1. En EE.UU. para los microaglomerados en frío el *MTAG Volume I Chapter 9* establece los agregados Type II y Type III como apropiados. Todas las graduaciones anteriores están definidas en la Tabla 3.2.- *Granulometrías de Áridos para Lechadas Asfálticas y Microaglomerados*.

Cuando se emplea la granulometría gruesa C-1, equivalente a la Type III, el agregado pétreo produce una superficie de macrotextura más rugosa y profunda. Esta característica define una superficie que drena más rápido y que aumenta considerablemente el índice de fricción, reduciendo el peligro de deslizamiento. En contrapartida la macrotextura más gruesa también va a producir más ruido al transitar por la calzada.

El excesivo ruido de tránsito por la calzada es la desventaja que más frecuentemente se reporta en los estudios consultados para aplicaciones de microaglomerados. Un estudio realizado en el Centro Nacional de Tecnología en Asfalto (NCAT) de EE.UU. encontró que una superficie de textura suave se logra usando un agregado de tamaño máximo pequeño (de Fortier y Smith, 2008), con la cual se redujo la macrotextura de la calzada y el ruido de tránsito por la carretera. Como el agregado de Tipo B1 o Type II tiene un tamaño de árido menor, ha mostrado ser el preferido por las agencias de transporte en EE.UU. Sin embargo la utilización de compactación neumática antes de poner en servicio los sellos de microaglomerado ha mostrados ser una efectiva herramienta para suavizar la macrotextura, reducir el ruido de tránsito y controlar el desprendimiento temprano de las partículas pétreas superficiales.

FILLER Y OTROS ADITIVOS

Los filler minerales en las aplicaciones de microaglomerados cumplen la misma función que fue discutida para las lechadas asfálticas. Dentro de los usados comúnmente están: Cemento Portland, Cal Hidráulica, Cal en polvo y Cenizas volantes.

Respecto de los aditivos empleado para retardar el quiebre en condiciones de mucha afinidad entre la emulsión y el agregado pétreo están: Sulfato de aluminio, Sulfato de amonio y Sales inorgánicas.

4.3.2 ASPECTOS CLAVES EN MICROAGLOMERADOS EN FRIO

SELECCIÓN Y PREPARACION DE PROYECTO

Similar al caso de las lechadas asfálticas, la selección adecuada del proyecto y el momento en el cual se aplicará el sello de microaglomerado ha mostrado ser el factor más importante para el éxito de la solución.

De acuerdo a los resultados del estudio del estado del arte en microaglomerados en frío realizado el año 2010 (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice,

2010), los microaglomerados en frío han probado ser herramientas más efectivas para la preservación de pavimentos que las lechadas asfálticas en todo el espectro de aplicaciones en las cuales las lechadas han logrado resultados satisfactorios.

Adicionalmente, debido a la mayor calidad de las emulsiones empleadas y las mejores características del agregado pétreo, la vida útil de este sello es al menos un 50% mayor que la que entrega una lechada asfáltica para la misma aplicación. Por sus características mejoradas, los microaglomerados en frío permiten corregir:

- De manera efectiva el ahuellamiento en la calzada (hasta 20 mm).
- Trabajos en condiciones climáticas de bajas temperaturas y mayores niveles de humedad ambiente. En algunos estados de EE.UU. se aplica con 5°C y subiendo.
- Con resultados aceptables (no óptimos) los problemas de agrietamiento en su fase temprana, del tipo piel de cocodrilo, agrietamiento longitudinal y/o transversal.

Para lograr mejores resultados previo a la aplicación de microaglomerados es necesario corregir los baches profundos en formación que presente la superficie a tratar, así como también sellar completamente los agrietamientos superficiales mayores a 5 mm.

Al igual que para el resto de aplicaciones de tipo slurry, es fundamental evaluar detenidamente el estado estructural del camino que se desea restaurar. No se recomienda aplicar microaglomerados cuando existan evidencias de deterioro estructural de la base del camino.

El sello con microaglomerado en frío aunque permite aplicaciones de capa sobre capa, sigue siendo una aplicación de espesor delgado que no aporta estructura a la base existente. Por lo anterior no se pueden esperar buenos resultados si se aplica para:

- Corrección de grietas reflectivas profundas con compromiso de la base.
- Frenar el avance de fallas que vienen desde la Base del pavimento.
- Corregir y frenar deformaciones plásticas por cizalle en carpetas de asfalto en caliente.

CONSTRUCCION

La construcción de una aplicación de microaglomerados difiere respecto de la aplicación de lechada asfáltica en que los espesores de aplicación son significativamente mayores, se puede aplicar en un espesor mayor al tamaño máximo de árido en el agregado, y en que la maquinaria empleada es mecánicamente más potente y robusta. Lo anterior se debe a que la fluidez de la

mezcla de microaglomerado es mucho menor que la de la lechada asfáltica. Además la viscosidad de las emulsiones modificadas con polímeros es mayor que la de un CSS-1h tradicional. La figura 3.8.- muestra un equipo para la instalación de microaglomerados donde se observa que la caja de distribución de la mezcla es mucho más robusta que la de un equipo de mezcla slurry para lechada, incluyendo dos líneas de mezcladores mecánicos.

Al igual que para las lechadas asfálticas es fundamental planificar todos los aspectos del proyecto que se mencionan en el punto 3.2.2.2.-

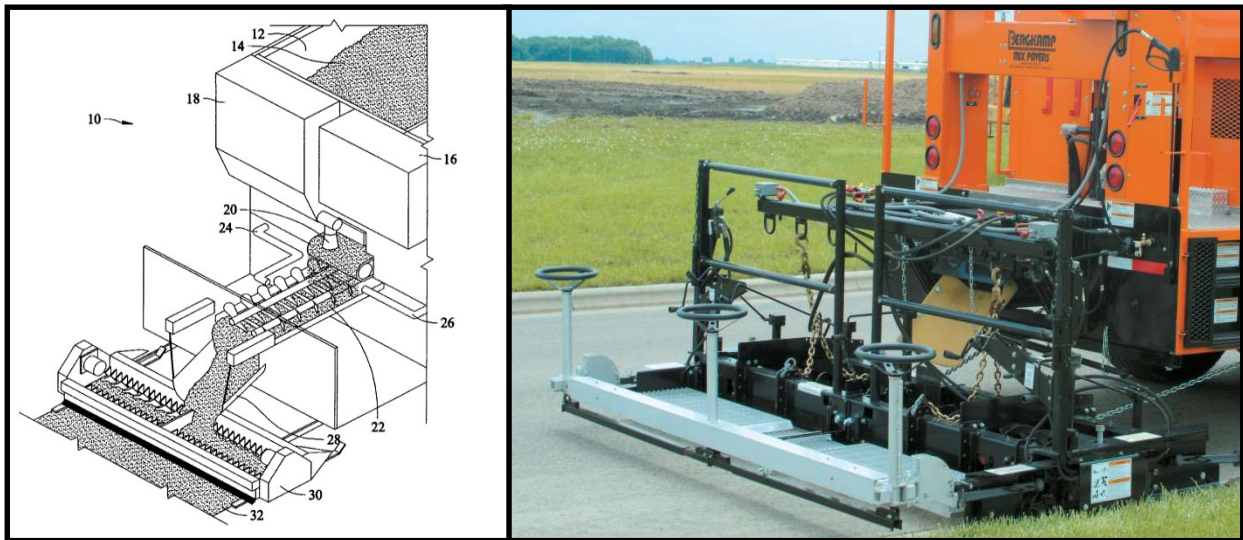


Figura 4.8.-Equipo de Instalación de Microaglomerado en Frio.

En aplicaciones multicapa y cuando se emplea agregado pétreo de graduación gruesa Tipo C1 (Type III), es altamente recomendable compactar neumáticamente el sello antes de entregarlo en servicio. Para esto generalmente se emplean compactadores neumáticos de 10 TON de peso estático sin lastre. La compactación se ejecuta a baja velocidad sin acelerar ni frenar de manera brusca sobre el sello para evitar agrietamientos y deformaciones. El ciclo de compactación se inicia una vez que la mezcla haya quebrado y este en un estado de avanzado de curado, nunca antes de media hora desde la instalación.

De acuerdo a los estudios realizados por las agencias de transporte de EE.UU., el conocimiento, la experiencia, la preparación y la capacidad de dirección del equipo humano encargado de la ejecución de la construcción de la aplicación incide de manera fundamental en los resultados finales del proyecto.

DESEMPEÑO Y VIDA UTIL ESPERADA

De acuerdo a los resultados del estudio de la práctica en microaglomerados en frío realizado el año 2010 (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010) los promedios de vida útil observada para los microaglomerados en frío van desde los 4,5 años como mínimo a los 8,5 años como máximo, aplicados sobre pavimentos existentes.

La tabla 3.6.- resume la información recabada en la literatura revisada que a su vez recoge los datos de encuestas sobre aplicaciones de microaglomerados que cumplieron sus ciclos de servicio. La tabla muestra un amplio consenso en que las vidas de servicio para microaglomerados están entre los 6 a 7 años.

Al igual que para las lechadas asfálticas, el tráfico no es la limitante principal de la vida útil en servicio de un microaglomerado. El deterioro existente en el pavimento original es mucho más incidente. Las fallas prematuras de los microaglomerados se presentarán en sectores con deterioros avanzados desde la base del firme, en zonas con agrietamientos profundos que no fueron tratados antes de la aplicación, o debido a una mala limpieza de la superficie a tratar. Para efectos del cálculo del costo anual equivalente de un microaglomerado aplicado sobre pavimento existente en condición regular, que se empleará más adelante en el análisis comparativo de soluciones, se asume una vida útil en servicio del sello de 4,5 años.

Fuente	Año	Vida de Servicio (años)		
		Mínimo	Máximo	Promedio
Encuesta Agencias Canadá	2010	3	9	6
Lyon y Persaud	2008	5	7	6
Labi et al.	2007	5	15	10
Bausano et al.	2004	6	7	6,5
Temple et al.	2002	4	10	7
Chehovits and Galehouse	2001	2	5	4,5
Smith and Beatty	1999	7	10	8,5
Watson and Jared	1998	5	7	6
Hicks et al.	1997	5	7	6
PROMEDIOS		4,67	8,56	6,72

Tabla 3.5.- Resumen de vida de servicio esperada según estudios disponibles (NCHRP Synthesis 411).

COSTO DIRECTO UNITARIO

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ITEM CODIGO M.C. *	5.406	DESIGNACIÓN	SELLO LECHADA ASFALTICA TIPO MICROAGLOMERADO - BANDA C1
UNIDAD DE MEDIDA	m2	CANTIDAD ANALIZADA	1

* Según Manual de Carreteras Volumen 5 - Versión Año 2013

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)	PORCENT. INCIDENCIA
--------	--------	-----------------	---------------------	-----------------------------	------------------------

MATERIALES

Transporte Aridos		50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total			
Riego Liga	lts	0,6		\$ 445	\$ 445	\$	267	14,9 %
Emul. Lechada Asf.	lts	1,7		\$ 515	\$ 515	\$	876	48,9 %
Polvo Roca	m3	0,011	\$ 7.500	\$ 12.000	\$ 19.500	\$	215	12,0 %
SUB-TOTAL MATERIALES						\$	1.357	75,7 %

EQUIPOS

Rendimiento Promedio		300 m2/hr						
Camión MP Slurry *	hr	0,003		\$ 41.711		\$	139	7,8 %
Retroexcavadora	hr	0,003		\$ 23.510		\$	78	4,4 %
Rodillo Neumático	hr	0,003		\$ 25.594		\$	85	4,8 %
Barredora Industrial	hr	0,003		\$ 27.128		\$	90	5,0 %
SUB-TOTAL EQUIPOS						\$	393	21,9 %

MANO DE OBRA

Capataz Asfaltos	hr	0,003		\$ 5.859		\$	20	1,1 %
Maestro Terreno	hr	0,003		\$ 3.581		\$	12	0,7 %
Ayudante	hr	0,003		\$ 2.930		\$	10	0,5 %
SUB-TOTAL MANO DE OBRA						\$	41	2,3 %

COSTO DIRECTO (CD)	\$	1.792
G. GENERALE 0% cr CD)	\$	-
UTILIDADES 0% cr CD)	\$	-
IMPREVISTO 0% cr CD)	\$	-
PRECIO UNITARIO ITEM (PUI)	\$	1.792
COSTO TOTAL ITEM	\$	1.792

COSTO DIRECTO ANUAL EQUIVALENTE

Un sello de microaglomerado en frio aplicado en un capa sobre un pavimento existente – TSS, DTS o mezcla asfáltica tradicional – que cumpla las condiciones mínimas de estructura y saneamiento superficial, permitirá rejuvenecer las propiedades superficiales de la carpeta y corregir deterioros tempranos, junto con prolongar su vida útil en servicio en al menos 4,5 años.

Con los antecedentes presentados se determina un costo anual equivalente promedio (C.A.Eq.) para los Microaglomerados en frio aplicados como sellos de rehabilitación de:

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 1.792. -}{4,5 \text{ años}} = 398. - (\$/año \times m^2)$$

VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Se concluye que las principales ventajas de los sellos de microaglomerados en frio son:

- Por ser una tecnología que mejora todas las propiedades de los sellos tipo lechada asfáltica, al igual que ésta permite extender la vida útil del pavimento existente con una baja inversión por m².
- Este sello ha mostrado ser efectivo para altos niveles de tráfico, en aminos urbanos y rurales (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010).
- La inversión inicial para los sellos de microaglomerados en frio es alrededor de un 30% mayor que la necesaria para la solución de lechada, sin embargo la vida útil de servicio esperada será al menos un 50% mayor, en un rango de 6 a 9 años.
- El costo anual equivalente promedio del sello de microaglomerado es 2/3 del costo anual equivalente de la lechada asfáltica.
- Los microaglomerados en frio abordan con mayor efectividad todo el espectro de aplicaciones que ofrecen las lechadas asfálticas, junto con:
 - Permitir aplicaciones nocturnas y en climas fríos.
 - Corregir efectivamente problemas de ahuellamiento e irregularidades menores en la calzada. Puede aplicarse entre los 9,5 mm a los 25 mm (en más de una capa).
 - Construido con la emulsión apropiada, permite controlar moderadamente los problemas de agrietamiento del tipo piel de cocodrilo, fisuras longitudinales y transversales.

Por su parte las principales desventajas de esta aplicación son:

- La calidad de sus resultados todavía dependen mucho de la experiencia del contratista.

- No se recomienda aplicar como sello en caminos nuevos, directamente sobre una carpeta de base granular chancada. Su durabilidad es incierta y con seguridad menor.
- El mayor potencial de éxito está en su correcta aplicación como sistema de mantenimiento vial preventivo, los cuales son muy poco empleados en países en desarrollo como Chile, con un bajo porcentaje de superficie pavimentada en su red vial.
- No aporta estructura al pavimento existente por lo cual refleja rápidamente fallas reflectivas, de agrietamiento profundo y deformaciones plásticas de asfaltos existentes.
- Su efectividad radica en que se aplique como tratamiento correctivo temprano.
- Es una solución sensible a la calidad de las emulsiones y de los agregados pétreos empleados.

4.4 SELLO TIPO CAPE SEAL (TSS CON TERMINACION SLURRY)

La capa de protección asfáltica tipo Cape Seal consiste en un Tratamiento Superficial Simple (TSS) cubierto por una Lechada Asfáltica. Los avances en el desarrollo de emulsiones modificadas con polímeros y látex, por las características mejoradas que aportan, han llevado a recomendar la utilización de una cubierta de Microaglomerados en Frio en vez de lechada asfáltica. Para éste último caso, el sello slurry se puede aplicar en más de una capa, contribuyendo significativamente al aumento de la vida útil esperada para la solución.

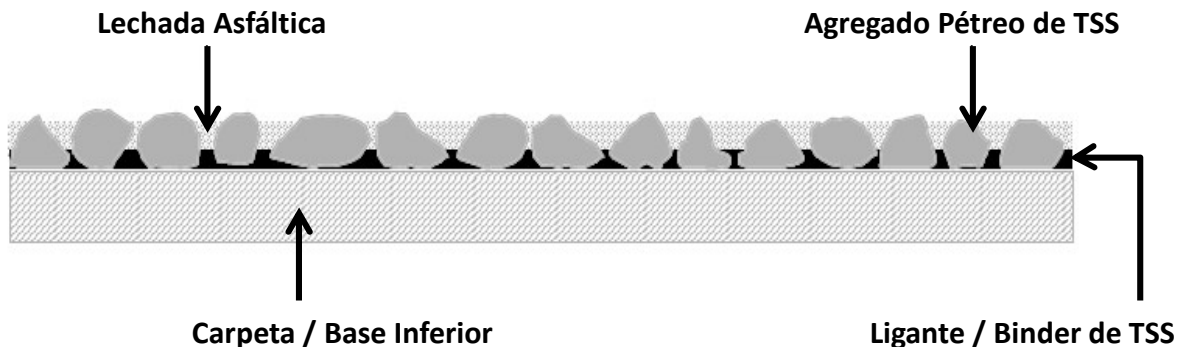
El Manual de Carreteras del MOP de Chile en su sección 5. 404.- especifica los requerimientos técnicos generales para este tipo de capa de protección, sin hacer distinciones específicas entre la aplicación Cape Seal con lechada asfáltica y la aplicación Cape Seal con microaglomerados. Para los objetivos de este estudio es importante hacer esta distinción ya que las vidas de servicio son muy distintas en cada caso.

El Cape Seal como proceso constructivo surgió en la provincia Sudafricana de Cape Town, de ahí su nombre. En principio consistió en un sello de grava de 20 mm cubierto por una mezcla caliente de asfalto con arena muy fina. Este procedimiento fue inicialmente especificado en la década de 1950 en un intento de mejorar la durabilidad de los tratamientos superficiales simples y de más de una capa. Se empleó en caminos cuyo tráfico no excediera de 300 vehículos pesados por día. Mejoramientos sucesivos en la técnica derivaron en 1957 a la definición del procedimiento que

casi sin modificaciones se emplea hoy en ese país: TSS en 20 mm. seguido de dos capas de aplicación de mezcla slurry; y TSS en 13 mm. con una capa de aplicación de mezcla slurry.

En Australia este procedimiento de capa de protección comenzó a usarse a principio de la década de 1960 fundamentalmente en caminos nuevos. Mezclas slurry con emulsión aniónica se emplearon para cubrir TSS de granulometría gruesa con el objeto de mejorar su textura e incrementar su durabilidad. Luego se empleó como procedimiento rejuvenecedor sobre tratamientos superficiales envejecidos. Se emplean TSS con piedras entre 7 y 20 mm cubiertas de una o dos capas de mezcla slurry Tipo A1 o B1.

CASO 1: Cape Seal Tradicional (TSS + Lechada Asf.)



CASO 2: Cape Seal Moderno (TSS + Microaglomerado)

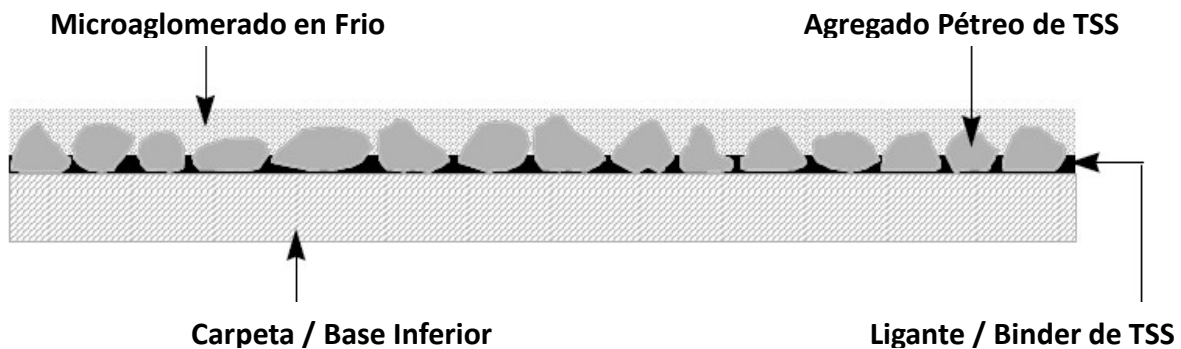


Figura 3.9.-Formas de Aplicación de Cape Seal: Tradicional y Moderna.

Los primeros proyectos de Cape Seal en EE.UU. datan de fines de la década de 1970 como parte de un esfuerzo de incorporar tecnología para la preservación de los pavimentos existentes. Debido a que los problemas viales en éste país eran fundamentalmente de preservación y rehabilitación en menor grado, se empleó ésta solución con un TSS de granulometría entre 6 a 10 mm. recubierto de una mezcla slurry Tipo B1 (Type II).

Construido apropiadamente el Cape Seal entrega una superficie densa y suave, con buenas condiciones antideslizantes, impermeabiliza la superficie sobre la cual se aplica, y entrega una vida de servicio relativamente larga, superior a los 8 años en muchos casos. La adición de una capa de mezcla slurry elimina el problema de piedras sueltas en la superficie que presentan los Tratamientos Superficiales, las cuales suelen ser peligrosas para los vehículos. La mezcla slurry mantiene los agregados pétreos firmes en el piso y reduce el ruido del tránsito.

En contrapartida la construcción de Cape Seal es un proceso constructivo que demanda habilidades y experiencia en la ejecución de dos tipos de sellos decapa de protección asfáltica, considera el empleo de emulsiones de composición diferente, que trabajan a diferentes temperaturas, y demanda el manejo de equipos distintos para la aplicación. Por lo anterior se considera una operación delicada y de mayor complejidad técnica.

4.4.1 MATERIALES PARA APLICACIONES DE CAPE SEAL

La técnica actual para el sello Cape Seal considera simplemente la aplicación combinada de una capa de Tratamiento Superficial seguida de una o dos capas de sello slurry del tipo Lechada o Microaglomerado. Por lo anterior los materiales empleados son los mismos descritos en los puntos 3.1.1., 3.2.1. y 3.3.1.

4.4.2 ASPECTOS CLAVES EN SELLOS TIPO CAPE SEAL

El sello Cape Seal al ser una combinación de dos técnicas de sellado asfáltico considera una gama amplia de variantes. Para fines del presente estudio se revisan las dos variantes más importantes para la realidad actual y futura del desarrollo de caminos básicos en Chile:

- A. Cape Seal - Estándar: TSS cubierto con sello de Lechada Asfáltica Estándar.
- B. Cape Seal - Microaglomerado: TSS cubierto con una capa de Microaglomerado en frío.

El punto A. es la solución tradicional que define el Manual de Carreteras de Chile (MC) en su apartado 5.404.- (Dirección de Vialidad, 2013). Su costo constructivo es menor, por considerar el uso de emulsiones sin látex o polímeros, pero su vida útil es más bien baja. La solución del punto B. es la variante más empleada actualmente. Su costo es marginalmente superior a la primera, sobre todo si se analiza el costo unitario por m² incluyendo el costo de la base inferior. Sin embargo el MC chileno no tiene una definición precisa de este tipo de sello de capa, aunque se podría derivar de la combinación de lo estipulado en los apartados 5.404. y 5.406.

SELECCIÓN Y PREPARACION DE PROYECTO

Al igual que para todos los sellos asfálticos, la selección adecuada del proyecto ha mostrado ser el factor más importante para el éxito de estos sellos.

Los Cape Seal se emplean mayoritariamente como primeros pavimentos sobre Bases granulares de alta calidad, 70% fracción chancada mínima y CBR > 100%. Estos sellos presentan un alto potencial para continuar reduciendo costos en la medida que aumente el dominio de la técnica por parte de los constructores, se entienda mejor las características de sus variantes y las posibilidades que ofrecen.

Las principales mejoras del Cape Seal respecto de un DTS, al ser aplicado como sello asfáltico sobre base granular chancada para el desarrollo de caminos nuevos, son:

- *Entrega una textura más lisa en la superficie de rodado, similar al asfalto tradicional.*
- *Reduce significativamente el ruido del tránsito.*
- *Disminuye al mínimo el riesgo de desprendimiento de partículas sueltas.*

Por otra parte si bien se trata de una aplicación de sello asfáltico de mayor costo y de mayor complejidad por considerar dos técnicas distintas, un sello Cape Seal puede ser una importante herramienta de rehabilitación de pavimentos deteriorados. Al incluirla en la familia de sellos apropiados para la rehabilitación, es aplicable a las mismas soluciones que los microaglomerados en frío, pero adicionalmente permite abordar:

- Con buenos resultados los problemas de agrietamiento en su fase temprana, del tipo piel de cocodrilo, longitudinal y transversal.
- Retardar efectivamente el avance de grietas reflectivas.
- Frenar el avance deterioros superficiales por penetración de agua a la Base del pavimento.
- Corregir y frenar deformaciones plásticas menores del tipo cizalle en pavimentos.

CONSTRUCCION

La construcción de los sellos asfálticos Cape Seal consideran el dominio de las técnicas de Tratamiento Superficial y de la de Sellos Slurry. Los aspectos constructivos son los mismos discutidos para éstas técnicas.

Cabe mencionar que al igual que para todos los tipos de sellos asfálticos, los estudios indican que, el conocimiento, la experiencia, la preparación y la capacidad de dirección del equipo humano encargado de la ejecución de la construcción incide de manera fundamental en los resultados finales.

DESEMPEÑO Y VIDA UTIL ESPERADA

La literatura revisada cuando menciona duraciones en servicio para sellos de lechada y microaglomerados en frío, no distingue entre una aplicación sobre pavimento existente o una del tipo camino nuevo. Por lo tanto para efectos de análisis en el presente estudio, se asumirá que un sello Cape Seal aplicado sobre una base chancada TM25, como camino nuevo, tendrá duraciones similares a las mostradas por la última capa slurry aplicada sobre una carpeta antigua, ya que la capa inferior TSS se considera cumpliendo la función de pavimento existente.

Las diferencias en las duraciones se asociaran a la calidad de los materiales empleados y al espesor del sello terminado. De acuerdo al informe del año 2010 del Comité de Investigaciones en Transportes de la Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería de EE.UU. los promedios de vida útil observada para estos microaglomerados en frío van desde los 4,5 años como mínimo a los 8,5 años como máximo.

Por lo anterior para efectos del cálculo del costo anual equivalente, las vidas útiles esperadas para las dos variantes de Cape Seal estudiadas, son:

- A. Cape Seal - Estándar: 4,5 años.
- B. Cape Seal - Microaglomerado: 6,0 años.

Al igual que para las lechadas asfálticas, el tráfico no es la limitante principal de la vida útil en servicio de un Cape Seal en un camino nuevo. La calidad de la Base Chancada sobre la cual se aplica el sello es mucho más determinante en su duración. Las fallas prematuras de estos sellos se presentarán en sectores con deficiencias de CBR, falta de compactación u homogeneización deficiente de la base. Para efectos del cálculo del costo anual equivalente de los distintos tipos

de sello cape seal, se considera éste aplicado sobre una Base de granulometría TM25 (MC Vol 5), con un 70% chancado mínimo y un CBR mayor o igual al 100%.

COSTO DIRECTO UNITARIO - CAPE SEAL ESTANDAR

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

ITEM CODIGO M.C. *	5.404	DESIGNACIÓN	TRATAMIENTO SUPERFICIAL SIMPLE CON LECHADA ASFALTICA - TIPO B1
UNIDAD DE MEDIDA	m ²	CANTIDAD ANALIZADA	1

* Según Manual de Carreteras Volumen 5 - Versión Año 2013

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)	PORCENT. INCIDENCIA
--------	--------	--------------	------------------	--------------------------	---------------------

MATERIALES

Transporte Aridos		50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total		
Imprimante	lts	1,0		\$ 400	\$ 400	\$	400 11,5 %
Emulsión TSS	lts	1,9		\$ 455	\$ 455	\$	865 24,8 %
Emul. Lechada CSS-1h	lts	1,6		\$ 445	\$ 445	\$	712 20,4 %
Polvo Roca	m ³	0,012	\$ 7.500	\$ 13.000	\$ 20.500	\$	246 7,1 %
Gravilla	m ³	0,021	\$ 7.500	\$ 10.000	\$ 17.500	\$	368 10,5 %
SUB-TOTAL MATERIALES						\$	2.590 74,3 %

EQUIPOS

Rendimiento Promedio		200 m ² /hr					
Camión Gravillador *	hr	0,005		\$ 45.979		\$	230 6,6 %
Camión MP Slurry *	hr	0,005		\$ 41.711		\$	209 6,0 %
Retroexcavadora	hr	0,005		\$ 23.510		\$	118 3,4 %
Rodillo Neumático	hr	0,005		\$ 25.594		\$	128 3,7 %
Barredora Industrial	hr	0,005		\$ 27.128		\$	136 3,9 %
SUB-TOTAL EQUIPOS						\$	820 23,5 %

MANO DE OBRA

Capataz Asfaltos	hr	0,005		\$ 5.859		\$	29 0,8 %
Maestro Terreno	hr	0,005		\$ 3.581		\$	18 0,5 %
Ayudante	hr	0,010		\$ 2.930		\$	29 0,8 %
SUB-TOTAL MANO DE OBRA						\$	76 2,2 %

COSTO DIRECTO (CD)		\$	3.487
G. GENERALES	0% cr CD)	\$	-
UTILIDADES	0% cr CD)	\$	-
IMPREVISTO	0% cr CD)	\$	-
PRECIO UNITARIO ITEM	(PUI)	\$	3.487
COSTO TOTAL ITEM SELLO		\$	3.487
BASE CHANCADA TM25		\$	3.989
COSTO TOTAL ITEM (SELLO + BASE)		\$	7.476

COSTO DIRECTO UNITARIO - CAPE SEAL MICROAGLOMERADO

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

ITEM CODIGO M.C. *	5.404 y 5.406	DESIGNACIÓN	T. SUPERFICIAL SIMPLE CON LECHADA ASFALTICA - TIPO MICROAGLOMERADO
UNIDAD DE MEDIDA	m ²	CANTIDAD ANALIZADA	1

* Según Manual de Carreteras Volumen 5 - Versión Año 2013

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)	PORCENT. INCIDENCIA
--------	--------	-----------------	---------------------	-----------------------------	------------------------

MATERIALES

Transporte Aridos		50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total		
Imprimante	lts	1,0		\$ 400	\$ 400	\$	400 10,2 %
Emulsión TSS	lts	1,9		\$ 505	\$ 505	\$	960 24,4 %
Emul. MAF CQS-1h PM	lts	1,8		\$ 530	\$ 530	\$	954 24,3 %
Polvo Roca	m ³	0,016	\$ 7.500	\$ 12.000	\$ 19.500	\$	312 7,9 %
Gravilla	m ³	0,023	\$ 7.500	\$ 10.000	\$ 17.500	\$	403 10,3 %
SUB-TOTAL MATERIALES						\$	3.028 77,1 %

EQUIPOS

Rendimiento Promedio		200 m ² /hr					
Camión Gravillador *	hr	0,005		\$ 45.979		\$	230 5,9 %
Camión MP Slurry *	hr	0,005		\$ 41.711		\$	209 5,3 %
Retroexcavadora	hr	0,005		\$ 23.510		\$	118 3,0 %
Rodillo Neumático	hr	0,005		\$ 25.594		\$	128 3,3 %
Barredora Industrial	hr	0,005		\$ 27.128		\$	136 3,5 %
SUB-TOTAL EQUIPOS						\$	820 20,9 %

MANO DE OBRA

Capataz Asfaltos	hr	0,005		\$ 5.859		\$	29 0,7 %
Maestro Terreno	hr	0,005		\$ 3.581		\$	18 0,5 %
Ayudante	hr	0,010		\$ 2.930		\$	29 0,7 %
SUB-TOTAL MANO DE OBRA						\$	76 1,9 %

COSTO DIRECTO (CD)		\$	3.925
G. GENERALES	0% cr CD)	\$	-
UTILIDADES	0% cr CD)	\$	-
IMPREVISTO	0% cr CD)	\$	-
PRECIO UNITARIO ITEM	(PUI)	\$	3.925
COSTO TOTAL ITEM SELLO		\$	3.925
BASE CHANCADA TM25		\$	3.989
COSTO TOTAL ITEM (SELLO + BASE)		\$	7.914

El análisis de precios unitarios se hace a partir de los valores de las emulsiones para Julio de 2014. El detalle del cálculo de los costos de mano de obra, equipos y materiales se incluye en el Anexo 1. En este mismo anexo se incluye un análisis de precios unitarios para las Bases Chancadas de graduación normal, TM50, y de graduación fina, TM25, la cual en general muestra una mayor capacidad de soporte.

COSTO DIRECTO ANUAL EQUIVALENTE

Un sello de tipo cape seal aplicado como solución de camino nuevo busca generar una carpeta de rodado de buen estándar a un costo relativamente bajo. En Chile se emplean extensivamente en la construcción de primeros pavimentos de la red nacional de caminos secundarios.

Los siguientes son los costos anuales equivalentes promedio (C.A.Eq.) para los dos tipos de sellos Cape Seal aplicados como sellos de rehabilitación de pavimentos:

- A. Cape Seal – Estándar, vida útil esperada de 4,5 años.

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 3.487. -}{4,5 \text{ años}} = 775. - (\$/año \times m^2)$$

- B. Cape Seal - Microaglomerado, vida útil esperada de 6,0 años.

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 3.925 -}{6,0 \text{ años}} = 654. - (\$/año \times m^2)$$

Finalmente se determinan los siguientes costos anuales equivalentes promedio (C.A.Eq.) para los dos tipos de sellos Cape Seal aplicados como soluciones de sello de capa de protección asfáltica en la construcción de caminos básicos:

- C. Cape Seal – Estándar, vida útil esperada de 4,5 años.

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 7.476. -}{4,5 \text{ años}} = 1.661. - (\$/año \times m^2)$$

- D. Cape Seal - Microaglomerado, vida útil esperada de 6,0 años.

$$C.A.Eq. = \frac{\$ 7.914 -}{6,0 \text{ años}} = 1.319. - (\$/año \times m^2)$$

VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Se concluye que las principales ventajas de los sellos Cape Seal son:

- Es una técnica que mejora las propiedades superficiales de los sellos tipo tratamiento superficial, entregando una terminación similar a la de una carpeta de asfalto en caliente pero a un costo inferior.
- La inversión inicial para los sellos de Cape Seal es más de un 30% inferior a la necesaria para una solución mínima de mezcla asfáltica en caliente en capa delgada (5 cm.) – ambas como soluciones de camino básico nuevo con Bases de 20 cm.
- Como herramientas de rehabilitación de pavimentos deteriorados, los Cape Seal permiten:
 - Permiten trabajar directamente sobre la carpeta existente. Ahorran el 100% de los costos de fresado de la carpeta original.
 - Generan variaciones de cota mínimas respecto de las estructuras existentes – entre 1 a 2 cm.
 - Al considerar una capa granular pétreo, controlar mejor los problemas de agrietamiento del tipo piel de cocodrilo, fisuras longitudinales y transversales.

Por su parte las principales limitaciones de estas aplicaciones son:

- La vida útil esperada para un Cape Seal, con microaglomerado, es alrededor de un 70% de la vida útil esperada para una solución mínima de mezcla asfáltica en caliente (5 cm).
- Su mayor potencial de éxito está en su correcta construcción. Se requiere el dominio de dos técnicas de sellado distintas: TSS y Microaglomerados en Frio. Por lo anterior se considera una técnica compleja.
- Su vida útil esperada está directamente relacionada con la calidad de la preparación de la superficie sobre la cual se aplica, sea esta una base granular chancada o un pavimento previamente reparado.
- No aporta estructura al pavimento existente por lo cual refleja rápidamente fallas inferiores, problemas de soportes, y deformaciones plásticas.
- La calidad de sus resultados depende mucho de la experiencia del contratista.
- Es sensible a la calidad de las emulsiones y agregados empleados.

CAPITULO V

NUEVAS TECNOLOGIAS EN SELLOS DE CAPA ASFÁLTICA

5 NUEVAS TECNOLOGIAS EN SELLOS DE CAPA ASFÁLTICA

En los últimos años se ha experimentado un rápido desarrollo de las tecnologías relacionadas a los sellos de capa de protección asfáltica. Los factores desencadenantes de este avance son los altos precios del petróleo y sus derivados como el asfalto, la creciente preocupación por la eficiencia energética y reducción de gases invernadero, y la evolución de los sistemas de mantenimiento vial preventiva en los países desarrollados.

Si bien las técnicas de sello de capa de protección asfáltica son de larga data, se mantuvieron siempre en un segundo plano como técnicas de pavimentación y construcción de pavimentos nuevos. Las mezclas asfálticas tradicionales siempre se mostraron más efectivas debido a su durabilidad y relativos bajos costos mientras el petróleo no estuviera en *shock* de precios.

Como se comenta en los capítulos precedentes las limitaciones más importantes de los sellos de capa de protección son: la alta variabilidad de los resultados producto de su dependencia de la experiencia del contratista y sus procedimientos constructivos, la alta sensibilidad a la calidad de los agregados pétreos y de las emulsiones asfálticas, la baja resistencia al estrés superficial y nulo aporte estructural al firme, y su baja vida útil de servicio.

Por otro lado el atractivo actual de éstos sellos de capa está en: los bajos requerimientos de inversión inicial (comparado con las técnicas tradicionales de pavimentación), el muy bajo impacto ambiental por consumo de materiales base y energía en sus procesos – comparado incluso con las soluciones de espesor delgado en asfaltos tradicionales, y su rapidez de ejecución y apertura al tránsito con menores impactos en los usuarios y su seguridad de tránsito.

Por lo anterior han surgido tecnologías para la construcción de sellos de capa de protección asfáltica que reducen sus limitaciones y potencian sus impactos positivos, como son los que se describen en el presente capítulo:

5.1. Sellador de Grava Sincrónico (Synchronous Chip Sealer).

5.2. Micropavimentación Slurry (Slurry Microsurfacing).

5.3. Emulsiones Modificadas con altos contenidos de polímeros y/o látex.

Adicionalmente al final se comentan brevemente las nuevas tecnologías para la producción de agregados y bases chancadas con alta cubricidad de partículas (5.4), muy importantes en la calidad y el correcto desempeño de los sellos asfálticos estudiados.

5.1 SELLADO DE GRAVA SINCRONICO

Uno de las tecnologías más rápida, práctica y económica para la aplicación de un sello de capa de asfalto con grava sobre la superficie de una carretera en construcción es la tecnología síncrona de sellado con grava. Como se detalla en los puntos precedentes, esta tecnología coordina completamente los dos procesos centrales del sello de capa asfáltica tipo Tratamiento Superficial: la distribución de la emulsión asfáltica o bitumen, con la posterior distribución inmediata de la grava sobre el sello asfáltico. Esta sincronía aporta un alto grado de automatización al procedimiento de constructivo de Tratamiento Superficiales, reduciendo la dependencia de la experiencia del personal y contribuyendo a la mejora de calidad final de la aplicación. Además mejora el rendimiento y la productividad de la operación, reduciendo los excedentes de agregado y mejorando la eficiencia energética del proceso al reducir los equipos.

En este apartado se describe y analiza la tecnología de sellado de grava síncrono, comparándola con el proceso tradicional de sellado de grava. Adicionalmente se estiman los costos directos de ambos alternativas de operación, y finalmente se resumen tanto los beneficios económicos como las mejoras técnicas que ofrece la nueva tecnología.

5.1.1 EQUIPO SELLADOR DE GRAVA SINCRONICO

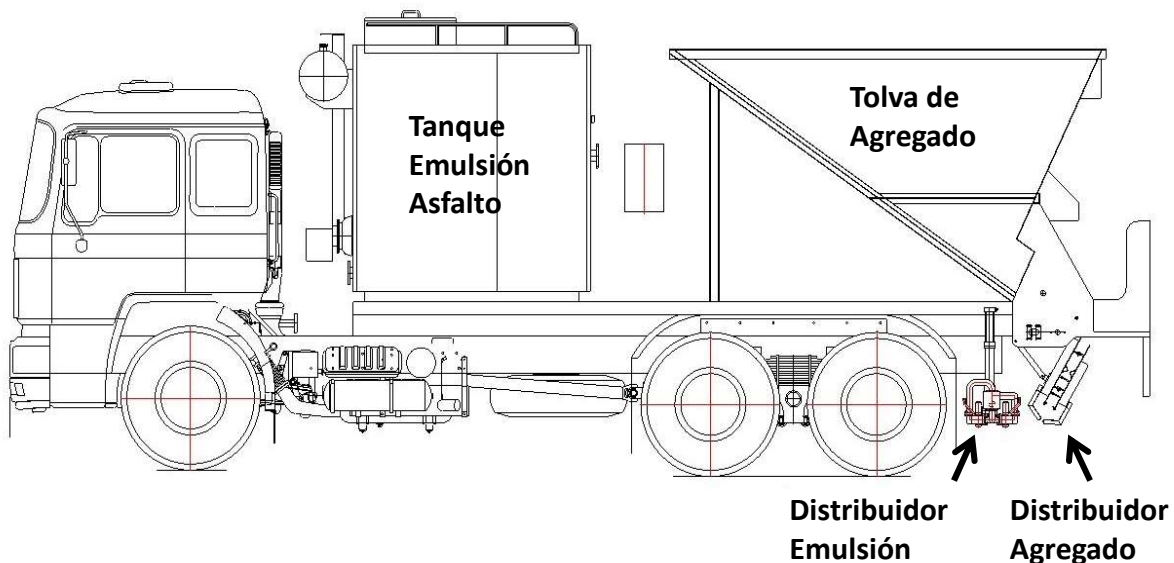


Fig. 2.1.- Esquema de Equipo Sellador de Grava Síncrono de 3 ejes.

DESCRIPCION



El sellador de grava sincrónico (chip sealer) genera varias ventajas respecto del proceso tradicional, como son: reducción de costo de aplicación, mayor adherencia grava-bitumen, buena resistencia al desgaste en el sello, y mejores propiedades impermeabilizantes. Además al terminar la construcción del sello el tráfico de vehículos puede normalizarse en un tiempo menor aprovechando las mayores adherencias logradas.

Características técnicas principales del Sellador de Grava Sincrónico son:

- 1.- **Control preciso de dosis de emulsión y/o bitumen.** El volumen de asfalto pulverizado se controla de forma automática por un PLC. La velocidad del vehículo también es monitoreada en tiempo real mediante el control PLC de circuito cerrado, haciendo ajustes para mantener la dosis en el rango de aplicación.
- 2.- **Operación y autonomía.** El control PLC provee al equipo de capacidad de operación desde la cabina. Una sola persona opera el proceso completo. Entrega buena autonomía de trabajo, rápida descarga en terreno, y facilidad para el recargado de materiales.
- 3.- **Trabajo en pendientes y con limitaciones de altura.** El agregado es conducido a los sinfines distribuidores por la cinta transportadora, lo que lo hace especialmente adecuado para el trabajo en pendientes, y al no requerir elevación de tolva permite el trabajo en condiciones de restricción de altura.
- 4.- **Control y preservación de temperaturas.** El sistema de calefacción por quemadores y el sistema de calefacción por circulación de aceite funcionan con un circuito independiente de quemadores y de fitting de aceite. Esta red distribuye calor hacia todos los elementos en que interactúan con la emulsión y/o bitumen. Las tuberías y las boquillas permanecen libres de obstrucciones y no es necesario limpiarlas con diesel.
- 5.- **Operación por aire.** Un sistema neumático controla las boquillas y puertas de agregado. Cada puerta puede controlarse de manera independiente mediante la computadora y manual. Puede trabajar en diversos anchos y en distintas posiciones.
- 6.- **Rápido reabastecimiento.** El esparcidor de sello asfáltico tiene la función de descarga y auto absorción, reduciendo los tiempos de aprovisionamiento de emulsión.

- 7.- **Distintos tamaños.** Los diseños pueden ser en 3 ejes (1 direccional) y en 4 ejes (2 direccionales), permitiendo que estos equipos aborden efectivamente diferentes condiciones de trabajo y espacio.

Si bien en su país de origen, China, el uso de esta tecnología se ha expandido fuertemente en la última década, en Chile a la fecha solo existen dos equipos selladores sincrónicos en operación. El primero de ellos, de tres ejes, entro en servicio en el país en Diciembre de 2012, ejecutando a la fecha más de 250.000.- m2 de tratamientos superficiales. El segundo, de cuatro ejes y mayores prestaciones, entró en servicio en Octubre de 2013, ejecutando a la fecha alrededor de 120.000.- m2 de tratamientos superficiales. Ambos equipos se han empleado exclusivamente en la ejecución de contratos de construcción de sellos de protección asfálticos para caminos básicos nuevos en la red de bajo la supervisión de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP). En la tabla 3.1 se resumen las principales características técnicas de cada equipo.

CARACTERISTICA	Equipo Sellador de Grava Sincrónico	
	3 ejes	4 ejes
IMAGEN		
Modelo	SG YKT0608	ME 5314TFC
Año Fabricación	2012	2013
Ancho Aplicación	200-3500 mm	250-4000 mm
Volumen Aplicación Asfalto	0.5~3.0 kg/m2	0.5~3.0 kg/m2
Tamaño Agregado	5-25 mm	5-25 mm
Velocidad de Trabajo	3 ~ 8 km/h	3 ~ 6 km/h
Capacidad Tanque Asfalto	6 m3	8 m3
Capacidad Agregado	8 m3	12 m3
Tipos de Asfalto	hot asphalt, hot modified asphalt, cutback asphalt and emulsified asphalt, etc.	hot asphalt, hot modified asphalt, cutback asphalt and emulsified asphalt, etc.
Dimensiones Generales	L×W×H = 9500×2500×3800 (mm)	L×W×H = 12500×2500×3800 (mm)

Cuadro 5.1.- Características de Equipos Selladores Sincrónicos operativos en Chile.

5.1.2 IMPACTO DE TECNOLOGIA SELLADO SINCRONICO

A. MENORES COSTOS POR USO DE EQUIPOS Y RECURSOS ASOCIADOS



Fig. 5.2. Equipos empleados en Tratamiento Superficial con sistema tradicional.

El tren tradicional de equipos necesarios para ejecutar un sello de capa del tipo Tratamiento Superficial considera: 1.- Camión Imprimador, 2.- Equipo distribuidor de agregado o Gravilladora, 3.- Camión de agregados, 4.- Rodillos compactadores neumáticos.

En contraste tren de equipos necesarios para ejecutar el sello de capa de Tratamiento Superficial con tecnología de sellado sincrónico considera: 1.- Camión sellador sincrónico, 2.- Rodillos compactadores neumáticos.



Fig. 5.3. Equipos empleados en Tratamiento Superficial con sistema sincrónico.

Esta reducción de equipos significa una directa reducción en los costos de arrendamiento de los mismos y ahorros en consumo de recursos durante la operación. En cuadro 5.2.- se cuantifican los principales ahorros que llegan a un 35% en costos directos de equipos para la aplicación.

Dado que los costos directos por equipos en los precios unitarios de TSS y DTS son alrededor de un 23% de los costos directos totales del sello (ver puntos 3.3.1 y 3.3.2), el ahorro que esta tecnología aporta a la construcción del sello es alrededor de un 8% (igual a 23% costos maquinaria x 36% de ahorro en costos equipos TS). Lo cual es significativo si se considera que el margen de utilidad para el contratista en este tipo de proyectos es de un 10% a 20%.

SELLO DE CAPA TS TRADICIONAL

<u>EQUIPOS</u>	<u>COSTO X HORA</u>
Distribuidor Agregado Trad.	29.380
Camión Imprimador	32.124
Rodillo Neumático	25.930
Camión Transporte 14 m3	26.455

Total Costo x Hora Ejecución **113.889**

AHORRO

SELLO DE CAPA TS SINCRONICO

<u>EQUIPOS</u>	<u>COSTO X HORA</u>
Sellador Sincrónico Grava	47.172
Rodillo Neumático	25.930

Total Costo x Hora Ejecución **73.102**

AHORRO

36%

VALORES EQUIPOS Y MAQUINARIA

DESCRIPCIÓN	COSTO BASE MES	COSTO BASE HR	COMBUSTIBLE		OPERACION \$/HR	VALOR UNIT. \$/HR
			LT/HR	\$/HR		
Sellador Sincrónico Grava	5.500.000	28.646	16	9.412	9.115	47.172
Distribuidor Agregado Trad.	3.800.000	19.792	8	4.706	4.883	29.380
Camión Imprimador	4.000.000	20.833	12	7.059	4.232	32.124
Rodillo Neumático	3.200.000	16.667	8	4.706	4.557	25.930
Camión Transporte 14 m3	3.200.000	16.667	10	5.882	3.906	26.455

Tabla. 5.2. Ahorros en Costos Directos Equipos Sello de Capa TS Sincrónico.

B. MEJORAS CUALITATIVAS QUE EXTIENDEN LA VIDA DEL SELLO

El sello sincrónico no solo genera externalidades positivas para el contratista, sino que tiene un impacto directo en la calidad de los sellos TS y prolonga su vida en servicio. Esta tecnología genera mejoras significativas en cuatro limitaciones de los sellos TS:

- 1) Reduce en al menos un 50% la dependencia del resultado de la aplicación en la experiencia del contratista – sus operarios – facilitando la ejecución.** Esta tecnología permite sincronizar los dos procesos centrales en una aplicación TS: la distribución del bitumen en la dosificación correcta y el esparcido uniforme del agregado sobre el bitumen. De esta manera se independiza de la experiencia del supervisor de terreno en cuanto al control y coordinación del avance de estos procesos. Tampoco depende de que los operarios deban estar acostumbrados a ejecutar un trabajo coordinado entre el imprimador y el esparcidor de grava. Solo se requiere de un operario calificado para el éxito de la aplicación TS sincrónica.
- 2) Mejora la adherencia entre el bitumen y el agregado, reduciendo el desprendimiento de posterior de granos de agregado.** Al caer la grava simultáneamente con el bitumen a la superficie de manera sincronizada, se aprovecha casi un 100% la temperatura de aplicación del asfalto, medida en el estanque del equipo. Por lo anterior la adherencia entre el betún y

el árido se optimiza para el rango de temperatura escogida para ejecutar el trabajo. Luego al aplicar una inmediata compactación el agregado se embebe fijándose y reduciendo al mínimo las partículas sueltas. Ver fig. 5.4. y fig. 5.5.

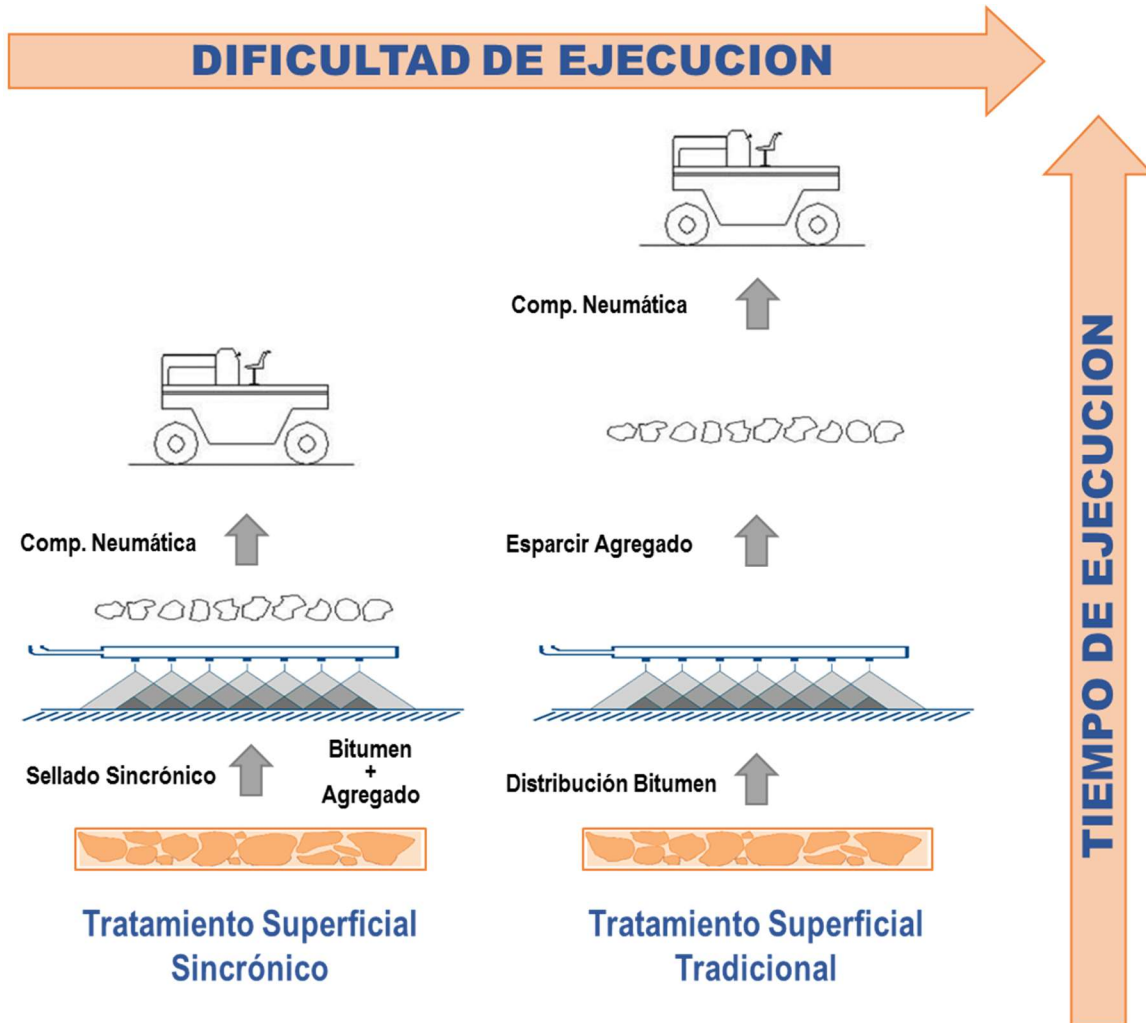


Fig. 5.4. Aplicación de Sello Sincrónico. Bitumen y agregado se aplican simultáneamente.

- 3) **Aumenta la productividad de la faena al reducir el tiempo de ejecución y disminuir los errores por mala ejecución en terreno.** Como el sello sincrónico elimina dos equipos del tren de trabajo de TS y ejecuta simultáneamente los dos procesos centrales, el tiempo de ejecución se reduce a casi a la mitad. Si bien el aprovechamiento de esta propiedad de la tecnología depende mucho de características propias del proyecto, como su extensión y la logística de aprovisionamiento de bitumen y agregados, existe el potencial para explotarla en las situaciones que permitan una ejecución rápida. Además al reducir la dependencia en la experiencia, reduce al mínimo las necesidades de corregir errores de ejecución.



Fig. 5.5. Aplicación de Sello Sincrónico. Bitumen y agregado se aplican simultáneamente.

- 4) Permite reducir el tiempo de apertura al tránsito y las molestias para los usuarios.** Debido a que el tiempo que transcurre entre la distribución del bitumen en la superficie y el esparcido del agregado es casi inexistente. La tecnología de sellado sincrónico puede trabajar con emulsiones de quiebre muy rápido, permitiendo el diseño de aplicaciones TS que puedan ser transitadas en menor tiempo.



Fig. 5.6. Aplicación de Sello Sincrónico DTS recién ejecutado.

5.2 MICROPAVIMENTACION CON MEZCLA SLURRY

La Micropavimentación con mezcla slurry, o microaglomerado en frío, se ha aplicado en Chile en proyectos de caminos básicos, principalmente para mejorar la uniformidad en carpetas de TSS y DTS. Si bien en el país no se diferencia todavía una aplicación Cape Seal con Lechada Asfáltica de una con Microaglomerado, se observan caminos que han sido construidos en espesores mayores de aplicación y aplicaciones de más de una capa de sello slurry.

El Microaglomerado incrementa el confort en la circulación, aumenta la vida útil del sello, y permite lograr una apariencia muy parecida a una carpeta de asfalto en caliente. Sin embargo en otros países su ámbito de aplicación es más amplio aplicándose soluciones con emulsiones de alto contenido de polímeros y/o látex en el tratamiento de las enfermedades del pavimento como el cierre de grietas superficiales, para contener el avance del agrietamiento por retracción, detener el deterioro profundo de la carpeta, y para impermeabilizar evitando la entrada de agua hacia la base granular inferior.

El mayor contenido de polímero o látex le entrega propiedades al sello slurry que la emulsión tradicional no proporciona: mayor flexibilidad, mayor capacidad de retención de partículas, resistencia a la degradación por rayos UV, menor deterioro por oxidación del pavimento, mejor capacidad para transmitir los esfuerzos de carga – permite ser aplicado en más de una capa. Todo lo cual se traduce en una mayor duración del sello que puede mostrar vidas en servicio del doble de duración que una lechada convencional.

En Chile el Manual de Carreteras Volumen 5 (año 2013), en su sección 5.406.-, especifica los Microaglomerados en Frío (Microsurfacing Slurry Seal) por el tipo de emulsiones modificadas que se aceptan para el sello y por las granulometrías solicitadas para los agregados pétreos. La especificación de este manual no establece criterios resalten las diferentes cualidades de esta aplicación slurry, como son sus espesores de aplicación, kilos de mezcla por m², propiedades físicas estrictas para los agregados, menores tiempos de curado y apertura al tránsito, posibilidad de trabajo nocturno y posibilidad de aplicación en un rango más amplio de condiciones climáticas.

La tecnología que se ha desarrollado para la construcción de sellos de capa de micropavimento slurry, incorpora un mecanismo reforzado de sinfines instalados en una caja de distribución de mayores dimensiones y peso. Este sistema prepara una pasta de sellado espesa y de mayor grosor, permite el empleo de emulsiones más viscosas y reduce la necesidad de incorporación de agua que facilite el amasado. La mezcla resultante se distribuye en la superficie del camino en

capas poco líquidas de espesores entre los 7 mm y los 15 mm terminados, dependiendo de la granulometría del agregado y de la emulsión asfáltica empleada.

5.2.1 EQUIPO MICROPAVIMENTADOR DE MEZCLA SLURRY

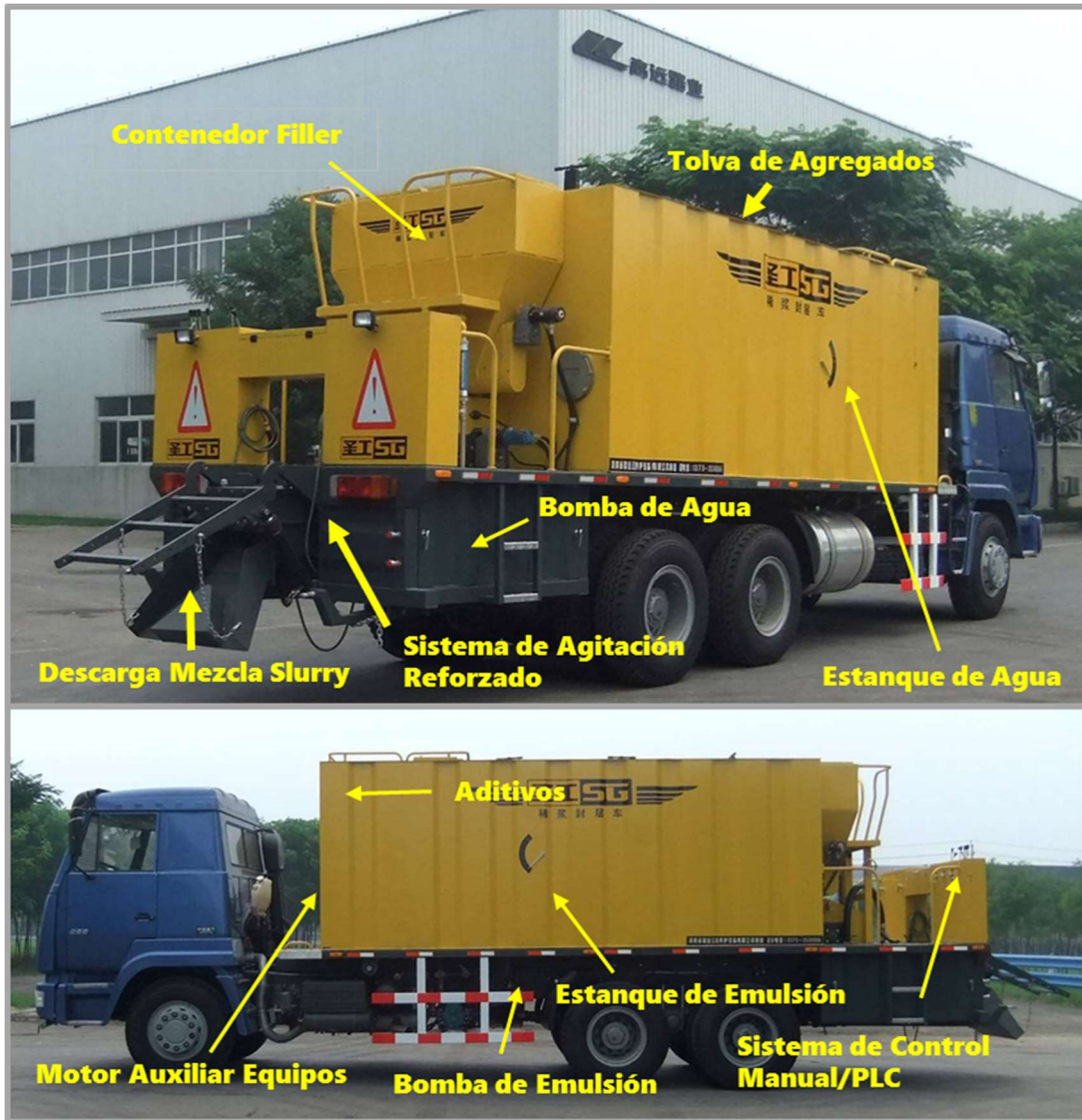


Fig. 5.7.- Esquema de Equipo Micropavimentador de 3 ejes.

DESCRIPCION

Un equipo Micropavimentador Slurry sigue el mismo diseño que los antiguos equipos de mezcla slurry. La tecnología ha avanzado principalmente aumentando la potencia de mezclado, para poder emplear emulsiones modificadas más viscosas y trabajar con mezclas espesas con menor

contenido de agua de premezclado. Adicionalmente las unidades modernas de micropavimentación incorporan sistemas de control automático tipo PLC que permiten al operador aumentar o disminuir la producción de mezcla durante la operación de manera sincronizada con un solo comando.

De esta manera las componentes esenciales de todo equipo de micropavimentación son:

- 1. Sistema de alimentación de agregados.** Consiste en la tolva de agregados, la compuerta de alimentación, una correa de alimentación central, la unidad motriz y las alarmas de control de bajo nivel de agregados disponibles.
- 2. Sistema de alimentación de emulsiones.** Integrado por un estanque de emulsiones, bomba de asfaltos, válvula de control, dispositivos de control de sincronización, y piping.
- 3. Sistema de suministro de agua.** Compuesto por el estanque de agua, la bomba de agua, medidores de flujo, válvula de control y piping.
- 4. Sistema de alimentación de Filler y aditivos.** Consiste en los contenedores de filler, estanque de aditivos con sus válvulas y controles.
- 5. Sistema de mezclado.** Consiste en dos espirales de mezclado, accionados hidráulicamente y de gran potencia.
- 6. Caja de pavimentación.** A diferencia del slurry tradicional, es más robusta, pesada y con espirales accionados por motores hidráulicos para un eficiente mezclado final y distribución transversal.
- 7. Sistema de control.** Plataforma de control automatizada por PLC que permite al operador acelerar o retardar la producción de mezcla por medio de un solo comando que aumenta o disminuye simultáneamente la alimentación de agregado y emulsión, sin necesidad de variar la velocidad del camión.

5.2.2 IMPACTO DE TECNOLOGIA MICROPAVIMENTACION SLURRY

A. MAYORES COSTOS POR MAYOR CONSUMO DE MATERIALES

A diferencia de la tecnología de sellado sincrónico, construir un sello de capa tipo microaglomerado es significativamente más costoso que construir un sello del tipo lechada asfáltica tradicional. La razón es el mayor consumo de materiales y el mayor costo de los mismos. El beneficio está en la mayor duración, con vidas en servicio del sello un 50% superior.

Lechada Asfáltica Estándar

COSTO EQUIPOS Y MATERIALES

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)
--------	--------	-----------------	---------------------	-----------------------------

MATERIALES

Transporte Aridos	50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total	
Emul. Lechada Asf.	lts	1,6	\$ 460	\$ 460	\$ 736
Polvo Roca	m ³	0,010	\$ 7.500	\$ 13.000	\$ 20.500
SUB-TOTAL MATERIALES					\$ 941

EQUIPOS

Rendimiento Promedio	300 m ² /hr				
Eq. Slurry Tradicional	hr	0,003	\$ 39.107	\$	130
SUB-TOTAL EQUIPOS					\$ 130

COSTO DIRECTO (CD)	\$ 1.072
---------------------------	-----------------

Sello Micropavimento Slurry

COSTO EQUIPOS Y MATERIALES

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD (a)	P. UNITARIOS (b)	COSTO UNITARIO (a) * (b)
--------	--------	-----------------	---------------------	-----------------------------

MATERIALES

Transporte Aridos	50 Km.	Transporte	Costo	C.U.Total	
Emul. Lechada Asf.	lts	1,8	\$ 520	\$ 520	\$ 936
Polvo Roca	m ³	0,013	\$ 7.500	\$ 13.000	\$ 20.500
SUB-TOTAL MATERIALES					\$ 1.203

EQUIPOS

Rendimiento Promedio	200 m ² /hr				
Micropavimentador Slurry	hr	0,005	\$ 42.753	\$	214
SUB-TOTAL EQUIPOS					\$ 214

COSTO DIRECTO (CD)	\$ 1.417
---------------------------	-----------------

VALORES EQUIPOS Y MAQUINARIA

DESCRIPCIÓN	COSTO BASE MES	COSTO BASE HR	COMBUSTIBLE		OPERACION \$/HR	VALOR UNIT. \$/HR
			LT/HR	\$/HR		
Eq. Slurry Tradicional	4.500.000	23.438	12	6.555	9.115	39.107
Micropavimentador Slurry	5.200.000	27.083	12	6.555	9.115	42.753

VALOR DE MATERIALES

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR UNITARIO
Emulsion CSS-1H/ Lechada Estándar	lt	460
Emulsion Modificada CQS-1H Polimero / Micropav	lt	520
Polvo Roca T.máx. 7 mm (Tipo B1)	m ³	13.000
Transporte de Aridos	\$/Km	150

Tabla. 5.3. Costos Directos de Equipos y Materiales, Lechada Asf. y Sello de Micropavimento Slurry.

El desglose de la tabla 5.3. muestra que si solo consideramos los costos directos de materiales y equipos por metro cuadrado, y comparamos los costos por metro cuadrado de ambas tecnologías de sello slurry, el Micropavimento es un 32% más costoso que un sello tipo lechada asfáltica. Este mayor costo ha limitado en muchos casos el empleo de Micropavimntos como el sello predilecto para la terminación de sellos Cape Seal y aplicaciones de rejuvenecimientos. En Chile esta predilección por Lechadas Asfálticas se ve acentuada por la escasa experiencia nacional en microaglomerados en frío y el inexistente seguimiento de su desempeño.

La experiencia internacional (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010) indica que los Micropavimentos entregan una vida de servicio mucho más larga que las lechadas asfálticas, e incluso pueden llegar a durar el doble de tiempo. Además mejoran varias de las limitaciones de las lechadas asfálticas, debido a que emplean emulsiones modificadas con polímeros, a que estas emulsiones quiebran por reacciones químicas, al empleo de agregados de mayor calidad, a su aplicación con menor contenido de agua de hidratación, y a los mayores espesores de aplicación.

Por lo anterior la justificación del empleo de Micropavimentos no pasa por un ahorro en inversión inicial o costos directos, sino por un ahorro de costos de mantenimiento y mejores prestaciones, siendo las más relevantes para las necesidades de caminos básicos en Chile las que se resumen a continuación.

B. MEJORAS CUALITATIVAS QUE EXTIENDEN LA VIDA DEL SELLO

Principales beneficios cualitativos de los Micropavimentos:

- 1) Larga vida de servicio como sello de capa de protección asfáltico.** Se puede esperar que la Micropavimentación tipo Slurry muestre en promedio una vida de servicio de 7 años, si el camino sobre el cual se aplica esta en buena condición estructural (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010). Esta condición se cumplen para los TSS recién construidos de la primera capa de los sellos Cape Seal.
- 2) Es un sello efectivo para todas las condiciones de tránsito.** Debido a sus propiedades mejoradas en comparación a la Lechada Asfáltica Tradicional, los micropavimentos slurry han mostrado buenos resultados en caminos de distintos niveles de tránsito, incluso en carreteras donde las velocidades exceden los 100 Km/hr, con TMDA mayores a 20.000.- vehículos. Además por resistir mejor el esfuerzo de corte superficial son una solución apropiada incluso para caminos urbanos.

- 3) **Es un sello efectivo para proyectos que deban ser ejecutados de noche y en condiciones climáticas frías.** En aplicaciones urbanas o en proyectos que deban ser ejecutados en corto plazo, es necesario programar la ejecución del sello de micropavimento slurry en horario nocturno. A diferencia de las lechadas asfálticas las emulsiones para micropavimentos quiebran químicamente, independizándose de la necesidad de luz solar y condiciones climáticas con temperaturas medias o altas.
- 4) **Introduce mejoras a todas las propiedades físicas de sello slurry lechada asfáltica – resistencia a la acción de agentes externos.** Mejoras su flexibilidad, incrementa la adherencia inicial entre el betún y el agregado, retarda el deterioro por exposición a rayos UV, retarda la oxidación del sello, mejoran el comportamiento estructural de la mezcla – lo cual permite instalarla en espesores mayores y en más de una capa.
- 5) **Bajo impacto ambiental.** Los sellos de Micropavimentos son una aplicación fría y poco contaminante. EL consumo de materiales base es solo una fracción de los que emplean las mezclas asfálticas en caliente. El uso de energía en el proceso es mucho menor que otras aplicaciones similares. Un reporte de la International Slurry Seal Association (ISSA) (Broughton, 2012) indica que el proceso de micropavimentacion emiten solo ¼ de los gases de efecto invernadero que emite la pavimentación con mezcla de asfalto caliente en capa delgada, con respecto a etanol, dióxido de carbono, y dióxido de nitrógeno.

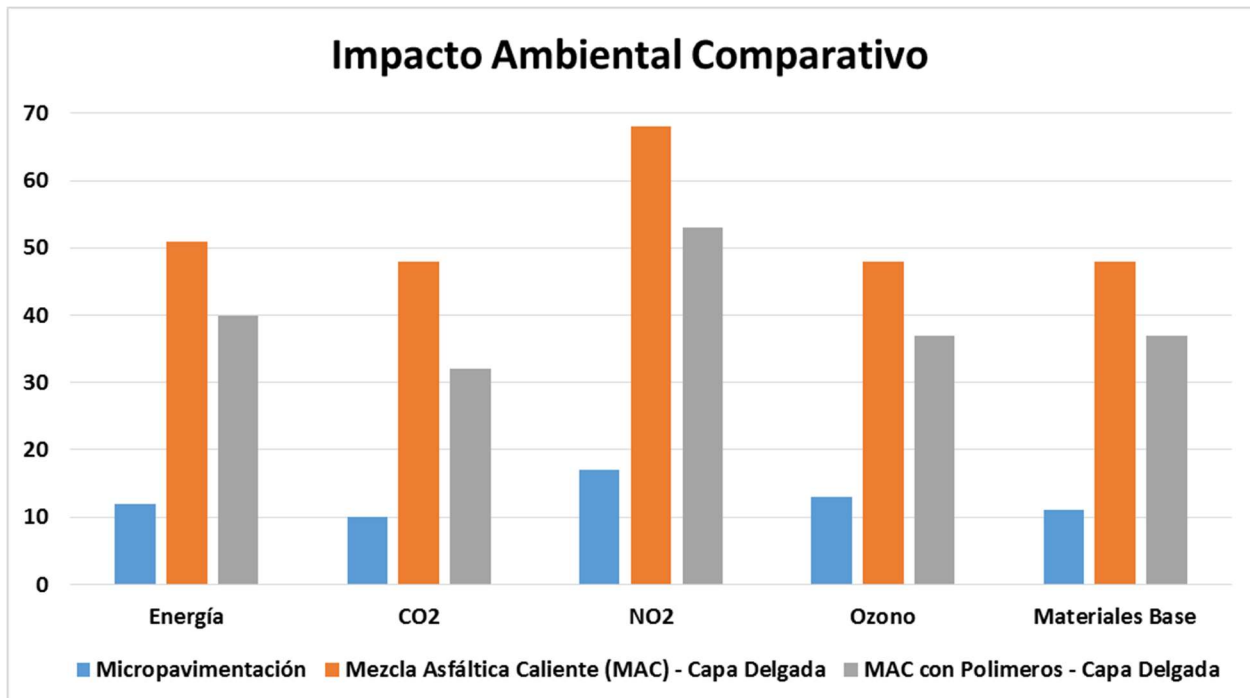


Fig. 5.8.- Impacto ambiental comparativo para tres tecnologías de capa de protección asfáltica (adaptado de (Takamura, 2001)).

6) **Apariencia.** Dentro de los sellos de capa de protección asfáltica es el que entrega una superficie muy parecida a la de una carpeta de mezcla de asfalto en caliente tradicional.

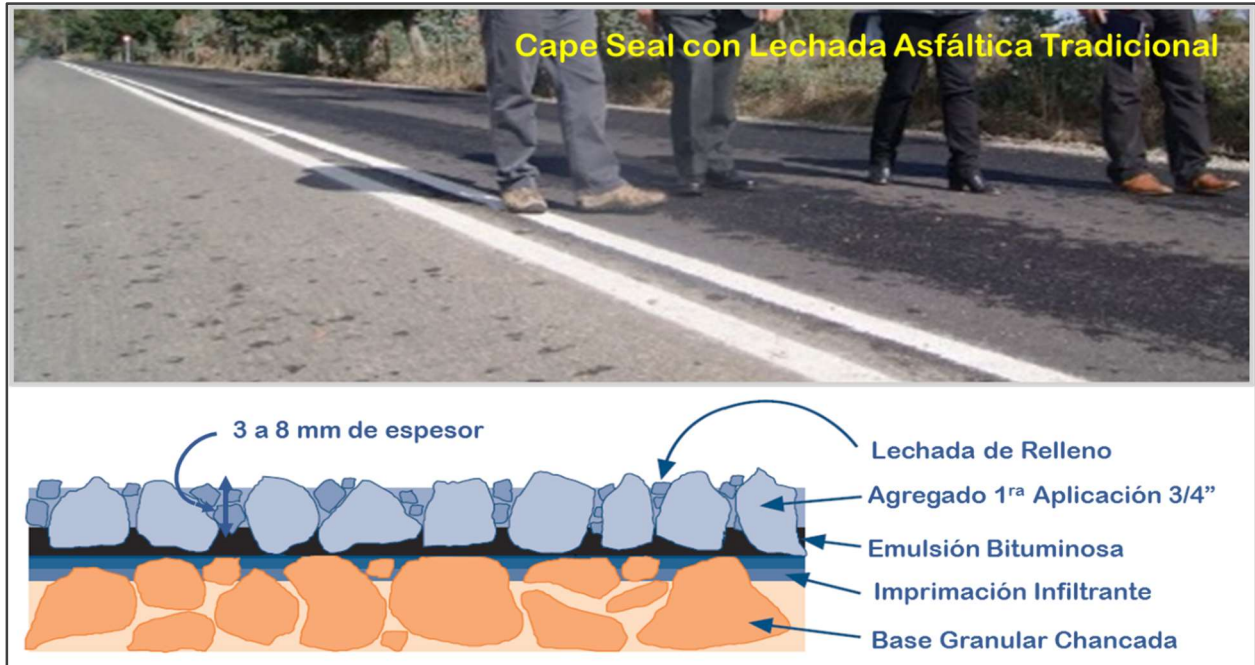


Fig. 5.9.- Cape Seal con Lechada Asfáltica en Ruta T-685 Itropulli-Chan Chan, Prov. Valdivia, 2013.

La Fig. 5.9 muestra los resultados de una aplicación de Cape Seal con Lechada Asfáltica en la provincia de Valdivia. Se puede observar una terminación que apenas recubre los granos de agregado de la capa TSS y su aspecto grisáceo. En contraste la Fig. 5.10 muestra dos aplicaciones de Cape Seal con Microaglomerado. La primera hecha en la Ruta G-465, camino Las Melosas, Región Metropolitana, donde se observa una terminación de apariencia más oscura que recubre completamente los granos de la primera capa TSS. La segunda es un sello construido a fines del 2012 en las afuera de Curicó, donde se observa una superficie compactada de Microaglomerado de apariencia muy similar a una capa delgada de mezcla de asfalto en caliente.



Fig. 5.10.- Cape Seal con Micropavimento.

Arriba: aplicación en Ruta G-465 Camino Las Melosas, Prov. San José de Maipo, 2014.

Abajo: aplicación en Ruta J-60 Cruce Isla Marchant, Prov. Curicó, 2012.

5.3 EMULSIONES ASFALTICAS MODIFICADAS

5.3.1 GENERALIDADES

“Las emulsiones asfálticas son partículas de asfalto dispersas en agua, estabilizadas mediante un sistema químico” (National Highway Institute, USA, 2007). Se fabrican mezclando agentes emulsificadores con la base asfáltica y solventes que permitan dispersar el asfalto en el conjunto, creando una mezcla temporal. Una vez instalada la mezcla en la superficie, la emulsión quiebra, produciéndose la separación entre el agua y las partículas de asfalto que se adhieren al agregado pétreo. En microaglomerados se emplean generalmente emulsiones catiónicas modificadas con polímeros o látex. La literatura indica que en EE.UU. la emulsión más empleada es CSS-1h, es decir catiónica (C), de quiebre lento (SS), poca viscosidad (1) y residuo asfáltico duro (h). En Chile para microaglomerados se prefieren emulsiones de quiebre controlado (QS) del tipo CQS-1h, ya que disminuyen el tiempo de apertura al tránsito.

La investigación “30 años de Micropavimentos: Una Revisión” (Broughton, 2012), centra sus conclusiones en que el desarrollo futuro de tecnología de emulsiones ayudará a corregir las limitaciones actuales de los Micropavimentos y acentuar su bajo impacto ambiental. “Aunque los micropavimentos tienen limitaciones, el potencial de desarrollo de aditivos que minimicen y corrijan estas limitaciones es grande.... Este estudio recomienda que se realice investigación para identificar aditivos que refuercen la alta aplicabilidad y durabilidad de los micropavimentos y así mejore su costo-efectividad” (Broughton, 2012). Además se requiere investigar aditivos que incorporen ingredientes sostenibles desde el punto de vista ambiental de manera de anticipar futuras restricciones en este sentido.

La tecnología de emulsiones permite incorporar aditivos para hacer ajustes en la formulación que mejoran la compatibilidad entre el agregado disponible, la emulsión y las condiciones climáticas al momento de la instalación.

5.3.2 EMULSIONES MODIFICADAS EN TRATAMIENTOS SUPERFICIALES.

Desde sus primeras aplicaciones los Tratamientos Superficiales han empleado diversos tipos de bitúmenes asfálticos para ligar las partículas que se esparcen en cada capa del sello.

Las emulsiones asfálticas se componen de un material bituminoso mezclado uniformemente con agua, un agente emulsionante y otros agentes estabilizantes. Dentro de las emulsiones

convencionales se destacan la CRS-2 (Cationic Rapid Setting) y la CRS-2h. Las emulsiones más completas agregan una fracción menor, entre 3% a 6%, de un Polímero que permita mejorar sus propiedades sellantes y su resistencia. Los conjuntos modificados con polímero más comunes son PMCRS-2 y PMCRS-2h, y se incluyen en las especificaciones estándar de la Sección 94 de Caltrans, 2006. Como polímero normalmente se emplea el SBS (Styrene Butadiene Styrene). También se utiliza la modificación con látex (LMCRS-2 y LMCRS-2h) que consideran emulsiones con adición de SBR (Styrene Butadiene Rubber).

Las emulsiones modificadas con polímeros utilizadas en TS permiten que estos sellos mejoren su resistencia a los rayos UV y retarden su proceso de oxidación. Además reducen el riesgo de exudación y mejoran la retención del agregado pétreo. Estas características seguirán potenciándose en la medida que surjan nuevos componentes como resultado de la investigación.

5.3.3 EMULSIONES MODIFICADAS EN MEZCLAS SLURRY

En mezclas de microaglomerados solo se aceptan emulsiones modificadas con polímero (Polymer-modified – PM) y modificadas con latex (Latex-modified – LM), las que generalmente se preparan para generar un quiebre rápido (Quick Setting – QS) al entrar en contacto con el agregado. La calidad de la emulsión asfáltica es la principal determinante de la calidad de un microaglomerado en frío. Nomenclaturas de emulsiones comúnmente usadas para microaglomerados en EE.UU. son:

- PMCQS-1h (P. Modified Cationic Quick Setting – Cationica de Quiebre Controlado)
- PMQS-1h (P. Modified Anionic Quick Setting – Aniónica de Quiebre Controlado)
- MSE (Micro-Surfacing Emulsion – Caltrans 2002)

En Chile las nomenclaturas varían según el proveedor de la emulsión sin embargo todas deben cumplir con la especificación resumida en la Tabla 5.4.- En ésta se resume para efectos de comparación las exigencias equivalentes según las Especificaciones Estándar DOT-Caltrans 2006.

Las especificaciones para las emulsiones asfálticas de microaglomerados en frío mejoran todas las características que tienen en común con las emulsiones para lechadas, como son la estabilidad, el contenido de aglutinante o residual de asfalto y la viscosidad. Además la exigencia de polímero en la emulsión mejora la capacidad de retención de piedras, especialmente una vez el sello entra en servicio. El polímero también aumenta la temperatura de ablandamiento de la mezcla y mejora su flexibilidad. Así los microaglomerados son empleados para retardar la aparición de agrietamiento superficial, y se aplican en capas gruesas y/o en multicapas.

TIPO ENSAYO	Propiedades de Emulsiones Microaglomerados en Frio			
	M.C. Vol 5 y 8 – 2013		D.O.T. – Caltrans - 2006	
EMULSION	Especificación	Mét. MC Vol 8	Especificación	Método
Viscosidad, SSF @ 25°C	20 – 50 Ssf	8.302.12	15 – 90	AASHTO T 59
Sedimentación	Máx. 5% (7 días)	8.302.5	< 5% (5 días)	ASTM D 244
Estabilidad Almacenamiento	-	-	< 1% (1 días)	AASHTO T 59
Tamizado	Máximo 0,1%	8.302.5	< 0,3%	AASHTO T 59
Carga de Partícula	Positiva / Negativa	8.302.5	-	-
Residuo Asfáltico (por evaporación)	Mínimo 62%	(1)	> 62%	Cal. Test 331
RESIDUO ASFALTICO	Especificación	Método	Especificación	Método
Viscosidad Brookfield (60°C)	Informar	8.302.24	-	-
Penetración, 25°C	40 – 90	8.302.3	40 – 90	AASHTO T 49
Punto de Ablandamiento	Informar	8.302.16	> 57°C	AASHTO T 53
Ductilidad (25°C)	Mínimo 40 cm	8.302.8	-	-
Índice de Fraass	Máximo -17°C	8.302.17	-	-
G* @ 20°C, 10 rad/sec, MPa	-	-	Informar	AASHTO TP 5
Phase Angle @ 50°C, 10 rad/sec	-	-	Informar	AASHTO TP 5
Recuperación Elástica por Torsión	Informar	NLT 329/91	> 18% (LMCQS-1h)	Cal. Test 332
Recuperación Elástica, 13°C	Mínimo 20%	8.302.19	Informar	AASHTO TP 1
Contenido de Polímero	-	-	> 2,5% (LMCQS-1h)	Cal. Test 401

Tabla 5.4.- Requisitos para emulsiones asfálticas modificadas (MC Vol 8 – DOT Caltrans).

Usualmente las emulsiones son modificadas con látex, lo cual genera una solución con partículas de goma en suspensión. El látex no se mezcla con el asfalto que se libera en el quiebre de la emulsión sino más bien forma cadenas de estructuras tridimensionales semirrígidas con las moléculas de asfalto. La Fig. 3.7.- muestra esquemáticamente como se asocia el latex con el asfalto en la mezcla. La emulsiones para microaglomerados son modificadas con látex natural, con styrene butadiene styrene (SBS) látex, o con styrene butadiene rubber (SBR) látex. Cuando las emulsiones están modificadas con látex la nomenclatura las identifica como LM. La emulsión modificada de este tipo más popular en EE.UU. es la LMCQS – 1h.

Debido a que el látex tiene distinta densidad que la emulsión, tiende a separarse de la fase acuosa. Por esta razón es importante periódicamente recircular estas emulsiones en los lugares de almacenamiento y especialmente antes de su empleo.

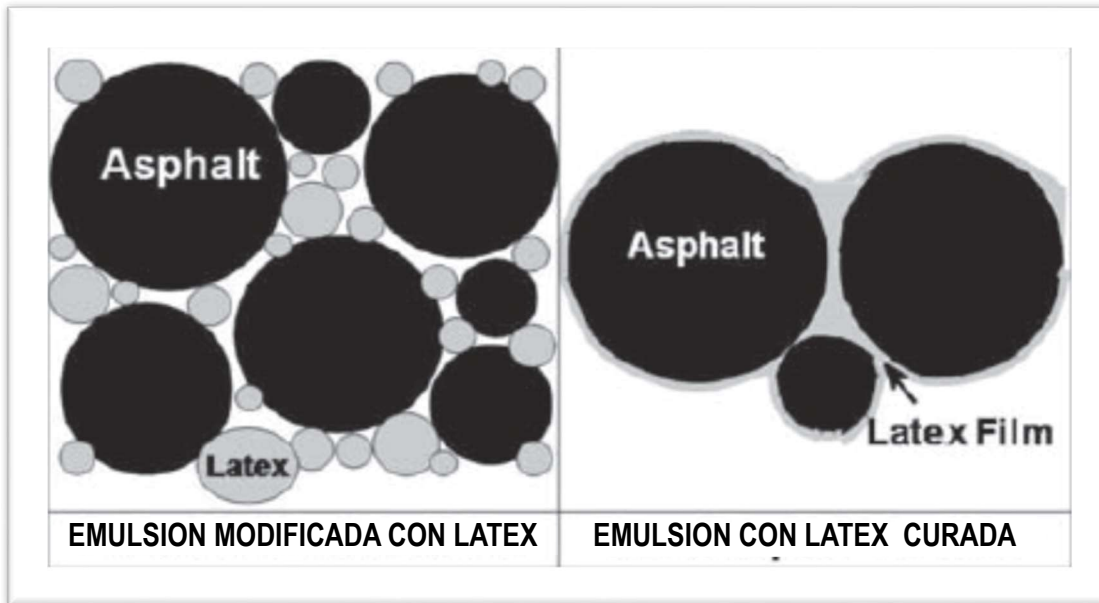


Fig. 5.11.- Esquema de reacción de emulsión asfáltica modificada con látex.

Existen prácticamente infinitas posibilidades para modificar una emulsión con polímeros. No todas las que se han empleado muestran los mismos resultados. Así como es muy probable que en el futuro se sigan descubriendo compuestos de polímeros y látex que permitan un mejor desempeño del sello.

Dentro de los desarrollos que se han concretado en los últimos años están la serie de investigaciones llevadas a cabo por Koichi Takamura para BASF Corporation en USA. A continuación se sintetizan los resultados más relevantes de uno de éstos estudios.

Micropavimentos con Emulsión Asfáltica Modificada con SBR Látex

Las emulsiones modificadas con látex no son solo emulsiones de asfalto modificado con polímeros sino que contienen partícula de látex dispersas en una fase acuosa. Como el látex con el asfalto no se mezclan, una vez se evapora el agua el látex queda incrustado entre las partículas de asfalto contribuyendo con sus propiedades al desempeño general de la mezcla. El SBR látex empleado en emulsiones para micropavimentos es diseñado para evitar la formación de grandes coágulos y por el contrario formar un delgado film de caucho sintético que actúa como una verdadera soldadura entre las partículas de asfalto mucho más grandes. Esto hace que la mezcla cure más rápido y tenga mejores propiedades físicas.

A principios de la década de 1990, D. R. Jones et al. analizaron el desempeño de siete tipos de emulsiones asfálticas modificadas que se emplean en micropavimentos. El objetivo de su estudio fue identificar el efecto de diferentes polímeros en el desempeño de los pavimentos. En su ensayo se fijaron todas las otras variables que pudiesen influir en el resultado, como el tipo de asfalto, surfactantes y calidad de agregados. Los resultados se presentaron en términos del Wet Track Abrasion Test (ensaye de la Pérdida de Abrasión en Medio Húmedo, 8.302.46 del MC-Vol.8) y del Loaded Wheel Test (ensaye de la Rueda de Carga, 8.302.53 del MC-Vol.8). Ver fig. 5.12.

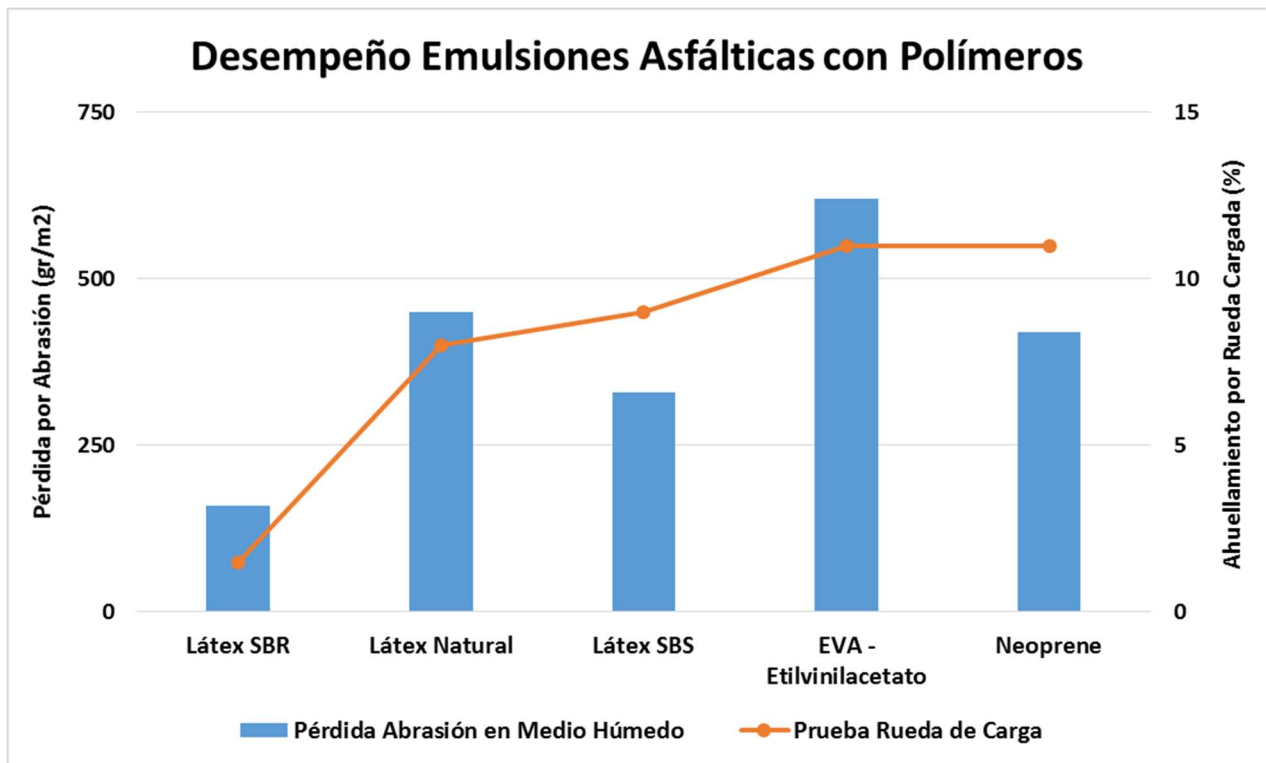


Fig. 5.11.- Desempeño de emulsiones modificadas con distintos polímeros (Takamura, 2001).

El estudio concluye que las mezclas preparadas con emulsiones modificadas con Látex SBR muestran mejor desempeño en todas las pruebas de laboratorio, siendo notorios sus mejores resultados en la prueba de pérdida por abrasión en medio húmedo y en la prueba de deformación por rueda cargada. Además los resultados indican que las emulsiones con látex muestran en este caso un desempeño mejor que las emulsiones modificadas con polímeros sólidos.

En resumen la experiencia internacional muestra que el continuo desarrollo de las emulsiones asfálticas y sus aditivos es la fuente principal de mejoras en el diseño de micropavimentos más duraderos y económicos.

CAPITULO VI

ANALISIS COMPARATIVO SELLOS DE CAPA DE PROTECCION

6 ANALISIS COMPARATIVO DE SELLOS DE CAPA DE PROTECCION.

MARCO DEL ANALISIS COMPARATIVO

Este estudio busca identificar los impactos de las nuevas tecnologías de sellado con capa de protección asfáltica en los plazos, costos y calidad de construcción de caminos secundarios en Chile. Por lo anterior se hace necesario definir un marco para el análisis de estos impactos.

La política pública más relevante en el desarrollo de caminos rurales en Chile es el PROGRAMA CAMINOS BASICOS, cuyo origen se remonta al año 2003, el cual quedó oficialmente instituido por la RS DV N° 1076 de 04.03.2011.

Este programa define diversos objetivos para sus proyectos de Caminos Básicos derivados, los cuales buscan generar beneficios en tres áreas: cambio del estándar del camino, reducir el deterioro del medio ambiente, e impulsar la economía local. A continuación se detallan los beneficios buscados por área de impacto:

- 1) En la economía local:**
 - a) Brindar una mejor calidad de vida a la gente que habita en los sectores rurales.
 - b) Eliminar el efecto nocivo del polvo a los cultivos aledaños al camino.
 - c) Crear condiciones propicias para el desarrollo local.

- 2) En el estándar del camino:**
 - a) Proveer una superficie de rodadura confortable de mayor durabilidad que la tradicional.
 - b) Menor cantidad de intervenciones de conservación.

- 3) En el medio ambiente:**
 - a) Disminuir o eliminar el polvo generado por los vehículos.
 - b) Menores efectos sobre el ambiente (menor extracción periódica de áridos).

Como condiciones de borde para el desarrollo del Programa Caminos Básicos, en el Capítulo 2 del presente estudios se identificó el estado de la red vial nacional a fines del año 2013, la cual mostraba a esa fecha un total de 53.227 km de caminos no pavimentados. Esto define cual sería la extensión potencial máxima a cubrir por el programa si hoy se abarcara por medio de éste, y de una vez, toda la red no pavimentada.

Por otro lado durante el año 2013 se pavimentaron 1.387 Km de caminos, los cuales significaron una inversión aproximada de MM USD\$ 419,55.- Un 65 % de estos fondos se destinó al desarrollo de 423 Km de camino pavimentados en alto estándar y un 35% se invirtió en la construcción de 964 Km de caminos con capa de protección asfáltica. Así la inversión en caminos de capa de protección fue cercana a los MM USD 150.- (millones de USD).

Dados estos objetivos del Programa de Caminos Básicos y las condiciones de antes mencionadas, a continuación se comparan los tipos más importantes de sello de capa de protección asfáltica estudiados en el presente informe bajo tres criterios de decisión: Inversión Inicial, Efectividad del Sello (medida por el Costo Directo Anual Equivalente), y Valor Presente de las alternativas de desarrollo de Caminos Básicos que se generan con su utilización.

Son dos las preguntas que se intentan responder. En primer lugar ¿Cuáles es el impacto económico que tendrán las nuevas tecnologías de sellos asfálticos en el Programa de Caminos Básicos? Por otro lado interesa saber ¿Cuál es la estrategia de desarrollo de caminos básicos que genera un mayor retorno económico para el país?

Debido a que la solución tradicional más económica para la construcción de carpetas de rodado pavimentadas es la aplicación de una capa delgada de mezcla de asfalto en caliente (5 cm a 7 cm), se consideran los costos promedio de esta alternativa como el estándar de comparación para las soluciones TSS, DTS y Cape Seal. Se estima que la duración de estas carpetas es de 10 a 12 años, lo cual se podría aceptar cuando los espesores mínimos son 7 cm o más. Sin embargo hoy el espesor mínimo solicitado en muchos proyectos es solo 5 cm e incluso 4 cm, sin considerar una membrana intermedia de absorción de estrés como puente entre la base y el asfalto – sistema SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) – para asegurar su vida de servicio.

La experiencia muestra que en primeros pavimentos con capas asfálticas tradicionales delgadas los resultados no han sido buenos. En la VIII Región del BioBio, las carpetas asfálticas en caliente de capa delgada ya no se consideran una alternativa viable para los proyectos de caminos básicos, por sus altos costos y duración limitada. Por lo anterior para efectos de comparación se considera que una capa de asfalto en caliente, de 5 cm de espesor, instalada sobre una base granular chancada, tendrá una vida de servicio esperada de 9 años – escenario optimista. En el Anexo I se incluyen los precios unitarios para las mezclas asfálticas en caliente de capa delgada.

6.1.1 INVERSION INICIAL, COSTO DIRECTO TOTAL POR KM

Uno de los objetivos de este estudio es dar a conocer tecnologías de pavimentación modernas cuyo impacto en el desarrollo de caminos rurales nuevos en Chile pueda ser importante. Por tratarse de caminos nuevos, al costo unitario directo de cada de cada tipo de sello se debe agregar el costo unitario por m² del soporte construido en base granular chancada, en los 20 cm de espesor comúnmente solicitados.

Los resultados de esta valoración se muestran en la fig. 5.12.- Cabe observar que los requisitos de diseño para la base granular chancada en capas de asfalto en caliente es menos exigente que las definiciones para las beses solicitadas para ser instaladas bajo una capa de protección asfáltica. La razón es que se considera que el asfalto aporta algo de capacidad estructural a paquete estructural inferior. Por lo anterior este tipo de base tiene un costo levemente inferior.

Los datos muestran que los costos de los sellos de protección asfálticos de doble capa son aproximadamente 2/3 del costo de una carpeta de mezcla asfáltica en caliente de 5 cm de espesor.

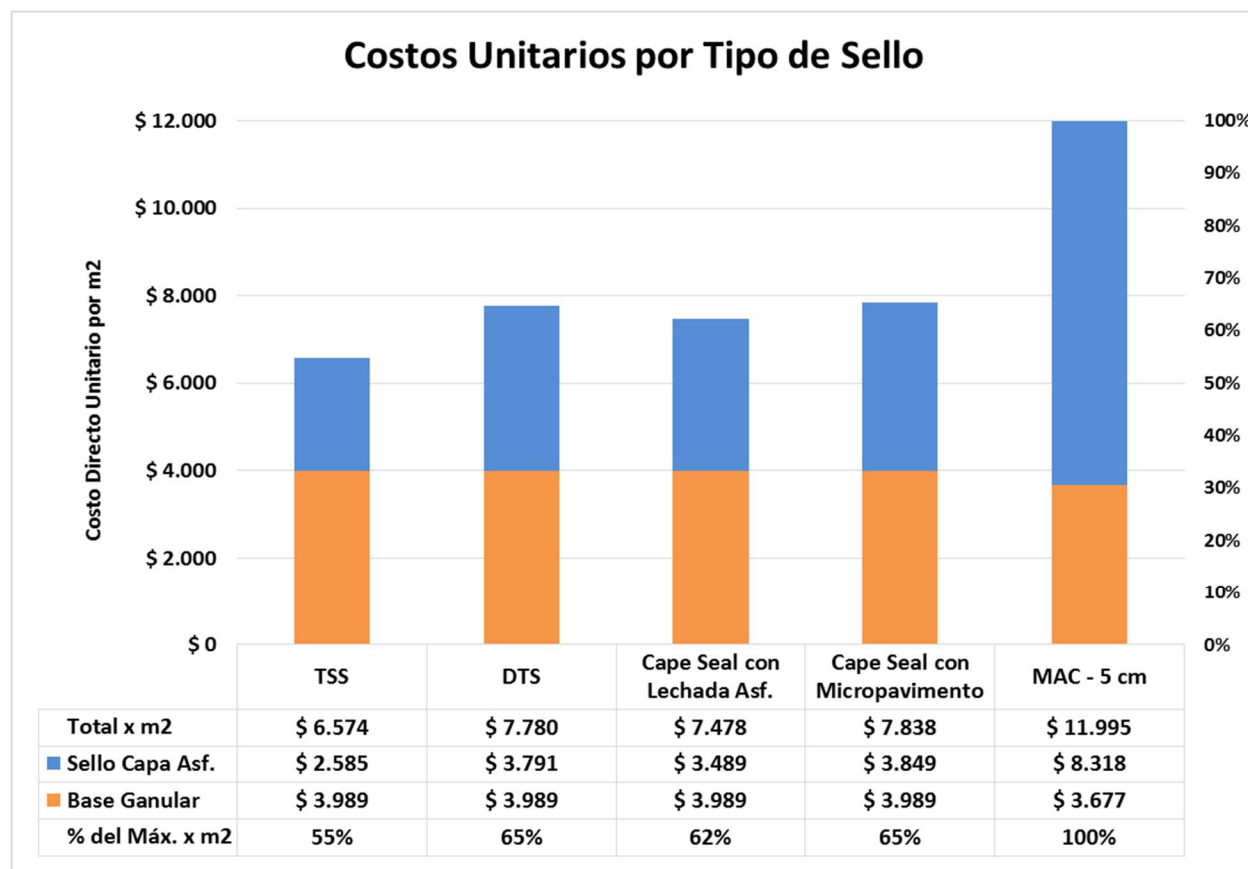


Fig. 5.12.- Comparación de Costo Directo Unitario por m² pavimento y por tipo de sello.

6.1.2 EFECTIVIDAD, COSTO DIRECTO ANUAL EQUIVALENTE POR KM

Si se toman los Costos Directos Unitarios para los distintos tipos de sellos y se dividen por las vidas de servicio esperadas, se obtiene el Costo Directo Anual Equivalente.

Este valor es un buen indicador del costo económico anual para cada solución de pavimentación, siempre que ésta no requiera de reparaciones adicionales importantes durante su vida de servicio. Se trata de un valor óptimo en cuanto a la efectividad en la construcción del sello, y su comparación entre distintos tipos de capas de protección constituye un buen criterio para decidir que opción privilegiar. Las vidas de servicio corresponden al promedio del desempeño reales de éstos tipos de sellos en países con mayor desarrollo en las técnicas, según la literatura.

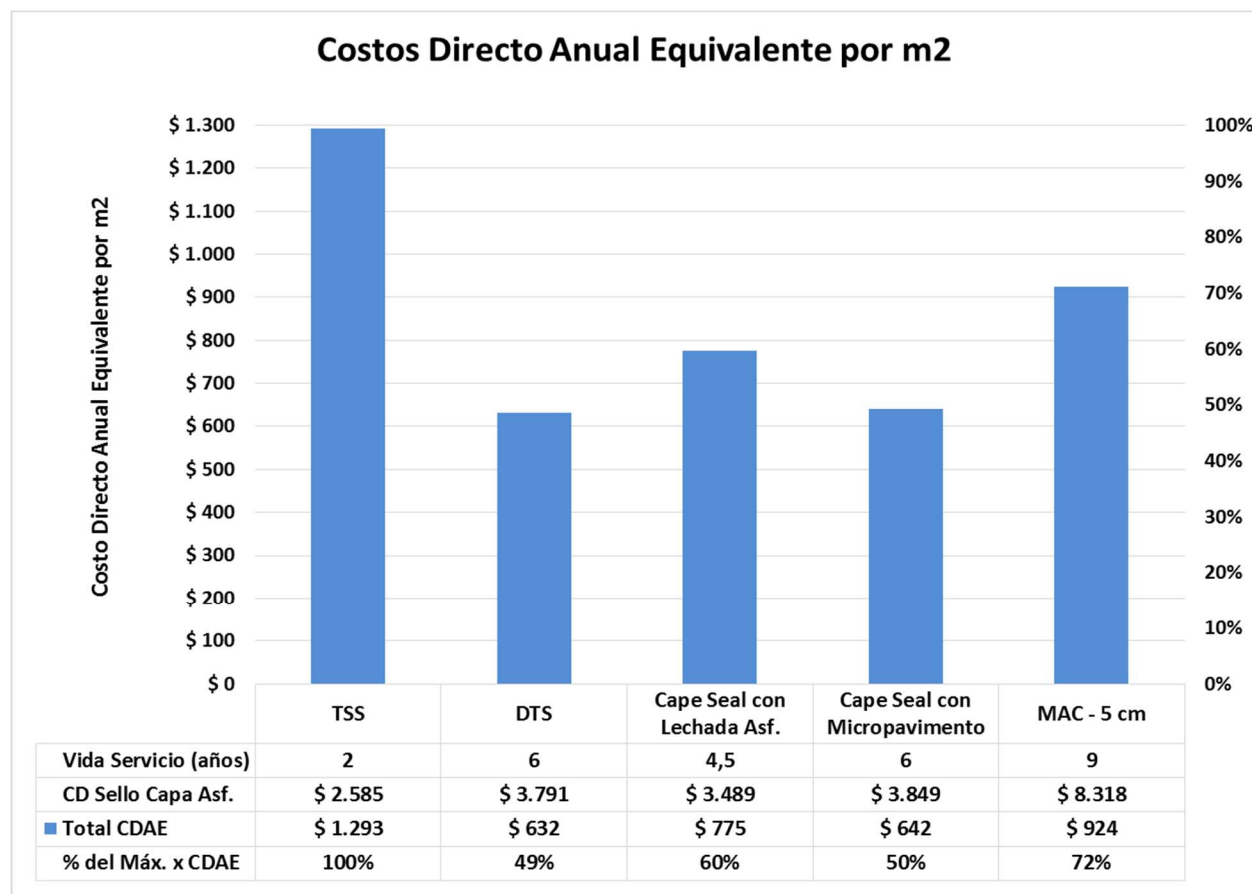


Fig. 5.12.- Comparación de Costo Directo Anual Equivalente por m2 de sello.

Si los pavimentos se construyen pensando en que serán mantenidos antes de que su deterioro comprometa estructuralmente la base granular chancada inferior, solo es necesario considerar en el costo anual equivalente el valor de reposición del sello de capa de protección, y no incluir el valor de la base chancada queda incorporada sin costo adicional en la siguiente capa. En este

caso las alternativas más eficientes son el sello DTS y el sello Cape Seal con Micropavimento, ambos con un costo anual de alrededor de \$ 640.- x m2. Ver fig. 5.12.-

Si por el contrario se considera que se dejará que el pavimento cumpla la totalidad de su ciclo de servicio hasta causar un deterioro avanzado de capa granular inferior, es muy probable que una mantención del camino deba reponer la base granular chancada, al menos parcialmente.

En este caso el Costo Anual Equivalente se calcula considerando el costo de reposición de la base. El escenario determina que las alternativas más eficientes son el DTS y el Cape Seal con Micropavimento, casi al mismo costo que la solución de mezcla de asfalto en caliente de 5 cm. Para efectos de decisión en este escenario es conveniente incorporar criterios adicionales como los comentados en el punto 6.3.- de este informe. Los valores calculados para este caso se detallan en la fig. 5.13.-

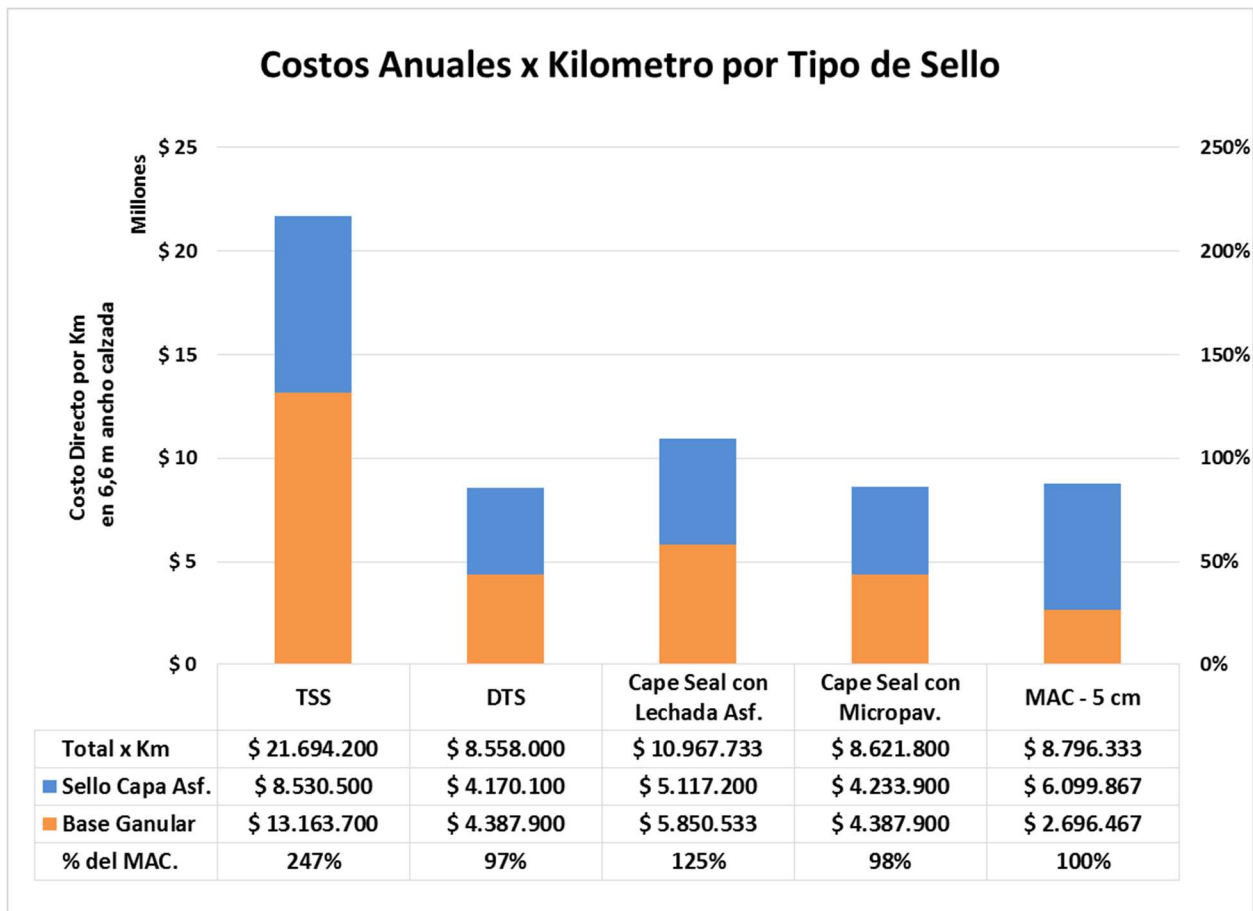


Fig. 5.13.- Comparación de Costo Directo Unitario por Km pavimento y por tipo de sello.

6.1.3 ESTIMACION DEL VALOR ECONOMICO DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DE CAMINOS BASICOS EN CHILE

El estudio Desarrollo DE Caminos, Crecimiento Económico, y Reducción de Pobreza en China (Shenggen Fan, 2005) determina que para el año 2001 el retorno marginal para la economía China por cada kilómetro adicional de camino pavimentado de bajo estándar fue de Y\$ 682.088.- en PIB Urbano, Y\$ 285.399.- en PIB Agrícola, y Y\$ 1.032.245.- en PIB Rural No Agrícola, sumando un total de Y\$ 1.999.732.- en PIB acumulado. En el periodo 2001-2013, la variación de precios en este país ha sido un 2,6% anual promedio, es decir en este periodo los precios se han incrementado en un 36% acumulado. Ajustando el valor por esta variación de precios, hoy el retorno marginal de cada Km adicional de caminos rurales debiera ser aproximadamente Y\$ 2.719.636.- lo cual convertido a dólares de Diciembre de 2013 nos da USD\$ 445.112.-

Existen razones por las cuales el retorno marginal de un kilómetro adicional de pavimentación de camino básico rural en Chile debería ser distinto al caso de China. Son economías distintas, con geografías distintas, con potenciales de desarrollo económico y productividades diferentes. Sin embargo para efectos del presente análisis solo requerimos de una estimación fundamentada del retorno económico que se puede obtener al construir un kilómetro adicional de pavimento en un camino rural en Chile – lo que en términos económicos se interpreta como el precio de la última unidad producida. De esta manera se consideran los retornos marginales por kilómetro que muestra la economía China como un estimador aceptable para efectos de comparación de las 4 estrategias de desarrollo que se evaluarán económicamente para la realidad chilena.

Del valor de retorno marginal estimado en el estudio citado – USD\$ 445.112.- por km – primero se concluye que el precio por kilómetro construido en caminos rurales es bastante superior al costo de construcción del kilómetro de camino nuevo con capas de protección asfáltica, para todas las alternativas revisadas en este estudio: TSS, DTS, Cape Seal con Lechada Asfáltica y Cape Seal con Microaglomerado. Este precio incluso justificaría la construcción de capas de protección en mezclas de asfalto en caliente delgadas (5cm), aunque en este caso la brecha entre retorno y costo de construcción se cierra bastante, por lo que cualquier variación en las condiciones económicas de entorno – que hagan variar el retorno marginal a la baja – pone en riesgo el efecto económico positivo de la inversión.

Con esta información se ejecutó una simulación económica simple para cuantificar el desafío que enfrenta el Programa de Caminos Básicos de la DV nacional, con el objeto de evaluar las alternativas más rentables, bajo los siguientes supuestos:

- a) Como objetivo para el programa se plantea construir los 53.227.- Km de red no pavimentada en el menor plazo, con la solución de capa de protección que genere una mejor relación costo-efectividad, y manteniendo la inversión periódicamente para asegurar su valor económico.
- b) La inversión disponible para la construcción de caminos bajo el programa durante el primer año es de USD 150.000.000.- (año 0). Este valor corresponde a la estimación del monto invertido en caminos básicos durante el año 2013. Cabe recordar que ese año se construyeron 1.387.- Km de camino nuevos que significaron una inversión estimada de MM USD\$ 420. De estos, 964 Km fueron caminos con capa de protección asfáltica, los cuales debido a sus menores costos solo concentraron un 35% de la inversión.
- c) El crecimiento anual del monto destinado a la inversión en caminos con capas de protección crece a un 10% anual. Este valor es alto pero se justifica en que las capas de protección deben ir concentrando cada vez un mayor porcentaje de los recursos disponibles para pavimentación, por su mejor relación costo-efectividad.
- d) La Tasa de descuento de los flujos generados se fija en un 5%, que se considera como la meta de crecimiento del PIB nacional para el periodo de evaluación. Es el crecimiento del PIB el que determina el retorno del mejor destino alternativo para los recursos fiscales destinados a esta política, por lo cual su meta de crecimiento anual fija la tasa de retorno exigida a las inversiones viales.
- e) El retorno marginal por kilómetro de camino construido se establece en USD\$ 445.112.- Este retorno se divide en los 5 años posteriores a la construcción debido a que los impactos económicos directos de cada kilómetro adicional se tienen a concentrar en los primeros años. Si bien cada kilómetro construido sigue prestando servicio durante todo el periodo, y este se asegura con mantención periódica, los retornos económicos de la red se tienden a concentrar en los nuevos sectores geográficos y comunidades que se conectan con de mejor manera con el cambio de estándar en los caminos. De esta manera el retorno anual estimado por kilómetro de camino nuevo es de USD\$ 89.022.- a partir del año siguiente a la construcción en un horizonte temporal de 5 años.
- f) Se considera que la mantención periódica se realizará con Microaglomerado en Frio en todas las estrategias evaluadas, por ser la solución de recapado que muestra un menor Costo Anual Equivalente. Las mantenciones se realizan cada 6 años.
- g) Se establece como prioridad del programa el mantener el valor de la inversión en caminos ya ejecutados. Por lo anterior primero se asignan los recursos a la mantención de la red existente, para luego utilizar los excedentes en la construcción de nuevos kilómetros de caminos básicos con capa de protección.

Los escenarios evaluados son los siguientes:

- A. **Estrategia 1.** Camino Nuevo construido con capa de protección del tipo Tratamiento Superficial Simple (TSS) seguido de mantenciones periódicas con Micropavimento Slurry después del segundo año de servicio. Las mantenciones periódicas se aplican: el primer ciclo de mantención comienza en el año 2. El segundo ciclo en el año 8. El tercer ciclo en el año 15. El cuarto en el año 23. Esta estrategia es una variación de la estrategia de desarrollo vial empleada en Nueva Zelandia, la cual considera el desarrollo un *First Coat* en TSS, seguido de sucesivas mantenciones del sello con TSS o DTS dependiendo del nivel de tránsito alcanzado por el camino.
- B. **Estrategia 2.** Camino Nuevo construido con capa de protección del tipo Doble Tratamiento Superficial (DTS) seguido de mantenciones periódicas con Micropavimento Slurry después del sexto año de servicio. Las mantenciones periódicas se aplican: el primer ciclo de mantención comienza en el año 6. El segundo ciclo en el año 13. El tercer ciclo en el año 20. El cuarto en el año 27. Esta estrategia es una de las soluciones más empleadas en Chile para el desarrollo de caminos básicos, con la diferencia de que en el país no existe una política de mantenimiento vial permanente en el tiempo.
- C. **Estrategia 3.** Camino Nuevo construido con capa de protección del tipo Cape Seal con Micropavimento Slurry (ya que no tiene diferencia importante en costo con el Cape Seal tradicional y entrega una mayor vida de servicio) seguido de mantenciones periódicas con Micropavimento Slurry a partir del séptimo año de servicio. La apuesta es que con estos sellos bien ejecutados se pueda ganar un año en el inicio de las mantenciones. Así las mantenciones periódicas se aplican: el primer ciclo de mantención comienza en el año 7. El segundo ciclo en el año 14. El tercer ciclo en el año 21. El cuarto en el año 28.
- D. **Estrategia 4.** Camino Nuevo construido con capa de protección del tipo Mezcla de Asfalto en Caliente en capa delgada de 5cm, seguido de mantenciones periódicas con Micropavimento Slurry a partir del décimo año de servicio. Así las mantenciones periódicas se aplican: el primer ciclo de mantención comienza en el año 10. El segundo ciclo en el año 17. El tercer ciclo en el año 24.

Los resultados para las distintas estrategias se resumen en la tabla 5.5.- siguiente. El detalle de los cálculos se incluye en los anexos.

El valor de los resultados de la simulación anterior no son los resultados numéricos en sí, pues no son precisos, sino las relaciones que entrega la aplicación de estas distintas estrategias en un escenario fijo. Por lo anterior es importante destacar el notorio mejor desempeño de la Estrategia

1, TSS más Micropavimento regular a partir del segundo año de servicio, y tratar de deducir si el resultado se condice con los datos y la experiencia.

Estrategia	Pimer Sello	Sello Mantenimiento	VPN	TIR	Capital Trabajo	Plazo
			MUSD\$	%	MUSD\$	Años
ESTRATEGIA 1	TSS	Micropavimento	\$ 2.708.126	38,2%	\$ 243.282	24
ESTRATEGIA 2	DTS	Micropavimento	\$ 480.103	32,0%	\$ 271.531	26
ESTRATEGIA 3	Cape Seal MP	Micropavimento	\$ 951.451	33,9%	\$ 272.732	26
ESTRATEGIA 4	MAC - 5 cm	Micropavimento	\$ 162.387	14,1%	\$ 360.013	26

Tabla 5.5.- VPN diferentes estrategias de desarrollo caminos rurales en Chile.

El valor de los resultados de la simulación anterior no son los resultados numéricos en sí, pues no son precisos, sino las relaciones que entrega la aplicación de estas distintas estrategias en un escenario fijo. Por lo anterior es importante destacar el notorio mejor desempeño de la Estrategia 1, TSS más Micropavimento regular a partir del segundo año de servicio, y tratar de deducir si el resultado se condice con los datos y la experiencia.

Al impulsar la construcción de sellos TSS como primeras capas de protección, por ser los de menores costos, la prioridad se coloca en el avance de la cobertura – entregar más Km al servicio de los usuarios. Además este sello inicial se cubre con un micropavimento a partir del segundo año, es decir se transforma en un Cape Seal con Micropavimento a partir de ese momento. ¿Qué se gana con esto? Se aprovecha la vida útil que el sello TSS tiene por si solo como primera aplicación. Luego se aprovecha toda la vida útil de las capas de Micropavimento como sellos de protección para mantenimiento da pavimentos existentes. Es decir un Cape Seal inicial cuya vida útil esperada era de 6 años, se trasforma en un secuencia inicial de 2 capas con vida en servicio de 8 años. Se gana un 33% de duración con un 15% de mayor costo. Por lo cual es más eficiente.

Este tipo de estrategias que aprovechan la vida de las capas de sellos económicas en forma individual es la que le ha permitido a Nueva Zelandia desarrollar su red vial. En este país el estándar por defecto para el primer sello en caminos rurales nuevos es un TSS. El cual en el segundo año de servicio se cubre con un nuevo TSS u otra capa para asegurar su duración en el tiempo. Esto le ha permitido a este país tener una red rural de caminos con un alto porcentaje de pavimentación al mínimo costo.

Es imposible que una única estrategia de pavimentación rural sea la indicada para todas las situaciones. Pero es evidente también que la pavimentación con capa de mezcla asfáltica caliente

en capa delgada (MAC – 5cm) es una opción que está en el límite de la viabilidad para muchos caminos.

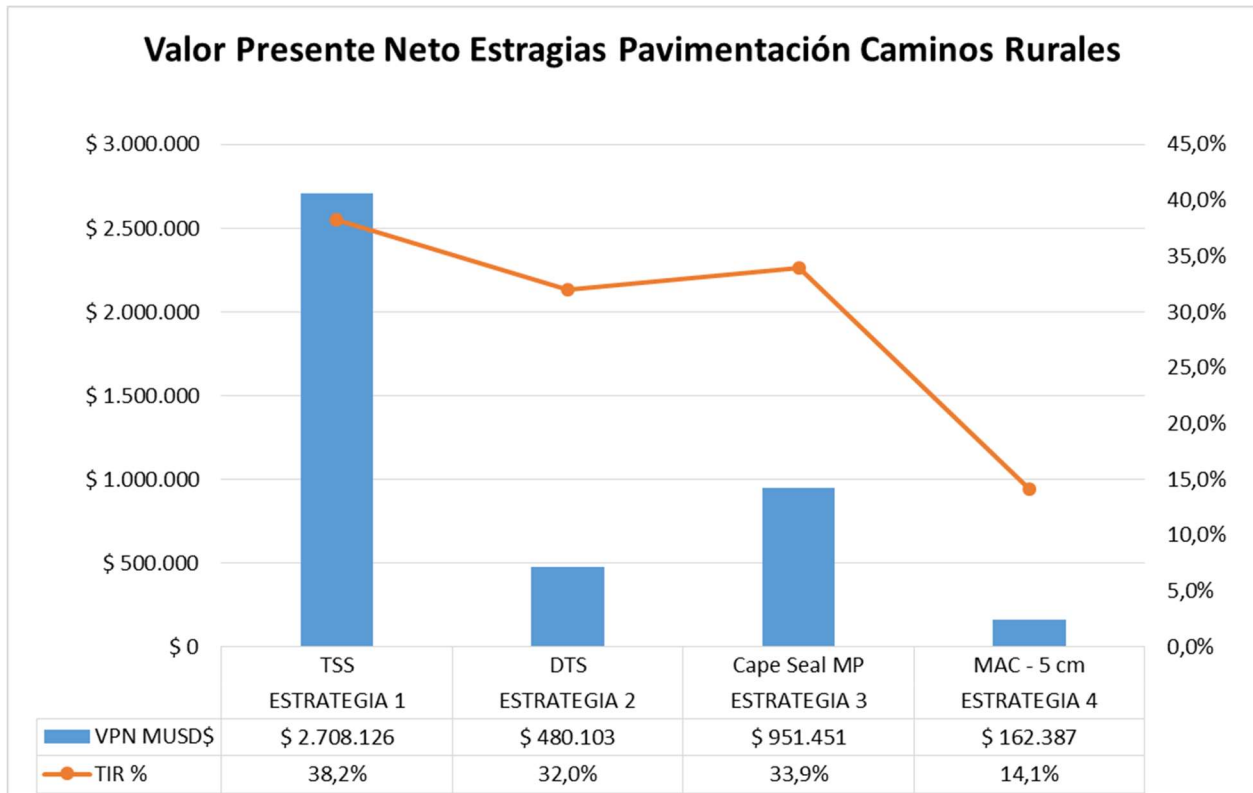


Fig. 5.14.- VPN y TIR para diferentes estrategias de desarrollo caminos rurales en Chile.

De esta manera parece ser que el una combinación de las alternativas de desarrollo con primeras capas en TSS, DTS y Cape Seal, todas con mantenciones periódicas con Micropavimentos, es la decisión correcta para abordar el cambio de estándar en la conectividad vial rural del país. Los énfasis deberían indicar:

- Dar prioridad a la construcción de sellos TSS en todas las situaciones de bajo tránsito donde el estándar de servicio de este tipo de capa de protección pueda mantenerse por al menos 2 años.
- Si el tránsito de los caminos, o condiciones particulares de estrés superficial, hace no recomendable la construcción de sellos TSS, la prioridad es la aplicación de un sello tipo Cape Seal con Micropavimentos. Además de capturar las ventajas estéticas de esta

solución, el menor riesgo de desprendimiento de agregado y la mayor resistencia al estrés superficial, la preferencia por este tipo de solución fomentará el desarrollo y dominio de la tecnología de Micropavimntos en el país. Los Micropavimentos son la aplicación económicamente más eficiente como sistema de mantenimiento preventivo de pavimentos y la que genera menores costos medioambientales (Gransberg, NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice, 2010).

- Si por condiciones climáticas se hace poco aconsejable ejecutar el primer sello en Cape Seal con Micropavimento, la alternativa es DTS.
- Para la mantención de los sellos se recomienda Micropavimento por su mayor duración. Esta tipo de sellos se utiliza con éxito en Canadá y los estados del norte de EE.UU. por lo cual siempre habrá un momento del año en el cual se puede aplicar con éxito en las distintas regiones de Chile.

6.2 ANALISIS TECNICO

6.2.1 COMPLEJIDAD TECNICA DE LA CONSTRUCCION DE SELLOS

Todos los sellos de capa de protección estudiados como parte del presente informe citan como una de sus desventajas la alta dependencia en la experiencia del constructor del resultado del sello en cuanto a calidad. Por lo anterior todas estas soluciones son complejas desde el punto de vista constructivo.

La complejidad de estas técnicas está en que la mezcla entre el agregado y el bitumen se va realizando en la medida que la aplicación se instala en el piso. El tiempo disponible para la correcta disposición final del material en la superficie es muy acotado, y en el caso de asfaltos de reacción rápida solo un par de minutos, ya que el bitumen emulsificado reacciona al entrar en contacto con el agregado. Por lo anterior su aplicación demanda mucha concentración y coordinación en el equipo de operarios a cargo de la instalación del sello.

Estas dificultades se han reducido con las nuevas tecnologías de sellado sincrónico y de micropavimentación, que por medio de automatización de procesos en equipos móviles han reducido sustancialmente los espacios para que la mala operación afecte el resultado final.

La complejidad de un sello con las tecnologías modernas depende en gran medida del número de etapas para la construcción del sello final y el número de técnicas involucradas. Bajo estos criterios los sellos estudiados se ordenan de menor a mayor complejidad como sigue:

1. Tratamiento Superficial Simple. 1 aplicación de Capa (TSS). 1 técnica de sellado (TS).
2. Doble Tratamiento Superficial. 2 aplicaciones de Capa (DTS). 1 técnica de sellado (TS).
3. Cape Seal. 2 aplicaciones de Capa (TSS + Capa Slurry). 2 técnicas de sellado (TS + Slurry).

6.2.2 TIEMPOS DE EJECUCION Y PUESTA EN SERVICIO

Los tiempos de ejecución de los sellos dependen mucho de la técnica del constructor, la adecuada logística de aprovisionamiento de insumos, y la tecnología de los equipos empleados.

La tecnología síncrona de TS es la más rápida para cubrir la superficie, aunque la necesidad de compactación posterior y el quiebre del bitumen empleado condicionan significativamente el tiempo de apertura al tránsito, el que puede extenderse 6 o 12 horas.

Los sellos tipo slurry son más lentos en la velocidad de disposición sobre la superficie del camino, la que queda determinada en última instancia por la capacidad de mezclado de los sistemas del equipo. Sin embargo si se emplean emulsiones modificadas, como es la exigencia por defecto para los microaglomerados en frío (micropavimntos slurry), el tiempo de apertura al tránsito puede ser del orden de una hora. Aunque no es una exigencia de la técnica, es recomendable la compactación neumática del microaglomerado en frío para disminuir la presencia de agregado suelto. Este proceso puede agregar otra hora al tiempo de espera para la apertura al tránsito.

Las técnicas de doble capa, DTS y Cape Seal, son por definición más lentas. La norma chilena (MC Vol. 5) es en especial estricta en los tiempos de espera entre la imprimación de la superficie y la aplicación de la primera capa de protección, y entre ésta y la segunda capa, exigiendo que se no se realicen durante el mismo día. Esta definición de tiempos dista mucho de la experiencia y la definición de la técnica en Nueva Zelandia, donde dos capas de TS aplicadas en días distintos no se consideran DTS sino que un TSS con recapado posterior. Además los países con mayor desarrollo de la técnica TS ya no emplean imprimaciones previas, sino que aplican una primera

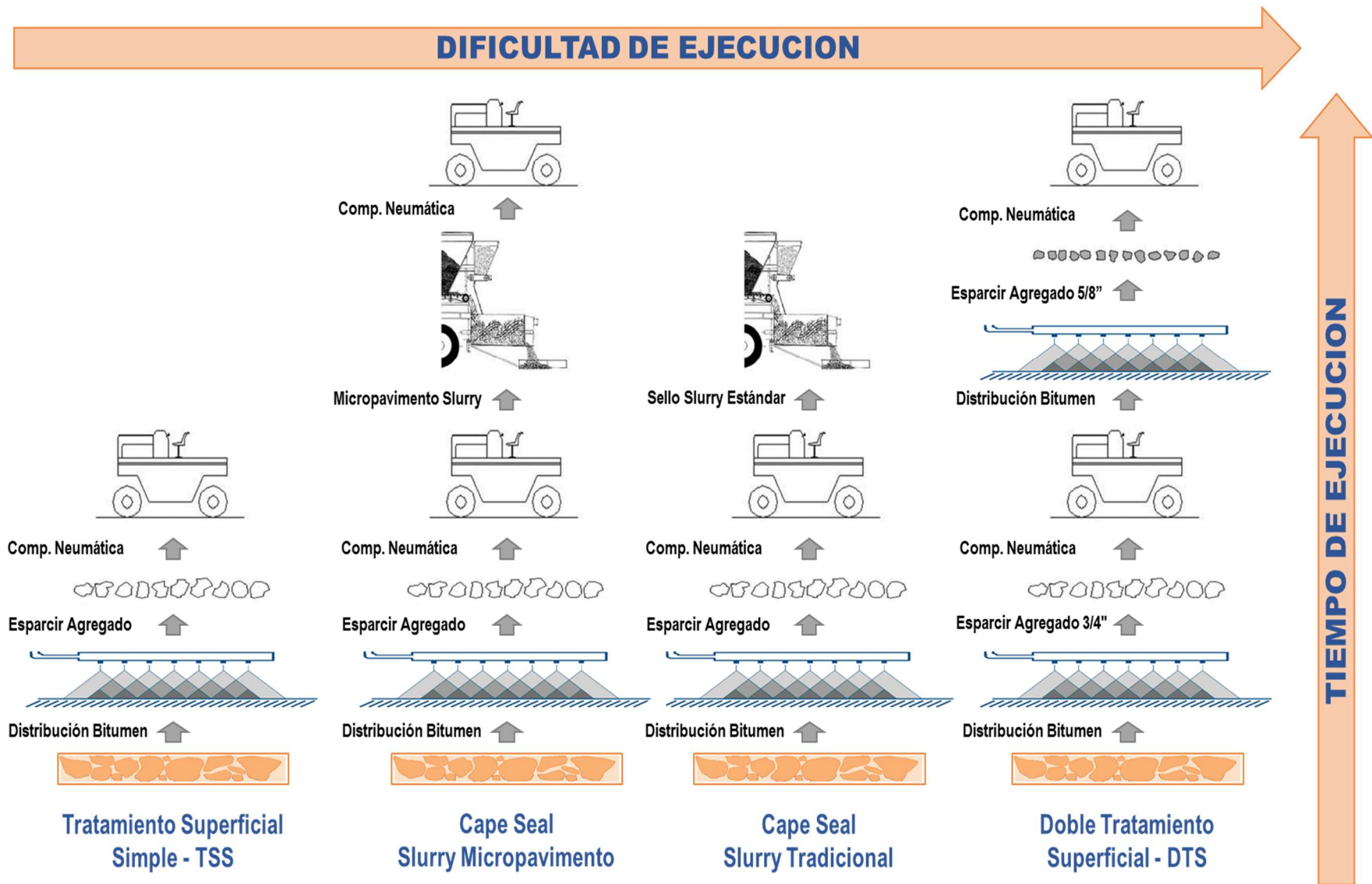


Fig. 5.15.- Complejidad Técnica y Tiempos de Ejecución de Alternativas en Sellos de Capa de Protección Asfáltica.

capa con una emulsión especialmente preparada para adherirse a la superficie de la base granular. Estas mejoras en la especificación de la técnica de TS reducen significativamente los tiempos.

Respecto del Cape Seal, es la aplicación de sello de capa de protección más lenta, por considerar dos sellos con tecnologías distintas que deben ser aplicadas en días distintos. De esta forma el orden de tiempos de aplicación, de menor a mayor, queda como sigue:

1. Tratamiento Superficial Simple. 1 aplicación de Capa (TSS). 1 técnica de sellado (TS).
2. Doble Tratamiento Superficial. 2 aplicaciones de Capa (DTS). 1 técnica de sellado (TS).
3. Cape Seal. 2 aplicaciones de Capa (TSS + Capa Slurry). 2 técnicas de sellado (TS + Slurry).

6.2.3 PRINCIPALES RIESGOS CONSTRUCTIVOS

Como se mencionó anteriormente los sellos con capa de protección asfáltica son aplicaciones in situ donde la construcción de la mezcla bitumen-agregado se ejecuta a medida que se disponen los materiales en la superficie del camino. Esto determina que exista un alto riesgo de que las dosificaciones teóricas no se apliquen en la ejecución práctica, pudiendo generar problemas en la calidad final del sello. Las normas de construcción para estas técnicas consideran formas de control en terreno que acotan este riesgo. Los quipos modernos corrigen los espacios para el error mediante la automatización. Sin embargo, como en toda técnica constructiva, la palabra final la tiene la experiencia del constructor y sus operarios.

En Tratamientos Superficiales, los errores en terrenos se traducen generalmente en excesivo desprendimiento de agregados, menores aplicaciones de agregados que generan una carpeta abierta e irregular, o excesiva distribución de bitumen que genera exudación de la superficie. Cuando se detectan estos errores en terreno, normalmente se corrigen con una capa adicional de agregado y bitumen, por lo cual el riesgo de error final es mayor en un TSS, sin espacio para corregir en la siguiente capa, que en un DTS.

En sellos con sistema slurry, los errores en la dosificación de la mezcla pueden producir excesivo escurrimiento lateral, por presencia de agua en exceso, falta de adherencia en el agregado, por falta de emulsión, o excesiva adherencia superficial post aplicación por exceso de emulsión en la mezcla. No obstante debido a los tiempos de aplicación y las características de la técnica, es más fácil detener para poder corregir una faena de sello slurry que una de tratamiento superficial.

Finalmente como se ha comentado con anterioridad, la buena coordinación del equipo encargado de la aplicación es una condición necesaria para una buena aplicación de tratamiento superficial con tecnología estándar. Lo cual introduce un riesgo adicional.

En todos los sellos de capa descritos es fundamental el estricto control de la calidad de los insumos básicos, bitumen o emulsiones, y agregados.

El orden de riesgo constructivo, en cuanto al logro de una calidad mínima para el sello, de menor a mayor, queda como sigue:

1. Cape Seal. 2 aplicaciones de Capa (TSS + Capa Slurry). 2 técnicas de sellado (TS + Slurry).
2. Doble Tratamiento Superficial. 2 aplicaciones de Capa (DTS). 1 técnica de sellado (TS).
3. Tratamiento Superficial Simple. 1 aplicación de Capa (TSS). 1 técnica de sellado (TS).

6.3 ANALISIS DE ECO-EFECTIVIDAD

En países desarrollados el enfoque de desarrollo ha cambiado del control de emisiones a la búsqueda de un desarrollo sustentable. El principal objetivo del análisis de Eco-eficiencia es poder visualizar las mejores opciones posibles con el menor impacto ambiental y al menor costo. El análisis se enfoca en cuatro aspectos:

- Desempeño técnico.
- Consumo de materias primas y energía.
- Posibilidades de reciclaje y disposición final de residuos.
- Ventajas ecológicas y económicas.

El análisis de Eco-eficiencia fue desarrollado por BASF (Takamura K. , 2010) para evaluar y visualizar las ventajas y desventajas de un producto y su empleo en términos de economía y ecología. El ciclo de vida completo de un producto, incluyendo desde la manufactura de los materiales básicos que lo componen, los consumos de energía, su empleo y disposición final, son evaluados en su dimensión económica y ecológica. Este análisis permite identificar los productos más competitivos y compatibles con los principios de desarrollo sustentable.

Muchos estudios muestran que en desarrollo vial la mantención preventiva de la red es la estrategia más eficiente de preservar la inversión y asegurar los retornos de la buena conectividad. En estudios sucesivos, Takamura et. al aplicaron el análisis de eco-efectividad a las

técnicas de mantenimiento preventivo más empleadas en USA, las cuales por diferenciarse muy poco en términos de Costos Directos Anuales Equivalentes, requerían de otros criterios de evaluación para visualizar su impacto económico completo. Las técnicas estudiadas fueron: Micropavimentación con emulsiones asfálticas modificadas, mezcla de asfalto en caliente en 4 cm, y mezcla de asfalto en caliente modificada con polímeros en 4 cm. Los resultados mostraron que la Micropavimentación superaba a las otras técnicas en todas las variables medidas.

El estudio asume una vida de servicio de 7 años para el sello de Micropavimento, de 10 años para la carpeta de asfalto en caliente de 4 cm, y 13 años para la carpeta de asfalto en caliente modificado en 4 cm.

El estudio en su versión actualizada del año 2010, muestra que un sello de Microaglomerado en Frio Tipo B1, consume al menos un 50% menos de energía, demanda un 50% menos de materias primas, y genera un 50% menos de residuos que una aplicación de sello con carpeta de Asfalto MAC en 4 cm.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

7 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

De la revisión de todos los antecedentes resumidos en el presente estudio, se concluye:

- i. En países avanzados el enfoque de desarrollo país ha cambiado del control de emisiones contaminantes a la búsqueda de un modelo de desarrollo sustentable. Cuando las políticas de construcción y mantenimiento de caminos en Chile asimilen este cambio, las capas de protección asfáltica, por su menor impacto ambiental, aumentarán considerablemente su presencia en el presupuesto anual para desarrollo vial, tanto rural como urbano.
- ii. El desarrollo futuro de las técnicas de construcción de capas de protección asfáltica seguirá enfocándose en reducir la gran dependencia de la solución en las capacidades y experiencia del constructor, por medio de la automatización de procesos y la mejora en las propiedades de las emulsiones asfálticas.
- iii. Es fundamental para el progreso en la calidad de las aplicaciones de sello de capa de protección que todos los actores que participan del proceso de diseño y construcción tengan un buen conocimiento de las emulsiones, sus propiedades y los comportamientos de éstas frente a distintas condiciones de clima y superficie sobre la cual se aplican. La correcta selección y aplicación de las emulsiones asfálticas es por si solo el factor más determinante en el buen desempeño de un sello de capa protección asfáltica. Es probable que esta tecnología siga evolucionando con rapidez en los años que vienen.
- iv. La tecnología síncrona de sellado con grava (Synchronous Chip Sealing) permite reducir los costos directos de equipos en un 35% y los tiempos de ejecución por kilómetro construido en un 50%, para aplicaciones de Tratamiento Superficial Simple (TSS) y Doble Tratamiento Superficial (DTS).
- v. La tecnología síncrona de sellado con grava contribuye a mejorar la calidad de terminación de sellos de protección asfálticos del tipo Tratamiento Superficial Simple (TSS) y Doble Tratamiento Superficial (DTS), en cuanto a:
 - a. una mayor homogeneidad de la aplicación de grava,
 - b. un mayor control y aprovechamiento de las temperaturas de trabajo en las emulsiones – lo cual permite una mayor adherencia de la grava,
 - c. un menor desperdicio de materias primas,
 - d. y un mejor control de las dosificaciones de emulsión y agregado, por la automatización y sincronía de procesos – lo cual reduce el riesgo de exudación.

- vi. Un impacto positivo no previsto del uso de la tecnología síncrona de sellado con grava es que al ser menos dependiente de la Mano de Obra, reduce el riesgo de calidad final deficiente por mala operación y/o ejecución en terreno. De acuerdo a los estudios internacionales consultados, el factor experiencia del contratista, que incluye la coordinación del equipo que aplica el sello y el conocimiento técnico de los encargados de terreno, es el factor no técnico controlable que más incide en la calidad final lograda para un sello de este tipo.
- vii. El sello tipo Micropavimentación Slurry en espesores de 5 mm a 15 mm mejora significativamente la calidad de terminación y durabilidad de sellos de protección asfálticos del tipo Cape Seal. Si se le compara con las terminaciones de Cape Seal en lechada asfáltica tradicional, de espesores entre los 3 mm y los 8 mm, su durabilidad es al menos un 50% más en tiempo de servicio, para un costo solo un 15%-30% mayor (dependiendo del espesor del micropavimento).
- viii. El sello de capa de protección asfáltica tipo Cape Seal modificado, que combina una primera capa de TSS con emulsión modificada con polímeros, por las mejores propiedades mecánicas que incorporan los polímeros, más una segunda capa de Microaglomerado en Frio Tipo C1 (cuya esp. técnica exige emulsión modificada) en espesor de 10 mm a 15 mm, es la solución que presenta una mejor relación costo-efectividad para los presupuestos actuales de inversión del Programa de Caminos Básicos de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile – medido en términos de costo directo anual equivalente.
- ix. La solución de Cape Seal mencionada en el punto v. anterior, permite aumentar la cobertura en Km. de caminos nuevos en un 50%, respecto de la solución MAC de 5 cm., para un mismo presupuesto de inversión vial. De acuerdo a un estudio del Banco Mundial sobre el impacto de la inversión en caminos de China durante el periodo 1985-2001, cada peso invertido en el aumento de la cobertura en Km de pavimentos básicos en caminos rurales no pavimentados, generó un impacto entre 4 a 6 veces mayor medido en crecimiento económico del PIB agregado. Por lo anterior un 50% más de cobertura en Km pavimentados generará un 200% más de crecimiento económico en el área de influencia del camino.
- x. La simulación de estrategias para el desarrollo de caminos básicos muestra que la alternativa de mayor retorno presente neto es la que considera un primer sello del tipo TSS, seguido de mantenciones preventivas regulares en Micropavimento a partir del segundo año de servicio. Esta alternativa mostro un Valor Presente casi tres veces superior a la segunda estrategia con mejor retorno económico. Resalta el hecho que la necesidad de capital de trabajo para colocar en funcionamiento las alternativas de desarrollo fue

menor al retorno económico para las tres alternativas de sello de capa de protección asfáltico analizadas: TSS, DTS y Cape Seal.

- xi. Si bien los resultados numéricos de retorno marginal empleados en la simulación anterior no tienen mayor respaldo en los datos de la economía chilena, un descubrimiento importante fue constatar que la estrategia de desarrollo más eficiente es muy similar a la política de desarrollo de caminos rurales que se ha empleado por años en Nueva Zelanda: construcción de un primer sello en TSS que se cubre con al segundo año con otra capa de TS (o mezcla slurry). Dado los buenos indicadores de desarrollo económico y social de ese país, se puede concluir que una política de desarrollo vial que ponga el énfasis en el avance en kilómetros de cambio de estándar – de grava a pavimentado – por sobre el tipo de sello, privilegiando las soluciones económicas y que considere una adecuada mantención de éstos sellos, genera mucho mayores beneficios económicos que el cambio a un pavimento más duradero pero mucho más costoso.
- xii. Por lo expresado en el punto anterior el impacto económico de las nuevas tecnologías de aplicaciones de sellos de capa de protección asfáltica – estudiados en este informe – es que contribuyen significativamente a la estandarización de los procesos constructivos involucrados, al control de la ejecución del sello, al mejor empleo de los insumos, a la reducción de los tiempos, y en general a la mejor calidad y mayor duración de los sellos. Específicamente las mejoras introducidas por la tecnología de sellado sincrónico con grava en los sellos tipo TSS, y las mejoras que muestra la tecnología de Micropavimentación en los sellos slurry, amplían la buena relación costo-efectividad de los sellos asfálticos TSS, DTS y Cape Seal, como soluciones de primeros pavimentos en Chile.
- xiii. La cadena de decisiones que define el tipo de sello apropiado para un cambio de estándar en un camino rural, debería considerar:
 - a. Dar prioridad a la construcción de sellos TSS en todas las situaciones de bajo tránsito donde el estándar de servicio de este tipo de capa de protección pueda mantenerse por al menos 2 años.
 - b. Si el tránsito de los caminos, o condiciones particulares de esfuerzos superficiales, hacen no recomendable la construcción de sellos TSS, la prioridad es la aplicación de un sello tipo Cape Seal con Micropavimentos, o un DTS.
 - c. Si por condiciones climáticas se hace poco aconsejable ejecutar el primer sello en Cape Seal con Micropavimento, la alternativa es DTS.

- d. Conservar periódicamente los sellos antes de que cumplan su vida útil de servicio esperada. Antes del deterioro avanzado: al segundo año para los TSS y al sexto año para los DTS y Cape Seal.
 - e. Definir un plan de mantención de los sellos que considere preferentemente el uso de Micropavimento para extender la vida en servicio del sello existente. Su mayor costo lo compensa con creces su duración. Este tipo de sellos se ha utilizado con éxito en Canadá y todos los estados de EE.UU. Siempre habrá un momento del año en el cual se puede aplicar con éxito en las distintas regiones de Chile.
- xiv. Un estudio de Eco-eficiencia presentado por BASF (Takamura K. , 2010), muestra que un sello de Microaglomerado en Frio Tipo C1, consume un 50% menos de energía, demanda un 50% menos de materias primas, y genera un 50% menos de residuos que una aplicación de sello con carpeta de Asfalto MAC en 4 cm.

En cuanto a mejoras en el método constructivo para Tratamientos Superficiales, se concluye que la protección de la base constituye el objetivo central de estos sellos bituminosos, para el logro de mayores vidas en servicio. Se sugiere que la normativa nacional introduzca criterios que permitan favorecer la reducción de los tiempos de ejecución de los sellos de protección de la base granular, dentro de los cuales se identifican como importantes:

- v. Reducir el énfasis en el control durante la ejecución solicitado por la norma, en cuanto a dosis de emulsión y cuantías de grava. Esto facilitaría el empleo del Sellador Sincrónico de Grava, que reduce los tiempos de ejecución, aprovecha la temperatura de la emulsión y sincroniza la distribución de la emulsión con el esparcido de la grava.
- vi. Permitir el empleo de emulsiones modificadas que permitan reemplazar el riego de imprimación por una mayor dosis de emulsión en primera aplicación que compense el residual de asfalto requerido en la superficie de la capa granular inferior. Con esto se reduce el tiempo de ejecución del primer sello, se acelera la protección de la base en su mejor condición estructural, y se evita la incorporación de agua en exceso en el estrato superior de la base.
- vii. Permitir la aplicación de la segunda (y tercera) capa de TS inmediatamente después de terminar la compactación de la capa anterior, sin necesidad de esperar el quiebre y ejecutar un barrido de excedentes cuando los granos libres presentes sean mínimos. Esto acelera la terminación del sello, evitando la exposición innecesaria de las capas intermedias del sello a las condiciones climáticas y al riesgo de suciedad por polvo y otros agentes.

- viii. Aumentar la tolerancia de variación en terreno para las dosis de emulsión y cuantías de grava determinadas en diseño. Este criterio permitiría un rango mayor de ajuste durante la ejecución, reduciendo los riesgos de exudación y corrigiendo los excesos de grava que obligan a un barrido entre aplicaciones de TS. Actualmente se establece un +/- 5% (se sugiere un 10% de tolerancia).

Finalmente, frente a la pregunta de si es más conveniente para el desarrollo económico del país, construir menos kilómetros de caminos rurales pavimentados pero con un alto estándar de tránsito y mayor durabilidad, o bien construir pavimentos simples en caminos rurales, de bajo costo y menor duración, pero que permiten avanzar más kilómetros de cobertura para un determinado presupuesto. La respuesta en este informe es que la prioridad debe ser avanzar en cobertura lo más rápido posible.

La razón de lo anterior es que el impacto económico viene de la transformación del camino rural desde una carpeta de grava – con todos sus inconvenientes para el tránsito y negativos impactos ambientales – a una carpeta pavimentada. Para los usuarios este es el cambio que perciben y explotan diariamente. Es un beneficio que es independiente de si la pavimentación se ejecuta en un alto estándar de carpeta o empleando una capa de protección asfáltica.

La variable económica que aborda el estándar son los costos de mantención. Los cuales impactan en el sostenedor del camino, la Dirección de Vialidad. Sin embargo incluso si se considera la mayor periodicidad de mantención, los sellos de capa de protección logran mejores retornos económicos ya que consideran una significativa reducción en la inversión inicial y emplean las mismas técnicas de pavimentación de bajo costo para mantener su nivel de servicio.

De esta manera los ahorros de tiempo, la mejoras en calidad y la reducción de costos, que las tecnologías de sellado sincrónico con grava, de micropavimentación slurry y de emulsiones modificadas, introducen en los sistemas de sellado con capa de protección asfáltica, finalmente terminaran aumentando el retorno económico de la construcción de nuevos kilómetros de pavimentos en los caminos rurales de Chile.

BIBLIOGRAFIA

- Asphalt Institute. (1998). *Asphalt Surface Treatments - Construction Techniques*. Kentucky: Educational Series N°12.
- Banco Mundial. (2014). *Datos Economicos Banco Mundial*.
- Broughton, B. (2012). *30 Years of Microsurfacing: A review*. San Marcos, TX.
- Caltrans Division of Maintenance. (2009). *MTAG Volume I Flexible Pavement Preservation 2nd Edition*. California.
- DIPRES - Gobierno de Chile. (2009). *Evaluación Programas Gubernamentales - Programa de Caminos Básicos D.V. MOP*. Santiago.
- Dirección de Vialidad - MOP. (2011). *Instructivo para Postulación de Caminos Básicos Intermedios*. Santiago.
- Dirección de Vialidad. (2013). *Manual de Carreteras, Vol. 5*. Santiago.
- Dirección de Vialidad MOP. (2014).
<http://www.vialidad.cl/proyectos/caminosbasicos/Paginas/default.aspx>. Santiago.
- Dirección de Vialidad, MOP. (2010). *Valor Patrimonio de la Red Vial Nacional Año 2009*. Santiago.
- Dirección de Vialidad. (2013). *Manual de Carreteras, Vol. 8*. Santiago.
- DOT Caltrans. (2006). *Standard Specifications, Section 37-2*. California, USA.
- Douglas Gransberg, David M.B. James. (2005). *NCHRP Synthesis 342 - Chip Seal Best Practices. A Synthesis of Highway Practice*. WASHINGTON, D.C.: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP).
- Duval Engineering LLC - Dep. Transp. Washington County OR, USA. (2011). *Chip Seal Performance Review*. Portland, Oregon: Washington County Operations Engineer.

- Gransberg, D. (2008). *Evaluate TxDOT Chip Seal Binder Performance Using Pavement Management Information System and Field Measurement Data, San Antonio District*. Oklahoma, TX: University of Oklahoma.
- Gransberg, D. (2010). *NCHRP Synthesis 411 - Microsurfacing - A Synthesis of Highway Practice*. Ames, Iowa, USA: National Cooperative Highway Research Program.
- Gundersen, B. (2008). *Chipsealing Practice in New Zealand*. New Zealand: Gundersen Consulting Ltd.
- Hanson, F. (1935). *The bituminous surface treatment of rural highways*. NZ Society of Civil Engineers: Annual Conference.
- McLeod, N. (1969). *Basic Principles for the Design and Construction of Seal Coats and Surface Treatments*. St. Paul, Minn.: Association of Asphalt Paving Technologies.
- New Zealand Transport Agency. (2014). *Physical Statistics*. NZ.
- Shenggen Fan (2005). *Road Development, Economic Growth and Poverty Reduction in China*. Washington DC: International Food Policy Research Institute.
- Takamura, K. (2001). *Microsurfacing for preventive maintenance: eco-efficient strategy*. California.
- Takamura, K. (2001-2010). *Microsurfacing: Eco-efficiency Strategy*. Charlotte, NC, USA: BASF Corporation.
- Transit NZ (2005). *Chipsealing in New Zealand*. Auckland.

ANEXO I

EVALUACION ECONOMICA DE ALTERNATIVAS PARA EL DESARROLLO DE CAMINOS RURALES

ESTRATEGIA 1 Desarrollo de Primeras Capas de Protección en TSS más secuencia de aplicaciones de sellos de mantenimiento en Micropavimento a partir del segundo año.

Primer Sello:	Tratamiento Superficial Simple	Sello Mantenimiento:	Micropavimento Slurry
Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 2.585	Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 1.792
Costo Directo Base Estructural Inst.	\$ 3.989		

SUPUESTOS

Km por Pavimentar Año 0	Km	53.227	Igual a los kilómetros No pavimentados al año 2013
Inversión Año 0	M USD\$	150.000	Igual a la inversión en caminos rurales hecha el año 2013.
Varición Anual Presupuesto Programa Caminos Básicos		10%	
Tasa de Reorno Exigida a Inversión Pública		5%	
Tipo Cambio	CH\$/USD\$	\$ 600	

Costo Directo Capas

Primer Sello	\$/m2	\$ 6.574
Mantenimiento	\$/m2	\$ 1.792

Construcción Camino Nuevo en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Construcción	M \$	\$ 43.388
	Sanemiento	M \$	\$ 20.000
	Subtotal 2	M \$	\$ 63.388
30%	GG + UT	M\$	\$ 19.017
	TOTAL NETO	M\$	\$ 82.405
	IVA	M\$	\$ 15.657
	TOTAL	M\$	\$ 98.062

Mantención Preventiva Camino en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Mantención	M \$	\$ 11.827
	Sanemiento	M \$	\$ 2.365
	Subtotal 2	M \$	\$ 14.193
30%	GG + UT	M\$	\$ 4.258
	TOTAL NETO	M\$	\$ 18.450
	IVA	M\$	\$ 3.506
	TOTAL	M\$	\$ 21.956

	AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Km por Pavimentar Inicio		53.227	52.309	51.300	50.395	49.399	48.258	47.003	45.632	44.125	42.670	41.069	39.217	37.180	34.970
Presupuesto Anual	M USD\$	\$ 150.000	165.000	181.500	199.650	219.615	241.577	265.734	292.308	321.538	353.692	389.061	427.968	470.764	517.841
	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 233.436.821	\$ 256.780.504	\$ 282.458.554	\$ 310.704.409

MANTENIMIENTO RED VIAL CAMINOS BASICOS CONSTRUIDOS

Necesidad Total de Mantenimiento	km	-	-	918	1.010	905	996	1.141	1.255	2.288	2.517	2.360	2.596	2.993	3.293
1er Ciclo	Km	0	0	918	1.010	905	996	1.141	1.255	1.370	1.507	1.455	1.601	1.852	2.037
2do Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	918	1.010	905	996	1.141	1.255
3er Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión en Mantenimiento	M \$	\$ -	\$ -	\$ 20.150.968	\$ 22.166.064	\$ 19.870.876	\$ 21.857.964	\$ 25.053.950	\$ 27.559.345	\$ 50.240.066	\$ 55.264.072	\$ 51.817.533	\$ 56.999.286	\$ 65.718.443	\$ 72.290.288
	M USD\$	\$ -	\$ -	\$ 33.585	\$ 36.943	\$ 33.118	\$ 36.430	\$ 41.757	\$ 45.932	\$ 83.733	\$ 92.107	\$ 86.363	\$ 94.999	\$ 109.531	\$ 120.484

INVERSION RED VIAL CAMINOS BASICOS NUEVOS

Saldo Inversión Disponible	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 88.749.032	\$ 97.623.936	\$ 111.898.124	\$ 123.087.936	\$ 134.386.540	\$ 147.825.194	\$ 142.682.927	\$ 156.951.220	\$ 181.619.289	\$ 199.781.218	\$ 216.740.111	\$ 238.414.122
Km Camino Nuevo posible ejec.	Km	918	1.010	905	996	1.141	1.255	1.370	1.507	1.455	1.601	1.852	2.037	2.210	2.431
Km Camino Nuevo construídos	Km	918	1.010	905	996	1.141	1.255	1.370	1.507	1.455	1.601	1.852	2.037	2.210	2.431
Inversión Ejecutada Camino Nuevo	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 88.749.032	\$ 97.623.936	\$ 111.898.124	\$ 123.087.936	\$ 134.386.540	\$ 147.825.194	\$ 142.682.927	\$ 156.951.220	\$ 181.619.289	\$ 199.781.218	\$ 216.740.111	\$ 238.414.122
Camino Nuevo	M USD\$	\$ 150.000	\$ 165.000	\$ 147.915	\$ 162.707	\$ 186.497	\$ 205.147	\$ 223.978	\$ 246.375	\$ 237.805	\$ 261.585	\$ 302.699	\$ 332.969	\$ 361.234	\$ 397.357
Km por Pavimentar Final	Km	52.309	51.300	50.395	49.399	48.258	47.003	45.632	44.125	42.670	41.069	39.217	37.180	34.970	32.538

RETORNOS INVERSION FISCAL CAMINO RURAL

Cam. Nuevo Acumulados 5 años Anterior	Km		918	1.927	2.832	3.828	4.969	5.306	5.667	6.270	6.729	7.189	7.786	8.452	9.155
Retorno Marginal X Km, Fracción anual	M USD\$		89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
Estimación Contribución Anual PIB	M USD\$		81.683	171.535	252.082	340.685	442.243	472.273	504.389	558.006	598.901	639.791	692.914	752.265	814.812

FLUJOS ANUALES

Flujo Neto Anual	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 83.317	-\$ 9.965	\$ 52.432	\$ 121.070	\$ 200.666	\$ 206.539	\$ 212.082	\$ 236.468	\$ 245.209	\$ 250.730	\$ 264.946	\$ 281.501	\$ 296.971
Flujo Neto Acumulado	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 233.317	-\$ 243.282	-\$ 190.850	-\$ 69.780	\$ 130.886	\$ 337.425	\$ 549.507	\$ 785.975	\$ 1.031.184	\$ 1.281.914	\$ 1.546.860	\$ 1.828.361	\$ 2.125.332

RESUMEN RESULTADOS

Valor Total Inversiones	M USD\$	\$ 14.006.105
Camino Nuevo	M USD\$	\$ 8.699.231
VP Inversiones Camino Nuevo	M USD\$	4.267.068
Mantenimiento	M USD\$	\$ 5.306.875
VP Inversiones Mantenimiento	M USD\$	2.111.206
Monto Retornos por Caminos Nuevo	M USD\$	\$ 20.045.642
VP Retornos Camino Nuevo	M USD\$	9.540.720

VP Flujos Netos ESTRATEGIA 1	M USD\$	2.708.126
Tasa Interna de Retorno	%	38,2%
Mínimo Flujo Neto Acumulado	M USD\$	- 243.282
Plazo de Pavimentación	Años	24
Kilómetros Pavimentados Ultimo	Km	123

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
34.970	32.538	30.060	27.540	24.838	21.978	19.008	15.679	12.139	8.472	4.489	123
517.841	569.625	626.587	689.246	758.171	833.988	917.386	1,009.125	1,110.037	1,221.041	1,343.145	1,477.460
\$ 310.704.409	\$ 341.774.850	\$ 375.952.335	\$ 413.547.569	\$ 454.902.326	\$ 500.392.558	\$ 550.431.814	\$ 605.474.995	\$ 666.022.495	\$ 732.624.744	\$ 805.887.219	\$ 886.475.941
3.293	4.498	5.866	6.766	7.949	9.524	10.203	11.766	13.957	15.580	17.204	19.440
2.037	2.210	2.431	2.478	2.520	2.702	2.859	2.971	3.329	3.540	3.667	3.983
1.255	1.370	1.507	1.455	1.601	1.852	2.037	2.210	2.431	2.478	2.520	2.702
0	918	1.927	2.832	3.828	4.969	5.306	5.667	6.270	6.729	7.189	7.786
0	0	0	0	0	0	0	918	1.927	2.832	3.828	4.969
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
\$ 72.290.288	\$ 98.768.099	\$ 128.795.876	\$ 148.543.689	\$ 174.525.437	\$ 209.098.589	\$ 224.015.427	\$ 258.330.849	\$ 306.440.745	\$ 342.069.539	\$ 377.728.769	\$ 426.818.844
\$ 120.484	\$ 164.613	\$ 214.660	\$ 247.573	\$ 290.876	\$ 348.498	\$ 373.359	\$ 430.551	\$ 510.735	\$ 570.116	\$ 629.548	\$ 711.365
\$ 238.414.122	\$ 243.006.751	\$ 247.156.459	\$ 265.003.880	\$ 280.376.889	\$ 291.293.969	\$ 326.416.387	\$ 347.144.147	\$ 359.581.750	\$ 390.555.205	\$ 428.158.450	\$ 459.657.097
2.431	2.478	2.520	2.702	2.859	2.971	3.329	3.540	3.667	3.983	4.366	4.687
2.431	2.478	2.520	2.702	2.859	2.971	3.329	3.540	3.667	3.983	4.366	123
\$ 238.414.122	\$ 243.006.751	\$ 247.156.459	\$ 265.003.880	\$ 280.376.889	\$ 291.293.969	\$ 326.416.387	\$ 347.144.147	\$ 359.581.750	\$ 390.555.205	\$ 428.158.450	\$ 12.084.811
\$ 397.357	\$ 405.011	\$ 411.927	\$ 441.673	\$ 467.295	\$ 485.490	\$ 544.027	\$ 578.574	\$ 599.303	\$ 650.925	\$ 713.597	\$ 20.141
32.538	30.060	27.540	24.838	21.978	19.008	15.679	12.139	8.472	4.489	123	-
9.155	10.131	11.009	11.677	12.342	12.991	13.531	14.381	15.401	16.365	17.489	18.885
89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
814.812	901.696	979.800	1,039.281	1,098.476	1,156.232	1,204.225	1,279.927	1,370.675	1,456.513	1,556.510	1,680.727
\$ 296.971	\$ 332.072	\$ 353.212	\$ 350.035	\$ 340.305	\$ 322.245	\$ 286.839	\$ 270.802	\$ 260.638	\$ 235.472	\$ 213.364	\$ 949.221
\$ 2.125.332	\$ 2.457.404	\$ 2.810.616	\$ 3.160.651	\$ 3.500.956	\$ 3.823.201	\$ 4.110.040	\$ 4.380.842	\$ 4.641.480	\$ 4.876.951	\$ 5.090.316	\$ 6.039.536

ESTRATEGIA 2 Desarrollo de Primeras Capas de Protección en DTS, más secuencia de aplicaciones de sellos de mantenimiento en Micropavimento a partir del sexto año.

Primer Sello:	Doble Tratamiento Superficial	Sello Mantenimiento:	Micropavimento Slurry
Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 3.791	Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 1.792
Costo Directo Base Estructural Inst.	\$ 3.989		

SUPUESTOS

Km por Pavimentar Año 0	Km	53.227	Igual a los kilómetros No pavimentados al año 2013
Inversión Año 0	M USD\$	150.000	Igual a la inversión en caminos rurales hecha el año 2013.
Varición Anual Presupuesto Programa Caminos Básicos		10%	
Tasa de Reorno Exigida a Inversión Pública		5%	
Tipo Cambio	CH\$/USD\$	\$ 600	

Costo Directo Capas

Primer Sello	\$/m2	\$ 7.780
Mantenimiento	\$/m2	\$ 1.792

Construcción Camino Nuevo en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Construcción	M \$	\$ 51.348
	Sanamiento	M \$	\$ 20.000
	Subtotal 2	M \$	\$ 71.348
30%	GG + UT	M \$	\$ 21.404
	TOTAL NETO	M \$	\$ 92.752
	IVA	M \$	\$ 17.623
	TOTAL	M \$	\$ 110.375

Mantenición Preventiva Camino en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Mantenición	M \$	\$ 11.827
	Sanamiento	M \$	\$ 2.365
	Subtotal 2	M \$	\$ 14.193
30%	GG + UT	M \$	\$ 4.258
	TOTAL NETO	M \$	\$ 18.450
	IVA	M \$	\$ 3.506
	TOTAL	M \$	\$ 21.956

	AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Km por Pavimentar Inicio		53.227	52.412	51.515	50.528	49.443	48.249	46.936	45.653	44.405	43.194	42.024	40.899	39.662	38.269
Presupuesto Anual	M USD\$	\$ 150.000	\$ 165.000	\$ 181.500	\$ 199.650	\$ 219.615	\$ 241.577	\$ 265.734	\$ 292.308	\$ 321.538	\$ 353.692	\$ 389.061	\$ 427.968	\$ 470.764	\$ 517.841
	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 233.436.821	\$ 256.780.504	\$ 282.458.554	\$ 310.704.409

MANTENIMIENTO RED VIAL CAMINOS BASICOS CONSTRUIDOS

Necesidad Total de Mantenimiento	km	-	-	-	-	-	-	-	815	1.712	2.699	3.784	4.978	5.476	5.861	6.938
1er Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	815	1.712	2.699	3.784	4.978	5.476	5.861	6.123	6.123
2do Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	815
3er Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión en Mantenimiento	M \$	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 17.902.921	\$ 37.596.134	\$ 59.258.668	\$ 83.087.456	\$ 109.299.122	\$ 120.229.035	\$ 128.690.665	\$ 152.340.106	
	M USD\$	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 29.838	\$ 62.660	\$ 98.764	\$ 138.479	\$ 182.165	\$ 200.382	\$ 214.484	\$ 253.900	

INVERSION RED VIAL CAMINOS BASICOS NUEVOS

Saldo Inversión Disponible	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 161.537.569	\$ 179.788.405	\$ 199.664.325	\$ 221.217.836	\$ 244.137.699	\$ 268.551.469	\$ 294.767.889	\$ 323.364.303
Km Camino Nuevo posible ejec.	Km	815	897	987	1.085	1.194	1.313	1.282	1.248	1.211	1.170	1.125	1.237	1.393	1.435
Km Camino Nuevo construídos	Km	815	897	987	1.085	1.194	1.313	1.282	1.248	1.211	1.170	1.125	1.237	1.393	1.435
Inversión Ejecutada Camino Nuevo	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 161.537.569	\$ 179.788.405	\$ 199.664.325	\$ 221.217.836	\$ 244.137.699	\$ 268.551.469	\$ 294.767.889	\$ 323.364.303
Camino Nuevo	M USD\$	\$ 150.000	\$ 165.000	\$ 181.500	\$ 199.650	\$ 219.615	\$ 241.577	\$ 235.896	\$ 229.647	\$ 222.774	\$ 215.213	\$ 206.896	\$ 227.586	\$ 256.280	\$ 263.941
Km por Pavimentar Final	Km	52.412	51.515	50.528	49.443	48.249	46.936	45.653	44.405	43.194	42.024	40.899	39.662	38.269	36.834

RETORNOS INVERSION FISCAL CAMINO RURAL

Cam. Nuevo Acumulados 5 años Anterior	Km		815	1.712	2.699	3.784	4.978	5.476	5.861	6.123	6.249	6.225	6.036	5.991	6.136
Retorno Marginal X Km, Fracción anual	M USD\$		89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
Estimación Contribución Anual PIB	M USD\$		72.571	152.398	240.209	336.800	443.050	487.355	521.655	544.949	556.136	554.007	537.228	533.208	546.093

FLUJOS ANUALES

Flujo Neto Anual	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 92.429	-\$ 29.102	\$ 40.559	\$ 117.185	\$ 201.474	\$ 221.621	\$ 229.348	\$ 223.411	\$ 202.444	\$ 164.945	\$ 109.261	\$ 62.444	\$ 28.252
Flujo Neto Acumulado	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 242.429	-\$ 271.531	-\$ 230.973	-\$ 113.788	\$ 87.686	\$ 309.307	\$ 538.655	\$ 762.066	\$ 964.510	\$ 1.129.456	\$ 1.238.716	\$ 1.301.160	\$ 1.329.412

RESUMEN RESULTADOS

Valor Total Inversiones	M USD\$	\$ 17.942.141
Camino Nuevo	M USD\$	\$ 9.791.582
VP Inversiones Camino Nuevo	M USD\$	- 4.407.756
Mantenimiento	M USD\$	\$ 8.150.559
VP Inversiones Mantenimiento	M USD\$	- 3.067.023
Monto Retornos por Caminos Nuevo	M USD\$	\$ 18.345.334
VP Retornos	M USD\$	8.352.626

VP Flujos Netos ESTRATEGIA 2	M USD\$	480.103
Tasa Interna de Retorno	%	32,0%
Mínimo Flujo Neto Acumulado	M USD\$	- 271.531
Plazo de Pavimentación	Años	26
Kilómetros Pavimentados Ultimo	Km	3.831

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
38,269	36,834	35,321	33,691	31,897	29,958	27,734	25,178	22,406	19,390	16,072	12,377	8,338	3,831
517,841	569,625	626,587	689,246	758,171	833,988	917,386	1,009,125	1,110,037	1,221,041	1,343,145	1,477,460	1,625,206	1,787,726
\$ 310,704,409	\$ 341,774,850	\$ 375,952,335	\$ 413,547,569	\$ 454,902,326	\$ 500,392,558	\$ 550,431,814	\$ 605,474,995	\$ 666,022,495	\$ 732,624,744	\$ 805,887,219	\$ 886,475,941	\$ 975,123,535	\$ 1,072,635,888
6,938	7,961	8,924	9,821	10,969	11,612	12,221	13,641	15,170	16,689	18,132	20,069	21,755	23,505
6,123	6,249	6,225	6,036	5,991	6,136	6,360	6,703	7,209	7,765	8,311	9,100	10,143	11,284
815	1,712	2,699	3,784	4,978	5,476	5,861	6,123	6,249	6,225	6,036	5,991	6,136	6,360
0	0	0	0	0	0	0	815	1,712	2,699	3,784	4,978	5,476	5,861
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
\$ 152,340,106	\$ 174,793,219	\$ 195,930,369	\$ 215,619,961	\$ 240,839,786	\$ 254,948,359	\$ 268,323,342	\$ 299,502,711	\$ 333,072,397	\$ 366,418,571	\$ 398,102,057	\$ 440,643,931	\$ 477,653,690	\$ 516,082,879
\$ 253,900	\$ 291,322	\$ 326,551	\$ 359,367	\$ 401,400	\$ 424,914	\$ 447,206	\$ 499,171	\$ 555,121	\$ 610,698	\$ 663,503	\$ 734,407	\$ 796,089	\$ 860,138
\$ 158,364,303	\$ 166,981,632	\$ 180,021,966	\$ 197,927,607	\$ 214,062,540	\$ 245,444,199	\$ 282,108,472	\$ 305,972,284	\$ 332,950,098	\$ 366,206,173	\$ 407,785,162	\$ 445,832,010	\$ 497,469,845	\$ 556,553,009
1,435	1,513	1,631	1,793	1,939	2,224	2,556	2,772	3,017	3,318	3,695	4,039	4,507	5,042
1,435	1,513	1,631	1,793	1,939	2,224	2,556	2,772	3,017	3,318	3,695	4,039	4,507	5,042
\$ 158,364,303	\$ 166,981,632	\$ 180,021,966	\$ 197,927,607	\$ 214,062,540	\$ 245,444,199	\$ 282,108,472	\$ 305,972,284	\$ 332,950,098	\$ 366,206,173	\$ 407,785,162	\$ 445,832,010	\$ 497,469,845	\$ 556,553,009
\$ 263,941	\$ 278,303	\$ 300,037	\$ 329,879	\$ 356,771	\$ 409,074	\$ 470,181	\$ 509,954	\$ 554,917	\$ 610,344	\$ 679,642	\$ 743,053	\$ 829,116	\$ 904,738
36,834	35,321	33,691	31,897	29,958	27,734	25,178	22,406	19,390	16,072	12,377	8,338	3,831	-
6,136	6,360	6,703	7,209	7,765	8,311	9,100	10,143	11,284	12,508	13,886	15,357	16,840	18,575
89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
546,093	566,009	596,532	641,594	691,084	739,702	809,918	902,749	1,004,308	1,113,182	1,235,861	1,366,763	1,498,780	1,653,192
\$ 28,252	\$ 3,615	\$ 30,055	\$ 47,652	\$ 67,087	\$ 94,286	\$ 107,468	\$ 106,376	\$ 105,730	\$ 107,859	\$ 107,284	\$ 110,697	\$ 126,426	\$ 88,316
\$ 1,329,412	\$ 1,325,797	\$ 1,295,742	\$ 1,248,090	\$ 1,181,003	\$ 1,086,718	\$ 979,249	\$ 872,873	\$ 767,144	\$ 659,284	\$ 552,000	\$ 441,304	\$ 314,878	\$ 403,194

ESTRATEGIA 3 Desarrollo de Primeras Capas de Protección en Cape Seal con Micropavimento, más secuencia de aplicaciones de sellos de mantenimiento en Micropavimento a partir del séptimo año.

Primer Sello:	Tratamiento Superficial Simple	Sello Mantenimiento:	Micropavimento Slurry
Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 3.849	Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 1.792
Costo Directo Base Estructural Inst.	\$ 3.989		

SUPUESTOS

Km por Pavimentar Año 0	Km	53.227	Igual a los kilómetros No pavimentados al año 2013
Inversión Año 0	M USD\$	150.000	Igual a la inversión en caminos rurales hecha el año 2013.
Varición Anual Presupuesto Programa Caminos Básicos		10%	
Tasa de Reorno Exigida a Inversión Pública		5%	
Tipo Cambio	CH\$/USD\$	\$ 600	

Costo Directo Capas

Primer Sello	\$/m2	\$ 7.838
Mantenimiento	\$/m2	\$ 1.792

Construcción Camino Nuevo en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Construcción	M \$	\$ 51.731
	Sanamiento	M \$	\$ 20.000
	Subtotal 2	M \$	\$ 71.731
30%	GG + UT	M \$	\$ 21.519
	TOTAL NETO	M \$	\$ 93.250
	IVA	M \$	\$ 17.718
	TOTAL	M \$	\$ 110.968

Mantenición Preventiva Camino en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Mantenición	M \$	\$ 11.827
	Sanamiento	M \$	\$ 2.365
	Subtotal 2	M \$	\$ 14.193
30%	GG + UT	M \$	\$ 4.258
	TOTAL NETO	M \$	\$ 18.450
	IVA	M \$	\$ 3.506
	TOTAL	M \$	\$ 21.956

	AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Km por Pavimentar Inicio		53.227	52.416	51.524	50.542	49.463	48.275	46.969	45.532	44.112	42.711	41.330	39.971	38.636	37.169
Presupuesto Anual	M USD\$	\$ 150.000	\$ 165.000	\$ 181.500	\$ 199.650	\$ 219.615	\$ 241.577	\$ 265.734	\$ 292.308	\$ 321.538	\$ 353.692	\$ 389.061	\$ 427.968	\$ 470.764	\$ 517.841
	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 233.436.821	\$ 256.780.504	\$ 282.458.554	\$ 310.704.409

MANTENIMIENTO RED VIAL CAMINOS BASICOS CONSTRUIDOS

Necesidad Total de Mantenimiento	km	-	-	-	-	-	-	-	-	811	1.703	2.685	3.764	4.952	5.447	5.991
1er Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	811	1.703	2.685	3.764	4.952	5.447	5.991
2do Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3er Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión en Mantenimiento	M \$	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 17.807.380	\$ 37.395.498	\$ 58.942.427	\$ 82.644.050	\$ 108.715.835	\$ 119.587.418	\$ 131.546.160
	M USD\$	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 29.679	\$ 62.326	\$ 98.237	\$ 137.740	\$ 181.193	\$ 199.312	\$ 219.244

INVERSION RED VIAL CAMINOS BASICOS NUEVOS

Saldo Inversión Disponible	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 233.436.821	\$ 256.780.504	\$ 282.458.554	\$ 310.704.409
Km Camino Nuevo posible ejec.	Km	811	892	981	1.080	1.187	1.306	1.437	1.420	1.402	1.381	1.359	1.334	1.468	1.615
Km Camino Nuevo construídos	Km	811	892	981	1.080	1.187	1.306	1.437	1.420	1.402	1.381	1.359	1.334	1.468	1.615
Inversión Ejecutada Camino Nuevo	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 233.436.821	\$ 256.780.504	\$ 282.458.554	\$ 310.704.409
Camino Nuevo	M USD\$	\$ 150.000	\$ 165.000	\$ 181.500	\$ 199.650	\$ 219.615	\$ 241.577	\$ 265.734	\$ 292.308	\$ 321.538	\$ 353.692	\$ 389.061	\$ 427.968	\$ 470.764	\$ 517.841
Km por Pavimentar Final	Km	52.416	51.524	50.542	49.463	48.275	46.969	45.532	44.112	42.711	41.330	39.971	38.636	37.169	35.554

RETORNOS INVERSION FISCAL CAMINO RURAL

Cam. Nuevo Acumulados 5 años Anterior	Km		811	1.703	2.685	3.764	4.952	5.447	5.991	6.430	6.752	6.946	6.999	6.896	6.944
Retorno Marginal X Km, Fracción anual	M USD\$		89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
Estimación Contribución Anual PIB	M USD\$		72.183	151.585	238.927	335.003	440.686	484.755	533.230	572.271	600.934	618.181	622.870	613.746	617.992

FLUJOS ANUALES

Flujo Neto Anual	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 92.817	-\$ 29.915	\$ 39.277	\$ 115.388	\$ 199.110	\$ 219.021	\$ 240.923	\$ 250.733	\$ 247.242	\$ 229.119	\$ 194.903	\$ 142.982	\$ 100.151
Flujo Neto Acumulado	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 242.817	-\$ 272.732	-\$ 233.455	-\$ 118.068	\$ 81.042	\$ 300.062	\$ 540.985	\$ 791.718	\$ 1.038.959	\$ 1.268.078	\$ 1.462.981	\$ 1.605.963	\$ 1.706.114

RESUMEN RESULTADOS

Valor Total Inversiones	M USD\$	\$ 17.561.254
Camino Nuevo	M USD\$	\$ 9.844.116
VP Inversiones Camino Nuevo	M USD\$	\$ 4.522.564
Mantenimiento	M USD\$	\$ 7.717.138
VP Inversiones Mantenimiento	M USD\$	\$ 2.850.195
Monto Retornos por Caminos Nuevo	M USD\$	\$ 19.121.737
VP Retornos	M USD\$	\$ 8.740.421

VP Flujos Netos ESTRATEGIA 2	M USD\$	951.451
Tasa Interna de Retorno	%	33,9%
Mínimo Flujo Neto Acumulado	M USD\$	- 272.732
Plazo de Pavimentación	Años	26
Kilómetros Pavimentados Ultimo	Km	1.936

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
37,169	35,554	33,907	32,192	30,371	28,401	26,236	23,727	20,872	17,771	14,381	10,660	6,536	1,936
517,841	569,625	626,587	689,246	758,171	833,988	917,386	1,009,125	1,110,037	1,221,041	1,343,145	1,477,460	1,625,206	1,787,726
\$ 310,704,409	\$ 341,774,850	\$ 375,952,335	\$ 413,547,569	\$ 454,902,326	\$ 500,392,558	\$ 550,431,814	\$ 605,474,995	\$ 666,022,495	\$ 732,624,744	\$ 805,887,219	\$ 886,475,941	\$ 975,123,535	\$ 1,072,635,888
5,991	7,241	8,455	9,630	10,763	11,848	12,390	13,148	14,664	16,234	17,896	19,531	21,166	22,571
5,991	6,430	6,752	6,946	6,999	6,896	6,944	7,157	7,423	7,779	8,266	8,768	9,319	10,180
0	811	1,703	2,685	3,764	4,952	5,447	5,991	6,430	6,752	6,946	6,999	6,896	6,944
0	0	0	0	0	0	0	0	811	1,703	2,685	3,764	4,952	5,447
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
\$ 131,546,160	\$ 158,984,791	\$ 185,643,922	\$ 211,445,601	\$ 236,304,085	\$ 260,125,052	\$ 272,044,101	\$ 288,678,418	\$ 321,957,315	\$ 356,435,002	\$ 392,928,489	\$ 428,813,125	\$ 464,725,156	\$ 495,559,135
\$ 219,244	\$ 264,975	\$ 309,407	\$ 352,409	\$ 393,840	\$ 433,542	\$ 453,407	\$ 481,131	\$ 536,596	\$ 594,058	\$ 654,881	\$ 714,689	\$ 774,542	\$ 825,932
\$ 179,158,250	\$ 182,790,059	\$ 190,308,413	\$ 202,101,967	\$ 218,598,241	\$ 240,267,506	\$ 278,387,713	\$ 316,796,577	\$ 344,065,180	\$ 376,189,743	\$ 412,958,730	\$ 457,662,816	\$ 510,398,379	\$ 577,076,754
1,615	1,647	1,715	1,821	1,970	2,165	2,509	2,855	3,101	3,390	3,721	4,124	4,600	5,200
1,615	1,647	1,715	1,821	1,970	2,165	2,509	2,855	3,101	3,390	3,721	4,124	4,600	1,936
\$ 179,158,250	\$ 182,790,059	\$ 190,308,413	\$ 202,101,967	\$ 218,598,241	\$ 240,267,506	\$ 278,387,713	\$ 316,796,577	\$ 344,065,180	\$ 376,189,743	\$ 412,958,730	\$ 457,662,816	\$ 510,398,379	\$ 214,834,595
\$ 298,597	\$ 304,650	\$ 317,181	\$ 336,837	\$ 364,330	\$ 400,446	\$ 463,980	\$ 527,994	\$ 573,442	\$ 626,983	\$ 688,265	\$ 762,771	\$ 850,664	\$ 358,058
35,554	33,907	32,192	30,371	28,401	26,236	23,727	20,872	17,771	14,381	10,660	6,536	1,936	-
6,944	7,157	7,423	7,779	8,266	8,768	9,319	10,180	11,320	12,599	14,019	15,576	17,191	18,936
89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
617,992	636,945	660,619	692,312	735,652	780,347	829,359	906,031	1,007,479	1,121,339	1,247,733	1,386,238	1,530,023	1,685,299
\$ 100,151	\$ 67,320	\$ 34,032	\$ 3,066	-\$ 22,519	-\$ 53,641	-\$ 88,028	-\$ 103,094	-\$ 102,558	-\$ 99,702	-\$ 95,412	-\$ 91,222	-\$ 95,183	\$ 501,309
\$ 1,706,114	\$ 1,773,435	\$ 1,807,466	\$ 1,810,532	\$ 1,788,013	\$ 1,734,372	\$ 1,646,344	\$ 1,543,251	\$ 1,440,693	\$ 1,340,991	\$ 1,245,578	\$ 1,154,356	\$ 1,059,174	\$ 1,560,483

ESTRATEGIA 4 Desarrollo de Primeras Capas de Protección en MAC - 5 cm, más secuencia de aplicaciones de sellos de mantenimiento en Micropavimento a partir del decimo año.

Primer Sello:	Tratamiento Superficial Simple	Sello Mantenimiento:	Micropavimento Slurry
Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 8.318	Costo Directo Sello	\$/m2 \$ 1.792
Costo Directo Base Estructural Inst.	\$ 3.612		

SUPUESTOS

Km por Pavimentar Año 0	Km	53.227	Igual a los kilómetros No pavimentados al año 2013
Inversión Año 0	M USD\$	150.000	Igual a la inversión en caminos rurales hecha el año 2013.
Varición Anual Presupuesto Programa Caminos Básicos		10%	
Tasa de Reorno Exigida a Inversión Pública		5%	
Tipo Cambio	CH\$/USD\$	\$ 600	

Costo Directo Capas

Primer Sello	\$/m2	\$ 11.930
Mantenimiento	\$/m2	\$ 1.792

Construcción Camino Nuevo en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Construcción	M \$	\$ 78.738
	Sanamiento	M \$	\$ 20.000
	Subtotal 2	M \$	\$ 98.738
30%	GG + UT	M \$	\$ 29.621
	TOTAL NETO	M \$	\$ 128.359
	IVA	M \$	\$ 24.388
	TOTAL	M \$	\$ 152.748

Mantenición Preventiva Camino en 6,6 m			
	Superficie	m2/Km	6.600
Costo	Mantenición	M \$	\$ 11.827
	Sanamiento	M \$	\$ 2.365
	Subtotal 2	M \$	\$ 14.193
30%	GG + UT	M \$	\$ 4.258
	TOTAL NETO	M \$	\$ 18.450
	IVA	M \$	\$ 3.506
	TOTAL	M \$	\$ 21.956

AÑO		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Km por Pavimentar	Inicio	53.227	52.638	51.990	51.277	50.492	49.630	48.681	47.637	46.489	45.226	43.837	42.393	40.890	39.321
Presupuesto Anual	M USD\$	\$ 150.000	\$ 165.000	\$ 181.500	\$ 199.650	\$ 219.615	\$ 241.577	\$ 265.734	\$ 292.308	\$ 321.538	\$ 353.692	\$ 389.061	\$ 427.968	\$ 470.764	\$ 517.841
	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 233.436.821	\$ 256.780.504	\$ 282.458.554	\$ 310.704.409

MANTENIMIENTO RED VIAL CAMINOS BASICOS CONSTRUIDOS

Necesidad Total de Mantenimiento	km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	589	1.237	1.950	2.735
1er Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	589	1.237	1.950	2.735
2do Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3er Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6to Ciclo	Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión en Mantenimiento	M \$	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 12.936.636	\$ 27.166.936	\$ 42.820.266	\$ 60.038.929
	M USD\$	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 21.561	\$ 45.278	\$ 71.367	\$ 100.065

INVERSION RED VIAL CAMINOS BASICOS NUEVOS

Saldo Inversión Disponible	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 220.500.185	\$ 229.613.567	\$ 239.638.288	\$ 250.665.480	
Km Camino Nuevo posible ejec.	Km	589	648	713	784	863	949	1.044	1.148	1.263	1.389	1.444	1.503	1.569	1.641	
Km Camino Nuevo construídos	Km	589	648	713	784	863	949	1.044	1.148	1.263	1.389	1.444	1.503	1.569	1.641	
Inversión Ejecutada	Camino Nuevo	M \$	\$ 90.000.000	\$ 99.000.000	\$ 108.900.000	\$ 119.790.000	\$ 131.769.000	\$ 144.945.900	\$ 159.440.490	\$ 175.384.539	\$ 192.922.993	\$ 212.215.292	\$ 220.500.185	\$ 229.613.567	\$ 239.638.288	\$ 250.665.480
	Camino Nuevo	M USD\$	\$ 150.000	\$ 165.000	\$ 181.500	\$ 199.650	\$ 219.615	\$ 241.577	\$ 265.734	\$ 292.308	\$ 321.538	\$ 353.692	\$ 367.500	\$ 382.689	\$ 399.397	\$ 417.776
Km por Pavimentar	Final	Km	52.638	51.990	51.277	50.492	49.630	48.681	47.637	46.489	45.226	43.837	42.393	40.890	39.321	37.680

RETORNOS INVERSION FISCAL CAMINO RURAL

Cam. Nuevo Acumulados 5 años Anterior	Km	589	1.237	1.950	2.735	3.597	3.957	4.353	4.788	5.267	5.793	6.288	6.747	7.168
Retorno Marginal X Km, Fracción anual	M USD\$	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
Estimación Contribución Anual PIB	M USD\$	52.439	110.123	173.574	243.371	320.148	352.163	387.379	426.117	468.729	515.601	559.624	600.511	637.949

FLUJOS ANUALES

Flujo Neto Anual	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 112.561	-\$ 71.377	-\$ 26.076	\$ 23.756	\$ 78.571	\$ 86.429	\$ 95.071	\$ 104.579	\$ 115.036	\$ 126.540	\$ 131.656	\$ 129.747	\$ 120.108
Flujo Neto Acumulado	M USD\$	-\$ 150.000	-\$ 262.561	-\$ 333.938	-\$ 360.013	-\$ 336.257	-\$ 257.686	-\$ 171.257	-\$ 76.186	\$ 28.393	\$ 143.429	\$ 269.969	\$ 401.626	\$ 531.372	\$ 651.481

RESUMEN RESULTADOS

Valor Total Inversiones	M USD\$	\$ 18.130.714
Camino Nuevo	M USD\$	\$ 13.550.502
VP Inversiones Camino Nuevo	M USD\$	\$ 5.942.717
Mantenimiento	M USD\$	\$ 4.580.212
VP Inversiones Mantenimiento	M USD\$	\$ 1.582.571
Monto Retornos por Caminos Nuevo	M USD\$	\$ 18.212.022
VP Retornos	M USD\$	\$ 8.072.059

VP Flujos Netos ESTRATEGIA 2	M USD\$	162.387
Tasa Interna de Retorno	%	14,1%
Mínimo Flujo Neto Acumulado	M USD\$	- 360.013
Plazo de Pavimentación	Años	26
Kilómetros Pavimentados Ultimo	Km	4.495

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
39.321	37.680	35.959	34.067	31.985	29.780	27.439	24.948	22.281	19.408	16.211	12.645	8.747	4.495
517.841	569.625	626.587	689.246	758.171	833.988	917.386	1,009.125	1,110.037	1,221.041	1,343.145	1,477.460	1,625.206	1,787.726
\$ 310,704.409	\$ 341,774.850	\$ 375,952.335	\$ 413,547.569	\$ 454,902.326	\$ 500,392.558	\$ 550,431.814	\$ 605,474.995	\$ 666,022.495	\$ 732,624.744	\$ 805,887.219	\$ 886,475.941	\$ 975,123.535	\$ 1,072,635.888
2.735	3.597	3.957	4.353	5.377	6.504	7.744	9.022	10.344	11.125	11.899	13.254	14.830	16.648
2.735	3.597	3.957	4.353	4.788	5.267	5.793	6.288	6.747	7.168	7.546	7.877	8.326	8.905
0	0	0	0	589	1,237	1,950	2,735	3,597	3,957	4,353	4,788	5,267	5,793
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	589	1,237	1,950
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
\$ 60,038.929	\$ 78,979.459	\$ 86,877.404	\$ 95,565.145	\$ 118,058.296	\$ 142,800.762	\$ 170,017.474	\$ 198,096.341	\$ 227,123.576	\$ 244,257.382	\$ 261,245.051	\$ 291,008.606	\$ 325,608.033	\$ 365,526.921
\$ 100.065	\$ 131.632	\$ 144.796	\$ 159.275	\$ 196.764	\$ 238.001	\$ 283.362	\$ 330.161	\$ 378.539	\$ 407.096	\$ 435.408	\$ 485.014	\$ 542.680	\$ 609.212
\$ 250,665.480	\$ 262,795.392	\$ 289,074.931	\$ 317,982.424	\$ 336,844.030	\$ 357,591.797	\$ 380,414.340	\$ 407,378.655	\$ 438,898.919	\$ 488,367.363	\$ 544,642.168	\$ 595,467.335	\$ 649,515.502	\$ 707,108.968
1.641	1.720	1.892	2.082	2.205	2.341	2.490	2.667	2.873	3.197	3.566	3.898	4.252	4.629
1.641	1.720	1.892	2.082	2.205	2.341	2.490	2.667	2.873	3.197	3.566	3.898	4.252	4.495
\$ 250,665.480	\$ 262,795.392	\$ 289,074.931	\$ 317,982.424	\$ 336,844.030	\$ 357,591.797	\$ 380,414.340	\$ 407,378.655	\$ 438,898.919	\$ 488,367.363	\$ 544,642.168	\$ 595,467.335	\$ 649,515.502	\$ 686,542.495
\$ 417.776	\$ 437.992	\$ 481.792	\$ 529.971	\$ 561.407	\$ 595.986	\$ 634.024	\$ 678.964	\$ 731.498	\$ 813.946	\$ 907.737	\$ 992.446	\$ 1,082.526	\$ 1,144.237
37.680	35.959	34.067	31.985	29.780	27.439	24.948	22.281	19.408	16.211	12.645	8.747	4.495	-
7.168	7.546	7.877	8.326	8.905	9.541	10.241	11.011	11.786	12.577	13.569	14.794	16.202	17.787
89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
637.949	671.593	701.064	741.020	792.509	849.147	911.449	979.981	1,048.911	1,119.365	1,207.651	1,316.638	1,441.941	1,583.024
\$ 120.108	\$ 101.969	\$ 74.477	\$ 51.774	\$ 34.339	\$ 15.159	-\$ 5.938	-\$ 29.144	-\$ 61.126	-\$ 101.677	-\$ 135.494	-\$ 160.822	-\$ 183.265	-\$ 170.425
\$ 651.481	\$ 753.449	\$ 827.926	\$ 879.700	\$ 914.039	\$ 929.198	\$ 923.261	\$ 894.116	\$ 832.990	\$ 731.314	\$ 595.820	\$ 434.998	\$ 251.733	\$ 81.309

