

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO.  
FACULTAD DE INGENIERÍA.  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL.**



Utilización de Escoria de Cobre como Agregado  
Pétreo para Solución de Caminos Básicos de la Región  
de Valparaíso.

Por  
Carlos Andrés Pardo Vera.

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en  
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Prof. Guía Sr. Guillermo Brante Lara

Enero, 2018

*Siempre sueña y apunta más alto de lo que sabes que puedes lograr.*

*William Faulkner.*

*Dedicado a mi Familia y todos quienes fueron partícipes de este proceso.*

## *Agradecimientos.*

*Agradezco a mis Padres por haberme brindado la oportunidad de estudiar junto con todo el sacrificio, paciencia, amor y apoyo entregado durante este largo proceso.*

*A mi hermano Camilo, que ha vivido a mi lado por tantos años, eres el que me ha estimulado y apoyado en toda esta etapa.*

*A mi pareja Nadia, por todos los años entregados, paciencia, aliento y apoyo en todo momento. Feliz de compartir esto contigo.*

*A aquellos amigos de colegio, universidad y de la vida que hasta el día de hoy comparten mi alegría y felicidad.*

*A mi profesor guía, por su apoyo, respaldo, paciencia, motivación y por sobre todo su disposición mostrada a lo largo de este proceso.*

*A todos los profesores que contribuyeron en mi formación como ingeniero civil y que hoy en día fomentan el prestigio, calidad y categoría a esta hermosa carrera de la cual me siento orgulloso de representar.*

# ÍNDICE

Capítulo I .....	16
1.1 Planteamiento del problema .....	16
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo general. ....	18
1.2.2 Objetivos específicos. ....	18
1.3 Alcances.....	19
1.4 Metodología.....	20
1.4.1 Utilización de agregados pétreos.....	20
1.4.2 Procedimiento para ensayos.....	20
1.4.3 Análisis de resultados .....	21
2 Capítulo II.....	25
Antecedentes y Marco teórico.....	25
2.1 Mejoramiento de carpetas de rodadura.....	25
2.1.1 Impacto para un país en el mejoramiento de caminos rurales. ....	25
2.2 CODELCO, División Ventanas. ....	27
2.2.1 Escoria de Cobre.....	28
2.2.2 Propiedades de la escoria de cobre .....	30
2.2.3 Usos Alternativos de la escoria de cobre. ....	31
2.3 Tipos de carpetas de rodadura en capas de protección.....	33
2.3.1 Tratamientos superficiales. ....	33
2.3.2 Funciones. ....	34
2.3.3 Tratamiento Superficial Simple.....	34
2.3.4 Riego de Imprimación. ....	36
2.3.5 Lechada Asfáltica o Slurry Seals.....	37
2.3.6 Sello Cape Seal.....	38
2.3.7 Emulsiones en Capas de protección. ....	39
2.4 Fallas en Caminos Básicos. ....	40
3 Capítulo III.....	42

Actualidad de la infraestructura vial en Chile.....	42
3.1 Programa caminos básicos en Chile.....	42
3.2 Tipos de capas de protección desarrollados por programa de solución de caminos básicos.....	43
3.2.1 Caminos con aplicación de un estabilizador de suelo .....	43
3.2.2 Caminos con aplicación de una capa asfáltica delgada (capa de protección) 44	
3.3 Evolución del programa de caminos básicos.....	46
4 Capítulo IV .....	49
Requisitos y normativa de ensayos para el diseño de capas de protección.....	49
4.1 Tratamientos Superficiales.....	49
4.1.1 Áridos en Tratamientos Superficiales.....	49
4.1.2 Emulsiones para TSS.....	50
4.1.3 Método de diseño para TS.....	50
4.2 Lechada asfáltica.....	55
4.2.1 Áridos en lechada asfáltica.....	55
4.2.2 Emulsiones para Lechada Asfáltica.....	56
4.2.3 Agua para Lechada Asfáltica.....	56
4.2.4 Método de diseño para Lechada Asfáltica.....	57
4.3 Sello Cape Seal. Sección 5.404.....	64
5 Capítulo V.....	65
Cálculo de dosificaciones para tramos de prueba de TSS a desarrollar en programa de caminos básicos en la región de Valparaíso.....	65
5.1 Dosificaciones con áridos tradicionales en TSS.....	65
5.1.1 Granulometría de áridos tradicionales para TSS.....	65
5.1.2 Requisitos de agregados pétreos de áridos tradicionales para TSS.....	68
5.1.3 Dosificación de áridos tradicionales para TSS.....	69
5.2 Dosificaciones de la escoria de cobre para TSS.....	73
5.2.1 Granulometría de la escoria de cobre para TSS.....	73
5.2.2 Requisitos de agregados pétreos de la escoria de cobre para TSS.....	74
5.2.3 Dosificaciones de la escoria de cobre para TSS.....	78

5.3	Análisis de las dosificaciones para TSS. ....	82
6	Capítulo VI .....	83
	Cálculo de dosificaciones para tramos de prueba de lechada asfáltica a desarrollar en programa de caminos básicos en la región de Valparaíso. ....	83
6.1	Dosificaciones del polvo de roca para lechadas asfálticas. ....	83
6.1.1	Granulometría del polvo de roca para lechada asfáltica. ....	83
6.1.2	Requisitos de agregados pétreos del polvo de roca para lechada asfáltica	84
6.1.3	Dosificaciones de la lechada asfáltica utilizando polvo de roca. ....	85
	Confección de mezcla para lechada asfáltica. ....	86
6.1.4	Granulometría de la escoria de cobre para lechada asfáltica. ....	90
6.1.5	Requisitos de agregados pétreos escoria de cobre para lechada asfáltica. .	91
6.1.6	Dosificación de la lechada asfáltica utilizando escoria de cobre. ....	92
6.1.7	Análisis de las dosificaciones para la lechada asfáltica. ....	97
7	Capítulo VII .....	103
	Validación de las dosificaciones mediante un prototipo a baja escala. ....	103
7.1	Evaluación de la dosificación del agregado utilizando escoria de cobre. ....	103
7.2	Evaluación de la dosificación de la emulsión. ....	104
7.2.1	Generalidades. ....	104
7.2.2	Aparatos y materiales utilizados. ....	104
7.2.3	Procedimiento de ensaye. ....	105
7.3	Aplicación del ensayo de rueda cargada como simulación de tránsito de baja escala. 111	
7.3.1	Condiciones de exigencia para la validación del modelo. ....	111
7.3.2	Ensayo de validación para el uso de escoria de cobre en capas de protección. 112	
	Conclusiones. ....	116
	Recomendaciones. ....	118
	Bibliografía .....	120
	ANEXOS. ....	123

- I. Ensayos de agregados pétreos para áridos tradicionales y la escoria de cobre.  
124

ANEXO DE FIGURAS..... 131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 "Metodología de trabajo" .....	22
Figura 1.2 "Metodología de trabajo" .....	23
Figura 1.3 "Metodología de trabajo" .....	24
Figura 2.1 "CODELCO División Ventanas" .....	27
Figura 2.2 "Sector de acopio de escoria de cobre, CODELCO División Ventana" .....	28
Figura 2.3 "Producción de escoria en miles de toneladas (Fuente: CODELCO reporte de sustentabilidad)." .....	29
Figura 2.4 "Producción acumulada de escoria de cobre (Fuente: CODELCO reporte de sustentabilidad)" .....	29
Figura 2.5 "Tipos de escoria de cobre" .....	30
Figura 2.6 "Tipos de escoria según grado de enfriamiento (Expandida – Granallada – Botadero)" .....	31
Figura 2.7 "Tratamiento Superficial Simple TSS, (Fuente: Elaboración propia)" .....	33
Figura 2.8 "Tratamiento Superficiales doble o múltiple (Fuente: Elaboración propia)" .....	33
Figura 2.9 "Teoría de aplicación agregado pétreo –emulsión" .....	34
Figura 2.10" Teoría de aplicación base – imprimante – ligante – agregado pétreo" .....	36
Figura 2.11 " Teoría de aplicación para lechada asfáltica" .....	37
Figura 2.12 "Teoría de aplicación para carpeta del tipo cape seal" .....	38
Figura 2.13." Desprendimiento del agregado" .....	40
Figura 2.14 "Exudación en carpeta asfáltica delgada" .....	41
Figura 3.1 "Solución de Caminos básico tipo ripio Norte y Sur de Chile" .....	45
Figura 3.2"Solución de camino tipo bichofita y capa asfáltica delgada" .....	45
Figura 3.3 "Km acumulado de caminos básicos periodo 2003 – 2015, .....	48

Figura 4.1 “Teoría de acomodamiento de partículas árido – emulsión” .....	51
Figura 4.2 “Placa de escurrimiento para ensaye de consistencia de lechadas asfálticas (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)” .....	60
Figura 4.3” AMH en función del porcentaje de emulsión para un contenido de agua total constante (Fuente: Curso laboratorista MOP.)” .....	61
Figura 4.4” Arena adherida en función del porcentaje de emulsión para un contenido de agua total constante (Fuente: Curso laboratorista MOP.)” .....	63
Figura 4.5 ”Determinación del contenido óptimo de asfalto (Fuente: Curso laboratorista MOP.).....	64
Figura 5.1 ”Granulometría río Aconcagua” .....	67
Figura 5.2 ”Granulometría estero la Patagua” .....	67
Figura 5.3 “Condición de la escoria de cobre en el patio de acopio CODELCO Ventanas” .....	73
Figura 6.1 “Granulometría del polvo de roca para Lechada Asfáltica” .....	84
Figura 6.2 “Rango 2-3 adecuada para la elección del agua de premezclado utilizando polvo de roca” .....	86
Figura 6.3 “Abrasión en medio húmedo utilizando polvo de roca” .....	88
Figura 6.4 “Arena adherida utilizando polvo de roca” .....	89
Figura 6.5 “Intersección de curvas para determinación del contenido óptimo de emulsión” .....	89
Figura 6.6 Rango 2-3 adecuada para la elección del agua de premezclado utilizando escoria de cobre” .....	93
Figura 6.7 “Abrasión en medio húmedo para la escoria de cobre” .....	95
Figura 6.8 “Arena adherida utilizando escoria de cobre” .....	96
Figura 6.9 “Intersección de curvas para determinación del contenido óptimo de emulsión” .....	96
Figura 6.10 “Contenido óptimo de emulsión para árido tradicional y escoria de cobre” .....	99
Figura 6.11 “Arena adherida para rueda cargada del árido tradicional y escoria de cobre” .....	100

Figura 6.12 “Abrasión en medio húmedo para el árido tradicional y la escoria de cobre”	101
Figura 7.1 “Dosificación del agregado homogeneizado utilizando escoria de cobre reproducida”	103
Figura 7.2 “Molde utilizados para ensayo modificado”	105
Figura 7.3 “Moldes con base granular estabilizada, compactada para TSS y Cape Seal”	107
Figura 7.4 “Probetas de base estabilizada compactada, sobre ésta la emulsión imprimante”	107
Figura 7.5 “TSS, reproducido (A) río Aconcagua y (B) estero la Patagua, utilizando escoria de cobre”	108
Figura 7.6 “Cape seal (C) y (D) (TSS en escoria de cobre(A)y(B) y lechada asfáltica utilizando polvo de roca)	109
Figura 7.7 “Cape seal (TSS y lechada asfáltica ambos reproducidos con escoria de cobre)”	110
Figura 7.8 “Ensayo de validación del uso de escoria de cobre”	112
Figura 7.9 “Probetas post- ensayo de validación”	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 “Cantidad de obra total periodo 1994 – 2003”	46
Tabla 4.1 “Requisitos de agregados pétreos para TSS (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)”	49
Tabla 4.2 “Bandas granulométricas para TS (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)”	50
Tabla 4.3 “Valores factor de desperdicio E (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)”	52
Tabla 4.4 “Factores de tránsito T (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)”	54

Tabla 4.5 "Corrección por textura superficial (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8)"	54
Tabla 4.6 "Requisitos de los áridos para lechada asfáltica (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)"	55
Tabla 4.7 "Bandas granulométricas para lechada asfáltica (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)"	56
Tabla 4.8 "Cantidad máxima de arena adherida (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8)"	62
Tabla 5.1 "Granulometría para árido del río Aconcagua"	66
Tabla 5.2 "Granulometría para árido de estero La Patagua"	66
Tabla 5.3 "Requisitos de agregados pétreos para el árido proveniente del río Aconcagua"	68
Tabla 5.4 "Requisitos de agregados pétreos para el árido proveniente del estero La Patagua"	68
Tabla 5.5 "Factores utilizados para el diseño del agregado"	69
Tabla 5.6 "Factores utilizados para el diseño del asfalto"	71
Tabla 5.7 "Factores utilizados para el diseño del agregado"	71
Tabla 5.8 "Factores utilizados para el diseño del asfalto"	73
Tabla 5.9 "Verificación de banda granulométrica para el uso de escoria de cobre en TSS"	74
Tabla 5.10 "Resultados de ensayos para Agregados pétreos según granulometría del Río Aconcagua"	75
Tabla 5.11 "Resultados de ensayos de agregados pétreos según granulometría de Estero La Patagua"	75
Tabla 5.12 "Factores utilizados para el diseño del agregado"	78
Tabla 5.13 "Factores utilizados para el diseño del agregado"	79
Tabla 5.14 "Factores utilizados para el diseño del agregado"	80
Tabla 5.15 Factores utilizados para el diseño del asfalto"	81
Tabla 5.16 "Dosificaciones de agregado pétreo y contenido de asfalto para TSS utilizando árido tradicional y escoria de cobre"	82
Tabla 6.1 "Granulometría del polvo de roca para lechada asfáltica"	83

Tabla 6.2 "Requisitos de agregados pétreos para el polvo de roca" .....	84
Tabla 6.3 "Agua de premezclado para la mezcla utilizando polvo de roca" .....	86
Tabla 6.4 "Cantidad de agua utilizada para la construcción de probetas" .....	87
Tabla 6.5 "Abrasión en medio húmedo para lechada asfáltica utilizando el polvo de roca" .....	87
Tabla 6.6 "Arena adherida para lechada asfáltica utilizando polvo de roca" .....	88
Tabla 6.7 "Granulometría de la escoria de cobre para Lechada Asfáltica" .....	90
Tabla 6.8 "Resultados de ensayos de agregados pétreos según granulometría para lechada asfáltica" .....	91
Tabla 6.9 "Agua de premezclado para la mezcla utilizando escoria de cobre" .....	93
Tabla 6.10 "Cantidad de agua utilizada para la construcción de probetas" .....	94
Tabla 6.11 Abrasión en medio húmedo utilizando escoria de cobre" .....	94
Tabla 6.12 "Arena adherida para lechada asfáltica utilizando escoria de cobre" .....	95
Tabla 6.13 Contenido óptimo de emulsión determinado con el criterio 1 para el árido tradicional" .....	97
Tabla 6.14 "Contenido óptimo de emulsión determinado mediante el criterio 1 para la escoria de cobre reproducida" .....	97
Tabla 6.15 "Abrasión en medio húmedo y arena adherida para el polvo de roca" .....	98
Tabla 6.16 "Abrasión en medio húmedo y arena adherida para para la escoria de cobre reproducida, (Fuente: Elaboración propia)" .....	98
Tabla 6.17 "Contenido óptimo de emulsión para polvo de roca y escoria de cobre en lechadas asfálticas" .....	99
Tabla 7.1 Resultados de ensayos de laboratorio para base estabilizada" .....	106
Tabla 7.2 "Detalle de capas de protección utilizadas para validación" .....	110
Tabla 7.3 "Fallas presentes en el ensayo de validación del uso de escoria de cobre en capas de protección" .....	113

## Glosario.

**Agregado pétreo:** Materiales granulares sólidos inertes, que se emplean en las capas constituyentes de la estructura de los pavimentos, con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas.

**AT:** Árido tradicional o agregado pétreo comúnmente utilizado en pavimentos.

**Material granular:** La materia granular o materia granulada es aquella que está formada por un conjunto de partículas macroscópicas sólidas lo suficientemente grandes para que la fuerza de interacción entre ellas sea la de fricción.

**Polvo de Roca:** Material fino generado por los chancadores apto para ser utilizado en pavimentos asfálticos, puede referirse al árido que es utilizado en lechadas o riego neblina, debido a la granulometría fina del material.

**CODELCO:** Corporación nacional del cobre de Chile.

**ENAMI:** Empresa Nacional de Minería.

**Cobre:** Metal de color pardo rojizo, brillante, dúctil, muy maleable, resistente a la corrosión y buen conductor de la electricidad y el calor; es el metal de más usos y se utiliza para la fabricación de cables, líneas de alta tensión, maquinaria eléctrica y en aleaciones, siendo las dos más importantes el latón, una aleación con cinc, y el bronce, una aleación con estaño.

**Mata de cobre:** Es el producto de la fusión de los minerales sulfurados de cobre previamente tostados para separar el sulfuro de cobre y de los demás metales que en forma de escoria sobrenadan en la mata. Las matas están pues constituidas esencialmente por sulfuros de cobre y hierro y se presentan generalmente en forma de gránulos negros o pardos (que se obtienen colando la mata fundida en el agua) o de masas que tienen aspecto metálico sin brillo.

**EC:** Escoria de cobre.

**MOP:** Ministerio de obras públicas.

**DV:** Dirección de vialidad.

**MC:** Manual de carreteras de Chile.

**Impacto ambiental:** Efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente.

**Impermeabilidad:** Que no permite el paso de la humedad, el agua u otro líquido.

**TS:** Tratamientos superficiales.

**TSS:** Tratamiento superficial simple.

**Tratamientos superficiales múltiples:** Consiste en dos ó más riegos alternados de asfalto y agregado pétreo.

**Slurry seal:** Lechada asfáltica.

**Reperfilado:** Consiste en una restitución de la geometría y una mejora en la cohesión del material existente en la superficie mediante escarificación con motoniveladora.

**Escarificación:** Consiste, en la disgregación de la superficie del terreno y su posterior compactación a efectos de homogeneizar la superficie de apoyo, confiriéndole las características prefijadas de acuerdo con su situación en la obra.

**Recebo de granulares:** Consiste en una reposición del material perdido de la carpeta de rodadura.

**Bacheo granular:** Utilizado cuando la carpeta de rodadura presenta baches aislados. Consiste básicamente en extraer material necesario, rellenar con material granular mezclado con la sal escogida y compactar.

**Emulsión asfáltica:** Las emulsiones asfálticas son mezclas de ligante asfáltico con agua, a las cuales se les agrega una pequeña cantidad de algún agente emulsificador.

**Ligante asfáltico:** Los ligantes asfálticos son elaborados a partir del residuo proveniente de la destilación del petróleo crudo de origen importado.

**Agente emulsificador:** Agente que ayuda en la mezcla de dos sustancias que normalmente son poco miscibles o difíciles de mezclar. De esta manera, al añadir este emulsionante, se consigue formar una emulsión.

**Durabilidad:** Representa el número de aplicaciones disponibles antes de que se destruya o termine su vida útil.

**Vida útil:** Tiempo para el cual se estima el diseño de un pavimento, en este periodo se garantiza el buen funcionamiento de la estructura.

## Resumen

El vertido o eliminación de la escoria causa efectos en el ambiente ya que ocupan grandes extensiones de terrenos que podrían ser utilizados para otras actividades. En lugar de acopiar estas escorias de manera parcial o total, pueden utilizarse en la elaboración de carpetas asfálticas delgadas como lo son TSS, lechadas asfálticas y sello cape seal.

En el presente trabajo se evalúan y comparan las propiedades mecánicas de la escoria de cobre como reemplazante del agregado pétreo tradicionalmente utilizado en la región de Valparaíso, con el objetivo de utilizar este árido como una alternativa sustentable y físicamente viable en las propiedades de TSS, lechadas asfálticas y carpeta de sello tipo cape seal. La construcción de estas carpetas proporcionaría y otorgaría una nueva utilidad a la escoria de cobre, aprovechando al máximo las propiedades físico-mecánicas que este residuo pudiese suministrar a caminos básicos cuyo objetivo principal es mejorar la textura superficial, serviciabilidad y rejuvenecimiento a los pavimentos asfálticos, alargando la vida útil de éstos.

Los resultados obtenidos por este trabajo de título, validarían el uso de la escoria de cobre como agregado pétreo para la utilización de este árido en carpetas de rodadura de uso económico para la utilización en el programa de caminos básicos desarrollado directamente por el departamento de vialidad del MOP.

La implementación de nuevas tecnologías siempre sugiere un cambio en la forma en la que se plantean y se llevan a cabo las obras de pavimentación, por esta razón este trabajo de título brinda las bases para que la utilización de escoria de cobre sea una alternativa de preservación que influya de manera positiva en el país.

# Capítulo I

## 1.1 Planteamiento del problema

La red vial en Chile está constituida por más de 80 mil kilómetros de caminos, según el informe de red vial que elabora la DV del MOP, de diciembre de 2015. De estos trayectos, que incluyen vías principales, pistas regionales y provinciales, así como aquellos que son comunales o de acceso a un lugar específico, el 60%, es decir, 48.474,56 km, es de ripio o de tierra [18], por lo que, dada esta situación, aquellos caminos rurales de menor tránsito deben atenderse a través de obras menores de reperfilados, recebos de material granular o ripiaduras. Si bien estas obras pueden solucionar el problema de conectividad, suelen presentar problemas de contaminación, debido a la presencia de polvo excesivo liberado por la extracción de áridos, como también bajos niveles de desempeño, baja seguridad vial y elevados costos de mantención y conservación [28].

Para la construcción de estos pavimentos es necesaria la utilización de áridos que se extraen de cauces naturales. De acuerdo a cifras disponibles, se estima que la extracción de áridos asciende a 7 millones 500 mil metros cúbicos producidos por año, de los cuales cinco millones corresponden a gravas, gravilla y arenas, el resto se divide entre estabilizados (bases y subbases de pavimentos) y puzolanas (fabricación de cemento) [32]. Por otra parte, existe la escoria de cobre, que podría ser utilizado como árido en mezclas asfálticas, ya que es un material granular y no contaminante, además el uso de escoria para la construcción de caminos ayuda a disminuir el pasivo ambiental, mejorando el paisajismo del sector y generando además, una importante baja en la extracción de áridos naturales desde ríos, esteros, dunas u otras fuentes, al reemplazar esas cantidades de recurso natural a extraer, por la reutilización de este material minero [7].

Las escorias de fundición constituyen uno de los principales desechos sólidos en las plantas de la industria del cobre, lo cual aumenta día a día. En Chile, por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor 2,2 toneladas de escoria, y a nivel nacional se producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas por año de escoria, existiendo a la fecha una acumulación de decenas de millones de toneladas. Esta escoria se acumula en canchas colindantes a cada planta industrial, constituyéndose escoriales catalogados como pasivos ambientales, los cuales son potencialmente contaminantes si no son bien manejados. Esto genera la necesidad de poder encontrar usos alternativos a las escorias, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre [31].

El presente trabajo de título se encuentra anexado al convenio suscrito entre CODELCO Ventanas y el Ministerio de Obras Públicas que está insertado en el marco del Programa de Recuperación Ambiental y Social de Quintero y Puchuncaví, donde se entrega este residuo para

uso vial. El desarrollo de este trabajo se centra en evaluar la funcionalidad de la escoria de cobre como árido, presentando una alternativa sustentable en el diseño de caminos básicos para la región de Valparaíso, solucionando a su vez el impacto ambiental y social que este genera.

En el diseño de caminos básicos, los tratamientos superficiales simples, lechadas asfálticas y sello cape seal son soluciones de pavimento económico y su fundamento es ayudar a la serviciabilidad del camino, aunque éste no entregue una estructura como tal, por lo tanto, la utilización de la escoria busca obtener una superficie regular, suficientemente texturada y que entregue una seguridad adecuada como se hace en este tipo de capa de rodadura.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo general.**

- Evaluar el uso de la escoria de cobre como agregado pétreo para TSS, lechada asfáltica y sello de capa del tipo “cape seal”, como alternativa para el diseño de caminos básicos en la región de Valparaíso.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

- Verificar el cumplimiento de la escoria de cobre como árido aplicando métodos de ensaye de agregados pétreos, estipulados en Volumen 8.101.1 del Manual de Carreteras de Chile.
- Evaluar la caracterización física del contenido de escoria de cobre en el diseño de TSS, lechada asfáltica y sello cape seal considerando el aprovechamiento de este árido de desecho en comparación con la explotación de áridos fluviales.
- Evaluar el comportamiento funcional de la escoria de cobre en TSS, lechada asfáltica y sello cape seal comparándolo con riegos producidos con árido tradicional.
- Proponer el diseño estructural de un pavimento como TSS, lechada asfáltica y sello cape seal, para un tramo de prueba utilizando la escoria de cobre generada por la planta de CODELCO División Ventanas.
- Evaluar el comportamiento de la escoria de cobre en TSS, lechada asfáltica y sello cape seal mediante la creación de un prototipo el cual pueda representar la construcción y funcionamiento de distintas capas de protección bajo condiciones de servicio y simulación de tránsito a baja escala para la región de Valparaíso.

### 1.3 Alcances

- En la región de Valparaíso las soluciones básicas predominantes corresponden a los TSS, lechada asfáltica y sello cape seal por lo que en este trabajo de título se evaluará la utilización de la escoria de cobre para estas soluciones de carpeta de rodado, aplicada como alternativa para el programa de caminos básicos.
- No se considera en este trabajo de título la evaluación de TS múltiples.
- La escoria de cobre se obtiene del centro de acopio de CODELCO División Ventanas.
- Los ensayos y controles de áridos tradicionales y áridos de escoria de cobre, son realizados en el Laboratorio de Vialidad del MOP, V Región.
- La evaluación de las propiedades y características de la escoria de cobre como agregado pétreo se determinan en base a los requisitos para TSS, lechada asfáltica y sello cape seal estipulados en el Volumen 5 del MC.
- El ligante asfáltico a utilizar corresponde a una emulsión catiónica CRS-2 para TSS y emulsión catiónica CSS-1H para lechada asfáltica y la mezcla de ambos para la utilización en sello cape seal.
- El método utilizado para determinar las dosificaciones para TSS se basa en el procedimiento del “Diseño de tratamientos superficiales” estipulado en MC 8.302.50.
- El método utilizado para la determinar de las dosificaciones de la lechada asfáltica se basa en el “Diseño para lechadas asfálticas y microaglomerados asfálticos en frío” estipulado en MC 8.302.62.
- Se propone el diseño estructural de un pavimento como TSS, lechada asfáltica y sello cape seal, siendo éstos alternativas para la construcción de un tramo de prueba a definir dentro de las alternativas del programa de caminos básicos.

## **1.4 Metodología.**

### **1.4.1 Utilización de agregados pétreos.**

- Los áridos, que se emplean en este trabajo de título corresponden a los áridos tradicionalmente utilizados en la región de Valparaíso y escoria de cobre de la empresa CODELCO División Ventanas, para la evaluación de carpetas asfálticas TSS, lechada asfáltica y sello cape seal.

### **1.4.2 Procedimiento para ensayos.**

PRIMERA ETAPA “Considerar en el análisis las propiedades y características del árido tradicional en el proceso constructivo de un TSS y lechada asfáltica.”

- Analizar agregados pétreos tradicionales provenientes del estero la Patagua y río Aconcagua.
- Verificar el cumplimiento de las especificaciones granulométricas para los agregados pétreos empleados en tratamientos superficiales simples utilizando la banda granulométrica TN 10-2,5 y la banda granulométrica C-I comúnmente utilizada para lechadas asfálticas ambas descritas en el Volumen 5 del MC.
- Caracterizar el árido tradicional como agregado pétreo, realizando métodos de ensaye para áridos estipulados en el Volumen 8.101 del M.C. para así obtener resultados patrones.
- Dosificar el árido tradicional utilizando el método de la “dimensión mínima promedio” para TSS y el “diseño para lechadas asfálticas y microaglomerados asfálticos en frío” para la lechada asfáltica.

SEGUNDA ETAPA “Estudiar mediante ensayos específicos de laboratorio las propiedades y características de la escoria de cobre en el proceso constructivo de un TSS.”

- Los materiales utilizados en el proceso constructivo corresponden a escoria de cobre proveniente de empresa Codelco División Ventanas.
- Reproducir la granulometría para la escoria de cobre logrando obtener la banda granulométrica TN 10-2,5 comúnmente utilizada para TSS.
- Caracterizar las propiedades de la escoria de cobre como agregado pétreo, realizando métodos de ensaye para áridos estipulados en el Volumen 8.101 del M.C.
- Dosificar un TSS utilizando escoria de cobre con granulometría reproducida, mediante el método de la dimensión mínima promedio.

TERCERA ETAPA “Estudiar mediante ensayos específicos de laboratorio las propiedades y características de la escoria de cobre en el proceso constructivo de una lechada asfáltica.”

- Utilizar en el proceso constructivo escoria de cobre proveniente de empresa Codelco División Ventanas.
- Reproducir la granulometría para la escoria de cobre logrando obtener la banda granulométrica C-I comúnmente utilizada para lechadas asfálticas.
- Caracterizar las propiedades de la escoria de cobre como agregado pétreo para el árido fino (porcentaje que pasa en la malla N°8), realizando métodos de ensayo estipulados en el Volumen 8.101 del MC.
- Dosificar la lechada asfáltica utilizando escoria de cobre con granulometría reproducida, mediante el método abrasión de medio húmedo y rueda de carga.

CUARTA ETAPA “Evaluar el comportamiento de la escoria de cobre para carpetas asfálticas delgadas”

- Construir carpetas asfálticas mediante un prototipo a baja escala el cual pueda representar la construcción de TSS y sello cape seal utilizando escoria de cobre y áridos tradicionales para validar desgaste, exudación y desprendimiento de material.
- Efectuar en terreno una inspección visual a modo de verificar el comportamiento de TSS, lechada asfáltica y sello cape seal.

### **1.4.3 Análisis de resultados**

El análisis se realiza en base a los resultados obtenidos con el árido tradicional comparándolo con la mezcla reproducida utilizando escoria de cobre, con el fin de verificar la funcionalidad de la escoria de cobre como remplazante del árido para en TSS, lechada asfáltica y sello cape seal y así verificar si es posible utilizar este agregado optimizando a su vez el ligante asfáltico utilizado según el método de dosificación respectivo.

Finalmente realizar un diseño estructural de carpeta TSS, lechada asfáltica y sello cape seal para la construcción de un tramo de prueba a definir dentro de las alternativas del programa de Caminos Básicos.

A continuación, en las Figuras 1.1 Figura 1.2 y Figura 1.3 se esquematiza un diagrama de flujo del trabajo de título, en el cual se especifican las exigencias para TSS, lechada asfáltica y sello cape seal según el Volumen 5.407 del M.C. y algunos ensayos adicionales para la profundización de este trabajo de título.

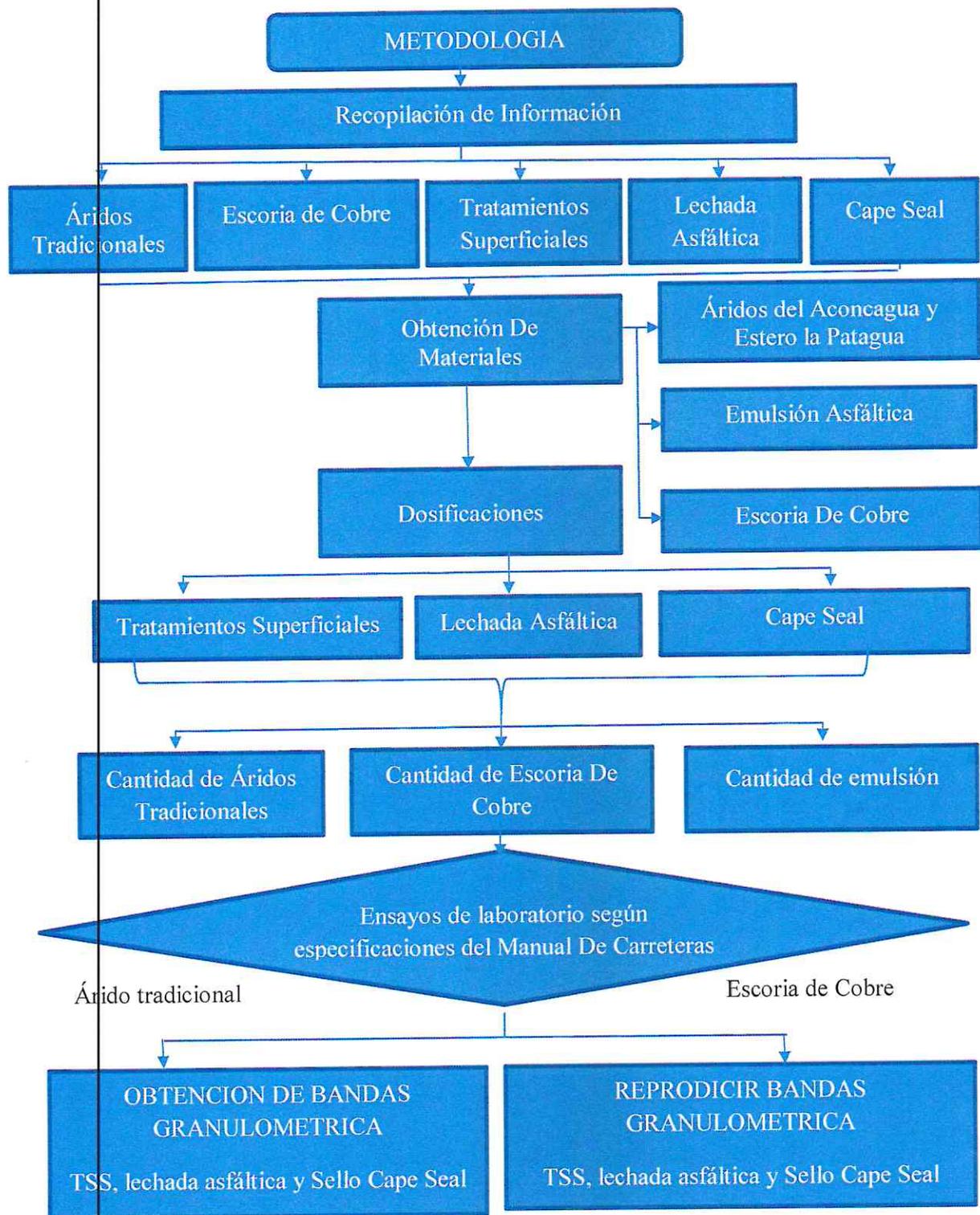


Figura 1.1 "Metodología de trabajo"

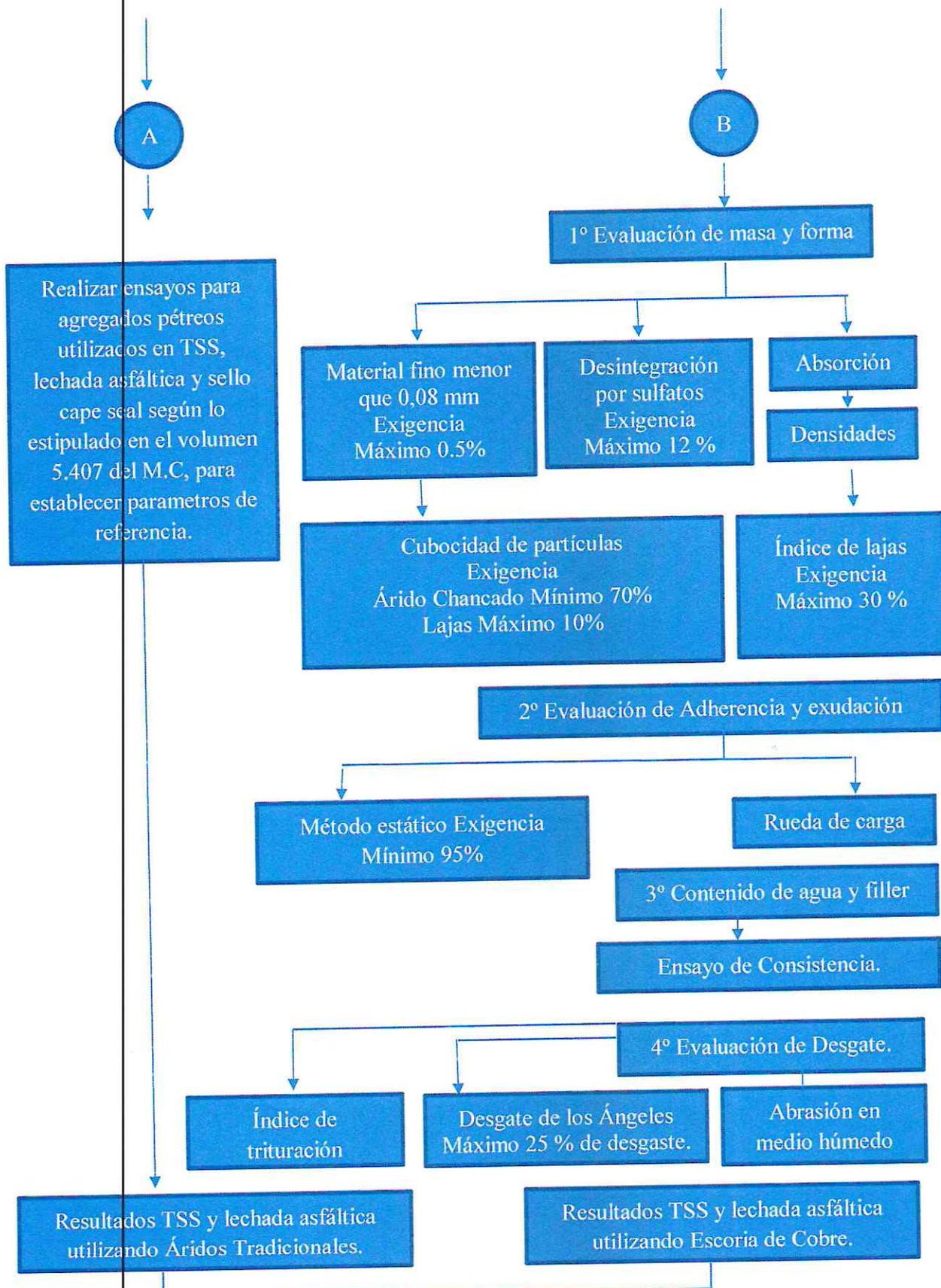


Figura 1.2 "Metodología de trabajo"

Figura 1.3



Diseño estructural de un pavimento con TSS y carpeta del tipo cape seal para un tramo de prueba a definir dentro de las alternativas del programa de caminos básicos.



Simular la construcción de carpetas del tipo TSS y sello cape seal utilizando escoria de cobre y áridos tradicionales, mediante la creación de un prototipo, el que permita consagrar estas soluciones como alternativas de caminos básicos mediante la simulación de tránsito a baja escala para la región de Valparaíso



Análisis de resultados.



Conclusiones.

Figura 1.3 "Metodología de trabajo"

## **Capítulo II**

### **Antecedentes y Marco teórico.**

A continuación, se expondrán los antecedentes requeridos para el desarrollo del presente trabajo de título, entre los que se encuentran los referidos al impacto que tiene el mejoramiento de carpetas de rodadura, la escoria de cobre y antecedentes generales sobre los TSS, lechadas asfálticas y sellos cape seal con los procedimientos experimentales estipulados en la normativa vigente.

#### **2.1 Mejoramiento de carpetas de rodadura.**

##### **2.1.1 Impacto para un país en el mejoramiento de caminos rurales.**

La construcción de caminos con mezclas asfálticas toman gran importancia para el desarrollo de un país, ya que permite la movilización de personas y productos desde y hacia diferentes lugares, generando así un incremento en las actividades económicas de las regiones[33].

La construcción de caminos con mezclas asfálticas toma gran importancia para el desarrollo de un país, ya que permite la movilización de personas y productos desde y hacia diferentes lugares, generando así un incremento en las actividades económicas de las regiones. El crecimiento económico de un país a tasas importantes exige una conectividad terrestre más expedita y segura, que disminuya los tiempos de traslado y favorezca la productividad del país. La evolución de los caminos rurales se contrasta con la experiencia internacional de desarrollo vial rural en un país como Nueva Zelandia, 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. Nueva Zelandia 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. Los tratamientos superficiales han sido empleados exitosamente en un amplio rango de solicitaciones de tránsito hasta 20.000 vehículos por calzada por día [36].

Por otro lado, en China existe un programa "Road Development, Economic Growth and Poverty Reduction in China (Desarrollo de Caminos, Crecimiento Económico y Reducción de la Pobreza en China)" el cual 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 al área de influencia del camino no solo está en la mejora de la producción agrícola del sector y los menores costos de transporte[36].

Según la D.V. las influencias que tiene un camino rural dentro de un país generan distintos beneficios que finalmente se ven reflejados en distintos aspectos como 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.

## 2.2 CODELCO, División Ventanas.

CODELCO División Ventanas es una fundición y refinería ubicada en la zona costera de la Región de Valparaíso, en la comuna de Puchuncaví a 50 kilómetros al norte de Viña del Mar, en donde se procesan los concentrados de cobre con el fin de producir principalmente ánodos y cátodos. Destaca el hecho de que los productos elaborados en esta planta están considerados entre los tres mejores a nivel mundial, llegando a alcanzar una pureza de 99,99%, entregando mayor valor agregado al principal recurso minero actual del país [8].

Su construcción comenzó a fines del 1959, para ser posteriormente inaugurada en 1964 por la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), hasta que el año 2005 pasó a formar parte de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) [9].

La División Ventanas está encargada de tratar los concentrados provenientes de las Divisiones Andina, Teniente y una gran cantidad de pequeñas y medianas mineras agrupadas en ENAMI y existentes entre la IV y VI región, como parte del trato del traspaso de la división[16].

Como las instalaciones de esta división se encuentran en el borde costero, la zona de Ventanas posee un área importante en cuanto a biodiversidad. El principal impacto producido en esta zona corresponde al depósito de escoria de cobre, desecho proveniente de la actividad de fundición [28].

En la Figura 2.1 se muestra la División CODELCO Ventanas.



*Figura 2.1 "CODELCO División Ventanas"*

### 2.2.1 Escoria de Cobre.

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho a partir del proceso de refinación de dicho metal, el que se realiza a través de procesos pirometalúrgicos de minerales sulfurados de cobre, los que previos a la fusión han sido concentrados mediante el proceso de flotación. Durante la fundición del material concentrado se producen dos fases líquidas separables o inmiscibles, la mata rica en cobre y la escoria [29]. En ocasiones, la escoria sí posee una rentabilidad comercial y previa al vertido final, éstas pasan por un proceso de flotación que permite recuperar los metales contenidos en ella y la escoria resultante se vierte en lugares aptos para ello. Debido a las grandes superficies que abarca el acopio este material, es que en los últimos años ha habido un creciente interés en buscar alternativas de uso para éstas [5].



*Figura 2.2 "Sector de acopio de escoria de cobre, CODELCO División Ventana"*

La escoria se considera un pasivo ambiental y puede permanecer en los lugares de acopio por tiempo indefinido, en Chile se registran depósitos de alrededor de 200 años de antigüedad. Los volúmenes vertidos ocupan grandes extensiones de superficies de terreno y muchas veces restan terreno cultivable e impactan negativamente al medio ambiente por la potencial lixiviación natural de metales pesados y por la contaminación visual del paisaje [1].

A lo largo del país, el panorama no es muy favorable, en la Figura 2.3 se muestra cual es la producción de escoria de cobre de las principales plantas de fundición en Chile, la cantidad de escoria de cobre producida dependen tanto de la tecnología empleada, como del proceso de producción utilizado.

### Producción de Escorias en Miles de Toneladas

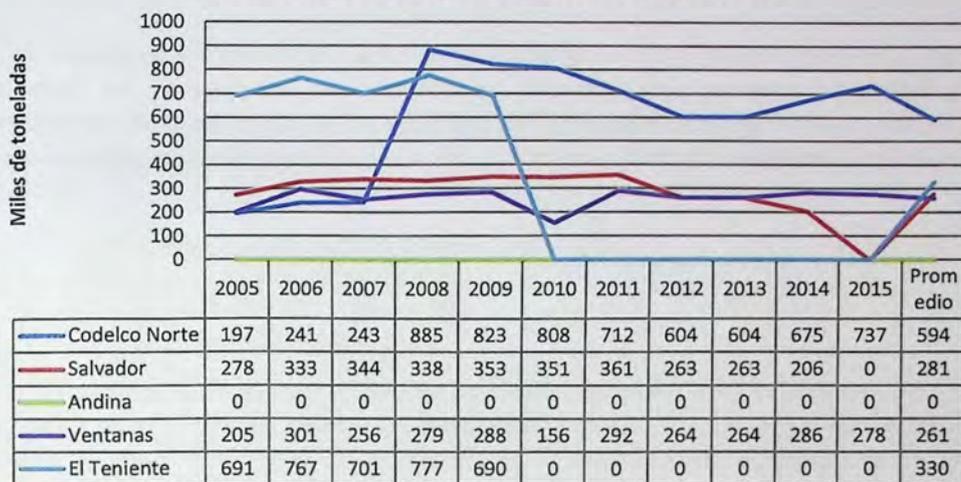


Figura 2.3 "Producción de escoria en miles de toneladas (Fuente: CODELCO reporte de sustentabilidad)."

Como se comentó anteriormente, este material es acopiado en lugares autorizados, en la Figura 2.4, se detalla la acumulación de escoria de cobre en miles de toneladas, lo que evidencia acumulación existente en los sectores de botadero de las principales plantas de fundición en Chile.

### Producción Acumulada de Escorias en miles de Toneladas

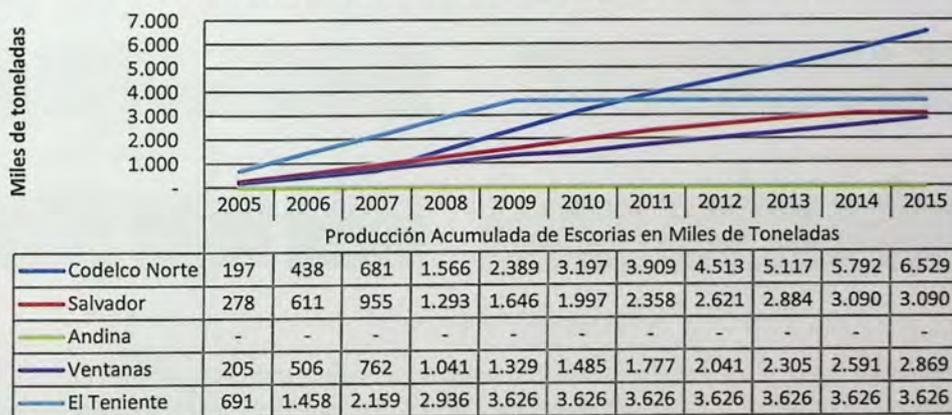


Figura 2.4 "Producción acumulada de escoria de cobre (Fuente: CODELCO reporte de sustentabilidad)"

## 2.2.2 Propiedades de la escoria de cobre

La escoria se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno y de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el procesamiento pirometalúrgico. Dependiendo de la naturaleza de los minerales, de los concentrados, de los fundentes, de las condiciones de operación y otros factores, los principales óxidos que se presentan en la escoria son [24]:

- Óxido de hierro (como  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) de 30% a 40%
- Óxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) de 35% a 40%
- Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) hasta 10%
- Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) hasta 10%

La composición química y física de las escorias dependen tanto de la materia prima, la tecnología empleada y del proceso de producción utilizado. Debido a que las escorias se producen a partir de los 1600 °C, se encontrarán en estado líquido, por lo que su posterior estructura dependerá considerablemente del método de enfriamiento. En el caso de existir enfriamiento rápido, la estructura quedará comprimida y presentará una estructura amorfa, siendo sus propiedades las de un material altamente reactivo [28].

En la Figura 2.5, se detallan los tipos de escoria de cobre clasificados según el grado de silicatos y según el proceso de enfriamiento que sufre al momento de ser vertida.

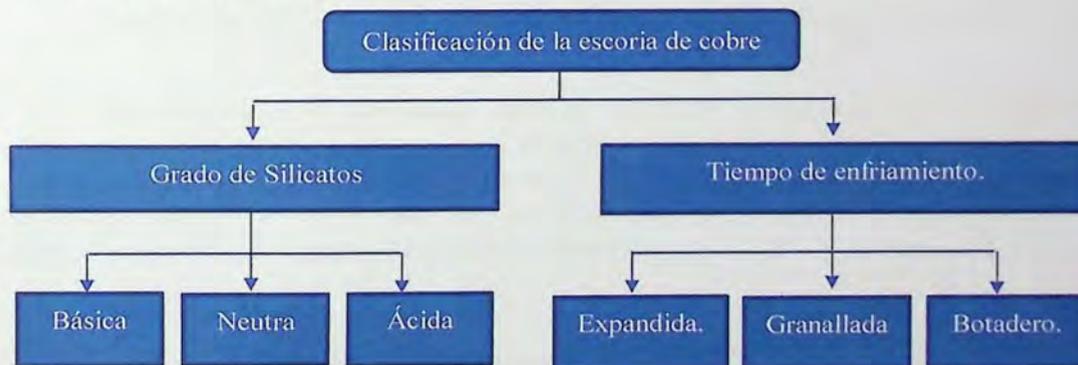


Figura 2.5 "Tipos de escoria de cobre"

Las escorias de Cobre pueden ser vertidas y enfriadas lentamente al aire, o pasar por un proceso de enfriamiento rápido con chorro de aire o agua. Las escorias enfriadas al aire son de color negro vítreo y muestran una baja absorción de agua, mientras que las que son enfriadas con agua son amorfas, granuladas y con mayor capacidad de absorción [3]. Es frecuente encontrar en las escorias de cobre modernas altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  (10-71%) y  $\text{FeO}$  (0,7-

62%) y los elementos químicos predominantes corresponden al Cu, Pb, Ni y Zn. Sus fases mineralógicas forman principalmente fayalita y magnetita. Además, algunas escorias de cobre muestran un elevado contenido de CaO, compuesto que otorgaría efectos positivos en las propiedades mecánicas de materiales conglomerantes para su uso como material de construcción. Al respecto, Nazer (2016) muestra que las escorias de cobre poseen propiedades puzolánicas y la influencia del contenido de CaO de dos escorias chilenas del siglo XIX contribuye en la resistencia mecánica de morteros de cemento Portland y de morteros con escorias activadas alcalinamente [3].

En la Figura 2.6 se muestra los tipos de escoria de cobre clasificada según el grado de enfriamiento



Figura 2.6 "Tipos de escoria según grado de enfriamiento (Expandida – Granallada – Botadero)"

Para los efectos de este trabajo de título se utilizan las escorias que son enfriadas lentamente al aire, debido a que este es el proceso de enfriamiento al cual son sometidas las escoria de CODELCO Ventana por lo que es clasificada del tipo Botadero, además esta escoria evidencia granulometría con tamaño máximo nominal de 3/8", el cual es el tamaño adecuado para su uso en TSS, lechadas asfálticas y sello cape seal.

### 2.2.3 Usos Alternativos de la escoria de cobre.

En la actualidad, la utilización de escorias de cobre en el país ha sido muy baja, debido al poco conocimiento que se tiene sobre este material. Entendiendo el impacto medioambiental que está produciendo, es que se han ido creando diversos usos alternativos para este residuo. A nivel mundial como nacional existen una serie de usos para la escoria de fundición de cobre, dentro de los cuales destacan:

- **Árido en Hormigón:** Según Nazer (2010), los hormigones con escoria de cobre, presentan una resistencia y una densidad mayor que los hormigones convencionales debido a la alta densidad de la escoria de cobre. Los hormigones con escoria de cobre pueden ser clasificados como hormigones pesados. En ingeniería se necesita en ocasiones, disponer de estructuras de la mayor densidad posible, para lo cual los hormigones pesados de escoria proveen una solución económica [1].
  
- **Rellenos estructurales:** En Chile se han realizado estudios con la utilización de este elemento como árido para la construcción de bases para caminos, así como material para terraplén.
  
- **Arena abrasiva (Sand Blasting):** Permite remover pintura, corrosión de estructuras industriales, así como remoción de capas externas. Esto se realiza por medio de una fuerza mecánica que impulsa las partículas abrasivas contra la superficie a tratar. La cubicidad existente en la escoria permite una mejor abrasión, destacando también la baja generación de polvo, lo que disminuye los riesgos para la salud de las personas. En Chile, empresas como “GRANALLA” utilizan escoria de cobre producto orientado a satisfacer demandas del sector metalúrgico, astilleros, empresas de servicios de limpieza, construcción, vial, odontológico, fábricas de jeans y un sin número de nuevos usos que descubrir. El sector geográfico objetivo es el centro y sur de América, desde los grandes consumidores de granalla hasta empresas Pymes que poco a poco se sumarán al consumo por la calidad de limpieza, rendimiento y lo más importante, el aporte al medio ambiente al no ser considerado como un producto contaminante y no dañar la salud de las personas como lo hace la arena en ciertas aplicaciones [15].

## 2.3 Tipos de carpetas de rodadura en capas de protección.

### 2.3.1 Tratamientos superficiales.

Los TS consisten en aplicaciones de riego asfáltico alternado con agregados pétreos colocados sobre una capa granular imprimada. Según el número de aplicaciones adoptan el nombre de:

- **Tratamiento Superficial Simple (TSS).** Corresponde a una primera capa de sello asfáltico inicialmente aplicado una base granular chancado uniforme. Ver Figura 2.7
- **Doble Tratamiento Superficial (DTS).** Aplicación en dos capas de árido granular chancado uniforme más emulsión. Ver Figura 2.8
- **Triple Tratamiento Superficial (TTS).** Aplicación en tres capas muy poco empleada por sus costos.

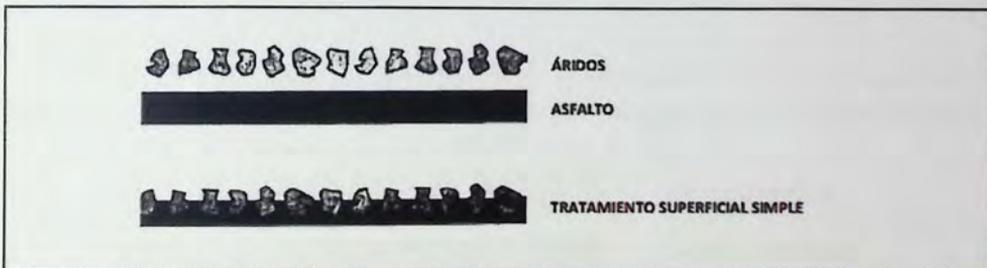


Figura 2.7 "Tratamiento Superficial Simple TSS, (Fuente: Elaboración propia)"



Figura 2.8 "Tratamiento Superficiales doble o múltiple (Fuente: Elaboración propia)"

### 2.3.2 Funciones.

Si bien un tratamiento superficial no genera un aporte estructural, permite una capa de protección a la base granular o pavimento existente. Los principales objetivos que busca cumplir este tipo de carpeta son:

- Sellar una superficie bituminosa existente contra la intrusión de aire y agua.
- Detener el deterioro de superficies existentes que muestren signos de desgaste.
- Proporcionar una superficie resistente al deslizamiento.
- Permite la posibilidad de demarcación del camino, con lo que se mejora la seguridad vial.
- Proporciona una superficie de apariencia uniforme.
- Asegura el drenaje de las aguas superficiales.
- Elimina emisiones de polvo.

### 2.3.3 Tratamiento Superficial Simple.

Un TSS o sellos bituminosos corresponden al recubrimiento de un pavimento con un riego asfáltico, en la Figura 2.9 se muestra la teoría de aplicación para un riego del tipo TSS.

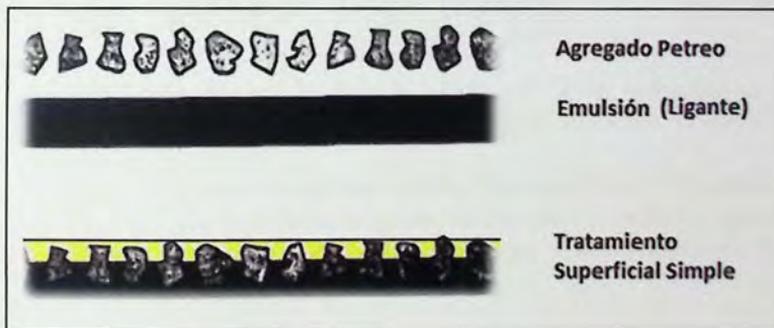


Figura 2.9 "Teoría de aplicación agregado pétreo –emulsión"

Con respecto a los TSS, este tipo de solución se destaca por su bajo costo con respecto a un pavimento tradicional, fácil aplicación, buena impermeabilización de la base y por su buen desempeño frente a varias adversidades climáticas y bajos volúmenes de tránsito (menores a 500 vehículos diarios) [38].

### 2.3.3.1 Áridos en Tratamientos Superficiales.

Los agregados utilizados para TSS se basa en la homogeneidad del tamaño de agregado, ya que, si todas las partículas de agregado son aproximadamente del mismo tamaño, la profundidad de hundimiento en el ligante asfáltico será la misma para cada partícula, contribuyendo a un desempeño exitoso del tratamiento. Partículas de agregado muy finas pueden llegar a ser sumergidas en el asfalto, lo que a ciclos de tránsito podría manifestarse como exudación. Las funciones principales del agregado en un tratamiento superficial simple son:

- Ser resistente a la abrasión generada por las cargas de las ruedas.
- Proporcionar una superficie resistente al deslizamiento.
- Ser en lo posible de un solo tamaño, para lograr así que la distribución sea lo más uniforme posible.
- Presentar forma chancada, evitando la presencia de partículas alargadas o lajeadas que puedan romperse con el paso del rodillo o del tránsito.
- Estar superficialmente limpio, para lograr adherencia óptima con el ligante asfáltico.
- Poseer un mínimo de humedad al momento de ser colocados (condición válida para emulsiones, para el caso de cementos asfálticos se recomienda que el agregado encuentre seco).

Ahora bien, según el tipo de tratamiento superficial a realizar es el tamaño del árido que se empleará para la construcción de un tratamiento superficial.

- Tratamiento Superficial Simple (TSS). El árido utilizado para este tipo de tratamiento, corresponde a una base granular chancado uniforme de tamaño máximo 13 mm (1/2").
- Doble Tratamiento Superficial (DTS). Para este tipo de tratamiento se aplican dos capas que se construyen 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").

### 2.3.4 Riego de Imprimación.

El riego de imprimación consiste en la aplicación de un material asfáltico, en forma de película, sobre la superficie de la subrasante o de un material granular no tratado (sub-base o grava de río), la imprimación corresponde a la primera capa en un TSS teoría que se detalla en la Figura 2.10.

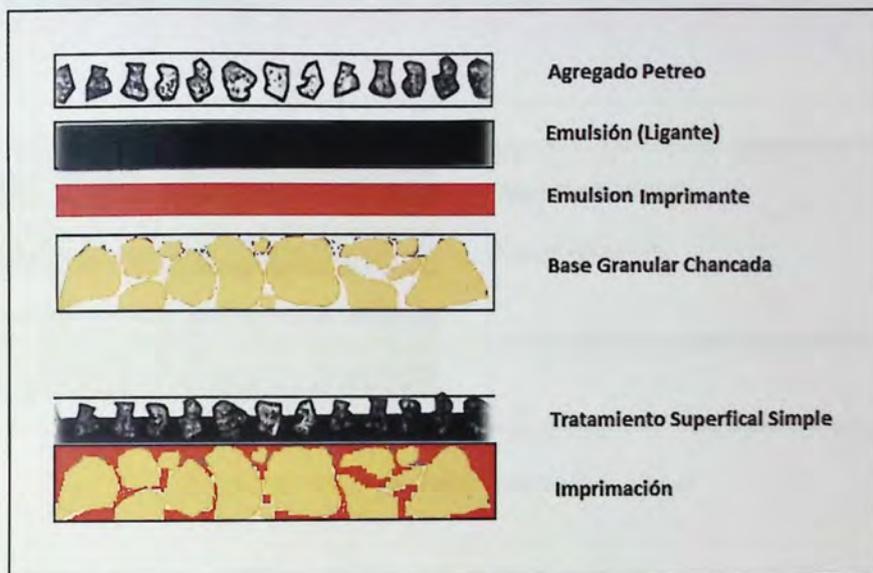


Figura 2.10 " Teoría de aplicación base – imprimante – ligante – agregado pétreo "

El Riego de Imprimación, en ningún caso aporta poder estructural a las capas de pavimento, esta capa tiene como objetivos principales:

- Impermeabilizar la superficie
- Cerrar los espacios capilares
- Revertir y pegar sobre la superficie las partículas sueltas
- Endurecer la superficie
- Facilitar el mantenimiento
- Suministrar adherencia a la superficie sobre la cual se coloca y la primera capa de mezcla asfáltica sobre ella colocada (TSS).

### 2.3.5 Lechada Asfáltica o Slurry Seals.

Las lechadas asfálticas se definen como una mezcla de agregado fino bien graduado, relleno mineral (filler), emulsión asfáltica (de rompimiento lento "SS" o acelerado "QS") y agua. Es un proceso de sellado utilizado generalmente en pistas, calles y carreteras existentes, utilizadas para mejorar y/o restaurar las características superficiales del pavimento, como se detalla en la Figura 2.11.

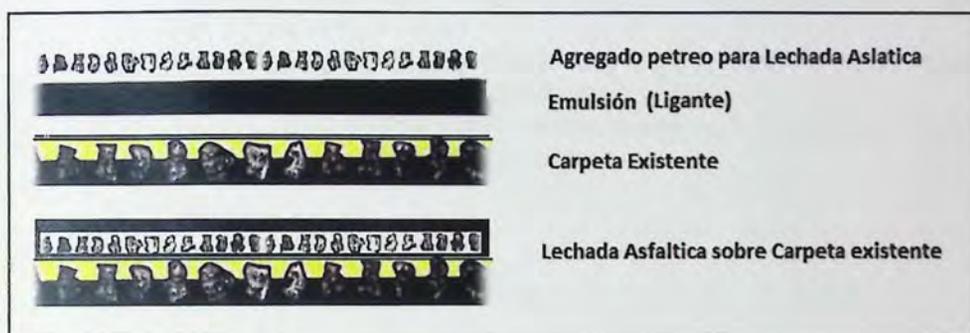


Figura 2.11 " Teoría de aplicación para lechada asfáltica"

Este tipo de pavimento económico tampoco aporta capacidad estructural, sino que éste se busca cumplir con los siguientes objetivos:

- Brindar soluciones para sellar los pavimentos que presentan un estado de oxidación muy avanzado, sellando grietas menores.
- Disminuir los riesgos de desprendimiento de áridos en pavimentos gastados y/o deteriorados, lo que permite restaurar la textura superficial y proveerla de mayor resistencia al deslizamiento.
- Otorga impermeabilización de las capas de rodadura
- Se utiliza para mantener las buenas condiciones de la superficie de rueda en pavimentos que tienen una capacidad estructural adecuada.
- Permiten corregir deterioros superficiales específicos, es decir, en superficies de rueda que no tienen un nivel muy avanzado de deterioro como fatiga o deformación permanente.
- Permite alargar la vida útil de un pavimento a un bajo costo.

### 2.3.5.1 Áridos en Lechadas Asfálticas.

El agregado en lechadas asfálticas queda determinado de inmediato por la selección del tipo de lechada, que en definitiva no es más que un tipo de granulometría. Los agregados pétreos deben cumplir ciertos requisitos lo que asegura su serviciabilidad al sometimiento de las cargas de tránsito y la compatibilidad con el ligante, la clasificación de las bandas está definida como sigue:

- Tipo A-1: Conformada de áridos finos, su aplicación es para sellado de grietas y sellado fino en vías de tráfico liviano.
- Tipo B-1: Conformado de áridos de tamaño medio, su aplicación es para sellados general y aumentar la textura.
- Tipo C-1: Conformado por áridos de tamaño grueso, su aplicación es sellados con textura profunda en vías de alto tránsito
- Tipo D-1: conformado por árido de tamaño grueso, su aplicación principal es sobre tratamientos superficiales simples.

### 2.3.6 Sello Cape Seal.

Un sello de construcción de tipo cape seal, está constituido por una primera capa de TSS, consistente en una aplicación de asfalto recubierta por áridos de granulometría con tamaño máximo de 20 mm (3/4"), en conformidad con lo dispuesto en la Sección 5.407, y una segunda capa de lechada asfáltica, de granulometría de tamaño máximo de 10 mm (3/8"), en conformidad con lo dispuesto en la Sección 5.406 ambas estipuladas en el MC. Este tipo de carpeta aumenta la vida útil del pavimento y adicionalmente se obtiene una superficie más texturada y homogénea, con los que se pretende evitar el desprendimiento del árido a nivel de TSS. En la Figura 2.12 se detalla el método utilizado para la construcción de este tipo de carpetas.

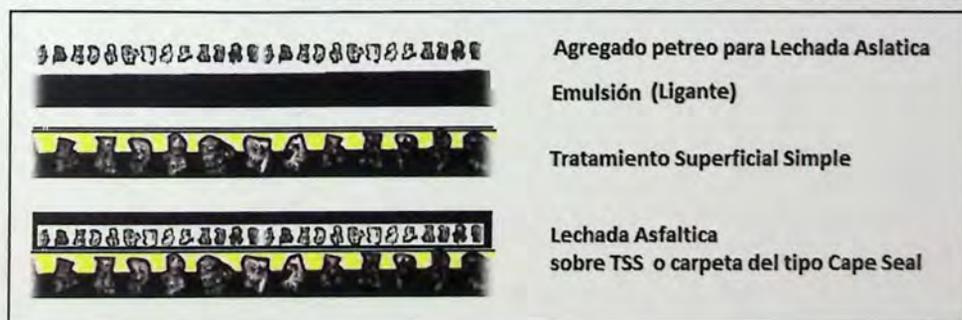


Figura 2.12 "Teoría de aplicación para carpeta del tipo cape seal"

### 2.3.7 Emulsiones en Capas de protección.

Las emulsiones asfálticas son mezclas de ligante asfáltico con agua, a las cuales se les agrega una pequeña cantidad de algún agente emulsificador. Los ligantes asfálticos son elaborados a partir del residuo proveniente de la destilación del petróleo crudo.

Los objetivos principales de las emulsiones asfálticas son:

- Ligar las partículas de agregado de la superficie subyacente.
- Proporcionar un sello a prueba de agua.
- Otorgar una capa protectora en la superficie de los glóbulos de asfalto a través de una carga eléctrica que permite que los glóbulos permanezcan aislados al repelerse entre sí.

Para un correcto funcionamiento de la emulsión con el agregado, cuando ésta entra en contacto con el agregado, y este posee carga contraria a la superficie, se produce un desequilibrio eléctrico que hace que las partículas de asfalto se unan a la superficie de agregado y el agua fluya o se evapore. A este fenómeno se le denomina “quiebre de la emulsión”. Según la carga eléctrica del árido es que existirán emulsiones aniónicas (de carga negativa) y emulsiones catiónicas (de carga positiva) Las emulsiones asfálticas se clasifican según el tipo de carga del agente emulsificante y del tipo de quiebre de la emulsión [17].

- CRS: Emulsión catiónica de quiebre rápido.
- CMS: Emulsión catiónica de quiebre medio.
- CSS: Emulsión catiónica de quiebre lento.

Actualmente en Chile sólo se utilizan emulsiones catiónicas, tales como:

- Catiónicas del tipo CSS-1H o CRS-2.

## 2.4 Fallas en Caminos Básicos.

En casi todos los países del mundo, muchos TS de asfalto y sellos de capa de protección están funcionando muy mal. En general, esto se debe a los procedimientos de diseño y construcción inadecuados e incluso descuidados empleados comúnmente [21]. Actualmente las fallas que más se han evidenciado en carpetas asfálticas delgadas destacan principalmente:

➤ Desprendimiento o pérdida del agregado:

Este tipo de falla se presenta cuando existe un problema de adherencia o no se acomodan correctamente el agregado y el asfalto o cuando existe un problema en las dosificaciones elaboradas [18]. Las principales causas de este tipo de falla recaen en la suciedad del agregado pétreo, dosis insuficientes de riego de asfalto [28], rodillado a destiempo del agregado, compactación sólo con rodillo liso, clima demasiado frío o húmedo, camino abierto a tránsito demasiado pronto sin restricción de velocidad o incorrecta elección de los parámetros a la hora de elaborar el diseño en la dosificación. Se aprecian zonas en que el material se ha desprendido (descascamientos), o también se puede observar que el material suelto está depositado sobre la calzada, la pérdida de agregado no solo afecta a la pérdida de uniformidad en la superficie, sino que el agregado suelto en el camino puede resultar peligroso para los vehículos o personas que se encuentren en las cercanías al generar el movimiento de partículas por el paso del tránsito [18]. En la Figura 2.13 se evidencia como queda la superficie cuando se presenta este tipo de falla.



*Figura 2.13- "Desprendimiento del agregado"*

➤ Exudación:

Consiste en el afloramiento hacia la superficie del exceso de asfalto aplicado, este genera la presencia de una película de material bituminoso en el pavimento, la cual forma una superficie brillante, cristalina y reflectora que usualmente llega a ser pegajosa [6].

Esta falla es originada por una dosis excesiva de emulsión, dosis elevada de imprimante, base demasiado húmeda al momento de ser imprimada, variaciones importantes en la granulometría del agregado, presión de bombeo muy alta, tránsito de vehículos pesados, incorrecta elección de los parámetros de diseño en la dosificación o un bajo contenido de vacíos de aire [23]. En la Figura 2.14 se presenta la falla por exudación, donde se evidencia el afloramiento de la emulsión hacia la superficie reflejando la exudación presente en el pavimento.



*Figura 2.14 "Exudación en carpeta asfáltica delgada"*

## Capítulo III.

### Actualidad de la infraestructura vial en Chile.

Este capítulo tiene por objetivo introducir el estado actual 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). Este estudio se realiza en base a la información pública descrita en la red vial nacional (actualizada hasta agosto 2015) y a las políticas de conservación vial implementadas en el programa (Establecidas en noviembre 2011).

A continuación, se presentan los objetivos, beneficios, evolución y tipos de soluciones utilizadas en el programa de caminos básicos realizado por el MOP.

#### 3.1 Programa caminos básicos en Chile.

El concepto fundamental que está detrás del nombre Caminos Básicos es el de conservar el camino sobre el mismo trazado y características actuales, aplicando sobre la superficie de rodadura alguna solución sin mejorar su geometría, los objetivos principales de este programa son los siguientes [13].

- Contribuir al desarrollo del país, a la superación de la pobreza, y apoyar a la economía productiva rural en este contexto.
- Disminuir ostensiblemente o eliminar la emisión de polvo al paso de los vehículos para los caminos de tierra y ripio, constituyendo al mismo tiempo una alternativa de menor impacto sobre el ambiente con respecto a soluciones de mayor costo.
- Realizar una obra de mejoramiento de camino dados los requisitos de rentabilidad, producto del bajo tránsito que se presenta en este tipo de caminos.
- Incide en la ampliación de los accesos a mercados, educación, salud y al esparcimiento de los habitantes de numerosas localidades afectadas hoy por distintos grados de aislamiento.
- Abordar con un mayor criterio social aquellos caminos con bajo volumen de tránsito, donde no es posible justificar económicamente la construcción de obras de pavimento.
- Aplicar soluciones básicas que otorguen una mayor calidad de vida a los usuarios y habitantes colindantes de estos caminos.

- Reducir costos de conservación por la adecuada aplicación de soluciones básicas económicas.
- Fortalecer el ámbito técnico de la ingeniería y la investigación.
- Aprovechar nuevas tecnologías y aplicarlas en los planes de conservación.
- Otorgar condiciones que permitan generar una redistribución y/o mayor nivel de flujos de tránsito en aquellos caminos que, por su bajo volumen de tránsito actual, no son posibles postularlos a un mejoramiento mayor o cambio de estándar.

### **3.2 Tipos de capas de protección desarrollados por programa de solución de caminos básicos.**

El Programa reúne proyectos de caminos rurales sin pavimentar a lo largo del país, y que al no cumplir con “ciertos requerimientos técnicos”, según señala la página web del MOP, no son considerados dentro de las obras de pavimentación de la D.V. de dicho ministerio.

Los proyectos tienen el objetivo de mejorar el estándar de este tipo de caminos, a través de soluciones básicas, entendiendo por ellas, aquellas soluciones cuyo costo de inversión es menor que el pavimento. Estas capas de protección se pueden clasificar en dos tipos principales:

#### **3.2.1 Caminos con aplicación de un estabilizador de suelo**

Los caminos con una aplicación de subsuelo son soluciones que se aplican mediante riego superficial o se incorporan al espesor completo de la capa de rodadura, aplicando distintos tipos de sales o cloruros con el objetivo de estabilizar la capa superficial. Entre los productos tradicionalmente aplicados destacan el cloruro de sodio, cloruro de magnesio hexahidratado (bischofita) y el cloruro de calcio. Estos productos aplicados son utilizados en los distintos tipos de soluciones de los cuales destacan:

- **Bacheo granular:** Utilizado cuando la carpeta de rodadura presenta baches aislados. Consiste básicamente en extraer material necesario, rellenar con material granular mezclado con la sal escogida y compactar (Según lo especificado por M.C.7.306.3b).
- **Riego Superficial:** Conservación preventiva que consiste en una restitución del cloruro superficial perdido por tránsito. Se aplica con camión aljibe y requiere que se presente una buena regularidad superficial (sin baches). Lo más tradicional para este caso es el uso de la Bischofita, debido a que es el cloruro

que mejor se disuelve en agua formando una salmuera. Este procedimiento no aparece especificado en el MC.

- **Reperfilado con compactación:** Consiste en una restitución de la geometría y una mejora en la cohesión del material existente en la superficie mediante escarificación con motoniveladora hasta una profundidad de entre 3 y 5 cm del espesor de la carpeta de rodadura (Según lo especificado por M.C.7.306.1d).
- **Recebo granular con adición de cloruro:** Consiste en una reposición del material perdido de la carpeta de rodadura. El material repuesto debe incluir la sal (a granel o disuelta) para posteriormente compactar (según lo especificado por M.C.7.306.4f).
- **Eliminación de polvo con cloruro de calcio:** Se emplea este material como solución no asfáltica principalmente en la Región del Bío Bío, con el objetivo de eliminar las emisiones de polvo principalmente en temporada estival.

### 3.2.2 Caminos con aplicación de una capa asfáltica delgada (capa de protección)

Tiene como objetivo principal adicionar una capa de recubrimiento que permita generar textura superficial y asegurar impermeabilidad. Existe una amplia cantidad de soluciones asfálticas simples, las que se pueden clasificar en:

- **Riego de neblina:** Consiste en un riego de emulsión asfáltica de quiebre lento utilizado para rejuvenecer superficies y sellar grietas pequeñas. (según lo especificado en el MC. 5.403)
- **Lechada asfáltica:** Una lechada es una mezcla de emulsión asfáltica de quiebre lento, agua, arena y eventualmente un relleno fino. Tiene como objetivo rejuvenecer la carpeta asfáltica, así como detener el desgaste superficial y mejorar la fricción entre pavimento y neumático (según lo especificado en el MC.5.406)
- **Sello de agregados:** Posee los mismos objetivos que las lechadas asfálticas. Consiste en un tratamiento superficial simple, el cual puede ser utilizado tanto como solución superficial definitiva o como método para reparar baches. En el caso de requerir una mejor estabilidad de la solución se realiza un tratamiento superficial múltiple.

- **Cape Seal:** Este método corresponde a una combinación de un tratamiento superficial simple, pero con la diferencia de que en su superficie posee una lechada asfáltica, los cuales tienen como objetivo rellenar la textura rugosa y abierta del tratamiento superficial (este sello se encuentra especificado en el MC5.404)
  
- **Otta Seal:** Es un sello similar a la lechada asfáltica, pero posee mayor costo de ejecución debido a la calidad de asfalto empleado y a las temperaturas de trabajo. Es una solución empleada comúnmente para condición de baja temperatura.

Finalmente, en la Figura 3.1 se muestra algunas soluciones con capa estabilizador, evidenciando la gran deficiencia presente de los caminos de ripio para zonas muy áridas debido a la emisión de material particulado generado por el paso de los vehículos y las complicaciones que genera con respecto a la adherencia entre el neumático y superficie de rodado, por otro lado, para zonas lluviosas se evidencian los baches que se generan por el exceso de humedad y el mismo paso de los vehículos. Con respecto a las soluciones que se muestran en la Figura 3.2 la bichofita es la solución que más se ha utilizado en el norte de Chile, pero al igual que el ripio es solo una capa estabilizadora el cual presenta los mismos problemas que los caminos de ripio. Si bien, las capas asfálticas delgadas es la solución que menos fallas presenta y la que involucra menos costos de mantención y sostenimiento, esto hace resaltar aún más su uso por sobre las otras soluciones de capa de protección.



*Figura 3.1 "Solución de Caminos básico tipo ripio Norte y Sur de Chile"*



*Figura 3.2 "Solución de camino tipo bichofita y capa asfáltica delgada"*

### 3.3 Evolución del programa de caminos básicos

Luego que algunas pocas regiones, en los años '90 comenzaron a explorar algunas innovaciones en la forma de conservar la red no pavimentada, en el año 2003 se instaura en Chile un programa llamado "Caminos Básicos 5.000", el cual cambió significativamente el concepto tradicional de conservación de la red vial no pavimentada del país [2]. Este programa reorganizó y dio prioridad a una serie de iniciativas individuales de las direcciones regionales de la Dirección de Vialidad, las cuales 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 [36]. Ahora bien, en la Tabla 3.1 se detalla la cantidad de obras totales realizadas en el periodo 1994 – 2003, antecedendo la creación del programa de caminos básicos.

Tabla 3.1 " Cantidad de obra total periodo 1994 – 2003 "

SOLUCION	REGIONES												R..M.	TOTAL	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII			
Bischofita	10	87.7	509.5	2.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	610
Sal	15	0.5	339.5	9.9	7.2	5.4	12.1	0	106	0	0	26.8	0	522.4	
Capro	0	0	0	0	271	0	0	0	0	0	0	0	0	271	
Cape Seal	0	0	95.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95.4	
I. Reforzada	77	35.5	0	8.5	544	2.4	0	91	0	0	22.7	195.3	0	976.4	
Sellos	164	0	17.3	42.3	351.5	19.1	0.8	0	61	0	32	0	97.2	785.2	
total	266	123.7	961.7	63.5	1173.7	26.9	12.9	91	167	0	32	49.5	292.5	3260.4	

Como una forma decidida a cambiar el escenario descrito anteriormente, en el 2003 la Dirección de Vialidad se impuso la meta de mejorar la superficie de rodadura de 5.000 Km de caminos de bajo tránsito con soluciones económicas adecuadas, dando lugar así al Programa Caminos Básicos 5.000, lo que fue concretado a mediados de 2006 [35].

En el 2007, la Dirección de Vialidad se autoimpuso la meta siguiente que fue completar 10.000 Km a marzo de 2009, lo que se cumplió durante el primer trimestre del año 2009 [36]. Ese mismo año 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 [34]. 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 [36].

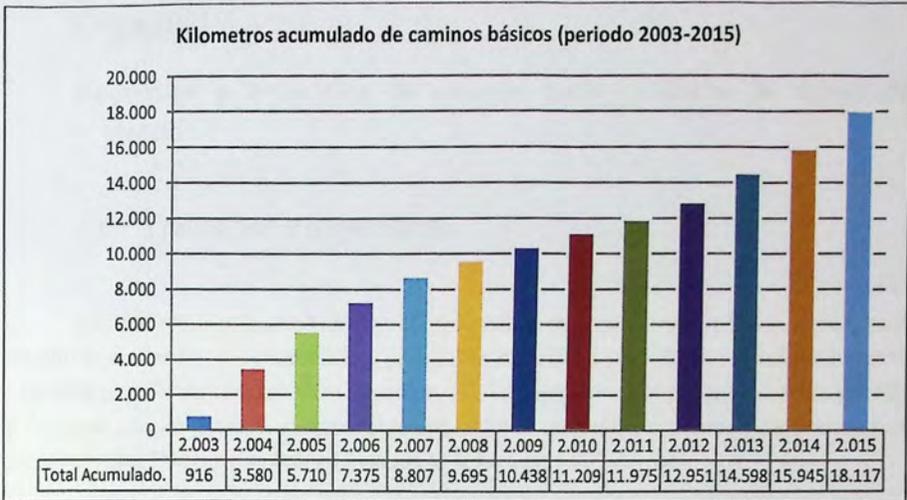
El 2011 se concreta una Resolución de la Dirección de Vialidad No 1076 del 04.03, que instituye oficialmente el Programa de Caminos Básicos (CCBB), tomando en cuenta las indicaciones hechas el año 2009 por la Dirección de Presupuestos. Con respecto a estas modificaciones se distinguen dos tipos de desarrollo de caminos básicos, uno denominado “CCBB por Conservación” y el otro denominado “CCBB Intermedios”.

Las intervenciones del tipo CCBB por Conservación pueden considerar tanto capas de protección asfáltica como adiciones de supresores de polvo, mientras que 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. Paralelamente a esto, en la Región de la Araucanía se comenzó a ejecutar el Programa de Desarrollo Indígena, el cual consistió en intervenir caminos en localidades de comunidades indígenas [36].

En la actualidad estos dos programas forman parte de lo que se ha denominado “Programa de Pavimentos Básicos 15000”. Este programa está basado sobre 5 ejes centrales:

1. Conservar la filosofía del programa de Caminos Básicos, el cual consiste en una solución económica a un camino de bajo tránsito según su contexto (zona geográfica, tránsito, clima, población beneficiada).
2. Generar una solución acorde a las condiciones climáticas existentes en la localidad.
3. Las modificaciones básicas en caminos producen una transformación económica en el entorno local, impulsando un movimiento productivo en el sector agrícola, pesquero y turístico.
4. Aumento en la calidad de vida de las personas. Aumenta la frecuencia en transporte local, la facilidad para asistir a centros de salud, etc.
5. Hacer participe a las personas de la obra, transmitiéndole a los usuarios las maneras de cuidar el camino utilizado. Entre las recomendaciones a transmitir destacan la advertencia de velocidades de circulación, evitar que depositen agua en el camino, condición de peso de vehículos, etc.

Los kilómetros avanzados desde la creación del programa en el 2003 hasta el 2015 bordean los 18.000 km acumulados en caminos básicos construidos como se detalla en la Figura 3.3. Toda esta experiencia acumulada desde el año 2003 se toma en cuenta por las autoridades del Gobierno para elaborar un gran programa a llevarse a cabo entre 2014 y 2018, el que considera 15.000 km (casi equivalente a lo ejecutado en los 11 años anteriores). En esta oportunidad se incluye unos 3.000 km de caminos en comunidades indígenas que apuntan a mejorar las condiciones de vida de un grupo de habitantes del país que no cuentan con una infraestructura vial mínima [35].



*Figura 3.3 "Km acumulado de caminos básicos periodo 2003 – 2015,  
(Fuente: Curso-taller latinoamericano de pavimentos y caminos básicos"*

A modo de innovación es que este trabajo de título en conjunto a la D.V. y CODELCO División Ventana, pretende incorporar la escoria de cobre como árido para carpetas asfálticas utilizadas en la región de Valparaíso, con el fin de reutilizar este pasivo ambiental como una alternativa de agregado pétreo, evitando así, el gran impacto que hoy generan las empresas constructoras en el proceso de extracción de áridos fluviales para la construcción de carpetas asfálticas.

## Capítulo IV

### Requisitos y normativa de ensayos para el diseño de capas de protección.

#### 4.1 Tratamientos Superficiales.

Los TS permiten la construcción de pavimentos de bajo costo, en forma rápida, para tránsito bajo a medio, impermeabiliza y protege las superficies granulares, y sobre pavimentos existentes permite mejorar la textura y fricción. [4]. La descripción del procedimiento es general y establece que de acuerdo al número de aplicaciones de riego de asfalto y de áridos. Los requisitos para TS se encuentran estipulados en la sección 5.407 del MC.

##### 4.1.1 Áridos en Tratamientos Superficiales.

Para TS los agregados pétreos deberán cumplir con requisitos de calidad. En la Tabla 4.1 se detallan los requerimientos estipulados en el Volumen 5.407.202 del MC, los cuales señalan exigencias máximas y mínimas para distintas características del árido como lo son su forma, tamaño, limpieza, granulometría y propiedades superficiales que le permitan resistir la abrasión del tránsito, así como mantener una buena adherencia con el ligante.

Tabla 4.1 "Requisitos de agregados pétreos para TSS (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)"

REQUISITOS PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES		
Ensayes	Exigencia	Método
Desgaste de Los Ángeles	Máximo 25 %	8.202.11
Desintegración con Sulfato de Sodio	Máximo 12 %	8.202.17
Adherencia por 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
Fino por Lavado	Máximo 0.5 %	8.202.4

Con respecto a la granulometría, la banda tradicionalmente utilizada para los TSS corresponde a la banda TN 10-2,5, mientras que las comúnmente utilizadas en DTS corresponden a la TN 20-10 y TN 10-2,5, para la primera y segunda aplicación respectivamente.

En la Tabla 4.2 se señalan las especificaciones granulométricas descritas en el Volumen 5.405.202 del MC para TS.

Tabla 4.2 "Bandas granulométricas para TS (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)"

TAMIZ	TN 25-12.5	TN 20-10	TN 12.5-5	TN 10-2.5	TN 5-2.5	TN 20-12.5a	TN 20-12.5b	TN 10-6.3a	TN 10-6.3b
40	100	-	-	-	-	-	-	-	-
25	90-100	100	-	-	-	100	100	-	-
20	20-55	90-100	100	-	-	85-100	85-100	-	-
12.5	0-10	20-55	90-100	100		0-20	0-20	100	100
10	0-5	0-15	40-70	85-100	100	0-7	0-5	90-100	85-100
6.3	-	-	-	-	-	-	-	0-40	0-25
5	-	0-5	0-15	10-30	85-100	-	-	0-5	0-10
2.5	-	-	0-5	0-10	10-40	0-1	-	-	0-1
1.25	-	-	-	-	-	-	0-1	0-1	-
0.08	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5

Es deseable que los agregados utilizados para TSS consistan esencialmente en un tamaño de agregado, ya que, si todas las partículas de agregado son aproximadamente del mismo tamaño, la profundidad de hundimiento en el ligante asfáltico será la misma para cada partícula, contribuyendo a un desempeño exitoso del tratamiento [17].

#### 4.1.2 Emulsiones para TSS.

Los asfaltos a emplear en TS serán emulsiones del tipo CRS-2, que se ajusten a la especificación descrita en 8.301.4 (Especificaciones para emulsiones asfálticas aniónicas) ó 8.301.5 (Especificaciones para emulsiones asfálticas catiónicas) según el Volumen 5.407. 201 del Manual de Carreteras. 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.

#### 4.1.3 Método de diseño para TS.

El procedimiento de dosificación empleado por el Laboratorio Nacional de Vialidad corresponde al método de la "dimensión mínima promedio" el que se encuentre definido en el numeral 8.302.50 del MC. Este método corresponde al que se utiliza oficialmente en el país y está basado en los principios de Hanson, aceptados y mejorados por la Country Roads Board de

Victoria. Las fórmulas utilizadas para el cálculo de la dosis de agregado y asfalto son como sigue:

➤ Cantidad del agregado pétreo C.

$$C = M * H * E * (1 - 0,4 * V) * Drs \quad (\text{ec. 4.1})$$

Donde:

C = Cantidad de agregado a aplicar [kg/m<sup>2</sup>]

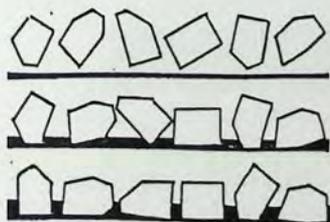
M = Factor de evaluación del agregado.

V = Porcentaje de huecos en el agregado. [%]

H = Dimensión mínima promedio del agregado [mm].

Drs = Densidad Real Seca. [kg/dm<sup>3</sup>]

El cálculo de la dosificación del agregado pétreo C se basa principalmente en condiciones físicas y geométricas del mismo. Para esto es necesario determinar distintos factores que definirán el contenido de agregado por m<sup>2</sup> como se expresa en la Ecuación 4.1. El factor de evaluación del agregado M es un factor de corrección que debe ser evaluado por la experiencia del diseñador y que está en función del clima, tránsito y tipo de agregado existente en la zona de trabajo. Si bien el valor 0,9 ha dado buena experiencia en el país, valores entre 0,9 y 1 podrán ser utilizados. El porcentaje de huecos en el agregado V corresponde a vacíos existentes entre los agregados que cumplen el objetivo de absorber la consolidación del ligante por amasado tanto del proceso de compactación como el tránsito mismo teoría que se explica en la Figura 4.1 y se calcula mediante la expresión descrita en la Ecuación 4.2.



$$V = 1 - \frac{Das}{Drs} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Figura 4.1 "Teoría de acomodamiento de partículas árido - emulsión"

Donde

Das = Densidad Aparente Suelta [kg/m<sup>3</sup>]

Drs = Densidad Real Seca del agregado [kg/m<sup>3</sup>].

La dimensión mínima promedio H corresponde a la dimensión mínima, o dimensión perpendicular a la cara de apoyo que presentarán los agregados luego de compactación por rodillado. La cual se determina con la Ecuación 4.3.

$$H = \frac{TM}{1,09 + 0,0118 * IL} \quad (\text{ec. 4.3})$$

Donde

H = Dimensión mínima promedio del agregado [mm].

TM = Tamaño medio del agregado [mm]

IL = Índice de Lajas [%]

El tamaño medio del agregado se define como la abertura del tamiz por donde pasa el 50% del material. El Índice de lajas representa el porcentaje de partículas que presentan su menor dimensión inferior a 0,6 veces su dimensión media. Las partículas lajeadas abarcan una mayor área al momento de ser aplicadas, pero tienden a quebrarse luego del paso de cargas, variando la granulometría del agregado. Mientras más bajo sea este índice, más se acerca el agregado a la forma cúbica.

Finalmente, el factor de desperdicio E permite estimar y cubrir así las pérdidas de agregado por manipulación, descarga o insuficiente uniformidad en la distribución. Depende de la dimensión mínima promedio del agregado (H) y se recomienda utilizar los valores entregados en la Tabla 4.3

Tabla 4.3 "Valores factor de desperdicio E (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)"

FACTOR DE DESPERDICIO E		
H [mm]	% Desperdicio	Factor E
< 6,5	5	1,05
6,5 – 8,0	4	1,04
8,1 – 9,5	3	1,03
> 9,5	2	1,02

➤ Cantidad de Ligante B.

$$B = \frac{K(0,4 * H * T * V + S + A)}{R} \quad (\text{ec. 4.4})$$

Donde:

B = Dosis de ligante [ $l/m^2$ ].

K = Factor de evaluación de condiciones de clima.

H = Dimensión mínima promedio del agregado [mm].

T = Factor de Tránsito

V = Porcentaje de huecos en el agregado. [%]

S = Corrección por textura superficial de la Base.

A = Corrección por absorción del agregado.

R = Residuo asfáltico del ligante, expresado en forma decimal.

La Ecuación 4.4 permite determinar la dosis de ligante B, que se basa principalmente en parámetros físicos y geométricos del agregado. El factor de corrección por absorción del agregado A corresponde a un parámetro referido a la emulsión que cubre las pérdidas de ligante debido a la absorción del agregado. En la práctica, los materiales pétreos utilizados a nivel local tienen porcentajes de absorción muy bajos, por lo que la magnitud de esta pérdida se puede despreciar dentro de los factores que intervienen en la fórmula de diseño ( $A = 0$ ). En caso de utilizar agregados absorbentes se considerará este factor con valores hasta los 0,15 [ $l/m^2$ ].

El factor de evaluación de condiciones de clima K, por su parte corresponde a un factor de corrección que debe ser evaluado en base al clima. Su valor normal es 1,0, pero puede ser mayor o menor según el diseñador. En climas tropicales se ha aplicado 0,9 mientras que en climas muy fríos se usa 1,2. Se podrá utilizar valores intermedios a los anteriores dependiendo el clima de la región donde se ejecute la obra. El Factor de Tránsito T se determina en base al volumen de tránsito, mientras mayor es el volumen de tránsito del camino a tratar menor será la cantidad de asfalto requerida debido a que los huecos existentes tienden a reducirse en condiciones de alto flujo vehicular. En la Tabla 4.4 se entregan los factores recomendados para distintos volúmenes de tránsito expresados en función de tránsito medio diario anual.

Los valores indicados en la Tabla 4.4 corresponden a los estimados para el año de puesta en servicio del tratamiento.

Tabla 4.4 "Factores de tránsito T (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)"

FACTORES DE TRÁNSITO T	
Volumen de Tránsito	Factor T TMDA ( Veh. / día )
< 100	0,85
100 – 500	0,75
500 – 1000	0,70
1000 – 2000	0,65
> 2000	0,60

El parámetro de corrección por textura superficial de la Base S, depende de la textura de la superficie a tratar, es necesario efectuar una corrección a la cantidad de ligante (lts/m<sup>2</sup>) a aplicar

Tabla 4.5 "Corrección por textura superficial (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8)"

CORRECCIÓN POR TEXTURA SUPERFICIAL (S)	
Textura Superficial Existente	Corrección S [l/m <sup>2</sup> ]
Pavimento asfáltico con exceso de asfalto superficial	Hasta -0,3
Pavimento asfáltico de textura cerrada	0,0
Pavimento asfáltico de textura abierta	
1	0,1
2	0,2
3	0,3
4	0,4
5	0,5
Base granular imprimada	0,0 – 0,2

Finalmente se determina el residuo asfáltico del ligante R, expresado en forma decimal, valor que se determina mediante ensayos a la emulsión. Para emulsiones catiónicas de quiebre rápido (CRS-2) es común utilizar R = 0,65.

Cuando se diseñan tratamientos múltiples es necesario destacar que:

- i. Las cantidades de agregado y de asfalto requeridas para el tratamiento se calculan para cada capa como si se tratara de tratamientos simples independientes entre sí.

- ii. Una vez calculada la dosis de cada aplicación, el resultado obtenido para la dosificación del agregado corresponderá a la misma que se utilizará en la construcción de cada una de las capas.
- iii. La dosis de ligante asfáltico se distribuirá privilegiando un mayor contenido para las capas superiores.
- iv. Para un tratamiento doble se sumarán ambas dosificaciones de ligante, y se aplicará entre un 40 y 45 % del total en la capa inferior, mientras que se aplicará entre un 60 y 55 % en la superior.
- v. Para el caso de un tratamiento triple la dosificación por capa corresponderá a un 30, 40 y 30% del total, para la primera, segunda y tercera aplicación respectivamente.

## 4.2 Lechada asfáltica.

Las lechadas asfálticas, son mezclas constituidas por áridos bien graduados, emulsión asfáltica, filler y agua. Los requerimientos para obtener una mezcla de lechada asfáltica con un buen desempeño se encuentran estipulados en la sección 5.406 del MC.

### 4.2.1 Áridos en lechada asfáltica.

Los áridos utilizados en lechadas asfálticas, deberán ser limpios, angulares y bien graduados. Áridos limpios son aquéllos libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas. Los áridos deberán ser chancados, aceptándose la incorporación de arena natural hasta 20% del total del árido. Los áridos deberán cumplir con los requisitos de la Tabla 4.6 y las bandas granulométricas la que se especifica en la Tabla 4.7.

Tabla 4.6 "Requisitos de los áridos para lechada asfáltica (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)"

REQUISITOS PARA LECHADA ASFÁLTICA		
Ensayes	Exigencia	Método
Equivalente Arena	8.202.9	Mínimo 45%
Índice Plasticidad	8.102.4	NP
Adherencia Riedel-Weber	8.302.30	0 – 5
Índice de Trituración Total	8.202.8	Máximo. 3.5%
Adherencia Método Estático	8.302.29	Mínimo 95%
Partículas Chancadas	8.202.6	Mínimo 90%

Tabla 4.7 "Bandas granulométricas para lechada asfáltica (Fuente: Manual de Carretera Volumen 5.)"

BANDAS GRANULOMÉTRICAS					
NCh (mm)	(ASTM)	Tipo A-1	Tipo B-1	Tipo C-1	Tipo D-1
12,5	(1/2")	-	-	-	100
10,0	(3/8")	-	100	100	85-98
5,0	(N°4)	100	85-95	70-90	62-80
2,5	(N°8)	85-95	62-80	45-70	41-61
1,25	(N°16)	60-80	45-65	28-50	28-46
0,63	(N°30)	40-60	30-50	18-34	18-34
0,315	(N°50)	25-42	18-35	12.-25	11.-23
0,16	(N°100)	15-30	10.-24	7.-17	6.-15
0,08	(N°200)	10.-20	5.-15	5.-11	4.-9

En la Tabla 4.7 se señalan las bandas granulométricas utilizadas en lechadas asfálticas, la banda A-1 es útil para el sellado de grietas y para sello fino como primera capa. Las granulometrías B-1 y C-1 se pueden emplear como sello para aumentar la textura. La granulometría D-1 se usará sobre Tratamiento Superficial Simple. Ahora bien, la banda granulométrica utilizada en este Trabajo de Título sobre el TSS será la banda C-1 ya que ésta presenta áridos más finos con respecto a la D-1, con la cual podría obtener una mayor trabazón de los agregados y a la vez un mejor desempeño frente a las cargas de tránsito.

#### 4.2.2 Emulsiones para Lechada Asfáltica.

En las lechadas asfálticas deberán utilizarse emulsiones asfálticas de quiebre lento, de los tipos CSS-1, CSS-1h, SS-1, SS-1h, y CSS-1h de quiebre controlado, que cumplan con las especificaciones descritas en los Tópicos 8.301.4 (Especificaciones para emulsiones asfálticas aniónicas) ó 8.301.5 (Especificaciones para emulsiones asfálticas catiónicas) según el Volumen 5.405. 201 del MC.

#### 4.2.3 Agua para Lechada Asfáltica.

En lechadas asfálticas el agua debe cumplir con estándares mínimos especificados en el numeral 5.406.201(4) del MC el que indica que el agua debe ser potable, compatible con la mezcla de la lechada asfáltica, debe estar libre de materias orgánicas, sales nocivas y otros contaminantes.

#### 4.2.4 Método de diseño para Lechada Asfáltica.

El procedimiento de dosificación empleado por el Laboratorio Nacional de Vialidad, para el diseño de lechadas asfálticas corresponde al "método de diseño de lechadas asfálticas y microaglomerados asfálticos en frío" que está definido en el numeral 8.302.52 del MC, el que determina el contenido óptimo de emulsión en base a los métodos:

- Abrasión en Medio Húmedo (AMH), según Método 8.302.46
- Ensaye de Rueda de Carga, según Método 8.302.53.

##### 4.2.4.1 Método de diseño de lechadas asfálticas y microaglomerados asfálticos en frío. Método 8.302.52.

Este método describe el procedimiento metodológico para determinar el contenido teórico de emulsión, el diseño preliminar es básicamente una estimación del contenido de asfalto para no sobrepasar los agregados con emulsión, el contenido de emulsión teórico se determina como se define en la Ecuación 4.5:

$$Et = \left( \frac{4,5 * \sqrt[5]{Superficie Específica}}{R} \right) - 1 \quad (\text{ec. 4.5})$$

Donde:

Et: Contenido de emulsión teórico referido al agregado seco en %

SE: Superficie Específica del agregado seco.

R: Residuo asfáltico de la emulsión (expresado en forma decimal)

La superficie específica es una propiedad de los sólidos la cual es la relación entre el área superficial total y la masa del sólido, o volumen bruto, o área en la sección transversal. La superficie específica se determinará de acuerdo a la Ecuación 4.6.

$$Superficie\ específica = \frac{0.17 * a + 0.33 * b + 2,3 * c + 12 * d + 135 * e}{100} [m^2/kg] \quad (\text{ec. 4.6})$$

Donde:

a = Porcentaje de árido mayor que 10 mm.

b = Porcentaje que pasa por tamiz 10 mm y queda retenido en 5 mm.

c = Porcentaje que pasa por tamiz 5 mm y queda retenido en 0,315 mm.

d = Porcentaje que pasa por tamiz 0,315 mm y queda retenido en 0,08 mm.

e = Porcentaje que pasa por tamiz 0,08 mm.

#### 4.2.4.2 Consistencia de lechadas asfálticas.

Una vez determinado el contenido teórico de emulsión, se debe determinar la consistencia de la lechada según el Método 8.302.45

Usando el contenido de emulsión teórico, se varia la cantidad de agua necesaria para obtener un desplazamiento de la mezcla. La cantidad de agua incorporada corresponde al agua de premezclado expresada en porcentaje (%), referida al agregado seco, este valor se registra como W1, aproximando a un decimal. Finalmente se calcula en porcentaje de agua en la mezcla W que no es mas que el agua de premezclado determinada anteriormente más el agua contenida indirectamente en la emulsión, el porcentaje total de agua se calcula como se define en la Ecuación 4.7.

$$W = W1 + Et * (1 - R) \quad (\text{ec. 4.7})$$

Donde:

W: Porcentaje de agua en la mezcla

W1: Porcentaje de agua de premezclado, referido al agregado seco

Et: Contenido de emulsión teórico, referido al agregado seco en %

R: Residuo asfáltico de la emulsión (expresado en forma decimal)

Para determinar el porcentaje de agua, se recomienda comenzar probando con un valor correspondiente al 2% menos que el valor de la emulsión teórica, calculada en el punto 4.2.4.1. Por ejemplo, si el porcentaje de emulsión teórica es de 11%, el porcentaje de agua de premezclado será de un 9%. Manteniendo constante el porcentaje de agua de premezclado calculado anteriormente, se varia (aumente o disminuya) el contenido (%) de emulsión respecto

del teórico obtenido (se recomienda inicialmente aumentar y disminuir 1 punto porcentual). La cantidad de agua de premezclado determina la trabajabilidad de las lechadas asfálticas.

Sobre una placa de escurrimiento (Figura 4.2) se pone un molde troncocónico de  $40 \pm 3$  mm de diámetro interno en la parte superior,  $90 \pm 3$  mm de diámetro interno en la parte inferior y  $75 \pm 3$  mm de altura. Este se coloca con el diámetro mayor hacia abajo y centrado, luego se deposita la mezcla de lechada asfáltica en el molde y se levanta de manera vertical, dejando desplazar la mezcla sobre la placa de escurrimiento. Se registra el desplazamiento en centímetros (con aproximación de 0,5) tomando el promedio de cuatros puntos que deja la escala de círculos. Cuando el promedio se encuentre entre 2-3, se entenderá que la mezcla de lechada asfáltica tiene una consistencia adecuada de trabajo, y el porcentaje de agua agregado será el indicado.

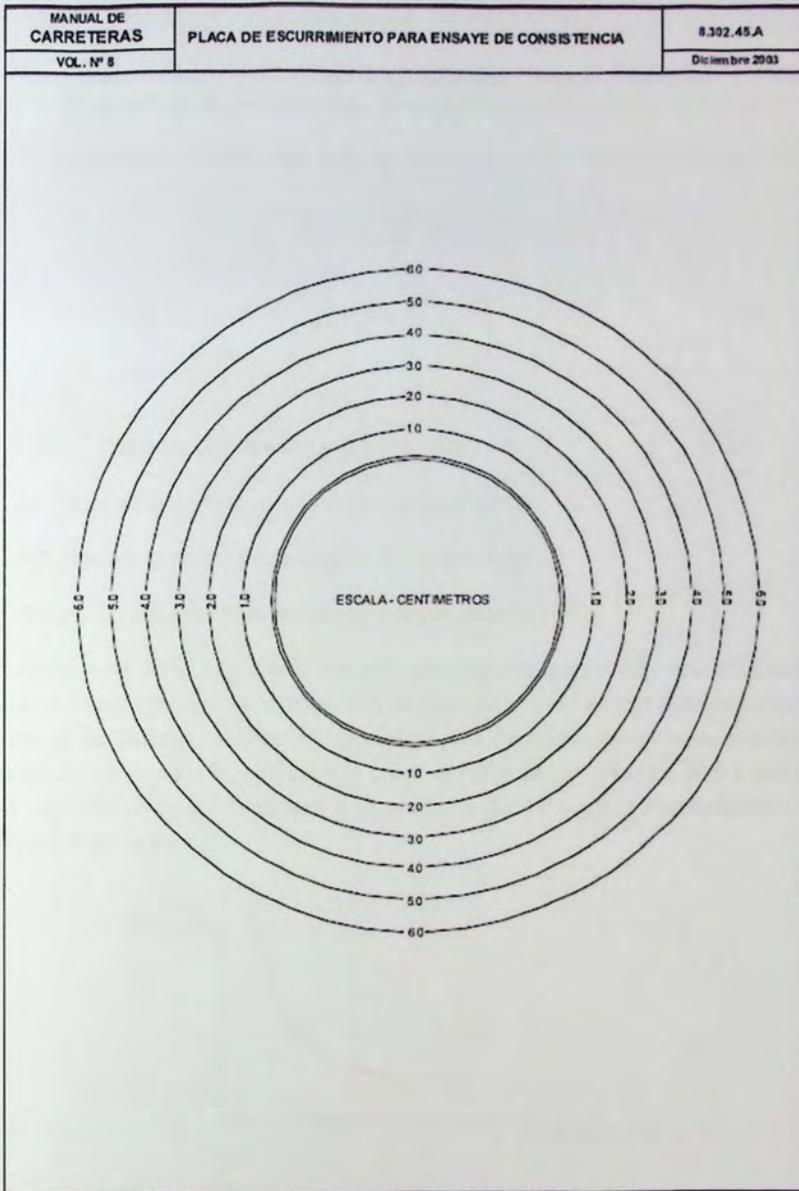


Figura 4.2 "Placa de escurrimiento para ensaye de consistencia de lechadas asfálticas (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)"

#### 4.2.4.3 Desgaste por Abrasión Medio Húmedo (AMH)

Una vez determinado el porcentaje de agua, se debe construir, un gráfico de AMH [ $\text{g}/\text{m}^2$ ] en función del porcentaje de emulsión, considerando una pérdida máxima de  $540 \text{ g}/\text{m}^2$ .

El desgaste por abrasión bajo agua se determina con la Ecuación 4.8, aproximando al entero

$$D. B. A = \frac{M_i - M_f}{A} \quad (\text{ec. 4.8})$$

donde:

D.B.A.: Desgaste por abrasión bajo agua ( $\text{g}/\text{m}^2$ ).

M<sub>i</sub>: Masa de la probeta seca antes del desgaste (g).

M<sub>f</sub>: Masa de la probeta seca después del desgaste (g).

A: Área de desgaste de la probeta de lechada asfáltica ( $\text{m}^2$ ).

El desgaste de lechadas asfálticas está directamente relacionado con el contenido de emulsión. A menor cantidad de emulsión asfáltica, mayor será el desgaste o desprendimiento de partículas en las lechadas asfálticas y viceversa, para un contenido de agua constante. Los porcentajes de emulsión utilizados deberán cubrir el rango de exigencia de AMH, que permita obtener una curva como la mostrada en la Figura 4.3 la que debe cubrir adecuadamente la zona o rango de trabajo requerido.

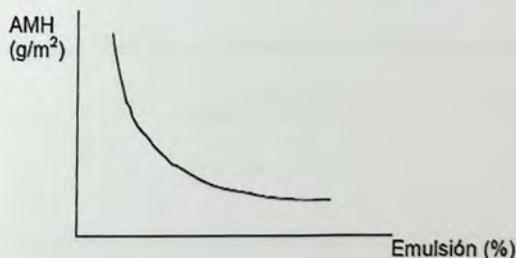


Figura 4.3 " AMH en función del porcentaje de emulsión para un contenido de agua total constante (Fuente: Curso laboratorista MOP.)"

#### 4.2.4.4 Rueda de Carga.

Este ensayo permite verificar el comportamiento en servicio, el cual se usa para determinar la tendencia de la lechada a exudar, detectando dosis excesivas de asfalto. El objetivo de la rueda no es desgastar la lechada sino sobrecompactarla, forzando al ligante a fluir hacia la superficie. Se deben emplear los mismos porcentajes de emulsión utilizados para el método de abrasión, se determina la cantidad de arena adherida a la probeta para cada uno de ellos según el Método 8.302.53.

En este ensaye se usan probetas rectangulares previamente moldeadas y curadas, las que son colocadas bajo la acción de una rueda neumática cargada (56 kg) que pasa en forma cíclica sobre la superficie de la probeta. Una vez que se han realizado 1000 ciclos, se colocan 300 grs. de arena caliente normalizada sobre la superficie de la probeta y se repiten 100 ciclos adicionales. La arena se pegará a la superficie de acuerdo al nivel de exudación presentado por la probeta. Mientras más exude la lechada, mayor cantidad de arena quedará adherida. El máximo de arena adherida corresponderá al indicado en la Tabla 4.8, el cual se determina en base al tránsito medio diario anual el que se define como el volumen de tránsito total anual dividido por el número de días del año.

Tabla 4.8 " Cantidad máxima de arena adherida (Fuente: Manual de Carretera Volumen 8) "

CANTIDAD DE ARENA ADHERIDA	
TMDA (Veh/día)	Adhesión de Arena g/m <sup>2</sup> Max.
< 500	750
500 a 1000	650
>1000	540

La cantidad de arena adherida a la probeta se determina de acuerdo a la expresión.

$$S_a = \frac{M_i - M_f}{A} \quad (\text{ec. 4.9})$$

donde:

S<sub>a</sub>: Cantidad de arena adherida a la probeta (g/m<sup>2</sup>).

M<sub>i</sub>: Masa inicial de la probeta (g).

M<sub>f</sub>: Masa final de la probeta (g).

A : Área de probeta para adherencia de arena (m<sup>2</sup>).

El área A se calcula a partir de las dimensiones indicadas en la Lámina. De acuerdo a esto, el valor del área por considerar en la expresión anterior es 0,01355 m<sup>2</sup>. Con la información reunida, se construye un gráfico, como el mostrado en la Figura 4.4, de arena adherida [g/m<sup>2</sup>] en función del porcentaje de emulsión, para un porcentaje de agua total constante, a mayor contenido asfáltico, mayor es la tendencia de la mezcla a exudar.

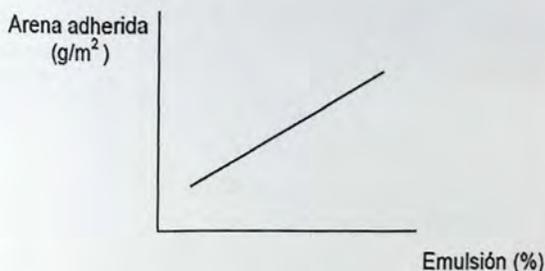


Figura 4.4 " Arena adherida en función del porcentaje de emulsión para un contenido de agua total constante (Fuente: Curso laboratorista MOP.)"

#### 4.2.4.5 Determinación de contenido óptimo de asfalto

El contenido de asfalto se determina mediante los resultados del Método 8.302.46: Método de abrasión en medio húmedo y el Método 8.302.53: Método de la rueda carga descritos anteriormente. A su vez existen dos criterios para la determinación del contenido óptimo de emulsión:

##### Criterio 1:

- Determinar el contenido mínimo de asfalto de acuerdo al ensayo de abrasión en Medio Húmedo considerando una pérdida máxima de 540 g/m<sup>2</sup>.
- Determinar el contenido máximo de asfalto según el ensayo de rueda cargada.
- Determinar el contenido óptimo como el promedio del rango óptimo.

Criterio 2:

- Determinar el contenido óptimo con el punto que se intercepta las curvas. Como se muestra en la Figura 4.5

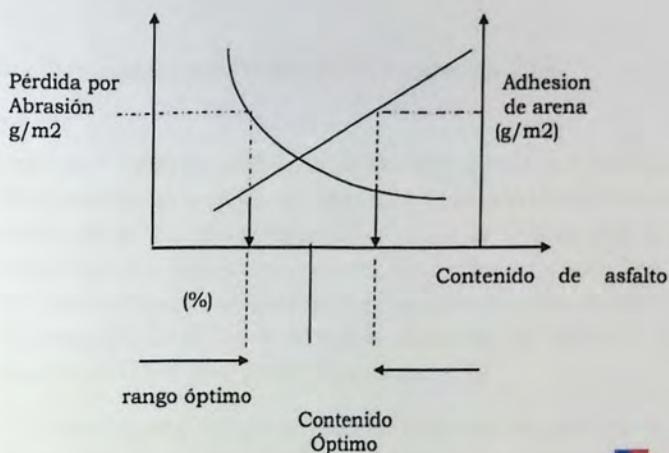


Figura 4.5 "Determinación del contenido óptimo de asfalto (Fuente: Curso laboratorista MOP.)

La dosificación deberá validarse mediante el tramo de prueba a que se encuentra estipulado en el Numeral 5.406.303. El tramo tendrá un mínimo de 100 metros de largo por una pista de ancho, en una superficie de similares características al camino.

La tolerancia en el diseño de la lechada será de:

- $\pm 2,0$  puntos porcentuales para el agua.
- $\pm 0,5$  puntos porcentuales para la emulsión.

### 4.3 Sello Cape Seal. Sección 5.404

Un sello tipo cape seal, que está constituido por una primera capa de TSS, en conformidad con lo dispuesto en la Sección 5.407, y una segunda capa de lechada asfáltica, en conformidad con lo dispuesto en la Sección 5.406. Los requisitos de agregados pétreos y el diseño corresponden a los detallados en los numerales 4.1 y 4.2 de este trabajo de título.

## Capítulo V

### **Cálculo de dosificaciones para tramos de prueba de TSS a desarrollar en programa de caminos básicos en la región de Valparaíso.**

#### **5.1 Dosificaciones con áridos tradicionales en TSS.**

En la Región de Valparaíso, el Río Aconcagua corresponde a la principal fuente de extracción de áridos destinados a capas de protección, presentándose en un 62 % de los proyectos controlados por el laboratorio regional de vialidad de Viña del Mar entre los años 2014 y 2016. Estos áridos son extraídos por plantas como Pétreos Concón, Tres Esquinas y Planta Maggi. El estero la Patagua, ubicado en la comuna de la Ligua, se presenta como la segunda zona de extracción de áridos de la región, registrando en un 22 % de los casos controlados, siendo Tricam la principal planta de extracción. [28]

Para el desarrollo de este trabajo de título se utilizarán dos áridos para TSS. Uno proveniente del río Aconcagua y el otro del estero la Patagua, principales fuentes de extracción de la región de Valparaíso.

##### **5.1.1 Granulometría de áridos tradicionales para TSS.**

La granulometría se define como la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un agregado pétreo. Para determinar esto se requiere realizar el análisis mediante tamizado dependiendo de la banda de trabajo a utilizar. El procedimiento de tamizado y determinación de la granulometría está descrito en el Volumen 8 sección 8.202.3 del MC, el cual es aplicable a los pétreos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas según el mismo manual. Los datos se registran en función de los pesos retenidos con lo que es posible determinar los porcentajes retenidos, porcentajes acumulados retenidos y porcentajes acumulados que pasan para cada abertura de tamiz.

Para el desarrollo de este trabajo de título se utilizan los áridos provenientes del estero la Patagua y el río Aconcagua. A estos áridos se verifica el cumplimiento de la banda utilizada para TSS resultados que son constatados en la Tabla 5.1 y la Tabla 5.2. La banda tradicionalmente utilizada para TSS corresponde a la banda TN 10-2,5.

Tabla 5.1 "Granulometría para árido del río Aconcagua"

GRANULOMETRÍA RÍO ACONCAGUA							
Nch [mm]	ASTM	Peso retenido [gr]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]	Banda utilizada [TN 10-2,5]		ESTADO
12.5	1/2	-	-	100	100	100	Cumple
10	3/8	-	-	100	85	100	Cumple
6.3	1/4	1500	30	70	-	-	-
5	# 4	2300	46	24	10	30	Cumple
2.5	# 8	1150	23	1	0	10	Cumple
0.08	# 200	35	0.7	0.3	0	0.5	Cumple
R		0	0.3	-	-	-	-

Tabla 5.2 "Granulometría para árido de estero la Patagua"

GRANULOMETRÍA ESTERO LA PATAGUA							
NCh [mm]	ASTM	Peso retenido [gr]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]	Banda utilizada [TN 10-2,5]		ESTADO
12.5	1/2	-	-	100	100	100	Cumple
10	3/8	585	12	88	85	100	Cumple
6.3	1/4	2376	48	40	-	-	-
5	# 4	1186	24	16	10	30	Cumple
2.5	# 8	730	15	1	0	10	Cumple
0.08	# 200	49.6	1	0.14	0	0.5	Cumple
R		7	0	-	-	-	-

Ahora bien, el árido del Estero La Patagua, posee una granulometría un poco más gruesa que para el Río Aconcagua, registrando un 12 % del peso retenido en el tamiz 3/8". Esto depende del procedimiento de chancado y las necesidades constructivas (granulometrías dentro de las bandas de trabajo). En las Figuras 5.1 y 5.2 se detalla el cumplimiento a las bandas granulométricas requeridos para el árido tradicional en TSS.



Figura 5.1 "Granulometría río Aconcagua"



Figura 5.2 "Granulometría estero la Patagua"

Se concluye que ambas granulometrías satisfacen los requerimientos indicados en el inciso 5.407.202 del MC, que en su conjunto da cumplimiento a banda granulométrica utilizada para TSS.

### 5.1.2 Requisitos de agregados pétreos de áridos tradicionales para TSS.

Se realizaron los ensayos requeridos a los agregados pétreos provenientes del río Aconcagua y el estero La Patagua, los resultados de estos se detallan en las Tablas 5.3 y 5.4 respectivamente.

Tabla 5.3 "Requisitos de agregados pétreos para el árido proveniente del río Aconcagua"

REQUISITOS PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES RÍO ACONCAGUA				
Ensayes	Unidad	Resultado	Exigencia	Método
Densidad Aparente	(DA)	1463.6	-	-
Densidad Real Seca	(DRS)	2626.7	-	-
Índice de Lajas	(IL)	15%	Máximo 30 %	8.202.7
Desgaste de Los Ángeles	(%)	13.8%	Máximo 25 %	8.202.11
Desintegración con sulfato de sodio	(%)	0.22%	Máximo 12 %	8.202.17
Partículas Chancadas	(%)	90.6%	Mínimo 70 %	8.202.6
Partículas Lajeadas	(%)	0.6%	Máximo 10 %	8.202.6
Adherencia método estático	(%)	100%	Mínimo 95 %	8.302.29
Finos por Lavado	(%)	0.31%	Máximo 0.5 %	8.202.4

Tabla 5.4 "Requisitos de agregados pétreos para el árido proveniente del estero La Patagua"

REQUISITOS PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES ESTERO LA PATAGUA				
Ensayes	Unidad	Resultado	Exigencia	Método
Densidad Aparente	(DA)	1512.9	-	-
Densidad Real Seca	(DRS)	2693.1	-	-
Índice de Lajas	(IL)	18%	Máximo 30 %	8.202.7
Desgaste de Los Ángeles	(%)	15.8%	Máximo 25 %	8.202.11
Desintegración con sulfato de sodio	(%)	0.20%	Máximo 12 %	8.202.17
Partículas Chancadas	(%)	100%	Mínimo 70 %	8.202.6
Partículas Lajeadas	(%)	5%	Máximo 10 %	8.202.6
Adherencia método estático	(%)	100%	Mínimo 95 %	8.302.29
Finos por Lavado	(%)	0.43%	Máximo 0.5 %	8.202.4

Ambos áridos cumplen con las exigencias de agregados pétreos para TSS, estipulados en el MC.

### 5.1.3 Dosificación de áridos tradicionales para TSS.

En TSS una vez cumplidas las exigencias de agregados pétreos como son las características y propiedades exigidas en el capítulo 5.12 y los requisitos granulométricos que se indican en el capítulo 5.11, es posible dosificar un TSS mediante el “método de diseño de tratamientos superficiales” estipulado en la sección 8.302.50 de MC, basado en el procedimiento de la “dimensión mínima promedio”.

#### 5.1.3.1 Dosificaciones del río Aconcagua para TSS.

El procedimiento de las dosificaciones para TSS se encuentra descrito en el capítulo 4 en el punto 4.13 de este trabajo de título.

##### A. Dosificación de agregado.

$$C = M * H * Drs * E * (1 - 0,4V) \quad (\text{ec. 5.1})$$

Donde:

- Factores de Diseño del Agregado.

Tabla 5.5 “Factores utilizados para le diseño del agregado”

Factor de evaluación de agregado	(M)	0.9
Factor de desperdicio	(E)	1.05

- Porcentaje de huecos en el agregado.

$$V = 1 - \frac{Da}{Drs} \quad (\text{ec. 5.2})$$

$$(V) \quad 0,44 \%$$

- Tamaño medio del agregado

$$TM = 10^{[\log(a1) - [\log(a1) - \log(a2)] * \frac{(b1 - 50)}{(b1 - b2)}]} \quad (\text{ec. 5.3})$$

a1	6.3
a2	5
b1	70
b2	24
log (a1)	0.799
log (a2)	0.699

$$(TM) \quad 5.698$$

- Dimensión mínima promedio del agregado

$$H = \frac{TM}{(1.09 + (0,0118 * IL))} \quad (\text{ec. 5.4})$$

$$(H) \quad 5.219$$

Finalmente reemplazando en la Ecuación 5.1.

$$C \text{ (kg/m}^2\text{)} \quad 10,7$$

### **B. Dosificación de Asfalto.**

$$B = \frac{K * (0,4 * H * T * V + S + A)}{R} \quad (\text{ec. 5.5})$$

- Factores de Diseño del Asfalto.

Tabla 5.6 "Factores utilizados para el diseño del asfalto"

Factor de Evaluación de Asfalto	(K)	1
Factor de Tránsito	(T)	0.65
Corrección Textura Superficial	(S)	0.1
Corrección Absorción de Agregado	(A)	0
Residuo Asfáltico	(R)	0.651

Finalmente remplazando en la Ecuación 5.5.

$$B \text{ (l/m}^2\text{)} \quad 1.08$$

### 5.1.3.2 Dosificación del estero La Patagua para TSS.

El procedimiento de las dosificaciones para TSS se encuentra descrito en el capítulo 4 en el punto 4.13 de este trabajo de título.

#### A. Dosificación de agregado.

$$C = M * H * Drs * E * (1 - 0,4V) \quad (\text{ec. 5.6})$$

Donde:

- Factores de Diseño del Agregado.

Tabla 5.7 " Factores utilizados para el diseño del agregado"

Factor de Evaluación de Agregado	(M)	0.9
Factor de Desperdicio	(E)	1.05

- Porcentaje de huecos en el agregado.

$$V = 1 - \frac{Da}{Drs} \quad (\text{ec. 5.7})$$

$$(V) \quad 0,44$$

- Tamaño medio del agregado

$$TM = 10^{[\log(a1) - [\log(a1) - \log(a2)] * \frac{(b1 - 50)}{(b1 - b2)}]} \quad (\text{ec. 5.8})$$

a1	10
a2	6.3
b1	88
b2	40
log (a1)	1.000
log (a2)	0.799

$$(TM) \quad 6.935$$

- Dimensión mínima promedio del agregado

$$H = \frac{TM}{(1.09 + (0,0118 * IL))} \quad (\text{ec. 5.9})$$

$$(H) \quad 5,325$$

Finalmente reemplazando en la Ecuación 5.6.

$$C \text{ (kg/m}^2\text{)} \quad 11,6$$

### B. Dosificación de Asfalto.

$$B = \frac{K * (0,4 * H * T * V + S + A)}{R} \quad (\text{ec. 5.10})$$

## Factores de Diseño del Asfalto.

Tabla 5.8 "Factores utilizados para el diseño del asfalto"

Factor de Evaluación de Asfalto	(K)	1
Factor de Tránsito	(T)	0.65
Corrección Textura Superficial	(S)	0.1
Corrección Absorción de Agregado	(A)	0
Residuo Asfáltico	(R)	0.651

Finalmente remplazando en la Ecuación 5.10.

$$B \text{ (l/m}^2\text{)} = 1.12$$

## 5.2 Dosificaciones de la escoria de cobre para TSS.

### 5.2.1 Granulometría de la escoria de cobre para TSS.

Con respecto a la escoria de cobre, este material se vierte en lugares cercanos a la fundición, a su vez la variedad de tamaños presentes en estos sectores es muy variado (ver Figura 5.3), por ende, es necesario realizar la caracterización granulométrica del material.



Figura 5.3 "Condición de la escoria de cobre en el patio de acopio CODELCO Ventanas"

Estudiar la escoria de cobre en su condición de extracción permite evaluar su sustentabilidad y validar su utilización para carpetas asfálticas, para esto es necesario verificar su granulometría. Los resultados obtenidos para su condición de extracción entregan los resultados que se detallan en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 "Verificación de banda granulométrica para el uso de escoria de cobre en TSS"

VERIFICACIÓN DE BANDA GRANULOMÉTRICA					
Bandas		Tratamiento Superficial Simple			
NCh (mm)	(ASTM)	Banda TN 10 - 2.5		% que pasa	Estado
12,5	(1/2")	100	100	100	Cumple
10,0	(3/8")	85	100	100	Cumple
6,3	(1/4)	N.A	N.A	N.A	No Cumple
5,0	(N°4)	10	30	63.6	No Cumple
2,5	(N°8)	0	10	38.1	No Cumple
1,25	(N°16)	N.A	N.A	20.5	No Cumple
0,63	(N°30)	N.A	N.A	11.2	No Cumple
0,315	(N°50)	N.A	N.A	5.5	No Cumple
0,16	(N°100)	N.A	N.A	2.6	No Cumple
0,08	(N°200)	0	0.5	0.53	No Cumple
NA. La banda no aplica para el tipo de tratamiento especificado					

En la Tabla 5.9, se detallan los resultados obtenidos para la utilización de la escoria, estos requisitos no cumplen con las bandas TN 10-2,5 para TSS. Utilizar este material no resulta aceptable, debido a la variedad de tamaños, además el material muestreado corresponde sólo a una zona específica del patio de acopio de CODELCO Ventanas y no representa el estado general de este material en el sector. Por lo que es necesario chancar y selecciones el material por tamices para la realización de los ensayos de agregados pétreos para TSS.

## 5.2.2 Requisitos de agregados pétreos de la escoria de cobre para TSS.

En este capítulo se evalúan las exigencias requeridas para la utilización de la escoria de cobre como agregado pétreo, propiedades como su masa y forma, desgaste y adherencia para su utilización en TSS. La utilización de escoria en su estado de extracción no es viable, por lo que es necesario reproducir la granulometría. Para lograr esto, es necesario chancar y seleccionar la escoria de cobre con respecto a los porcentajes retenidos por tamiz del apartado 5.1.1, ahora bien, dependiendo del ensayo a realizar es que se obtiene el tamaño de la muestra en escoria de cobre.

Los resultados de las Tabla 5.10 y 5.11 detallan las características del árido tradicional y de la escoria de cobre, dados los requisitos de agregados pétreos para TSS según las exigencias del MC. Los ensayos fueron realizados para la escoria de cobre reproducida y comparada con los resultados obtenidos para los áridos tradicionales que se señalan en el capítulo 5.1.2 de este trabajo de título.

Tabla 5.10 "Resultados de ensayos para Agregados pétreos según granulometría del Rio Aconcagua"

RÍO ACONCAGUA					
Ensayes	Unidad	Escoria de cobre	Árido tradicional	Exigencia	Razón Escoria/Árido
Densidad Aparente	(kg/m <sup>3</sup> )	2096,6	1463,6	-	1,43
Densidad Real Seca	(kg/m <sup>3</sup> )	3816,7	2626,7	-	1,45
Índice de Lajas	(%)	18,2%	15%	Máximo 30 %	1,21
Desgaste de Los Angeles	(%)	19,4%	13,8%	Máximo 25 %	1,41
Desintegración con sulfato de sodio	(%)	0,03%	0,22%	Máximo 12 %	0,14
Partículas Chancadas	(%)	100%	91%	Mínimo 70 %	1,1
Partículas Lajeadas	(%)	4,5%	1%	Máximo 10 %	7,50
Adherencia método estático	(%)	100%	100%	Mínimo 95 %	1,00
Finos por Lavado	(%)	0,10%	0,31%	Máximo 0.5 %	0,33

Tabla 5.11 "Resultados de ensayos de agregados pétreos según granulometría de Estero La Patagua"

ESTERO LA PATAGUA					
Ensayes	Unidad	Escoria de cobre	Árido tradicional	Exigencia	Razón Escoria/Árido
Densidad Aparente	(kg/m <sup>3</sup> )	2094,2	1512,9	-	1,38
Densidad Real Seca	(kg/m <sup>3</sup> )	3820,7	2693,1	-	1,42
Índice de Lajas	(%)	17,2%	14,2%	Máximo 30 %	1,21
Desgaste de Los Angeles	(%)	20,1%	15,8%	Máximo 25 %	1,27
Desintegración con sulfato de sodio	(%)	0,02%	0,20%	Máximo 12 %	0,10
Partículas Chancadas	(%)	100%	100%	Mínimo 70 %	1
Partículas Lajeadas	(%)	3,5%	5%	Máximo 10 %	0,66
Adherencia método estático	(%)	100%	100%	Mínimo 95 %	1
Finos por Lavado	(%)	0,25%	0,43%	Máximo 0.5 %	0,58

## Análisis de Resultados.

- La escoria de cobre cumple con todas sus exigencias para agregados pétreos para TSS estipuladas en el MC.
- Con respecto a la densidad aparente suelta escoria de cobre resulta 1,43 veces más denso que el árido tradicional, lo que puede generar consecuencia a la hora del traslado de material a su destino final, ya que al ser más pesado genera un mayor gasto de combustible. Además, una mayor densidad podría afectar en los valores de dosificación de agregado y ligante asfáltico para el diseño en TSS, a la hora de determinar el índice de huecos del agregado (V).
- Los valores de densidad real seca de la escoria de cobre están por sobre los 3800 [kg/m<sup>3</sup>], mientras que los valores de densidad del árido tradicional están por sobre los 2600 [kg/m<sup>3</sup>], la escoria de cobre resulta un 30% más denso en su condición seca tanto para el río Aconcagua y el estero la Patagua.
- Las escorias reproducidas arrojan porcentajes de Índice de Laja muy similar a los áridos tradicionales, el índice de lajas representa el porcentaje en peso de partículas que tienen un espesor (dimensión mínima) inferior a 0,6 veces la dimensión media de la fracción de agregado considerada. La escoria chancada exhibe 1.21 veces más peso de partículas de espesor inferior a 0,6 veces la dimensión media. Estos resultados influyen directamente en el contenido de agregado y de emulsión, ya que un menor porcentaje de índice lajeado disminuye el valor de Dimensión Mínima Promedio del agregado (H) en el diseño de TSS.
- El desgaste de Los Ángeles permite determinar la resistencia al desgaste de los pétreos mayores a 2,5 mm, este ensayo es aplicable a pétreos de densidad neta entre 2.000 y 3.000 kg/m<sup>3</sup>, especificación que no es aplicable a la escoria de cobre, ya que su densidad neta ronda los 3500 kg/m<sup>3</sup>. El ensayo se realizó de todas maneras, pero se validó mediante el ensayo de trituración como lo especifica el MC. La escoria presenta un porcentaje de desgaste de los ángeles que está entre un 20-30 % más de desgaste que el árido tradicional. Si bien resultados muy elevados de desgaste podrían reflejar un árido que no responderá de buena manera ante abrasión, valores muy bajos de desgaste podrían evidenciar la presencia de un árido demasiado duro, lo que a la larga produciría problemas en el proceso de chancado de material. Aun así la escoria de cobre cumple con la exigencia de un máximo de 25% de desgaste. Al momento de la realización del ensayo, la escoria al ser más densa puede presentar mayor fractura dentro de la máquina de desgaste, ya que los golpes y la agresividad del ensayo puede haber ocasionado los resultados entregados por este ensayo, justificando el mayor desgaste de la escoria con respecto al árido tradicional.
- La desintegración por sulfato de sodio, que consiste en calcular la desintegración como pérdida de masa para la escoria y el árido tradicional, el cual fue sometido a ciclos sucesivos de inmersión sobre sulfato de sodio (ensayo que emula los

cambios drásticos de temperatura, como lo son los ciclos de hielo y deshielo), arrojó resultados muy bajos para la escoria de cobre, lo que se evidenció por la baja pérdida de masa provocada por el sulfato de sodio. La escoria de cobre cumple totalmente la exigencia de un máximo de 12% de desintegración.

- La presencia de material chancado para la escoria de cobre cumple la exigencia del 75% requerido para TSS. La totalidad del material de escoria presenta al menos dos o más caras fracturadas, lo que define al material en su totalidad como chancado. Este parámetro depende de la procedencia del material, la escoria fue sometida a un proceso de chancado lo que justifica el elevado porcentaje de material chancado, por otro lado, en su condición sin chancar es difícil que se presente un material del tipo canto rodado, ya que no existe un proceso natural que haga que la escoria se erosione en el tiempo para adquirir esta característica, como ocurre para las rocas provenientes de cauces naturales, las que alcanza esta característica por los efectos erosivos (como fuerzas de transporte, agua o gravedad). Está comprobado en áridos, que el chancado de material produce un árido de forma irregular y con capacidad de trabazón de los agregados, que las muestras que contienen alto contenido de partículas rodadas.
- El porcentaje de partículas lajeadas de 3,5 y 4,5 % de la escoria de cobre reproducida del estero La Patagua y el río Aconcagua arrojados por los ensayos de cubocidad de partículas, no supera el 5% de exigencia para TSS. De igual manera que el material chancado, la presencia de partículas lajeadas depende mucho de la procedencia del árido. La baja presencia de lajas origina un pétreo que en su conjunto no se fractura con facilidad frente al paso de los vehículos, un bajo porcentaje de elementos lajeados provee una carpeta más homogénea y no genera desgaste o desprendimiento de partículas en el corto plazo.
- Los resultados de 0,1 y 0,25 % de material fino por lavado para la escoria de cobre reproducida para el río Aconcagua y el estero la Patagua respectivamente cumplen con el máximo de 0.5% de exigencia, este método determina el contenido de material fino compuesto por partículas inferiores a 0,080 mm en los pétreos, ensayo realizado en condición de lavado de material. Los resultados obtenidos para los árido tradicionales del estero La Patagua y río Aconcagua evidencian porcentajes mayores de material fino por lavado que la escoria de cobre, esto puede deberse a que por una parte la escoria de cobre tiene un menor porcentaje de absorción por lo que no absorbe la humedad y a su vez no permite la adherencia de partículas finas.
- Con respecto a la adherencia por método estático, la escoria de cobre presentó un comportamiento similar al árido tradicional, ya que el ligante asfáltico adhirió y cubrió en su totalidad las granulometrías reproducidas, dando cumplimiento a la adherencia exigida de un mínimo de 95% requerido para TSS.

### 5.2.3 Dosificaciones de la escoria de cobre para TSS.

#### 5.2.3.1 Escoria de cobre reproducida con granulometría del río Aconcagua.

Recordemos que el procedimiento de las dosificaciones para TSS se encuentra descrito en el capítulo 4 en el punto 4.13 de este trabajo de título.

#### A. Dosificación de agregado.

$$C = M * H * Drs * E * (1 - 0,4V) \quad (\text{ec. 5.11})$$

- Factores de Diseño del Agregado.

Tabla 5.12 "Factores utilizados para el diseño del agregado"

Factor de Evaluación de Agregado	(M)	0.9
Factor de Desperdicio	(E)	1.05

- Porcentaje de huecos en el agregado.

$$V = 1 - \frac{Da}{Drs} \quad (\text{ec. 5.12})$$

$$(V) \quad 0,46$$

- Tamaño medio del agregado

$$TM = 10^{\log(a1) - [\log(a1) - \log(a2)] * \frac{(b1 - 50)}{(b1 - b2)}} \quad (\text{ec. 5.13})$$

a1	6.3
a2	5
b1	70
b2	24
log (a1)	0.799
log (a2)	0.699

$$(TM) \quad 5.698$$

- Dimensión mínima promedio del agregado

$$H = \frac{TM}{(1.09 + (0,0118 * IL))} \quad (\text{ec. 5.14})$$

$$(H) \quad 4,375$$

Finalmente reemplazando en la Ecuación 5.11

$$C \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad 12,9$$

### B. Dosificación de Asfalto.

$$B = \frac{K * (0,4 * H * T * V + S + A)}{R} \quad (\text{ec. 5.15})$$

- Factores de Diseño del Asfalto.

Tabla 5.13 "Factores utilizados para el diseño del agregado"

Factor de Evaluación de Asfalto	(K)	1
Factor de Tránsito	(T)	0.65
Corrección Textura Superficial	(S)	0.1
Corrección Absorción de Agregado	(A)	0
Residuo Asfáltico	(R)	0.651

Finalmente reemplazando en la Ecuación 5.15.

$$B \text{ [l/m}^2\text{]} \quad 0.91$$

### 5.2.3.2 Escoria de cobre reproducida con granulometría del estero la Patagua.

Recordemos que el procedimiento de las dosificaciones para TSS se encuentra descrito en el capítulo 4 en el punto 4.13 de este trabajo de título.

#### A. Dosificación de agregado.

$$C = M * H * Drs * E * (1 - 0,4V) \quad (\text{ec. 5.16})$$

Donde:

- Factores de Diseño del Agregado.

Tabla 5.14 "Factores utilizados para el diseño del agregado"

Factor de Evaluación de Agregado	(M)	0.9
Factor de Desperdicio	(E)	1.05

- Porcentaje de huecos en el agregado.

$$V = 1 - \frac{Da}{Drs} \quad (\text{ec. 5.17})$$

$$(V) \quad 0,45$$

- Tamaño medio del agregado

$$TM = 10^{\log(a1) - [\log(a1) - \log(a2)] * \frac{(b1 - 50)}{(b1 - b2)}} \quad (\text{ec. 5.18})$$

a1	10
a2	6.3
b1	88
b2	38
log (a1)	1.000
log (a2)	0.799

$$(TM) \quad 6.935$$

- Dimensión mínima promedio del agregado

$$H = \frac{TM}{(1.09 + (0,0118 * IL))} \quad (\text{ec. 5.19})$$

(H) 5,364

Finalmente remplazando en la Ecuación 5.16

C (kg/m<sup>2</sup>) 15,9

**B. Dosificación de Asfalto.**

$$B = \frac{K * (0,4 * H * T * V + S + A)}{R} \quad (\text{ec. 5.20})$$

- Factores de Diseño del Asfalto.

*Tabla 5.15 Factores utilizados para el diseño del asfalto"*

Factor de Evaluación de Asfalto	(K)	1
Factor de Tránsito	(T)	0.65
Corrección Textura Superficial	(S)	0.1
Corrección Absorción de Agregado	(A)	0
Residuo Asfáltico	(R)	0.651

Finalmente remplazando en la Ecuación 5.20

B (l/m<sup>2</sup>) 1.12

### 5.3 Análisis de las dosificaciones para TSS.

Los resultados de las dosificaciones arrojan dosificaciones de agregado y asfalto que se muestran en la Tabla 5.16. La comparación se realiza en base a los resultados obtenidos para el árido tradicional comparados con la escoria de cobre reproducida tanto para el río Aconcagua y el estero La Patagua.

Tabla 5.16 "Dosificaciones de agregado pétreo y contenido de asfalto para TSS utilizando árido tradicional y escoria de cobre"

ESTERO LA PATAGUA			
	Escoria de cobre reproducida según estero La Patagua	Árido tradicional del estero La patagua	Razón Escoria/Árido
C [kg/m <sup>2</sup> ]	15,87	11,58	1,37
B [l/m <sup>2</sup> ]	1,119	1,115	1

RÍO ACONCAGUA			
	Escoria de cobre reproducida según río Aconcagua	Árido tradicional del río Aconcagua	Razón Escoria/Árido
C [kg/m <sup>2</sup> ]	12,91	10,66	1,21
B [l/m <sup>2</sup> ]	0,91	1,08	0,85

Los resultados obtenidos arrojan que la cantidad de agregado pétreo utilizando escoria de cobre, para ambos áridos reproducidos, resultan menores cantidad de agregado pétreo por m<sup>2</sup>. Cabe destacar que la escoria de cobre es más pesada por lo tanto esto refleja un menor contenido de pétreos en un mismo volumen. Lo cual será necesario verificar mediante algún método visual con el fin de corroborar la cantidad de agregado pétreo a utilizar.

Para las cantidades de asfalto, la escoria de cobre no presenta grandes variaciones con respecto al árido tradicional, aunque levemente la escoria de cobre requiere un menor contenido de emulsión, esto se debe al bajo porcentaje de absorción que presenta este árido de botadero.

## Capítulo VI

**Cálculo de dosificaciones para tramos de prueba de lechada asfáltica a desarrollar en programa de caminos básicos en la región de Valparaíso.**

### 6.1 Dosificaciones del polvo de roca para lechadas asfálticas.

#### 6.1.1 Granulometría del polvo de roca para lechada asfáltica.

Para determinar la granulometría del árido utilizado para la lechada asfáltica el procedimiento de tamizado y determinación de la granulometría está descrito en la sección 8.202.3 del MC, lo cual permite determinar los porcentajes retenidos, porcentajes acumulados retenidos y porcentajes acumulados para la muestra de árido, resultados que se detallan en la tabla 5.3.

Tabla 6.1 "Granulometría del polvo de roca para lechada asfáltica"

Bandas		Lechada Asfáltica							
NCh (mm)	(ASTM)	Peso retenido [gr]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]	Banda Tipo C-1		ESTADO	Banda de trabajo	
12,5	(1/2")	0	0	100.0	-	-	Cumple	-	-
10,0	(3/8")	0	0	100.0	100	100	Cumple	-	-
5,0	(N°4)	70	14	86.0	70	90	Cumple	81.0	91.0
2,5	(N°8)	150	30	56.0	45	70	Cumple	51.0	61.0
1,25	(N°16)	90	18	38.0	28	50	Cumple	33.0	43.0
0,63	(N°30)	55	11	27.0	18	34	Cumple	22.0	32.0
0,315	(N°50)	40	8	19.0	12	25	Cumple	14.0	23.0
0,16	(N°100)	25	5	14.0	7	17	Cumple	9.0	17.0
0,08	(N°200)	20	4	10.0	5	11	Cumple	5.0	12.0
R	R	50	10	0.0	-	-	-	-	-

En el Figura 6.1, se evidencia el cumplimiento de la banda C-1 para el polvo de roca, por lo que el uso de este árido resulta apropiado para su utilización en lechadas asfálticas.



Figura 6.1 "Granulometría del polvo de roca para Lechada Asfáltica"

## 6.1.2 Requisitos de agregados pétreos del polvo de roca para lechada asfáltica

Tabla 6.2 "Requisitos de agregados pétreos para el polvo de roca"

Polvo de roca			
Ensayes	Unidad	Árido tradicional	Exigencia
Densidad Aparente	(kg/m <sup>3</sup> )	1500,0	-
Densidad Real Seca	(kg/m <sup>3</sup> )	2719,0	-
Equivalente Arena	%	49,7%	Mínimo 45%
Índice Plasticidad	NP	NP	NP
Adherencia Riedel-Weber	Rango	2 - 7	0 - 5
Índice de Trituración Total	%	2,2%	Máximo 3.5%
Adherencia Método Estático	%	95%+	Mínimo 95%
Partículas Chancadas	%	100%	Mínimo 90%

Según lo señalado en la tabla 6.2 el polvo de roca cumple con las exigencias para agregados pétreos en lechadas asfálticas según lo estipulado en el MC.

### 6.1.3 Dosificaciones de la lechada asfáltica utilizando polvo de roca.

Recordemos que el procedimiento de las dosificaciones para lechadas asfálticas se encuentra descrito en el capítulo 4 en el punto 4.2.4 de este trabajo de título.

- Determinación del contenido teórico de emulsión de la lechada asfáltica.

$$\text{Superficie específica} = \frac{0,17 \cdot a + 0,33 \cdot b + 2,3 \cdot c + 12 \cdot d + 135 \cdot e}{100}$$

(ec. 6.1)

	A	B	c	d	e
% Retenido	0	14	67	9	10
Tamiz	>10	5 - 10	0,315 - 5	0,08 - 0,315	Pasa 0,08

$$Et = \left( 4,5 \frac{\sqrt[5]{\text{superficie específica}}}{R} \right) - 1 \quad (\text{ec. 6.2})$$

Superficie específica	16.2
Residuo asfáltico de la emulsión (decimal)	0.630

Emulsión teórica tentativa referida  
al agregado seco (%)

11.5

## Confección de mezcla para lechada asfáltica.

### A. Determinación de agua mediante ensayo de consistencia

Tabla 6.3 "Agua de premezclado para la mezcla utilizando polvo de roca"

Contenido de agua	Rango en placa de escurrimiento	Agua de premezclado
12	3-4	11
11	2-3	
10	1-2	
5	0	
2,5	0	



Figura 6.2 "Rango 2-3 adecuada para la elección del agua de premezclado utilizando polvo de roca"

**B. Determinación del contenido de agua total de la mezcla.**

Tabla 6.4 "Cantidad de agua utilizada para la construcción de probetas"

Componente	Porcentaje referido al agregado seco %					Metodo
	1	2	3	4	5	
Contenido de emulsión Teórico	11,5					-
Contenido de emulsión	7	8	11	14	15	-
Filler	0	0	0	0	0	-
Agua de premezclado W1	11	11	11	11	11	8.302.45
Agua Total en la mezcla W	13,6	13,9	15,0	16,1	16,5	8.302.52

Cantidad de agua de suministrada para la construcción de probetas el diseño de la lechada asfáltica utilizando polvo de roca

**C. Determinación de abrasión de medio húmedo.**

Tabla 6.5 "Abrasión en medio húmedo para lechada asfáltica utilizando el polvo de roca"

Abrasión en medio húmedo			
Contenido de emulsión	8	11	14
Mi	1219.8	1200.7	950.9
Mf	1205.9	1196.3	947.7
Diferencia de masas	13.9	4.4	3.2
Diámetro de desgaste	13.8	13.9	14.5
Área de desgaste	0.015	0.015	0.017
Abrasión Húmeda g/m <sup>2</sup>	930	290	196

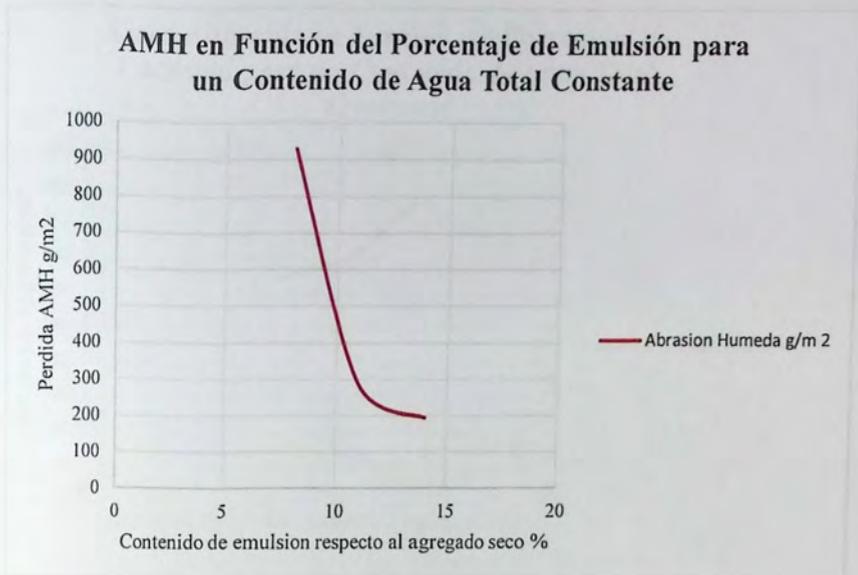


Figura 6.3 "Abrasión en medio húmedo utilizando polvo de roca"

**D. Determinación de arena adherida.**

Tabla 6.6 "Arena adherida para lechada asfáltica utilizando polvo de roca"

Arena adherida mediante rueda de carga				
Contenido de emulsión	8	11	14	-
Mi	712.0	668.9	693.8	-
Mf	715.7	673	699	-
Diferencia de masas	3.70	4.11	5.20	-
Área probeta	0.01355	0.01355	0.01355	-
<b>Arena Adherida g/m<sup>2</sup></b>	<b>273</b>	<b>303</b>	<b>384</b>	<b>8.302.53</b>

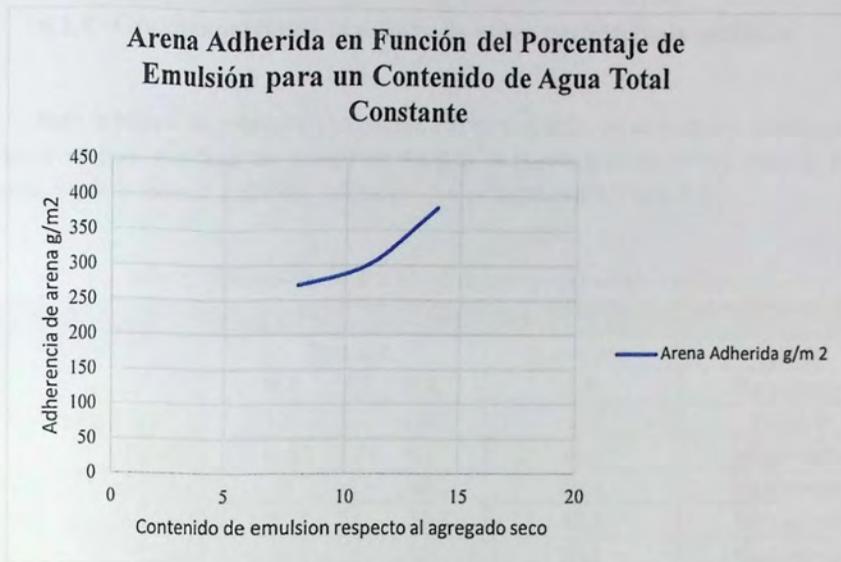


Figura 6.4 "Arena adherida utilizando polvo de roca"

**E. Determinación del contenido óptimo de emulsión.**

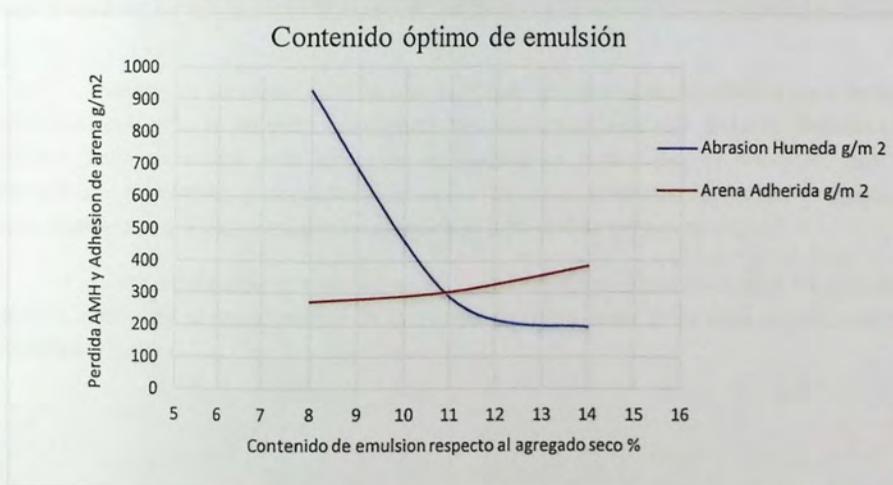


Figura 6.5 "Intersección de curvas para determinación del contenido óptimo de emulsión"

Contenido óptimo de emulsión                      11%

### 6.1.4 Granulometría de la escoria de cobre para lechada asfáltica.

Para la escoria de cobre por ende es necesario realizar la caracterización granulométrica del material para rectificar su cumplimiento pen la banda granulométrica elegida para la elaboración de la lechada asfáltica, validación que se detalla en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 "Granulometría de la escoria de cobre para Lechada Asfáltica"

BANDAS		ESCORIA DE COBRE			
NCh (mm)	(ASTM)	Tipo C-1		% que pasa	Estado
12,5	(1/2")	N.A	N.A	100	No Cumple
10,0	(3/8")	100	100	100	Cumple
6,3	(1/4)	N.A	N.A	N.A	No Cumple
5,0	(N°4)	70	90	63.6	No Cumple
2,5	(N°8)	45	70	38.1	No Cumple
1,25	(N°16)	28	50	20.5	No Cumple
0,63	(N°30)	18	34	11.2	No Cumple
0,315	(N°50)	12	25	5.5	No Cumple
0,16	(N°100)	7	17	2.6	No Cumple
0,08	(N°200)	5	11	0.53	No Cumple
<b>NA. La banda no aplica para el tipo de tratamiento especificado</b>					

La escoria de cobre no cumple con los requerimientos granulométricos para lechadas asfálticas, por ende, es necesario reproducir la granulometría para la lechada. Debido a los tamices finos requeridos para este tipo de carpeta de protección, es necesario canchar, seleccionar el material y reproducir el polvo de roca utilizado en lechadas (según la granulometría con la que se trabajó en el apartado 6.11 de este trabajo de título).

Una vez reproducido el material, se realizan los ensayos específicos para los agregados pétreos, evaluando el cumplimiento de la escoria de cobre como árido para su utilización en lechadas asfálticas.

### 6.1.5 Requisitos de agregados pétreos escoria de cobre para lechada asfáltica.

Los resultados obtenidos en la Tabla 6.8 muestra las características y propiedades ensayadas para la escoria de cobre según las exigencias del MC, las que son comparadas con los parámetros obtenidos para el polvo de roca.

Tabla 6.8 "Resultados de ensayos de agregados pétreos según granulometría para lechada asfáltica"

REQUISITOS PARA AGREGADOS PÉTREOS EN LECHADAS ASFÁLTICAS					
Ensayes	Unidad	Escoria de cobre	Polvo de roca	Exigencia	Razón Escoria/Árido
Densidad Aparente	(kg/m <sup>3</sup> )	2094,2	1500,0	-	1,40
Densidad Real Seca	(kg/m <sup>3</sup> )	3782,2	2719,0	-	1,39
Equivalente Arena	%	46%	49,7%	Mínimo 45%	0,93
Índice Plasticidad	NP	NP	NP	NP	-
Adherencia Riedel-Weber	Rango	2 - 9	2 - 7	0 - 5	-
Índice de Trituración Total	%	2,90%	2,2%	Máximo 3.5%	1,32
Adherencia Método Estático	%	95%+	95%+	Mínimo 95%	-
Partículas Chancadas	%	100%	100%	Mínimo 90%	1,00

#### Análisis de Resultados.

- La escoria de cobre cumple con todos los requisitos de agregados pétreos para lechadas asfálticas estipulados en el MC.
- Al igual que los valores de densidades obtenidos para el material grueso en TSS, la densidad del material fino de la escoria de cobre supera en 1.4 veces la densidad del polvo de roca.
- El porcentaje de material chancado cumple con el 90% de exigencia requerido para lechadas asfálticas, estos resultados se deben al proceso de chancado al cual fue sometido el material para lograr obtener la granulometría necesaria para su utilización en lechadas asfálticas, es importante destacar que el proceso de chancado es mucho más exigente debido a las exigencias granulométricas de la banda C-1 de lechadas asfálticas.
- El índice de trituración calculado a la escoria permitió medir la resistencia a la desintegración física de los áridos finos (entre 10 y 0,63 mm) mediante la compresión, de acuerdo a cortes granulométricos. La escoria de cobre se desintegra físicamente más que los áridos tradicionales, este material presenta

una resistencia a desgastarse y/o triturarse levemente superior al árido tradicional, se espera que este material se comporte de manera similar al ser chancado como al momento de resistir la abrasión producida por el tráfico en lechadas.

- Los resultados obtenidos para la adherencia por método estático, demuestran que la escoria de cobre presenta un comportamiento similar al árido tradicional, resultando un 100% de adherencia dando cumplimiento a la exigencia del 95% requerido para Lechadas asfálticas.

### 6.1.6 Dosificación de la lechada asfáltica utilizando escoria de cobre.

Recordemos que el procedimiento de las dosificaciones para lechadas asfálticas se encuentra descrito en el capítulo 4 en el punto 4.2.4 de este trabajo de título.

- Determinación del contenido teórico de emulsión de la lechada asfáltica.

$$\text{Superficie específica} = \frac{0,17 \cdot a + 0,33 \cdot b + 2,3 \cdot c + 12 \cdot d + 135 \cdot e}{100}$$

(ec. 6.3)

	A	B	C	D	e
% Retenido	0	14	67	9	10
Tamiz	>10	5 - 10	0,315 - 5	0,08 - 0,315	Pasa 0,08

$$Et = \left( 4,5 \sqrt[5]{\frac{\text{superficie específica}}{R}} \right) - 1 \quad (\text{ec. 6.4})$$

Superficie específica	16.2
Residuo asfáltico de la emulsión (decimal)	0.630

Emulsión teórica tentativa referida  
al agregado seco (%)

11.5

- Confección de mezcla para lechada asfáltica.

**A. Determinación de agua mediante ensayo de consistencia.**

*Tabla 6.9 "Agua de premezclado para la mezcla utilizando escoria de cobre"*

Análisis de consistencia		
Contenido de agua	Rango en placa de escurrimiento	Agua de premezclado
12	Sobrepasado	2.5
11	Sobrepasado	
10	Sobrepasado	
5	Sobrepasado	
2.5	2-3	



*Figura 6.6 Rango 2-3 adecuada para la elección del agua de premezclado utilizando escoria de cobre"*

**B. Determinación del contenido de agua total de la mezcla.**

*Tabla 6.10 "Cantidad de agua utilizada para la construcción de probetas"*

Componente	Porcentaje referido al agregado seco %			Método
	1	2	3	
Contenido de emulsión Teórico	11,5			
Contenido de emulsión	5	7	11	
Filler	0	0	0	
Residuo Asfáltico	0,633			
<b>Análisis de Consistencia</b>				
Agua de premezclado W1	2,5	2,5	2,5	8.302.45
Agua Total de la mezcla W	4,3	5,1	6,5	8.302.52

Cantidad de agua suministrada para la construcción de probetas el diseño de la lechada asfáltica utilizando escoria de cobre.

**C. Determinación de abrasión de medio húmedo.**

*Tabla 6.11 Abrasión en medio húmedo utilizando escoria de cobre"*

Contenido de emulsión	5			7			10		
Mi	1509. 9	1558. 2	1600. 9	1404. 1	1611. 8	1575. 7	1150. 4	1582. 8	1435. 5
Mf	1505. 9	1552. 6	1598	1396. 3	1609. 4	1572. 2	1147. 7	1580. 6	1432. 4
Diferencia de masas	4.0	5.6	2.9	2.8	2.4	3.5	2.7	2.2	3.1
Promedio diferencia de masas gr	4.17			2.90			2.67		
Diámetro de desgaste	14.9	14.1	13.7	13.9	15.2	14.4	14.5	14.4	15.2
Área de desgaste	0.017	0.016	0.015	0.015	0.018	0.016	0.017	0.016	0.018
Abrasión Húmeda g/m <sup>2</sup>	229.4	358.6	196.7	184.5	132.3	214.9	163.5	135.1	170.8
Promedio Abrasión Húmeda g/m <sup>2</sup>	261.6			177.2			156.5		

**AMH en Función del Porcentaje de Emulsión para un  
Contenido de Agua Total Constante**



*Figura 6.7 "Abrasión en medio húmedo para la escoria de cobre"*

**D. Determinación de arena adherida mediante ensayo de rueda de carga.**

*Tabla 6.12 "Arena adherida para lechada asfáltica utilizando escoria de cobre"*

Arena adherida mediante rueda de carga									
Contenido de emulsión	5			7			10		
Mi	812.8	942.4	784.9	769.2	924.1	848.1	794	812.2	899.7
Mf	815.7	945	787.2	773	928.3	851.6	799	818.8	905.4
Diferencia de masas	2.9	2.6	2.3	3.8	4.2	3.5	5.0	6.6	5.7
Promedio diferencia de masas g/m <sup>2</sup>	2.60			3.83			5.77		
Área probeta	0.013 55								
Arena Adherida g/m <sup>2</sup>	214.0	191.9	169.7	280.4	310.0	258.3	369.0	487.1	420.7
Promedio Arena Adherida g/m <sup>2</sup>	191.9			282.9			425.6		

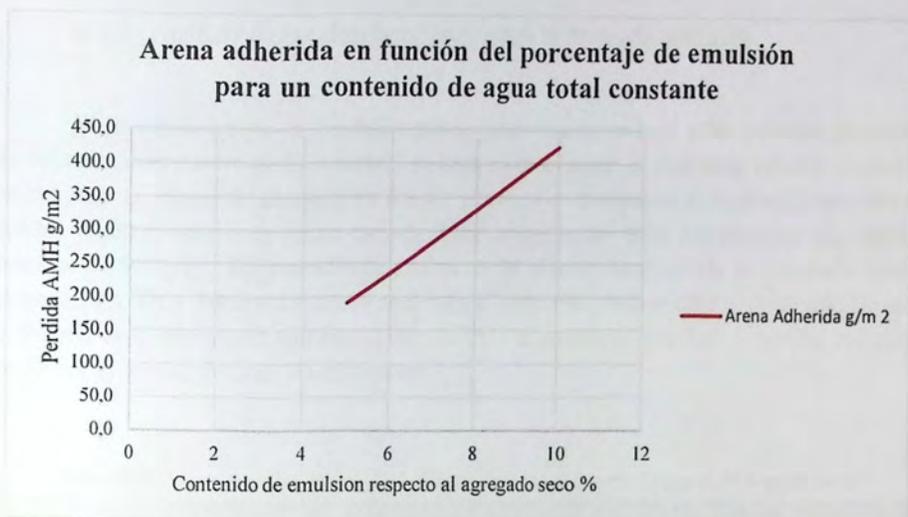


Figura 6.8 "Arena adherida utilizando escoria de cobre"

#### E. Determinación del contenido óptimo de emulsión.

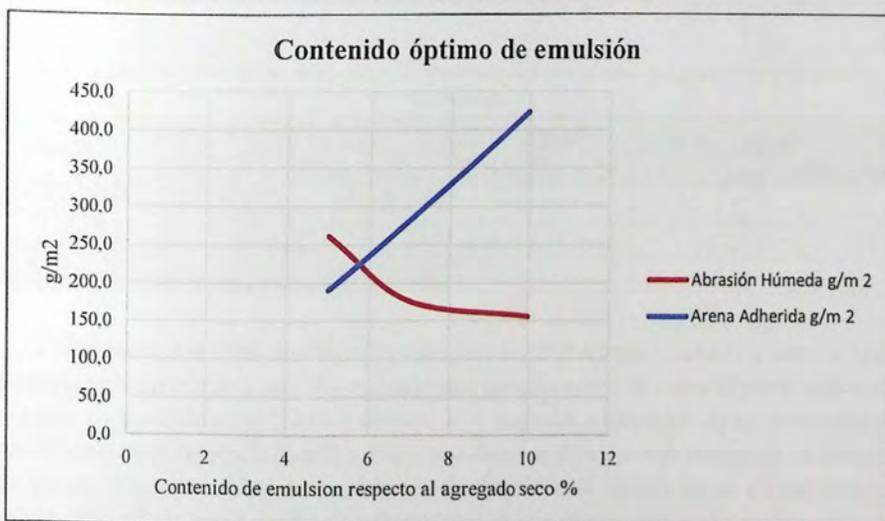


Figura 6.9 "Intersección de curvas para determinación del contenido óptimo de emulsión"

Contenido óptimo de emulsión                      6%

### 6.1.7 Análisis de las dosificaciones para la lechada asfáltica.

El contenido óptimo de emulsión puede determinarse en base a dos criterios, los cuales no deberían diferir entre sí. El criterio 1 se basa en determinar el contenido mínimo de asfalto de acuerdo al ensayo de abrasión en Medio Húmedo y determinar el contenido máximo de asfalto según el ensayo de rueda cargada, para ambos casos debe considerarse una pérdida máxima de 540 g/m<sup>2</sup>. El promedio de este rango de valores, corresponde al contenido óptimo de emulsión. En la Tabla 6.13 y 6.14 se detalla el contenido óptimo para el árido tradicional y la escoria de cobre respectivamente, especificando el contenido máximo y mínimo calculado mediante el método descrito anteriormente.

Tabla 6.13 Contenido óptimo de emulsión determinado con el criterio 1 para el árido tradicional"

Criterio 1 (Polvo de roca)				
Componente	unidad	Método	% de Emulsión	Optimo
Contenido Mínimo de asfalto	g/m <sup>2</sup>	AMH	9,5	13
Contenido Máximo de asfalto	g/m <sup>2</sup>	Rueda de Carga	16,9	
Promedio del rango óptimo	g/m <sup>3</sup>	-	13,2	

Tabla 6.14 "Contenido óptimo de emulsión determinado mediante el criterio 1 para la escoria de cobre reproducida"

Criterio 1 (Escoria de cobre reproducida como polvo de roca)				
Componente	unidad	Método	% de Emulsión	Optimo
Contenido Mínimo de asfalto	g/m <sup>2</sup>	AMH	1,5	7
Contenido Máximo de asfalto	g/m <sup>2</sup>	Rueda de Carga	12,5	
Promedio del rango óptimo	g/m <sup>3</sup>	-	7,0	

Los resultados obtenidos, muestran que para los áridos tradicionales el contenido óptimo de emulsión corresponde a un 13%, mientras que para la escoria de cobre el porcentaje óptimo obtenido corresponde a un 7% de emulsión, esto equivale a alrededor de un 50% menos de emulsión si se utiliza escoria de cobre. Estos resultados se deben al bajo porcentaje de absorción que posee este material. Menos porcentajes de absorción se traduce en un menor contenido óptimo de emulsión según diseño de lechadas asfálticas y microaglomerados en frío.

Por otro lado, en el diseño de lechadas asfálticas el contenido óptimo de asfalto se puede determinar en base a un segundo criterio el cual consiste en la intersección de las curvas del método de abrasión en medio húmedo y el método de rueda carga descritos en capítulos 6.1.3 y 6.1.6 para el polvo de roca y la escoria de cobre respectivamente. En la Tabla 6.15 se detallan

los resultados de ambos métodos (AMH y rueda de carga) aplicados al polvo de roca considerando un contenido teórico de emulsión del 11%, a la mezcla se le debe suministrar el agua de premezclado determinado mediante el en el método de consistencia. En la Tabla 6.16 se observan los resultados obtenidos utilizando escoria de cobre, el MC recomienda variar en 3 unidades el contenido de emulsión con respecto al contenido teórico de emulsión para la elaboración de probetas de abrasión y rueda de carga, no es posible aplicar este procedimiento a la escoria de cobre, ya que el contenido teórico es el mismo que para el árido tradicional (11%), esta cantidad de emulsión hace que las probetas se vean sobrepasadas de manera considerada (mezcla demasiado líquida y no manipulable). Por lo que para la confección de probetas se consideran porcentajes de emulsión menores y tentativos, en base a la experiencia obtenida con la consistencia de la mezcla del árido tradicional.

Tabla 6.15 "Abrasión en medio húmedo y arena adherida para el polvo de roca"

Criterio 2 (Polvo de roca)				
Polvo de roca	Contenido de emulsión	8	11	14
	Abrasión Húmeda $g/m^2$	930	290	196
	Arena Adherida $g/m^2$	273	303	384

Tabla 6.16 "Abrasión en medio húmedo y arena adherida para para la escoria de cobre reproducida"

Criterio 2 (Escoria de cobre reproducida como polvo de roca)				
Escoria de cobre	Contenido de emulsión	5	7	10
	Abrasión Húmeda $g/m^2$	262	177	156
	Arena Adherida $g/m^2$	192	283	426

En la Figura 6.10 se graficaron los resultados obtenidos anteriormente, obtenidos mediante el método de abrasión en medio húmedo y el método de rueda cargada tanto para el árido tradicional y la escoria de cobre.

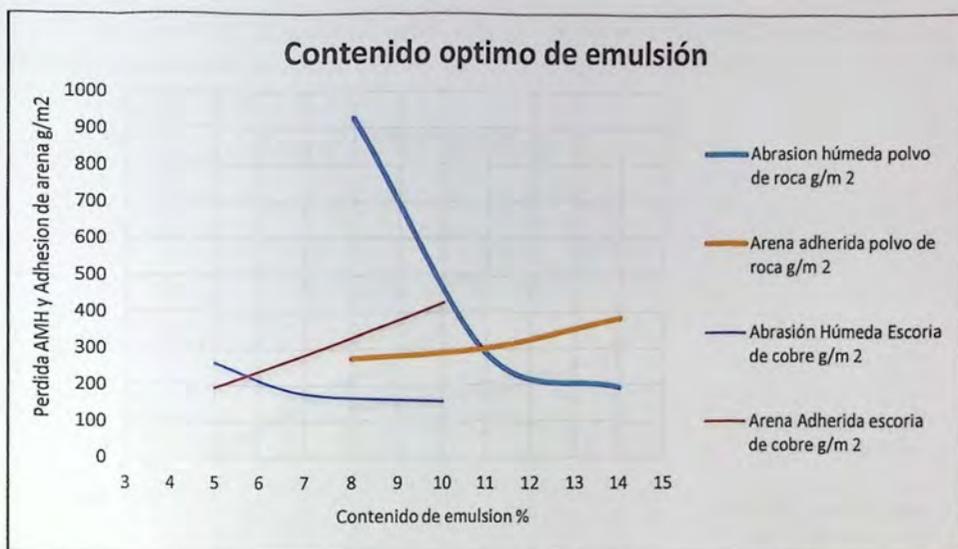


Figura 6.10 "Contenido óptimo de emulsión para árido tradicional y escoria de cobre"

Tabla 6.17 "Contenido óptimo de emulsión para polvo de roca y escoria de cobre en lechadas asfálticas"

Contenido óptimo de emulsión	
Árido tradicional	Porcentaje de emulsión
	11%
Escoria de cobre	Porcentaje de emulsión
	6%

Los contenidos óptimos de emulsión utilizando el criterio 2 (intersección de curvas), detallados en la Tabla 6.17 evidencia una desigualdad en el contenido óptimo de emulsión que ronda un 50% menos de emulsión cuando se utiliza escoria de cobre, diferencia que valida lo obtenido utilizando el criterio 1 descrito anteriormente. Cabe destacar que los resultados obtenidos con ambos métodos varían entre sí, pero mantienen la variación existente entre el árido tradicional y la escoria de cobre.

Todas las dosificaciones obtenidas deben validarse mediante la construcción de un tramo de prueba según lo especifica en MC, lo que no se descarta como alternativa para la ejecución de un tramo de prueba dentro de las alternativas de caminos básicos desarrollados por el ministerio. Para este trabajo de título las dosificaciones serán validadas mediante un prototipo que apruebe la utilización de la escoria como capa de protección.

En Figura 6.11 se graficó la arena adherida para el polvo de roca, la escoria de cobre y la tendencia existente para ambos áridos con respecto al ensaye de rueda cargada.

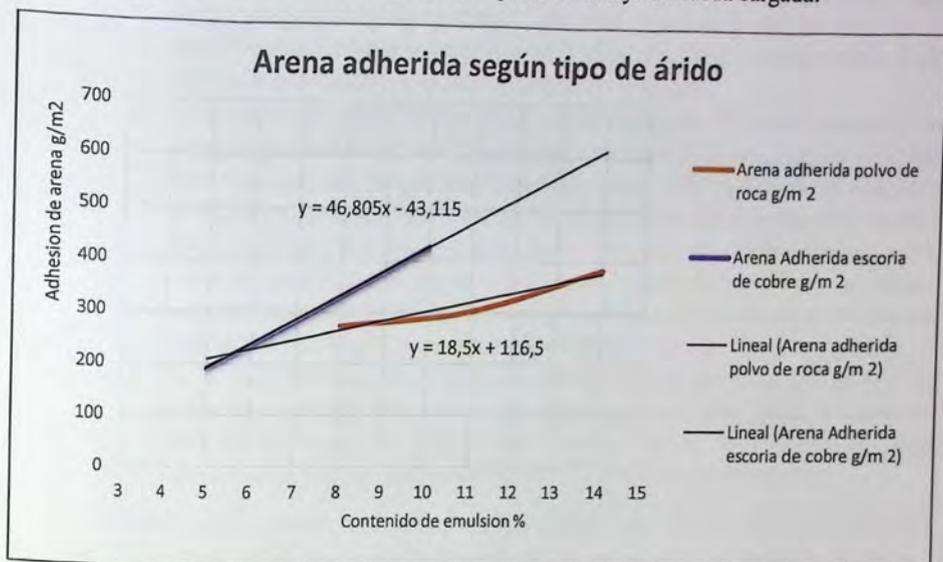


Figura 6.11 "Arena adherida para rueda cargada del árido tradicional y escoria de cobre"

### Análisis de Resultados.

- La cantidad de arena adherida en g/m<sup>2</sup> es un indicador de exceso de ligante que tiene la probeta. Ambos materiales alcanzan los 400 g/m<sup>2</sup> de arena adherida lo que se encuentra bajo el límite de 540 g/m<sup>2</sup> que establece el MC como máximo. Por lo que no se debería presentar problemas de exudación a la hora de aplicar este tipo de capa de protección (lechada asfáltica).
- Con respecto a las pendientes de ambas líneas de tendencias, una mayor pendiente representa una menor capacidad de adosamiento del material con la emulsión conforme aumenta la cantidad de emulsión suministrada, ya que se genera una mezcla poco trabajable. La escoria de cobre tiene una pendiente de 46.8, mayor a los 18.5 que se obtuvo con el polvo de roca, lo que representa la menor capacidad de ligar que tiene la escoria de cobre frente a un mayor contenido de emulsión, todo esto se valida con lo presentado al momento de construir las probetas de rueda de carga, ya que al variar los porcentajes de emulsión (3% más y menos con respecto al contenido de emulsión teórica "11.5" como lo recomienda el MC), estas presentan una condición no manipulable (probetas grumosas y muy acuosas).

- Conforme aumenta el porcentaje de emulsión, la adherencia de arena es mayor para la escoria de cobre, pero a la vez se produce una probeta muy fluida, lo que no permite ensayar estas probetas, que al momento de cargarlas hace que la emulsión escurra hacia la superficie originando el colapso de las probetas. Todo esto se ve justificado por la baja absorción de la escoria.
- Si se compara la consistencia de la mezcla utilizando el mismo porcentaje de emulsión teórica (11%), para la escoria de cobre se refleja un estado saturado que hace imposible su trabajabilidad, mientras que el árido tradicional se comporta de manera más homogénea y trabajable, recordemos que el porcentaje óptimo de emulsión para el polvo de roca es de un 11% mientras que la escoria de cobre resulta de un 6%, con lo que se concluye que el procedimiento para determinar el contenido teórico de emulsión no es aplicable para la escoria de cobre, ya que no considera la absorción que tiene el material.
- No se puede realizar otro análisis o comparación, ya que no se trabajó con los mismos porcentajes de emulsión respecto al agregado seco, elaborar muestras fuera de los rangos de trabajo hacen que se genere una mezcla de mala trabajabilidad (mezcla demasiado líquida o demasiado deshidratada).

En Figura 6.12 se graficó la abrasión en medio húmedo para el polvo de roca, la escoria de cobre y la tendencia existente de ambos con respecto al ensaye abrasión de medio húmedo.

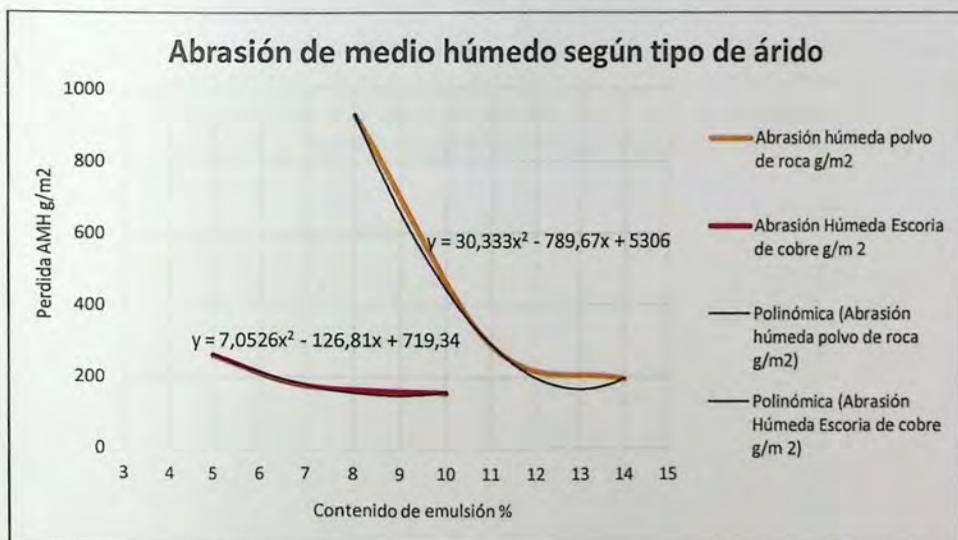


Figura 6.12 "Abrasión en medio húmedo para el árido tradicional y la escoria de cobre"

## **Análisis de Resultados.**

- La cantidad de pérdida abrasiva en medio húmedo medido en  $\text{g/m}^2$  es un indicador de resistencia al desgaste que tiene la mezcla.
- Con respecto al desgaste en abrasión de medio húmedo el Gráfico 6.12 prueba que la escoria de cobre no posee grandes variaciones de desgaste para distintos contenidos de emulsión, el comportamiento de ésta fluctúa en un rango de 150 y 300  $\text{g/m}^2$ , si se compara con el rango del árido tradicional, este oscila entre los 150 y 1000  $\text{g/m}^2$ . Lo que evidencia el buen comportamiento de la escoria frente al desgaste, resultado que validaría su uso frente al paso de los vehículos.
- La tendencia de ambas curvas tiende a ser descendiente conforme aumenta el contenido de emulsión, esto quiere decir que tanto el polvo de roca como la escoria de cobre tienden a desgastarse lo mismo frente a un incremento en la cantidad de emulsión, para porcentajes muy altos se alcanza una misma tendencia al desgaste, pero esto no puede ser validado ya que al suministrarle mucha emulsión a la escoria de cobre se hace muy fluida lo que no permite su trabajabilidad, esto se debe a la absorción que tiene la escoria. Elaborar muestras fuera de los rangos de trabajo hacen que se genere una mezcla con un pésimo rendimiento y operatividad (mezcla demasiado líquida o demasiado deshidratada).
- Estos resultados serían positivos ya que la escoria de cobre podría presentar un buen comportamiento a la hora de evaluar el desprendimiento o pérdida del agregado frente al paso de tránsito. Todo esto será validado mediante un prototipo que apruebe la utilización de la escoria como capa de protección.

## Capítulo VII

### Validación de las dosificaciones mediante un prototipo a baja escala.

Para el desarrollo de este numeral, se realizará una evaluación de las dosificaciones resultantes de agregado pétreo y ligante asfáltico utilizando escoria de cobre como agregado pétreo en carpetas TSS, lechada asfáltica y finalmente un sello cape seal. Para esto se evaluará de modo visual la cantidad de agregado en un área de superficie y luego se analizará la dosificación de asfalto realizando un prototipo a baja escala que simule la construcción y puesta en obra de las carpetas delgadas desarrolladas, a modo de evaluar su comportamiento insitu para factores como son el desprendimiento, exudación y factibilidad de uso de este material de botadero.

#### 7.1 Evaluación de la dosificación del agregado utilizando escoria de cobre.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la fórmula de dosificación del agregado pétreo, se verifica la superficie abarcada por este material sobre una bandeja de 50x50 cm a modo de verificar la cantidad de agregado obtenido según el respectivo método de diseño, en este caso, dimensión mínima promedio. Como la escoria de cobre es más densa que el árido tradicional es necesario realizar esta verificación visual de la dosificación del agregado con el fin de rectificar el área utilizada por este material.



Figura 7.1 "Dosificación del agregado homogeneizado utilizando escoria de cobre reproducida"

En la Figura 7.1 se puede observar que la cantidad de agregado alcanza a cubrir el área especificada, corroborando las dosificaciones obtenidas utilizando las granulometrías reproducidas del río Aconcagua ( $C=12,91 \text{ kg/m}^2$ ) y el estero La Patagua ( $15,87 \text{ kg/m}^2$ ), lo que resultó cantidades de agregado de 3,22 kg y 3.97 kg respectivamente.

## **7.2 Evaluación de la dosificación de la emulsión.**

La D mediante el MC, actualmente establece como método de verificación de las dosificaciones, realizar tramos de pruebas de al menos 100 metros de longitud por una pista de ancho. En la actualidad no existe un método específico para evaluar el comportamiento ya sea a nivel de exudación y desprendimiento de material (a excepción de lechadas asfálticas, el cual el diseño de estas se realiza midiendo estos parámetros). Con respecto a los resultados obtenidos anteriormente para TSS y lechadas asfálticas, se evaluarán tres alternativas de carpetas asfálticas las que serán sometidas a ciclos de carga que simule el tránsito de los vehículos para evaluar características como lo es la textura, homogeneidad, adherencia del árido con la emulsión, exudación, desprendimiento del agregado y validar la utilización de la escoria de cobre en estas soluciones básicas predominantes.

### **7.2.1 Generalidades.**

En este capítulo se someterán las probetas construidas anteriormente, a la máquina de rueda de carga con el fin de simular un tránsito a baja escala. Para el desarrollo de este enunciado se necesitan aplicar procedimientos específicos de diseño, fabricación y condiciones controladas de ejecución (extremar el control de temperaturas), por lo que para la construcción de estas probetas se necesita un control de calidad riguroso.

### **7.2.2 Aparatos y materiales utilizados.**

- Base granular estabilizada
- Árido tradicional para lechadas asfálticas.
- Escoria de cobre dosificada para TSS y Lechada Asfáltica.
- Emulsión imprimante QL prime
- Emulsión catiónica CRS-2.
- Emulsión catiónica CSS-1H

- Molde de madera (Dimensiones interiores de 230 x 430 x 130 [mm]).
- Dispensador de emulsión.
- Dispensador de áridos.
- Pisón para compactación utilizado para ensayo de Proctor Modificado.
- Rodillo compactador
- Mechero.
- Máquina de ensayo de rueda cargada.
- Papel mantequilla.
- Brocha

### 7.2.3 Procedimiento de ensaye.

#### a) Preparación de molde.

Se utilizan moldes que son fabricados en el laboratorio de vialidad, los cuales tienen la dimensión de 430 x 230 x 9 cm necesaria para almacenar el material de ensaye y permita realizar correctamente el análisis de las dosificaciones.



*Figura 7.2 "Molde utilizados para ensayo modificado"*

**b) Preparación y colocación de la base estabilizada.**

Los materiales para base granular deben cumplir con ciertos requerimientos. La granulometría deberá ajustarse a una de las siguientes bandas: TM-50b, TM- 50c o TM-25 de la Tabla 8.101.1.B del MC; el porcentaje de chancado, no deberá ser menor que 50%, su tamaño máximo absoluto será de 40 mm. y su índice de plasticidad máximo será de 4%. En cuanto a las propiedades mecánicas, el material deberá tener una capacidad de soporte CBR  $\geq$  80%, la fracción gruesa deberá tener una resistencia al desgaste, medida por el ensaye de Los Ángeles, de no más de 35%. Los resultados obtenidos para para la base estabilizada son los que se detallan en la Tabla 25, especificando las exigencias que establece el Manual de Carreteras para esta capa inferior.

*Tabla 7.1 Resultados de ensayos de laboratorio para base estabilizada"*

BASE GRANULAR CHANCADA			
Ensayes	Unidad	Resultado	Exigencia
Densidad Máxima Compactada Húmeda	kg/m <sup>3</sup>	2462	-
Humedad	%	6	-
Densidad Máxima Compactada Seca	kg/m <sup>3</sup>	2323	-
Análisis de California CBR			
CBR Ref al 95% de la DMCS a 5 mm de penetración	%	85	Mínimo 80%
Chancado	%	75	Mínimo 50%
Rodado	%	25	-
Laja	%	2	-
Tamaño máximo absoluto del agregado	Mm	40	Máximo 40 mm
Desgaste de Los Ángeles	%	18	Máximo 35%

Para confeccionar las probetas se simulan los 5 [cm] de una base estabilizada. Según se especifica en el Manual de Carreteras, se establece como requisito para bases granulares destinadas a tratamientos superficiales, contar con un 70% de Material Chancado y contar con un CBR de 100% al 95% de la D.M.C.S. Debido a que la base está destinada a ser recubierta con un tratamiento superficial, el tamaño máximo absoluto será 40 [mm]. La base granular se ajusta a la banda granulométrica TM-25 C. Se realizan los ensayos necesarios para determinar la humedad óptima, densidad óptima y densidad aparente suelta. Se prepara en una fuente el material, colocándole el porcentaje de humedad necesaria para llegar a la óptima. Se obtuvo que al colocar 10286 [g] de material, este ocupa un alto de 65 [mm], refiriéndose a la densidad suelta del material. La compactación mínima necesaria el material tiene que descender 15 [mm], manteniendo su masa, pero variando así el volumen.

La compactación se realiza con una plataforma de 430x230 cm, la cual se instala sobre la base homogeneizada, utilizando el pisón se compacta hasta obtener los 5 cm de altura de base granular estabilizada compactada como se puede ver en la Figura 7.3.



*Figura 7.3 "Moldes con base granular estabilizada, compactada para TSS y Cape Seal"*

### c) Imprimación.

Para la etapa de imprimación se utiliza una emulsión imprimante QL Prime, la cual se aplica a una tasa promedio de 1,2 l/m<sup>2</sup>. Para controlar la aplicación del imprimante, se midió el peso del ligante aplicado hasta lograr el correspondiente a la dosificación definida. Las emulsiones imprimantes se aplicaron a temperatura ambiente. Esta condición se debe cumplir siempre que la temperatura ambiente sea superior a los 10°C. Para realizar el riego de imprimación, se utiliza un dosificador, el cual asegura una distribución uniforme en la superficie. Se debe obtener una penetración mínima de 3[mm], por lo que se deja un tiempo de 24 horas para asegurar una correcta absorción de la base estabilizada. En la Figura 7.4 se observa la base estabilizada imprimada.



*Figura 7.4 "Probetas de base estabilizada compactada, sobre ésta la emulsión imprimante"*

d) Aplicación del ligante para TSS.

En base a las dosificaciones de asfalto ( $\text{kg/m}^2$ ) resultantes utilizando escoria de cobre para TSS detalladas en el apartado 5.2.3 de este trabajo de título, es posible determinar la cantidad de emulsión para el área definida del molde. La emulsión utilizada corresponde a una emulsión catiónica de quiere rápido CRS-2. La aplicación se realiza, usando un recipiente de vidrio con perforaciones en su tapa con la emulsión dosificada y calentada mediante baño maría hasta alcanzar una temperatura entre los 70 y 80°C para obtener una mejor manejabilidad de la emulsión la cual tiene una característica muy viscosa. La aplicación se realiza de forma meticulosa para obtener la mejor homogeneidad del ligante sobre la superficie donde se aplicará el árido.

e) Distribución y compactación de escoria de cobre como árido para TSS.

En base a las dosificaciones utilizando escoria de cobre como árido para TSS detalladas en el apartado 5.2.3. se procede a la distribución de la escoria de cobre, esta se realiza mediante una espátula grande, la que permite la distribución homogénea del material, Para la compactación se construye un rodillo relleno de hormigón de 230 mm de ancho que simula el rodillo compactador utilizado en esta etapa de construcción, el cual tiene como objetivo orientar las partículas a su posición mínima. Finalizando el procedimiento del TSS. En la Figura 7.5 se muestra los TSS resultantes.



Figura 7.5 "TSS, reproducido (A) río Aconcagua y (B) estero la Patagua, utilizando escoria de cobre"

f) Sello cape seal utilizando polvo de roca para la lechada asfáltica.

Una vez aplicado el TSS (A) río Aconcagua y (B) estero la Patagua, ambas reproducidas en escoria de cobre, se realiza la aplicación de la lechada asfáltica utilizando polvo de roca, se limpia con una brocha todo el material desprendido que no se haya adherido al ligante para el TSS construido en el punto i). El rendimiento del polvo de roca para esta lechada será  $15\text{kg/m}^2$ , esta dosificación se aplica en el molde de  $430 \times 230\text{ mm}^2$ . Una vez determinado la cantidad de polvo de roca en el área del molde, se incorpora el agua (6%) y la emulsión (11%) obtenido por diseño que se calculó en el capítulo 6.1.3 de este trabajo de título, se revuelve toda la mezcla hasta homogeneizar y se llena el molde con la mezcla de lechada utilizando polvo de roca sobre el TSS. Resultando el cape seal que se muestra en la Figura 7.6.



Figura 7.6 "Cape seal (C) y (D) (TSS en escoria de cobre(A)y(B) y lechada asfáltica utilizando polvo de roca).

g) Sello cape seal utilizando escoria de cobre.

Al igual que el procedimiento descrito en el punto f), una vez realizado el TSS (A) río Aconcagua y (B) estero la Patagua ambas reproducidas con escoria de cobre, se limpia con una brocha todo el material desprendido que no se haya adherido adecuadamente al ligante y se prepara la escoria de cobre reproducida como polvo de roca para utilizarla como lechada asfáltica. El rendimiento utilizado es de  $15\text{ kg/m}^2$ , el material se dosifica para el molde de  $430 \times 230\text{ mm}^2$ .

En base a las dosificaciones de escoria de cobre como polvo de roca que se determinó en el apartado 6.1.6 de este trabajo de título se calcula la cantidad de escoria de cobre necesaria para el área del molde, se suministra el agua (2.5%) y la emulsión (6%) obtenido en el diseño de lechadas asfálticas utilizando escoria de cobre, se hace una mezcla y se revuelve hasta homogeneizar completamente, finalmente se aplica y distribuye sobre el TSS (A) y (B) obteniendo el cape seal que se muestra en la Figura 7.7.



Figura 7.7 "Cape seal (TSS y lechada asfáltica ambos reproducidos con escoria de cobre)"

Las probetas resultantes serán sometidas en un ensayo alternativo que permita validar el uso de escoria de cobre en capas de protección para la región de Valparaíso. Las probetas construidas las podemos resumir como se detallan en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 "Detalle de capas de protección utilizadas para validación"

Probeta	Capa de protección	Áridos utilizados para	
		TSS	Lechada Asfáltica
(A)	TSS	Escoria de cobre río Aconcagua	No se aplicó
(B)	TSS	Escoria de cobre estero la Patagua	No se aplicó
(C)	Cape seal	Escoria de cobre río Aconcagua	Polvo de roca
(D)	Cape seal	Escoria de cobre estero la Patagua	Polvo de roca
(E)	Cape seal	Escoria de cobre río Aconcagua	Escoria de cobre como polvo de roca
(F)	Cape seal	Escoria de cobre estero la Patagua	Escoria de cobre como polvo de roca

### **7.3 Aplicación del ensayo de rueda cargada como simulación de tránsito de baja escala.**

En este capítulo se evalúan de las distintas capas de protección que fueron construidas en el capítulo 7.2 de este trabajo de título, las que están resumidas en la Tabla 7.2, estas probetas son sometidas a un ensayo alternativo que asimila la apertura de tránsito, para esto se utiliza la máquina de rueda de cargada para simular el paso de los vehículos. Este ensayo nos permite evaluar el comportamiento de las capas de protección, pudiendo detectar posibles fallas que se pudiesen generar. El procedimiento aplicado es el siguiente:

#### **7.3.1 Condiciones de exigencia para la validación del modelo.**

Cuando una mezcla asfáltica es usada en un pavimento, este está sujeto a múltiples factores que afectan su vida útil. Al realizar este ensayo, se asimilan factores reales como lo son el tráfico y el clima. Para generar las condiciones óptimas se aplican ciertas exigencias:

- i. Para la confección de las mezclas, se mantienen todos los materiales a 25°C durante al menos 60 min, como lo especifica el MC 8.302.53 para la construcción de probetas de rueda de carga.
- ii. No se realiza colocación de lechada asfáltica cuando las temperaturas atmosféricas o de la superficie a tratar sean inferiores a 10°C o durante tiempo inestable o lluvioso tal como lo indica el ensayo de rueda carga en el MC 8.302.53.
- iii. No se coloca ninguna mezcla cuya emulsión hubiere quebrado antes de las operaciones de esparcido, ni cuando existan demoras de más de 30 minutos entre la preparación de la mezcla y su colocación, por lo que la aplicación debe ser inmediata.
- iv. Se asume que el proceso constructivo de las probetas, se realizó de la forma más meticulosa y semejante posible. Ya sea a nivel de base estabilizada, imprimación, aplicación del TSS y la lechada asfáltica.
- v. En ningún momento la lechada se debe adherir a la rueda, para lo que se debe precisar el momento adecuado para el paso de la rueda cargada. Para esto se dejará fraguar las probetas por al menos 2 semanas, para lograr que la mezcla evapore toda el agua existente, evitando que la adherencia de la rueda se genere con la superficie debido al agua, ya que la falla de exudación es producida por el exceso de emulsión y no de agua.

### 7.3.2 Ensayo de validación para el uso de escoria de cobre en capas de protección.

La metodología que se utiliza se define a continuación y se muestra en la Figura 7.8:

- (1) Las carpetas (A)(B)(C)(D)(E)(F) fueron montadas para ensayar en la máquina de rueda cargada.
- (2) Se utilizó papel mantequilla sobre la superficie para evaluar la exudación que pudiesen presentar las probetas debido al paso de la rueda cargada.
- (3) El peso suministrado es de 56 Kg como lo estipula el MC en el Método 8.302.53 (Método de la rueda de carga) para el diseño de lechadas asfálticas. Se aplican 1000 ciclos, como lo propone el mismo MC, manteniendo la probeta bajo observación durante la duración del ensayo. La máquina debe recorrer una longitud de 12" en forma recíproca, a una frecuencia de 44 ciclos/min. Si transcurrido un determinado tiempo se observara brillo en la superficie de la probeta o humedad sobre el papel, se registra el número de revoluciones al cual se inicia este fenómeno.
- (4) Transcurridos 1.000 ciclos, se detiene la máquina, se descarga y se registran posibles signos de exudación, como lo es la adherencia del papel, brillo sobre la superficie o si esta se presenta pegajosa.
- (5) Finalmente se desarma el conjunto y sobre una bandeja se realiza el barrido del material para evaluar el posible desprendimiento del agregado.



Figura 7.8 "Ensayo de validación del uso de escoria de cobre"

Finalmente, en la Tabla 7.3 se detallan los resultados obtenidos donde se evalúan fallas como son la exudación y desprendimiento del agregado.

Tabla 7.3 "Fallas presentes en el ensayo de validación del uso de escoria de cobre en capas de protección"

Análisis de fallas frente a la simulación de tránsito a baja escala						
Probeta	Exudación				Desprendimiento del agregado	Baches
	Brillo	Pegajoso	Adherencia del papel con la superficie	Peso del papel absorbente		
(A)	No	No	No	No varía	No	No
(B)	No	No	No	No varía	No	No
(C)	No	No	No	No varía	No	Si
(D)	No	No	No	No varía	No	No
(E)	No	No	No	No varía	No	No
(F)	No	No	No	No varía	No	Si

A continuación, se presentan las probetas ensayadas donde se evidencian las fallas que se exponen en la Tabla 7.3. Donde se puede constatar que no existió exudación, desprendimiento del agregado y una falla (baches) que no se origina en TSS o lechada.



Figura 7.9 "Probetas post- ensayo de validación"

## Análisis de Resultados.

- No se presentó una adherencia del 100% para la escoria reproducida del río Aconcagua (A) al momento de construir las probetas, un tamaño de árido más grande (material retenido en la banda 3/8"), puede haber generado el impedimento de adherencia. Todo esto puede mejorar aplicando correctamente la distribución y compactación del agregado pétreo en terreno. Esto no es impedimento para ensayar estas probetas en la rueda cargada.
- A nivel de TSS se evidencian demasiados huecos en el agregado que podría mejorar muy bien la lechada asfáltica, generando una superficie regular, homogénea y texturada. Cumpliendo con el principal objetivo de la lechada que es rejuvenecer la superficie.
- El ensayo valida la adherencia y comportamiento existente entre la escoria de cobre y la emulsión para todas las capas de protección propuestas. Debido al análisis de posibles fallas como exudación y desprendimiento del agregado que se podrían haberse generado.
- Según lo señalado en la Tabla 7.3 no se generó desprendimiento del agregado a nivel de ninguna de las capas de protección ensayadas.
- Cuando se aplicó la rueda cargada sobre los TSS no se presentaron síntomas de exudación.
- Las probetas cape seal (C)(D)(E)(F) no presentaron exudación, ya que como se señaló en la Tabla 7.3 no se evidenció brillo, adherencia del papel ni una superficie pegajosa.
- Se presentó una falla que no se genera en TSS o lechada asfáltica, los baches son una falla que se genera por la mala compactación de la sub base o base, recordemos que se tiene que alcanzar un nivel de compactación del 95% según lo especifica el MC. Lo que puede no haberse logrado en las probetas (C) y (E), que fueron donde se generó esta falla. Esto se puede evitar realizando un meticuloso proceso constructivo y de compactación en terreno de las capas inferiores.
- Las probetas (A)(B)(D) y (F) no presentaron baches una vez concluido el ensayo. Lo que valida la similitud del ensayo con condiciones reales.
- Este prototipo se creó para simular el proceso constructivo de las capas de protección (TSS, lechada asfáltica y cape seal) con el fin de validar de forma experimental el uso de la escoria de cobre. Objetivo que se cumple a cabalidad ya que se validó el uso de escoria para distintas combinaciones de capas de protección, soluciones que podrían ser realizadas directamente por el ministerio.
- Los ensayos validan que cualquiera de las superficies propuestas, puedan ser entregadas al tránsito una vez que la mezcla haya curado.

- Finalmente, la escoria de cobre representa una buena alternativa de uso ya sea para TSS, lechadas asfáltica o cape seal, de igual forma todo esto debe ser validado en una cancha de prueba según lo especifica del MC.

## Conclusiones.

Mediante ensayos granulométricos aplicados a la escoria de cobre proveniente del centro de acopio de CODELCO Ventanas, se concluye que la escoria de cobre no satisface las especificaciones granulométricas tanto para TSS (banda TN10-2,5) y lechadas asfálticas (banda C-1). Por lo que en su condición de extracción no es posible utilizar este material para caminos básicos en la región de Valparaíso.

Para utilizar la escoria de cobre en caminos básicos es necesario chancar y seleccionar el material para poder dar cumplimiento a bandas granulométricas utilizadas para capas de protección para la región de Valparaíso, detalle de esto fue lo realizado en este trabajo de título donde fue necesario reproducir las bandas granulométricas tanto para TSS (banda TN10-2,5) y para lechadas asfálticas (C-1). Adicionalmente la escoria de cobre no se presentó contaminada con áridos de otro material, residuos orgánicos o cualquier otro material que pudiese alterar los resultados, por lo que se logró realizar un correcto análisis, uso y validación de la escoria en TSS, lechada asfáltica y sello cape seal.

La escoria de cobre, como árido para TSS, lechada asfáltica y sello cape seal, cumplió con todos los requisitos de agregados pétreos establecidos en el Volumen 5 MC, resultando una buena alternativa para el uso de este árido de botadero en capas de protección. En consecuencia, el uso de escoria resulta ser una buena alternativa para la ejecución de caminos básicos ejecutados directamente por el ministerio. Además, presenta mejoras en algunas propiedades mecánicas en comparación con los áridos fluviales.

Es importante considerar que la escoria de cobre posee características que se benefician directamente a las distintas capas de protección, donde se pueden generar ahorros en la cantidad de emulsión, agua y en el proceso de chancado y trituración del material. Todas estas propiedades resultan una ventaja para la utilización de este árido en caminos básicos.

La escoria de cobre posee una densidad mayor a los áridos tradicionales, lo que se traduce en dosificaciones de agregado mayores en  $\text{kg/m}^2$ , un mayor peso se traduce en grandes inconvenientes en relación a costos de traslado y disposición final del material, costos asociados principalmente a la capacidad de los camiones con respecto al volumen de material que puedan trasladar. Idealmente sería necesario considerar este factor, de manera de corroborar posibles incrementos en el gasto de combustible debido al aumento del peso de carga.

La escoria de cobre al presentar un menor porcentaje de absorción con respecto a áridos tradicionales, esta propiedad traduce la utilización de menores contenidos de emulsión tanto en TSS como en lechadas asfálticas.

Utilizar este material significaría un ahorro considerable en la construcción de carreteras y vías dentro del país, ahorrando los costos y daños por explotación de áridos fluviales lo cual genera un impacto ambiental y alteración al ecosistema y geografía en los lugares de extracción, por otro lado, resulta una solución sustentable para intentar disminuir la gran acumulación existente de este material disminuyendo el impacto que genera a la geografía del lugar (sectores de acopio), y reduciendo el impacto visual a las comunidades aledañas a los depósitos de este mismo. Utilizar este material generaría un impulso hacia la ingeniería sustentable y promover la utilización de recursos alternativos.

Si se realiza un estimativo, para la construcción de un tramo de prueba de 100 metros de longitud por 3,5 metros de ancho se necesitarían aproximadamente 6 toneladas de escoria de cobre para la construcción de un TSS y 5,3 toneladas de escoria de cobre para una lechada asfáltica. Lo que significaría un gran aporte para la disminución de este material que es depositado en los lugares de acopio.

En este trabajo de título se realizaron ensayos solo a TSS, pero esto no debería ser un impedimento el poder realizar TS múltiples utilizando escoria de cobre, debido a que estos se dosifican utilizando el mismo procedimiento de diseño.

Las dosificaciones utilizando escoria de cobre resultan ser apropiadas con respecto a los respectivos diseños tanto para TSS y lechada asfáltica, estas dosificaciones fueron refrendadas mediante inspección visual tanto de agregado y de la mezcla con asfalto.

Los métodos de diseño utilizados, la dimensión mínima promedio y el diseño de lechada asfáltica y microaglomerados en frío presentaron un buen funcionamiento para el uso de escoria de cobre. Validación de estos fue el ensayo del prototipo que logró cumplir con el objetivo de validar su uso a nivel constructivo y de tránsito, simulando condiciones reales de servicio no requiriendo ningún tipo de factor de corrección para las dosificaciones ya que no presentó ningún problema de exudación ni desprendimiento de agregados, pero no olvidando la necesidad de validación mediante una cancha de prueba.

Finalmente, la utilización de la escoria de cobre como agregado pétreo en capas de protección resulta ser una gran alternativa como árido, ya que este incorpora aspectos de sustentabilidad para el desarrollo del proyecto caminos básicos en la región de Valparaíso. La disposición de este material por parte de CODELCO Ventanas permitiría al MOP, la construcción de una serie de caminos en las comunas de Puchuncaví y Quintero, lo que podría generar un importante ahorro económico para proyectos desarrollados directamente por el ministerio lo que abre la oportunidad de otorgar una mejora de conectividad, dándole un uso efectivo a este material de botadero.

## Recomendaciones.

Se recomienda realizar un estudio de impacto ambiental, con el propósito de asegurar la existencia de un pasivo ambiental. Debido a que en la actualidad la escoria de cobre no se encuentra valorizada.

Se recomienda a la División de CODELCO Ventanas resolver el conflicto existente con respecto al uso de este material, haciendo parte a comunidades, juntas vecinales o sindicatos con el objetivo de informar la pasividad y actualidad del residuo mediante charlas y reuniones donde se clarifique los beneficios sobre el uso de la escoria de cobre en proyectos viales, estructurales o industriales, de manera de apaciguar el rechazo existente por la sociedad.

Si se aprueban los requerimientos ambientales, es necesario chancar la escoria, por lo que se recomienda la instalación de una planta chancadora de escoria dentro del mismo sector de botadero. El situar una planta chancadora en el mismo botadero permitiría mantener las emisiones de polvo en el mismo sector, junto con esto se recomienda implementar medidas de mitigación para la emisión de material particulado.

Se recomienda realizar un estudio de desgaste y trituración para el material como bolones que existen en gran cantidad en el patio de acopio a fin de justificar aún más la viabilidad de chancado del material.

Considerando los resultados obtenidos en este trabajo de título, se recomienda utilizar la escoria de cobre como agregado pétreo, ya sea como TSS, lechada asfáltica o sello cape seal, ya que cumple con los requerimientos estipulados en la normativa actual respecto a sus respectivos diseños.

Debido al correcto desempeño de la escoria de cobre como árido para TSS y lechada asfáltica, es que se recomienda profundizar el estudio de las propiedades de este residuo como árido para otras soluciones o capas inferiores como lo son capas granulares a nivel de bases y subbases.

Se recomienda evaluar el contenido de emulsión con respecto a otras bandas granulométricas ya sea en TS (bandas TN 25-12.5; TN 20-10; TN 12.5-5; TN 5-2.5; TN 20-12.5a; TN 20-12.5b; TN 10-6.3a; TN 10-6.3b) o para lechadas asfálticas (Tipo A-1; B-1; D-1), considerando las recomendaciones que establece el MC para la utilización de estas.

Se recomienda evaluar el contenido de escoria de cobre, variando porcentualmente la cantidad de escoria con respecto al árido tradicional (ejemplo: 50% de escoria y 50 % de árido tradicional) en TSS, lechadas asfálticas, sello cape seal y otros tipos de carpetas de rodadura,

con el propósito de verificar los beneficios que pudiese otorgar la escoria de cobre al generar una mezcla en conjunto.

Se recomienda realizar estudios que profundicen la conveniencia económica de la construcción de TS, lechadas asfáltica y sello cape seal utilizando escoria de cobre, considerando el ahorro extractivo que este conlleva.

Según el MC, se recomienda la revisión de las dosificaciones obtenidas mediante la construcción de tramos de prueba, validación que podría desarrollarse mediante el programa de caminos básicos desarrollado directamente por MOP, ya que según los resultados obtenidos este árido de botadero si se puede utilizar en capas de protección debido a su bajo desgaste frente a las cargas de tránsito y a bajo nivel de exudación todo esto reflejado en el ensayo expuesto en el capítulo 7 de este trabajo de título.

## Bibliografía

- [1] Nazer, O. P. (2010). Una revisión sobre los usos de las escorias de cobre. Paper, Congreso IBEROMET XIX CONAMET/SAM.
- [2] Aguayo, O. (2016). Taller Latinoamericano de pavimentos y caminos básicos. Santiago de Chile.
- [3] Amin Nazer, J. P. (2016). Caracterización de escorias de cobre de fundiciones chilenas del Siglo XIX. Revista de Metalurgia.
- [4] Bitumix. (s.f.). Bitumix Sur. Obtenido de <http://www.bitumixsur.cl/servicios/tratamientos-superficiales/>
- [5] Bustos, S. H. (2016). Evaluación de la Utilización de Escoria, producto de extracción de cobre como árido para pavimentos flexibles. Valparaíso: Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil.
- [6] CASTILLO, C. (2008). Formulación de una metodología general para la elección de programas de conservación de pavimentos viales y su aplicación a la región de Magallanes. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- [7] CODELCO División Ventana, D. D. (7 de julio de 2015). CODELCO Ventanas hizo entrega de escoria para la construcción de caminos en Puchuncaví y Quintero.
- [8] CODELCO. (s.f.). [https://www.codelco.com/division-ventanas/prontus\\_codelco/2016-02-25/165525.html](https://www.codelco.com/division-ventanas/prontus_codelco/2016-02-25/165525.html).
- [9] CODELCO. (s.f.). [https://www.codelco.com/historia/prontus\\_codelco/2011-02-25/103555.html](https://www.codelco.com/historia/prontus_codelco/2011-02-25/103555.html).
- [10] CODELCO. (s.f.). <https://www.codelcoeduca.cl>.
- [11] CODELCO. (2015.). Reporte de sustentabilidad año 2015.
- [12] Cavieres W. (2008) Comportamiento de las soluciones básicas de carpetas de rodadura aplicadas a caminos de bajo tránsito: memoria para optar al título de ingeniero civil
- [13] Vialidad, M.d. (s.f.).Concepto de caminos Básicos. [http://www.vialidad.cl/proyectos/caminosbasicos/Documents/Conceptos\\_CBasicos](http://www.vialidad.cl/proyectos/caminosbasicos/Documents/Conceptos_CBasicos)

- [14] Gómez, S. A. (2006). Uso de escoria de cobre en cementos. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- [15] Granalla. (s.f.). <http://www.granalla.cl/mineria.html>.
- [16] Kohnenkamp, E. (2016). "Estudio del efecto de la adición de aluminio metálico a las escorias oxidicas en División Ventana de CODELCO". Memoria de Titulo Universidad Técnica Federico Santa María, Dpto. de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales.
- [17] Laboratorio Nacional de Vialidad, M. (2000). Curso Laboratorista Vial. 5ª edición, Vol. II. Santiago: Libro de curso de Laboratorista.
- [18] M. Miranda, A. V. (09 de 01 de 2017). <http://diario.latercera.com/2017/01/09/01/contenido/pais/31-230614-9-el-60-de-los-caminos-en-chile-no-esta-pavimentado-y-regiones-viii-y-ix-lideran.shtml>.
- [19] Manual de Carreteras Volumen 5 "Especificaciones técnicas generales de construcción". (Edición 2016).
- [20] Manual de Carreteras Volumen 8 "Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control". (Edición 2016).
- [21] McLeod, N. (1959). Asphalt Surface Treatments and Seal Coats. Toronto, Ontario: Asphalt Consultant, Imperial Oil Ltd.
- [22] Ministerio de Obras Públicas. (s.f.). Curso de laboratorista MOP. Santiago de Chile.
- [23] Miranda, R. (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos. Valdivia. Tesis para optar al título de Ingeniero Constructor. Universidad Austral de Chile.
- [24] Orizola, S. (2006). Uso de escoria de cobre en cementos. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile
- [25] Osvaldo Aguayo, M. (2016). Curso taller Latinoamericano de pavimentos y caminos básicos. Santiago de Chile.
- [26] Oyarzun, I. (2013). Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón. Valdivia: Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile
- [27] Pantoja, J. B. (2016). Utilización de Escoria de Cobre como Agregado Pétreo en Mezclas Asfálticas en Caliente, y Evaluación del Comportamiento Mecánico a Largo

- Plazo. Valparaíso: Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil. Universidad de Valparaíso
- [28] Pérez, Y. (2017). Utilización de escoria de cobre de CODELCO Ventana como agregado pétreo para tratamientos superficiales asfálticos simples. Valparaíso. Universidad Técnico Federico Santa María, Departamento de obras Civiles.
- [29] Santander, N. (1972). Pirometalurgia del cobre. Santiago de Chile: Universidad Técnica del Estado.
- [30] SANTANDER, N. H. (s.f.). Pirometalurgia del cobre.
- [31] Sepúlveda, C. (2006). Utilización De Escorias De Fundición Para La Producción De Compuestos De Hierro. Memoria de Titulo Universidad De Chile, Santiago.
- [32] Trafilaf, S. (08 de 02 de 2015). <http://radio.uchile.cl/2015/02/08/los-peligros-de-la-extraccion-masiva-de-aridos/>. Obtenido de <http://radio.uchile.cl/2015/02/08/los-peligros-de-la-extraccion-masiva-de-aridos/>
- [33] Vialidad, D. d. (2014). Infraestructura Vial en Chile.
- [34] Vialidad, M. d. (2009). Informe final de evaluación Programa Caminos Básicos.
- [35] Vialidad, M. d. (s.f.). Historia del Programa.
- [36] Villacencio, C. (2015). Impacto de la aplicación de nuevas tecnologías de sellado con capa de protección asfáltica plazos, costos y calidad de construcción de caminos secundarios en Chile. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- [37] Villacorta, F. L. (s.f.). Estudio comparativo de metodologías de diseño de tratamientos superficiales bituminosos. Universidad Nacional de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME).

**ANEXOS.**

I. Ensayos de agregados pétreos para áridos tradicionales y la escoria de cobre.

A. Densidad de grava y absorción.

densidad real seca	$\rho_{RS}$	$Z/(X-Y)*1000$
densidad neta	$\rho_{RN}$	$Z/(Z-Y)*1000$
Absorción	$\alpha$	$(X-Z)/Z*100$

			Río Aconcagua			
			Río Aconcagua		Escoria de cobre reproducida	
Peso Superficialmente Seco	X	gr	3092	3467	1971	1971
Peso Bajo Agua	Y	gr	1946	2164	1456	1455
Peso Seco	Z	gr	3046	3382	1968	1967
	X-Y		-	-	-	-
Densidad Real Seca	-	kg/m3	2657,9	2595,5	3821,4	3812,0
	Z-Y		-	-	-	-
Densidad Neta		kg/m3	2769,1	2776,7	3843,8	3841,8
Absorción		%	1,510177282	2,513305736	0,152439024	0,203355363
Densidad Real Seca		kg/m3	2626,74		3816,69	
Densidad Neta		kg/m3	2772,89		3842,77	
Absorción		%	2,01		0,18	
			Estero La Patagua			
			Estero La Patagua		Escoria de cobre reproducida	
Peso Superficialmente Seco	X	gr	3099	3434	1969	2001
Peso Bajo Agua	Y	gr	1962	2175	1455	1478
Peso Seco	Z	gr	3058	3395	1965	1997
	X-Y		-	-	-	-
Densidad Real Seca	-	kg/m3	2689,5	2696,6	3823,0	3818,4
	Z-Y		-	-	-	-
Densidad Neta		kg/m3	2790,1	2782,8	3852,9	3847,8
Absorción		%	1,340745585	1,148748159	0,203562341	0,200300451
Densidad Real Seca		kg/m3	2693,06		3820,66	
Densidad Neta		kg/m3	2786,47		3850,36	
Absorción		%	1,24		0,20	

B. Densidad aparente suelta.

		Rio Aconcagua	
		Arido tradicional	Escoria de cobre
Volumen medida	lt	3019	3019
Masa medida (recipiente)	g	3287	3287
Masa material + masa medida 1	g	7937	9567
Masa material + masa medida 2	g	7474	9666
Masa promedio	g	7705,5	9616,5
Masa muestra suelta	g	4418,5	6329,5
Densidad aparente suelta	kg/m <sup>3</sup>	1,464	2,10
		Estero La Patagua	
		Estero La Patagua	Escoria de cobre reproducida según Estero la Patagua
Volumen medida	lt	3019	3019
Masa medida (con recipiente)	g	3287	3287
Masa material + masa medida 1	g	7937	9610
Masa material + masa medida 2	g	7772	9609
Masa promedio	g	7854,5	9609,5
Masa muestra suelta	g	4567,5	6322,5
Densidad aparente suelta	kg/m <sup>3</sup>	1,51	2,09

C. Densidad y absorción del fino.

	Escoria de Cobre	Polvo de roca
Densidad real seca (kg/m <sup>3</sup> )	3.782	2.629
Densidad neta (kg/ m <sup>3</sup> )	3.833	2.746
Absorción (%)	0,4	1,8

#### D. Índice de lajas.

Río Aconcagua								
Ab pié de m	Río Aconcagua				Escoria de cobre			
	M retenida	M que pasa	M total	IL fracción	M retenida	M que pasa	M total	IL fracción
mm	g	g	g	%	g	g	g	%
4,89	114,1	15,9	130	12,2	121,30	27,50	148,80	18,48
3,39	55,3	11,8	67,1	17,6	187,90	41,40	229,30	18,05
Índice de Lajas	15,5				18,22			
Estero La Patagua								
mm	Estero La Patagua				Escoria de cobre			
	M retenida	M que pasa	M total	IL fracción	M retenida	M que pasa	M total	IL fracción
mm	g	g	g	%	g	g	g	%
6,75	243,3	49,8	293,1	17,0	54,10	6,70	60,80	11,02
4,89	124,4	26,9	151,3	17,8	198,00	42,13	240,13	17,54
3,39	67,8	15,1	82,9	18,2	97,00	23,40	120,40	19,44
Índice de Lajas	14,2				17,2			

#### E. Material fino por lavado.

Río Aconcagua			
		Árido tradicional	Escoria de cobre
Peso muestra inicial	g	2560	2504.3
Peso muestra final	g	2552	2501.7
Diferencia	g	8	2.6
Fino por lavado	g	0.31	0.10
Estero La Patagua			
		Árido tradicional	Escoria de cobre
Peso muestra inicial	g	2571	2508.9
Peso muestra final	g	2560	2502.7
Diferencia	g	11	6.2
Fino por lavado	g	0.43	0.25

F. Cubicidad de partículas.

		Río Aconcagua	
		Árido tradicional	Escoria de cobre
Peso muestra total	g	317,6	302,1
Peso material chancado	g	288,1	292,1
Peso material rodado	g	0,0	0,0
Peso laja chancada	g	0,0	10,0
Peso laja rodada	g	29,5	0,0
Chancado total	%	90,7	100,0
Rodado	%	0,1	0,0
Lajas	%	0,6	4,5
		Estero La Patagua	
		Árido tradicional	Escoria de cobre
Peso muestra total	g	714,10	500,00
Peso material chancado	g	676,6	482,6
Peso material rodado	g	0	0
Peso laja chancada	g	37,5	17,4
Peso laja rodada	g	0	0
Chancado total	%	100	100
Rodado	%	0	0
Lajas	%	5,3	3,5

G. Índice de trituración

Material	Escoria de cobre							
	10		5		2.5		1.25	
Grado	1	2	1	2	1	2	1	2
Ensayo	1	2	1	2	1	2	1	2
Muestra + Molde	2384.7	2432.1	2365.4	2356	2313	2315	2289	2305
Molde	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520
Muestra	864.7	912.1	845.4	836	793	795	769	785
Tamiz para finos producidos	1.25		0.63		0.315		0.16	
Retenido	832.5	878.6	815.8	809.6	775.3	771.2	753.5	771.4
Que pasa	32.2	33.5	29.6	26.4	17.7	23.8	15.5	13.6
I.T parcial	3.72	3.67	3.50	3.16	2.23	2.99	2.02	1.73
I.T Parcial por corte	3.7		3.3		2.6		1.9	
I.T Total	2.9							

## H. Desintegración por sulfato de sodio.

Desintegración por Sulfato de Sodio			
	Peso inicial	Peso final	Desintegración
Estero La Patagua	301,4	298,1	0,20%
Escoria de cobre	302,4	301,1	0,02%
Río Aconcagua	301,2	298,3	0,22%
Escoria de cobre	302,3	301,9	0,03%

## I. Desgaste de los Ángeles.

Asignación de Grado de Ensaye para Estero La Patagua									
NCh [mm]	ASTM	Retenido [%]	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4	Grado 5	Grado 6	Grado 7
12,5	1/2	0	-	-	-	-	-	-	-
10	3/8	12	-	-	-	12	12		
6,3	1/4	48	-	-	-			48	
5	# 4	24	-	-	-			24	
2,5	# 8	15	-	-	-				15
Sumatoria % Parcial Retenido			-	-	-	12	12	72	15
Asignación de Grado de Ensaye para Río Aconcagua									
NCh [mm]	ASTM	Retenido [%]	Grado 1	Grado 2	Grado 3	Grado 4	Grado 5	Grado 6	Grado 7
12,5	1/2	0	-	-	-	-	-	-	-
10	3/8	0	-	-	-	-	-	-	-
6,3	1/4	30	-	-	-	-	-	30	-
5	# 4	46	-	-	-	-	-	46	-
2,5	# 8	23	-	-	-	-	-		23
Sumatoria % Parcial Retenido			-	-	-	-	-	76	23

	Mi [g]	Mf [g]	P [%]
Río Aconcagua	5000	4310	13.8%
Estero La Patagua	5000	4212	15.8%
Escoria de cobre reproducido Río Aconcagua	5000	4030	19.4%
Escoria de cobre reproducida Estero La Patagua	5000	3996	20.1%



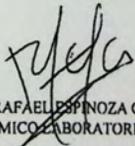
CERTIFICADOS ISO 9001 : 2008

DOC. N°	069
GUIA N°	119863

**CERTIFICADO DE ANALISIS E.A. CRS-2  
LABORATORIO CONTROL DE CALIDAD**

Fecha	13-abr-2017
Cliente	CONSTRUCTORA COMASCA S.A.
Destino	RETIRA CLIENTE LIMACHE
Toneladas / N° Tambores	6.15
Estanque	E-2
Fecha V° B°	13-abr-2017
Partida N°	104
Chofer	MAURICIO OLIVAREZ
Patente	SP-7062

ANALISIS	RESULTADO	ESPECIFICACION		METODO
		Min.	Máx.	Manual de Carreteras (MC)
Viscosidad SFs a 50°C. (s)	198	100	400	MC 8.302.12
Estabilidad en Almacenamiento, 24 hrs. (%)	En Análisis		1	MC 8.302.5
Demulsibilidad, (%)	79,6	40		MC 8.302.5
Carga de Partícula	Positiva		POSITIVA	MC 8.302.5
Tamizado, (%)	0,08		0,1	MC 8.302.5
<b>DESTILACION</b>				
Residuo, (%)	65,1	65		MC 8.302.5
Aceite, (%)	0.25		3	MC 8.302.5
<b>EN EL RESIDUO</b>				
Penetración a 25°C, 100g, 5s., (1/10 mm.)	105	100	250	MC 8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min., (cm.)	80	40		MC 8.302.8
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	+97,5	97,5		MC 8.302.11
Ensayo de la Mancha, (% Xilol)	-30		30	MC 8.302.7

  
 RAFAEL ESPINOZA C.  
 QUIMICO LABORATORISTA

[www.quimicalatinoamericana.cl](http://www.quimicalatinoamericana.cl)

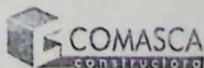
Gerencia: Magdalena N° 265, Las Condes - Santiago, Fono/Fax: (56)(2)2335588- E-mail: ventas@qla.cl  
 Planta Vía del Mar: Limache esq. Calle 5 N°15 - El Salto, Fono/Fax: (56)(32)2672085  
 Planta Talcahuano: Camino Lengua N°3341- Talcahuano, Fono/Fax: (56)(41)2414049



Análisis de Emulsión Asfáltica

Tipo de Emulsión Asfáltica: CSS-1H

Análisis	Resultado	Especificación		Método
		Min.	Máx.	
Viscosidad a 25°C. (sSF)	43	20	100	M C 8 302 12
Estabilidad en Almacenamiento, 24 horas (%)	0,08	-	1	M C 8 302 5
Farmizado, (%)	0,02	-	0,1	M C 8 302 5
Carga de Partícula	Positiva	Positiva		M C 8 302 5
Residuo por destilación. (%)	63,3	57		M C 8 302 5
<b>Ensayes al Residuo</b>				
Penetración a 25°C, 100g, 5c. (0,1 mm )	70	40	90	M C 8 302 3
Ductilidad a 25°C. 5 cm/mm. (cm )	66,4	40	-	M C 8 308 8
Ensaye de la Mancha. (% Xolol)	-30	-	30	M C 8 302 7



## ANEXO DE FIGURAS.



*Figura A1 "Muestreo de escoria de cobre en escoria CODELCO Ventanas"*



*Figura A2 "Tamizado y selección de material"*



*Figura A3 "Selección de escoria de cobre para reproducción de bandas granulométricas"*



*Figura A4 "Ensayo de consistencia de lechadas asfálticas"*



*Figura A5 "Maquina de abrasión en medio húmedo para diseño de lechadas asfálticas"*



*Figura A6 "Maquina de Rueda Cargada para diseño de lechadas asfálticas"*



*Figura A7 "Horno para acondicionamiento de Muestras"*



*Figura A8 "Moldes para construcción de probetas de AMH y Rueda de Carga"*



*Figura A9 "Construcción de probetas de AMH y Rueda de Carga"*



*Figura A10 "Probetas de AMH y Rueda de Carga"*



*Figura A11 "Máquina de Desgaste de los Ángeles para ensayo de desgaste y chancado del material"*