



Universidad de Valparaíso
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Utilización de Escoria de Cobre como Agregado Pétreo en Mezclas Asfálticas en Caliente, y Evaluación del Comportamiento Mecánico a Largo Plazo

Por

Jorge Luis Boock Pantoja

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

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Marzo, 2017

Dedicatoria

Este trabajo de título se lo dedico a mi familia en especial a mi madre por enseñarme de que todo en la vida es posible si están las ganas de salir adelante y el esfuerzo para lograrlo, que a pesar de las dificultades ¡siempre se puede!, además la importancia de estar siempre unidos como familia, ya que viajamos juntos por este camino que se llama vida.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, fuente de toda sabiduría, por entregar el apoyo y las herramientas necesarias para lograr terminar esta etapa de formación y guiarme por el mejor camino, que muchas veces me costó ver, pero que finalmente pude comprender.

A mis padres, por su cariño incondicional, ya que a pesar de las dificultades siempre me entregaron su apoyo, sobre todo en los momentos difíciles.

A mi profesor guía don Guillermo Brante, por creer en mí y entregar su apoyo y experiencia para aclarar cada duda que surgió en desarrollo de este trabajo de título, además por gestionar los contactos necesarios para desarrollar los ensayos.

Al equipo de trabajo del laboratorio de vialidad de la Quinta Región por transmitir su conocimiento y por la ayuda que me brindaron cuando fue necesario.

Al equipo de trabajo del Laboratorio Nacional de Vialidad por haberme permitido realizar ensayos que fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Al señor W. Amadeus Mozart, por su música, motivación en esas largas horas de estudio.

Índice de contenidos

1	Capítulo I: Introducción.....	15
1.1	Introducción General.....	15
1.2	Procedencia de la Escoria de cobre de fundición.....	16
1.3	Generalidades sobre mezclas asfálticas	17
1.4	Planteamiento del problema.....	20
1.5	Objetivos	21
1.5.1	Objetivo general.....	21
1.5.2	Objetivos específicos	21
1.6	Alcances	22
1.7	Metodología	23
2	Capítulo II: Marco Teórico	24
2.1	El cobre	24
2.1.1	El cobre en Chile.....	25
2.2	Escoria de Cobre	27
2.2.1	Composición de la escoria de cobre	27
2.2.2	Tipos de escoria de cobre.....	30
2.2.3	Estudio de impacto ambiental.....	34
2.3	Comportamiento de las mezclas asfálticas.....	36
2.4	Propiedades mecánicas consideradas en mezclas asfálticas	40
2.5	Áridos en mezclas asfálticas	44
2.5.1	Requisitos para áridos en mezclas asfálticas	44
2.5.2	Áridos en mezclas asfálticas en caliente.....	44
2.6	Asfalto	47
2.6.1	Especificaciones para asfaltos	47
2.7	Diseño de mezclas asfálticas.....	49
2.7.1	Requerimientos para mezclas asfálticas en caliente	49
3	Capítulo III: Propiedades de la escoria de cobre como árido	50
3.1	Granulometría de la escoria	50

3.2	Cubicidad de partículas	51
3.3	Índice de lajas.....	52
3.4	Resistencia al desgaste	52
3.5	Densidad y absorción	53
3.5.1	Densidad aparente suelta	53
3.5.2	Densidad real, neta y absorción	54
4	Capítulo IV: Escoria de cobre como árido en mezclas asfálticas en caliente.....	55
4.1	Mezcla asfáltica en caliente	55
4.1.1	Características del cemento asfáltico CA-24 utilizado en la mezcla.....	55
4.1.2	Evaluación de áridos para mezclas asfálticas en caliente	56
4.1.3	Reconstitución de banda granulométrica	58
4.1.4	Confección de las probetas Marshall	59
4.2	Porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla según diseño Marshall	62
4.2.1	Óptimo por densidad.....	63
4.2.2	Óptimo por estabilidad.....	64
4.2.3	Óptimo para 5% de huecos de aire en la mezcla	66
4.2.1	Otros parámetros obtenidos en el diseño Marshall.....	69
4.2.2	Cálculo del porcentaje óptimo de asfalto.....	74
5	Capítulo V: Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente	76
5.1	Parámetros influyentes en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica ...	76
5.1.1	Estabilidad	76
5.1.2	Rigidez.....	76
5.1.3	Resistencia a la tracción.....	78
5.2	Diagrama de estudio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas	80
5.3	Comportamiento a corto plazo	81
5.3.1	Agrietamiento por bajas temperaturas	81
5.3.2	Comportamiento en presencia de humedad	83
5.3.3	Temperatura máxima de la mezcla bajo radiación solar.....	85
5.3.4	Resistencia al deslizamiento	89
5.4	Comportamiento a largo plazo	93

5.4.1	Resistencia al desgaste superficial	93
5.4.2	Resistencia a la fatiga	106
5.4.3	Resistencia al ahuellamiento.....	109
6	Capítulo VI: Evaluación del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas asfálticas en caliente	114
6.1	Comparación de propiedades mecánicas	115
6.2	Comparación de los mecanismos de falla a largo plazo	116
6.2.1	Resistencia al desgaste.....	116
6.2.2	Resistencia a la fatiga	117
6.2.1	Resistencia al ahuellamiento.....	121
6.3	Comportamiento mecánico a largo plazo de las mezclas estudiadas.....	122
7	Capítulo VII: Diseño estructural de un tramo de prueba utilizando escoria de cobre como agregado pétreo.....	123
7.1	Diseño estructural de las capas asfálticas y granulares.....	124
7.2	Parámetros de diseño.....	125
8	Conclusiones y recomendaciones	131
9	Bibliografía	134
10	Anexos	136
10.1	Ensayes.....	137
10.1.1	Desgaste los Ángeles	138
10.1.2	Reconstitución de mezclas.....	139
10.1.3	Densidad de la escoria de cobre.....	140
10.1.4	Densidad de mezclas asfálticas.....	141
10.2	Figuras	142
10.3	Ficha técnica CA-24 y Nomograma de Heukelom.....	146

Índice de Figuras

Figura 1.1: Depósito de escoria de cobre. Fuente: Pool (2011).....	16
Figura 1.2: Distribución tipo de capas estructurales de un pavimento flexible.....	18
Figura 1.3: Comportamiento de un pavimento flexible.....	19
Figura 1.4: Falla tipo piel de cocodrilo.....	19
Figura 1.5: Falla por ahuellamiento.....	19
Figura 2.1: Minerales Sulfurados. Fuente: Codelco educa.....	24
Figura 2.2: Minerales oxidados. Fuente: Codelco educa.....	25
Figura 2.3: Países de mayor producción de cobre (%) año 2010, (Fuente: BGS World Mineral Statistics).....	25
Figura 2.4: Tendencia en 5 años de los mayores productores de cobre (Fuente: BGS World Mineral Statistics).....	25
Figura 2.5: Microscopía electrónica de barrido de un grano de escoria de cobre (5000x ampliación, fuente: Almeida 2007).....	28
Figura 2.6: Difractograma de escoria de cobre de la minera "The Black Sea Cooper Works" Samsun, Turquía. (Fuente: Alp 2008).....	28
Figura 2.7: Escoria de botadero, acopio Codelco Ventanas.....	32
Figura 2.8: Escoria expandida, acopio de Codelco Ventanas.....	33
Figura 2.9: Escoria de cobre granallada.....	33
Figura 2.10: Imagen satelital botadero de escoria, Codelco Ventanas, 2004-2016. Fuente: google Earth.....	34
Figura 2.11: Plano de corte producto del desplazamiento del agregado.....	37
Figura 2.12: Variación de una mezcla asfáltica en función del tiempo de aplicación de una carga, (fuente: Cepeda, 2002).....	38
Figura 4.1: Método del Hervido, resultados para escoria de cobre (1) y árido del río Aconcagua (2).....	58
Figura 4.2: Curva de reconstitución de la mezcla de escoria de cobre para banda IV-A-12.....	59
Figura 4.3: Probetas Marshall.....	61
Figura 4.4: Gráfico de estabilidad para mezclas de escoria y tradicional.....	65
Figura 4.5: gráfico de fluidez para mezclas de escoria y tradicional.....	65
Figura 4.6: Huecos de aire para mezclas con escoria de cobre y tradicional.....	68
Figura 5.1: Registro de temperaturas para mezclas asfálticas bajo radiación solar.....	85
Figura 5.2: Gráfico de temperaturas de mezclas asfálticas a distintas horas del día.....	87
Figura 5.3: Microtextura y Macrotextura de un pavimento.....	89
Figura 5.4: Partes del péndulo Británico, fuente: Manual de Carreteras 8.502.16.....	90
Figura 5.5: Gráfico de corrección de BPN para temperatura del agua a 20°C.....	90
Figura 5.6: Imagen de la ejecución del ensayo de resistencia al deslizamiento mediante el Péndulo Británico.....	91

Figura 5.7: Ensayo desgaste de Cantabro.	94
Figura 5.8: Dispositivos de plomo.	98
Figura 5.9: Confección de probeta con dispositivo de plomo	99
Figura 5.10: Mezcla asfáltica con dispositivo de plomo, M es la masa total de la mezcla asfáltica	99
Figura 5.11: Probetas después del ensaye de Cantabro.	104
Figura 5.12: Gráfico experimental de desgaste superficial para distintos tipos de mezcla.	104
Figura 5.13: Gráfico de desgaste superficial para una misma energía potencial durante el ensaye Cantabro.	105
Figura 5.14: Ejecución del ensaye de fatiga.	107
Figura 5.15: Gráfico de Fatiga a un 50% de rigidez, deformación cte. (500 $\mu\epsilon$).	107
Figura 5.16: Gráfico de Fatiga a un 50% de rigidez, deformación cte. (300 $\mu\epsilon$).	107
Figura 5.17: probetas SUPERPAVE para ensayo de ahuellamiento.	109
Figura 5.18: Probetas de escoria de cobre antes y después del ensayo de Ahuellamiento.	111
Figura 5.19: Curva de Ahuellamiento en especímenes de mezcla con escoria de cobre.	111
Figura 5.20: Curva de Ahuellamiento en especímenes de mezcla con árido tradicional.	112
Figura 6.1: Comparación de desgaste en mezclas asfálticas.	116
Figura 6.2: Resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas.	117
Figura 6.3: Ciclos de carga para ensayo de fatiga a 500 $\mu\epsilon$	118
Figura 6.4: Disipación de energía durante el ensayo de fatiga a 500 $\mu\epsilon$	119
Figura 6.5: Ciclos de carga para ensayo de fatiga a 300 $\mu\epsilon$	119
Figura 6.6: Ciclos de carga para ensayo de fatiga a 300 $\mu\epsilon$	120
Figura 6.7: Comparación de ahuellamiento de mezclas asfálticas.	121
Figura 10.1: Botadero de escoria de cobre Codelco Ventanas.	143
Figura 10.2: Muestreo aleatorio de escoria de cobre.	143
Figura 10.3: Cuarteo de agregado de escoria.	143
Figura 10.4: Tamizado de escoria.	143
Figura 10.5: reconstitución de banda IV-A-12.	143
Figura 10.6: Agregados pétreos a temperatura de 154°C +/- 3°C.	144
Figura 10.7: Mezclado de agregados con ligante asfáltico.	144
Figura 10.8: Preparación de la mezcla asfáltica para compactar a 146°C +/- 3°C.	144
Figura 10.9: compactador Marshall.	144
Figura 10.10: Desmolde de probetas.	144
Figura 10.11: Probetas Marshall.	145
Figura 10.12: Prensa Marshall.	145
Figura 10.13: Probeta ensayada a compresión diametral RTI.	145
Figura 10.14: Probetas después de ensaye RTI.	145
Figura 10.15: Probetas Superpave después de ensaye de ahuellamiento.	145
Figura 10.16: Vigas para ensaye de fatiga.	145

Índice de tablas

Tabla 2.1: Empresas mineras en Chile año 2012.....	26
Tabla 2.2: Análisis de Fluorescencia de Rayos X, muestra de escoria de cobre en fundición de Codelco División Ventanas.....	29
Tabla 2.3: Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante fluorescencia, Fuente: Orizola (2006); Moura (1999); Al-Jabri (2011).	30
Tabla 2.4: Estructura molecular de la escoria de cobre según el índice de silicatación.	31
Tabla 2.5: Concentraciones de metales en suelos de botadero de escoria de cobre de Codelco División Ventanas	35
Tabla 2.6: Requisitos de los áridos para mezclas asfálticas en caliente [16].....	45
Tabla 2.7: Requisitos de los finos para mezclas asfálticas en caliente [16].	45
Tabla 2.8: Granulometría del filler [16].....	46
Tabla 2.9: Requisitos para áridos combinados [16].....	46
Tabla 2.10: Granulometría semidensa, banda IV-A-12 [16].	46
Tabla 2.11: Especificaciones para el cemento asfáltico CA-24.....	48
Tabla 2.12: Requisitos para mezclas asfálticas en caliente.	49
Tabla 2.13: Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral (VAM).	49
Tabla 3.1: Granulometría general de la escoria de cobre.	50
Tabla 3.2: Cubicidad de partículas	51
Tabla 3.3: Desgaste Los Ángeles, según grado de áridos.....	53
Tabla 3.4: Densidad aparente suelta	53
Tabla 3.5: Resultados densidad real de áridos.....	54
Tabla 4.1: Características del cemento asfáltico CA-24 de PROVISA.....	55
Tabla 4.2: Resultados para fracción gruesa de áridos para mezclas asfálticas en caliente.....	57
Tabla 4.3: Propiedades para fracción fina de áridos para mezclas asfálticas en caliente.	57
Tabla 4.4: Reconstitución de la mezcla para banda IV-A-12	58
Tabla 4.5: Densidades de las probetas Marshall de escoria de cobre (1,4% de filler).	63
Tabla 4.6: Densidades máximas para cada tipo de mezcla.....	63
Tabla 4.7: Estabilidad para la mezcla compuesta con escoria de cobre (1,4% de filler).....	64
Tabla 4.8: Óptimo por estabilidad	65
Tabla 4.9: EC, Dmm según % de asfalto.....	67
Tabla 4.10: AT, Dmm según % de asfalto.....	67
Tabla 4.11: Huecos de aire para mezcla de escoria de cobre.....	67
Tabla 4.12: Huecos de aire para mezcla de árido del río Aconcagua.	68
Tabla 4.13: Óptimo para 5% de huecos de aire	68
Tabla 4.14: Resumen de resultados.	69
Tabla 4.15: Densidad efectiva de los agregados pétreos.	70
Tabla 4.16: Absorción de asfalto.	70
Tabla 4.17: Contenido de asfalto útil en mezclas con escoria de cobre.	71

Tabla 4.18: Contenido de asfalto útil en mezclas con árido del río Aconcagua.....	71
Tabla 4.19: Vacíos en el agregado mineral en mezclas de escoria de cobre.	72
Tabla 4.20: Vacíos en el agregado mineral en mezclas de árido del río Aconcagua.....	72
Tabla 4.21: Huecos llenos con asfalto en mezclas con escoria de cobre.	72
Árido del río Aconcagua:.....	73
Tabla 4.22: Huecos llenos con asfalto en mezclas con árido del río Aconcagua.	73
Tabla 4.23: Resultados para la mezcla asfáltica con escoria de cobre (1,4% de filler).....	73
Tabla 5.1: RTI para mezcla con escoria de cobre en condición seca.	79
Tabla 5.2: RTI para mezcla con árido del río Aconcagua en condición seca.	79
Tabla 5.3: Resultados RTI para mezcla con escoria de cobre a baja temperatura.	81
Tabla 5.4: Resultados RTI para mezcla con árido del río Aconcagua a baja temperatura. ..	82
Tabla 5.5: Resultados RTI para mezcla de escoria de cobre en condición húmeda.	83
Tabla 5.6: Resultados RTI para mezclas con árido del río Aconcagua en condición húmeda.	83
Tabla 5.7: Registro de temperatura diaria de las mezclas asfálticas.....	86
Tabla 5.8: Resultado de las lecturas registradas mediante el péndulo Británico.	91
Tabla 5.9: Iteración para encontrar las dimensiones del dispositivo de plomo.	98
Tabla 5.10: Resultados para las probetas AT.	100
Tabla 5.11: Resultados para las probetas AT*.	101
Tabla 5.12: Resultados probetas AT**.	102
Tabla 5.13: Resultados para las probetas EC.....	103
Tabla 5.14: Resultados para las probetas EC*.	103
Tabla 5.15: Resultados de ensaye de fatiga.	106
Tabla 5.16: Probetas SUPERPAVE de escoria de cobre.....	109
Tabla 5.17: Probetas SUPERPAVE de árido del río Aconcagua.	110
Tabla 6.1: Propiedades mecánicas a corto plazo.	115
Tabla 6.2: Propiedades Mecánicas a largo plazo.	115
Tabla 7.1: Ejes equivalentes para calculados para 20 años.	126
Tabla 7.2: Nivel de confiabilidad según ejes equivalentes.	126
Tabla 7.3: Coeficientes estructurales	128
Tabla 7.4: Cantidades de material para la confección del tramo de prueba.	130

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.

Árido: Materiales naturales rocosos como las arenas o las gravas.

Árido Tradicional: Agregado pétreo comúnmente utilizado en pavimentos.

Árido virgen: Árido extraído en depósitos naturales como canteras y ríos.

AT: Árido Tradicional.

Ahuellamiento: Deformación longitudinal, en forma de huella, producida por el tránsito vehicular.

Cobre: Metal de color pardo rojizo, brillante, dúctil, muy maleable, resistente a la corrosión y buen conductor de la electricidad y el calor.

Comportamiento mecánico: comportamiento de un material sometido a condiciones de servicio, como cargas y cambios de temperatura.

Durabilidad: Tiempo en el que un material mantiene sus propiedades resistentes con las cuales fue diseñado.

Escoria de cobre: Material constituido en un 90% o más por sílice y hierro, con algún contenido de cobre residual que se separa de la mezcla fundida en el interior de hornos de reverbero o convertidores por gravedad, quedando ésta en la parte superior donde es retirada en forma separada de la parte donde está el cobre por vaciado del horno.

EC: Escoria de Cobre

Fatiga: Condición en la cual un material deja de comportarse elásticamente.

Filler: Polvo mineral utilizado para entregar mayor consistencia a mezclas asfálticas.

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

Impermeabilidad: Capacidad de impedir el paso de la humedad, el agua u otro líquido.

Ingeniería sustentable: Proceso de diseñar u operar sistemas de tal manera que utilicen energía y recursos sustentables, a tal grado de no comprometer el medio ambiente o la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus necesidades.

Ligante asfáltico: También conocido como cemento asfáltico, es un material negro derivado del petróleo que gracias a su estado bituminoso proporciona elasticidad al pavimento, característica por la cual los pavimentos bituminosos reciben el nombre de flexibles.

MC: Manual de Carreteras.

Mezcla asfáltica en caliente: Combinación de agregados gruesos triturados, agregado fino y polvo mineral, uniformemente mezclados en caliente con cemento asfáltico.

Módulo resiliente: Módulo que representa la rigidez de una mezcla asfáltica.

M. EC: Mezcla asfáltica en caliente producida con escoria de cobre.

M. AT: Mezcla asfáltica en caliente producida con árido tradicional.

Pavimento rígido: Tipo de pavimento que se ejecuta teniendo como material fundamental el hormigón, bien sea en la base o en toda su estructura.

Silicato: Grupo de minerales de mayor abundancia, pues constituyen más del 95% de la corteza terrestre, además del grupo de más importancia geológica por ser petrogénicos, es decir, los minerales que forman las rocas.

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

La escoria de cobre de fundición es el principal desecho minero en la industria del cobre, por lo cual existen decenas de millones de toneladas de este material a lo largo de Chile; se estima que por cada tonelada de cobre producido se generan de 2,2 a 3 toneladas de escoria de cobre. La gran abundancia de este subproducto, y por otra parte la escasez de material árido que existe producto de la gran explotación y demanda que hay de este recurso en obras civiles, ha motivado a estudiar la escoria de cobre, de esta manera incorporarla como agregado pétreo en mezclas asfálticas en caliente.

Para lograr estudiar el potencial de la escoria de cobre como agregado pétreo, se realizaron mezclas asfálticas en caliente reemplazando en un 100% el árido tradicional utilizado comúnmente en este tipo de mezclas, luego se estudió el comportamiento mecánico de dichas mezclas y se comparó con una mezcla patrón de árido tradicional, de esta manera se pudo evaluar el comportamiento mecánico a largo plazo de la mezcla con escoria, y concluir si es factible utilizarla como agregado pétreo.

En los análisis realizados a la escoria de cobre como árido, y como agregado pétreo en mezclas asfálticas, evaluando parámetros como adherencia con el asfalto y comportamiento mecánico de la mezcla, se logró determinar que es factible utilizar este residuo minero como agregado pétreo en mezclas asfálticas en caliente, ya que se observó que la mezcla presenta un comportamiento mecánicamente estable, e incluso superior en algunas propiedades mecánicas como resistencia a las deformaciones permanentes y resistencia a la tracción, además de un notable ahorro en la cantidad de cemento asfáltico necesario para realizar la mezcla.

Se recomienda utilizar la escoria de cobre para este tipo de solución, considerando los resultados obtenidos en este trabajo, y resaltando el gran beneficio ambiental que generaría utilizar este material, reduciendo la explotación de áridos naturales y el impacto ambiental que produce la acumulación de este residuo minero en los lugares aledaños a su producción.

Palabras Clave: Escoria de cobre, Comportamiento mecánico, Impacto ambiental.

Abstract

The smelting copper slag is the main mining waste in the copper industry, so there are tens of millions of tons of this material throughout Chile; It is estimated that about 2.2 to 3 tons of copper slag are generated per each ton of copper produced. The great abundance of this by product, and on the other hand the scarcity of arid material that exists due to the great exploitation and demand that exists of this resource in civil works, has motivated to study the copper slag in this way to incorporate it as aggregate stone in mixtures Asphalts.

In order to study the potential of the copper slag as a stone aggregate, hot asphalt mixtures were made by replacing the traditional arid used in this type of mixtures in a 100%, then the mechanical behavior of these mixtures was studied and compared with a Mixing traditional arid pattern, this way it was possible to evaluate the mechanical behavior in the long term and the mixture with slag, and to conclude if it is feasible to use it as aggregates stony.

In the analysis made to the copper slag as aggregate, and as a stone aggregate in asphalt mixtures, evaluating parameters such as adhesion with the asphalt and mechanical behavior of the mixture, it was possible to determine that it is feasible to use this mineral residue as a stone aggregate in asphalt mixtures In hot, since it was observed that the mixture presents a mechanically stable behavior, and even superior in some mechanical properties like resistance to the permanent deformations and tensile strength, in addition to a considerable saving in the quantity of asphaltic cement necessary to realize the mixture .

It is recommended to use the copper slag for this type of solution considering the results obtained in this work and highlighting the great environmental benefit that would generate use of this material, reducing the exploitation of natural aggregates and the environmental impact generated by the accumulation of this mine receipt in the places close to its production.

Keywords: Copper slag, Mechanical behavior, environmental impact.

1 Capítulo I: Introducción

1.1 Introducción General

Debido al constante crecimiento y desarrollo del país surge la necesidad de aumentar y mejorar la comunicación vial entre comunas, ciudades y regiones, por lo que es necesario disponer de carreteras y vías con capacidad para un flujo vehicular óptimo. Esto implica la necesidad de investigar e incorporar nuevas alternativas de diseño de pavimentos, que se ajusten a las necesidades tanto económicas y medioambientales que se requieren en la actualidad. Por esto se propone la incorporación de materiales alternativos en la fabricación de mezclas asfálticas, con el propósito de reducir el impacto ambiental que se genera en la extracción de los recursos naturales, y por otra parte utilizar otros recursos disponibles que aun no tienen un uso determinado. De esta manera se pretende impulsar un crecimiento sustentable y en armonía con el medio ambiente.

Para diseñar pavimentos, tanto rígidos como flexibles, es necesaria la incorporación de áridos finos y/o gruesos los cuales se obtienen en yacimientos que se encuentran a lo largo del país; por otra parte Chile es el mayor productor de cobre del mundo, por lo mismo cada año se generan millones de toneladas de escoria de cobre que es un residuo que no tiene ningún tipo de uso, por lo que es considerado un material de desecho, que genera un impacto ambiental y visual para vecinos aledaños a los lugares de producción.

La iniciativa de utilizar este pasivo ambiental, surge debido a la gran acumulación histórica que existe de este material en lugares cercanos a las plantas de producción, siendo esto un inconveniente para la geografía del lugar, y para las comunas y ciudades vecinas a estos depósitos; por otra parte existe la necesidad de incorporar áridos alternativos en la construcción de obras civiles, debido a la escasez de árido virgen existente en la actualidad.

La escoria de cobre se obtiene como residuo tras los procesos piro-metalúrgicos para la extracción del cobre de alta ley, luego se acopia en lugares cercanos a la planta de producción en forma de material chancado para facilitar su transporte y depósito. A pesar de las grandes cantidades de escoria de cobre que existen en estos depósitos, se determinó que las cantidades de elementos que se consideran tóxicos según la normativa Chilena NCH 409/2006 son menores a la exigencia, por lo que es considerado un pasivo ambiental, según la Superintendencia del Medio Ambiente.

Codelco División Ventanas como forma de reducir sus cantidades de acopio de escoria de cobre, tomó la iniciativa de donar más de 2 millones de toneladas de escoria al Ministerio de Obras Públicas, para la construcción de caminos en Quintero y Puchuncaví [1], lo que significaría un gran ahorro para el Estado, y además una gran solución para reducir las grandes cantidades acumuladas de este material. Debido a esto surge la necesidad de realizar los estudios pertinentes con el fin de evaluar la utilización de la escoria, y su desempeño como un nuevo material para la elaboración de pavimentos en obras viales.

1.2 Procedencia de la Escoria de cobre de fundición

La escoria de cobre es un material que se obtiene como desecho en el proceso piro-metalúrgico de la extracción del concentrado de cobre. Durante la fundición del mineral se obtienen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, que se clasifican de la siguiente manera: material rico en cobre (sulfuros), y escoria (óxidos). La primera fase pasa a un proceso de conversión y la segunda fase (escoria) pasa a un proceso de recuperación de cobre hasta obtener un porcentaje de éste menor al 1%, antes de ser descartado en los lugares de acopio como se muestra en la figura 1.3 [5].



Figura 1.1: Depósito de escoria de cobre. Fuente: Pool (2011).

La escoria de alta ley, entre un 4% a un 10% de cobre pasa a otros procesos de recuperación que se utilizan actualmente, de modo de que la cantidad de cobre en la escoria sea lo más baja posible. Estos procesos de recuperación se llevan a cabo en hornos eléctricos, plantas de flotación y hornos de limpieza tipo Teniente o HLE [5].

En investigaciones acerca de la extracción de cobre realizadas por distintas universidades nacionales, se estima que por cada tonelada de cobre producido se generan entre 2,2 a 3 toneladas de escoria de cobre, por lo que se estima que cada año se generan unas 4,5 millones de toneladas de escoria de cobre de fundición y que existe una acumulación histórica de escoria de superior a los 50 millones de toneladas (Universidad de Concepción, 2003). Por esto surge un gran interés por parte de la industria minera de encontrar algún uso a este material, y de esta manera reducir los grandes acopios de este cercanos a los lugares

de producción, con el fin de poder reducir el impacto medioambiental y social que genera este residuo en los lugares aledaños a los depósitos.

Debido a la gran acumulación de escoria que existe en los lugares de acopio, se realiza un proceso de chancado, para mover y acomodar el material de manera más fácil y además aprovechar mejor el espacio para soportar los grandes volúmenes de este residuo, dando a este material un tamaño reducido y forma chancada muy parecida al árido tradicional que se utiliza para la elaboración de hormigones y concretos asfálticos.

1.3 Generalidades sobre mezclas asfálticas

En la actualidad los pavimentos flexibles son los más utilizados en Chile y en el mundo para el tráfico vehicular y ciclovías, siendo fundamentales las mezclas asfálticas en su elaboración, además de conformar su estructura más costosa. La necesidad de comunicación terrestre que existe actualmente, ha impulsado a buscar nuevas alternativas de diseño de mezclas asfálticas, que satisfagan las necesidades de movilidad que van en constante crecimiento. Por esto el programa de investigación de carreteras SHRP (Strategic Highway Research Program), ha propuesto un método de diseño de pavimentos flexibles, el método SUPERPAVE (Superior Performance Pavement), donde se utilizan nuevas especificaciones para evaluar ligantes asfálticos, y un nuevo método de compactación de mezclas asfálticas en laboratorio mediante amasado giratorio, lo cual simularía de mejor manera las condiciones de compactación en terreno. En la actualidad es ampliamente utilizado el método de diseño Marshall, para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, pero debido al constante avance tecnológico en la ingeniería vial, es necesario incorporar nuevos métodos de diseño, ensayos o también materiales que favorezcan un mejor diseño y comportamiento de las carreteras, considerando además el impacto ambiental que generan en el entorno.

Las mezclas asfálticas están compuestas por una combinación de agregados minerales, los cuales se clasifican y proporcionan según su tamaño, estos se aglomeran mediante un ligante asfáltico el cual es un derivado del petróleo (parte más densa), este ligante forma una película que rodea los agregados pétreos uniéndolos unos a otros, la cantidad de ligante a utilizar será de tal manera que la película de ligante cubra por completo la mezcla, pero sin sobrepasar su cantidad para no interferir en la unión y trabazón de los agregados dentro de su distribución, es decir, formar un Material sólido capaz de resistir cargas y fuerzas abrasivas en condiciones de servicio [6].

La construcción de un pavimento flexible parte del mejoramiento del terreno natural en donde se construirá, así evitar asentamientos o deformaciones no deseadas en el futuro, por esto muchas veces es necesario el remplazo del suelo existente por otro que tenga un comportamiento más estable, además de la compactación que genera estabilidad y uniformidad a los tramos a pavimentar [6]. La cantidad de capas estructurales y su

distribución geométrica, así como el tipo de mezcla asfáltica, dependerá del tipo de diseño y especificaciones técnicas del proyecto, generalmente la distribución de capas de un pavimento flexible es de la siguiente manera, como se muestra en la figura 1.2:

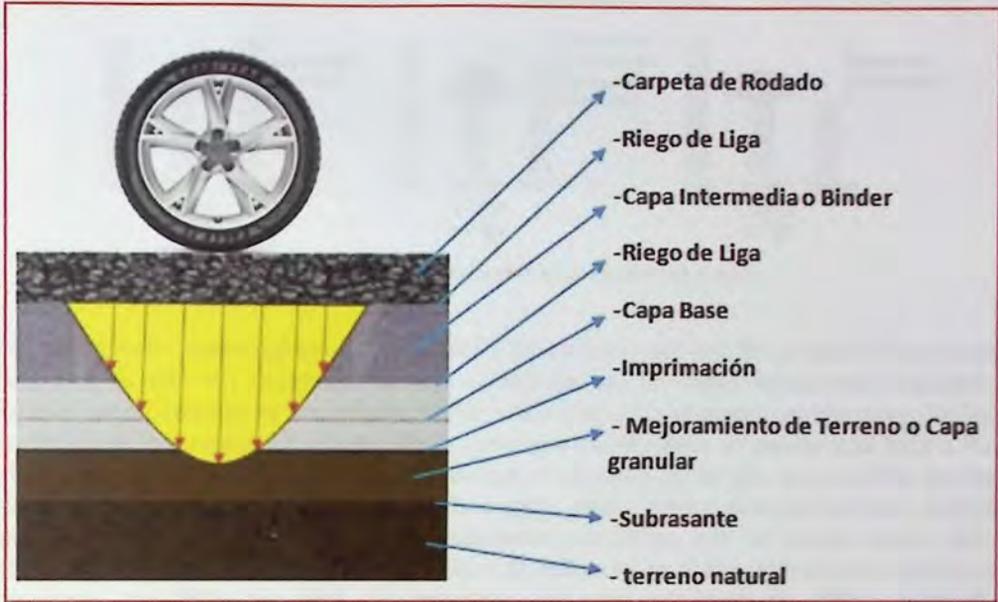


Figura 1.2: Distribución tipo de capas estructurales de un pavimento flexible.

Un pavimento flexible no sólo está compuesto por la carpeta de rodado, sino por todas las capas que conforman la estructura, éstas pueden ser asfálticas y granulares. Su calidad estructural varía según la profundidad, al igual que la distribución de cargas que se producen sobre la estructura. La distribución de estas capas es de tal manera que se puedan transmitir las cargas hasta el terreno natural sin que éste se deforme. Dependiendo el tipo de tráfico o tipo de suelo, no siempre serán necesarias todas las capas mostradas en la figura 1.2, es decir dependerá del tipo de diseño que se requiera.

El comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas bajo la acción de cargas se define como elástico, visco-elástico ó viscoso, dependiendo de la temperatura (ver figura 1.3), y cantidad de ligante de la mezcla, esto induce a distintos tipos de falla como agrietamiento por tracción, debido a la aplicación de un esfuerzo de tensión mayor a la capacidad de la mezcla, o ahuellamiento debido al tránsito pesado, altas temperaturas o exceso de ligante de la mezcla.



Figura 1.3: Comportamiento de un pavimento flexible

Los pavimentos, tanto rígidos como flexibles tienen una vida útil. En el caso de pavimentos flexibles, la vida útil dependerá de las condiciones de las capas adyacentes, cantidad de ligante, granulometría de la mezcla, tráfico vehicular y condiciones ambientales del lugar en donde se encuentra. En el caso de los pavimentos flexibles se espera una falla a largo plazo que no induzca discontinuidades severas o abruptas de la vía, que podrían provocar riesgo para los usuarios; en el tipo de fallas a largo plazo existen dos que son muy comunes en pavimentos antiguos, estas son agrietamiento por fatiga, que se conoce como piel de cocodrilo y ahuellamiento; de estos dos tipos de falla a largo plazo siempre se espera que se produzca una falla por piel de cocodrilo, ya que este tipo de falla no produce irregularidades tan severas como las producidas por ahuellamiento, además tienen un menor costo de mantención.



Figura 1.4: Falla tipo piel de cocodrilo



Figura 1.5: Falla por ahuellamiento

1.4 Planteamiento del problema

Para la construcción de obras civiles es necesaria la utilización de agregado pétreo que se extrae en ríos y canteras, generando un impacto ambiental en los lugares de extracción, además de la escasez de éste recurso en la actualidad, por otra parte existe la escoria de cobre, que es un material similar a un árido tradicional y que podría ser utilizado como árido en mezclas asfálticas, ya que es un material granular y no contaminante, que hasta ahora no posee ningún uso determinado.

En estudios anteriores se logró determinar que podría ser factible utilizar escoria de cobre como agregado pétreo en el diseño de pavimentos flexibles, sin embargo se desconoce el comportamiento a largo plazo que presentará esta mezcla asfáltica, y en qué medida se verán afectadas sus propiedades mecánicas bajo condiciones de servicio. Por esto es necesario predecir el comportamiento de la mezcla asfáltica mediante diferentes ensayos que simulan el desgaste debido al tráfico vehicular y condiciones ambientales a las que se verá afectada la mezcla durante su vida útil, con el propósito de verificar si es factible o no la utilización de escoria de cobre como árido en mezclas asfálticas, y en el caso de no serlo buscar otras alternativas de uso en obras viales de manera de utilizar la gran cantidad que se dispone de este material.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Evaluar la utilización de escoria de cobre como agregado pétreo en mezclas asfálticas en caliente, analizando su comportamiento mecánico a largo plazo como una carpeta de rodadura.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar las propiedades de la escoria de cobre como árido, según lo dispuesto en el Volumen 8 del Manual de Carreteras de Chile.
- Analizar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente utilizando escoria de cobre como árido, simulando el deterioro del material bajo condiciones de servicio, mediante distintos ensayos, según el Manual de Carreteras y Normativa AASHTO, según corresponda.
- Comparar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas tradicionales, con mezclas producidas con árido de escoria de cobre.
- Evaluar el deterioro acelerado de mezclas asfálticas producidas con escoria de cobre, de esta manera proponer una dosificación óptima para mezclas con árido de escoria.
- Proponer el diseño estructural de un pavimento flexible para un tramo de prueba utilizando la escoria de cobre generada por la planta de Codelco División Ventanas.
- Concluir si es factible el uso de escoria de cobre como árido en pavimentos flexibles, una vez analizado el deterioro acelerado de la mezcla mediante ensayos normalizados.

1.6 Alcances

- La escoria de cobre es un material que no produce daños a la salud ni al terreno en donde se encuentra, según la Superintendencia del Medio Ambiente, por lo cual será utilizado como el material inocuo que es.
- Los áridos del Río Aconcagua, utilizados para confección de mezcla tradicional, se encuentran divididos en sus tres categorías; gravilla 13-17 (mm), 6-13 (mm), Polvo de Roca y filler de aportación.
- Los áridos de escoria de cobre utilizados en este trabajo provienen del acopio de CODELCO División Ventanas.
- El asfalto a utilizar será un CA-24, que se utiliza para zonas de clima templado; además se utilizará filler de aportación, para la confección de mezcla tradicional y mezcla con escoria de cobre.
- Los análisis de áridos tradicionales y áridos de escoria de cobre, serán realizados en el Laboratorio de Vialidad del MOP, V Región, como también los ensayos de estabilidad-fluidez Marshall y Desgaste Cantabro.
- Los ensayos que simulan el desgaste a largo plazo del material, se realizarán bajo la normativa del Manual de Carreteras y normativa AASHTO según corresponda.
- Los ensayos que simulan la fatiga y ahuellamiento del pavimento debido a cargas repetitivas; ensayo de fatiga y ensayo de rueda cargada, se realizarán en el Laboratorio Nacional del MOP, región Metropolitana.
- Se estudiarán otros aspectos mecánicos, tales como coeficiente de roce, susceptibilidad a la humedad, tracción a bajas temperaturas y comportamiento bajo radiación solar, con el fin de analizar la funcionalidad del pavimento propuesto.
- La factibilidad económica, utilizando este nuevo material, no será evaluada en este trabajo de título.

1.7 Metodología

Para evaluar la utilización de escoria de cobre como árido en mezclas asfálticas en caliente, se realizarán dosificaciones idénticas para ambos tipos de áridos, tradicional y de escoria, las dos con granulometría semidensa correspondiente a la banda granulométrica IV-A-12, donde se confeccionarán probetas según el diseño Marshall (8.302.40 del MC-V8), variando los porcentajes de asfalto de la mezcla en 0,5%, para lograr encontrar el óptimo porcentaje de asfalto a utilizar para cada caso, según 8.302.47 del MC-V8.

Los ensayos que simulan el deterioro a largo plazo del pavimento son los siguientes:

- Desgaste superficial**, mediante el ensayo desgaste Cantabro, según 8.302.54 del MC-V8.
- Fatiga**, mediante el ensayo de viga de cuatro puntos, según la normativa AASHTO T 321-07, y AASHTO Designación: R 30-02 (2010) para envejecimiento de la mezcla en caliente.
- Ahuellamiento**, mediante el ensayo de rodadura, o rueda de Hamburgo, según la norma española UNE-EN 12697-22:2008+Al.

Otros parámetros de control que se pretenden analizar y comparar son los siguientes:

- Temperatura de la mezcla expuesta a radiación solar**, registrando las temperaturas diarias cada media hora en exposición total al sol.
- Comportamiento a bajas temperaturas**, mediante el ensayo de tracción indirecta (ITS), según, según la Normativa NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.
- Comportamiento en presencia de humedad**, mediante el ensayo de tracción indirecta (ITS), según la Normativa NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”.
- Resistencia al deslizamiento**, mediante el péndulo Británico, según 8.502.16 del MC-V8

Finalizando los ensayos descritos anteriormente se evaluará el uso de escoria de cobre como agregado pétreo, comparando los resultados, y verificando que estén dentro de los parámetros exigidos por las normativas vigentes.

El análisis de los resultados obtenidos, tanto para el mezcla tradicional como para la mezcla con escoria de cobre, luego se compararán ambas de manera funcional para determinar si es o no factible el uso de escoria de cobre como árido, si es así se propondrá la dosificación más favorable de esta mezcla, de lo contrario se reevaluará una nueva dosificación.

2 Capítulo II: Marco Teórico

En el presente trabajo de título se propone dar un uso, a un determinado material, que es la escoria de cobre, por lo que es necesario recopilar antecedentes acerca de su origen y composición, además someter este material a distintos tipos de análisis, según lo establecido en la Normativa actual, de modo de evaluar sus propiedades y la posibilidad de utilizarlo como árido en mezclas asfálticas en caliente.

2.1 El cobre

El cobre es un metal rojizo que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre; se estima que hace unos 6.000 años antes de Cristo se comenzó a utilizar para la fabricación de herramientas y utensilios. En la actualidad este material tiene una gran diversidad de usos, desde la construcción, hasta aplicaciones médicas. Además de ser un material dúctil y resistente a la corrosión, una de sus principales características es su alta conductividad eléctrica, por lo que se ha utilizado para distintos tipos de usos en el desarrollo tecnológico, como la fabricación de cables, circuitos eléctricos y equipos informáticos entre otros. Las principales características y propiedades del cobre se mencionan a continuación:

Símbolo: (Cu)

N° Atómico: 29

Electrones: 2, 8, 18,1

Temperatura de ebullición: 2.595 °C

T° de fusión: 1083,4 °C

Peso Atómico: 63,546

Electronegatividad: 1,9

Configuración Electrónica: [Ar] 3d104s1

Siendo Chile el principal productor de cobre en el mundo, existe un gran número de minas de cobre, donde se encuentran además una serie de otros minerales provenientes de los procesos metalúrgicos de extracción. Según la Empresa Codelco el cobre que se encuentra en minas chilenas, se puede clasificar en dos grupos;

1. Minerales sulfurados: Son mezclas de sulfuros de cobre y hierro combinados con otros elementos, de estos elementos los principales se muestran en la figura 2.1:



Figura 2.1: Minerales Sulfurados. Fuente: Codelco educa.

2. **Minerales oxidados:** Estos minerales se originan debido a la descomposición y oxidación de minerales sulfurados, en este grupo los principales se muestran en la figura 2.2:



Figura 2.2: Minerales oxidados. Fuente: Codelco educa.

2.1.1 El cobre en Chile

Desde principios del siglo XX la Gran Minería del Cobre en Chile ha sido un pilar fundamental para la economía y desarrollo del país, debido a la gran demanda de este mineral. Actualmente Chile es el mayor productor de Cobre del mundo, produciendo cada año cerca de 5.700.000 toneladas, lo que representa cerca de un tercio de la producción mundial, como muestra la Figura 2.3 y 2.4, lo que significa para el país aproximadamente el 19% del total de los ingresos públicos [2].

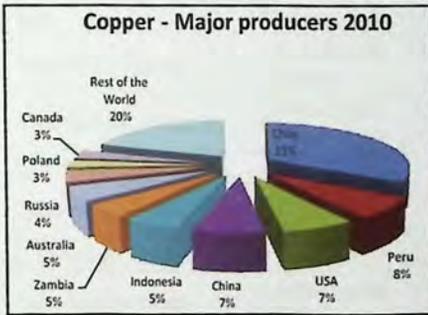


Figura 2.4: Países de mayor producción de cobre (%) año 2010, (Fuente: BGS World Mineral Statistics).

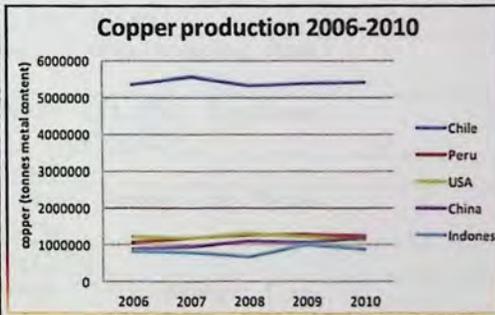


Figura 2.3: Tendencia en 5 años de los mayores productores de cobre (Fuente: BGS World Mineral Statistics).

El 11 de julio de 1971 comienza la promulgación de la reforma constitucional que nacionalizó el cobre en Chile, luego esta fue formalizada por decreto el 1 de abril del año 1976 creando así la corporación nacional del cobre CODELCO. Hoy en día CODELCO es la mayor empresa productora de cobre en Chile y en el mundo, produciendo cerca del 9% del cobre mundial cada año lo que equivale al 32,5% del cobre producido dentro el país [4].

Luego, el resto de la producción nacional 67,5 % esta dividida en el sector privado, (ver tabla 2.1), las principales empresas mineras en Chile se muestran a continuación:

Tabla 2.1: Empresas mineras en Chile año 2012.

Nombre	Dueños	Producción de cobre (miles ton/año 2012)
Codelco Chile	Estado de Chile	1.646,5
S.C.M. El Abra	Freeport McMoRan (51%); Codelco Chile (49%)	153,7
S.C.M. Candelaría	Freeport McMoRan (80%); Sumitomo (20%)	122,8
Minera Escondida Ltda.	BHP Billinton (57,5%); Río Tinto (30%); JECO Corp (10%); JECO 2 Ltda. (2,5%)	1.075,9
Cía. Minera Cerro Colorado	BHP Billinton (100%)	73,1
Empresa Minera Mantos Blancos S.A.	Anglo American (100%)	54,2
Anglo American Sur S.A.	Anglo American (50,1%); JV Codelco-Mitsui (29,5%); Mitsubishi Corp. (20,4%)	416,6
S.C.M. Doña Inés de Collahuasi	Xstracta Copper (44%); Anglo American (44%); JCR (12%)	282,1
Cía. Minera Xstracta Lomas Bayas Ltda.	Xstracta Copper (100%)	73,3
Minera Los Pelambres S.A.	Antofagasta Minerals (60%); Nippon LP Ressources (25%); MM LP (15%)	417,7
Minera El Tesoro	Antofagasta Minerals (70%); Marubeni Corp. (30%)	105,0
Minera Michilla S.A.	Antofagasta Minerals (74,18%); Inversiones Costa Verde (15,3); Otros (10,52%)	37,7
Cía. Minera Zaldívar	Barrick Gold (100%)	131,1
Quebrada Blanca	Teck (76,5%); Grupo Hurtado de Vicuña (13,5%); Enami (10%)	62,4
Carmen de Andacollo	Teck (90%); Enami (10%)	79,8
Minera Esperanza	Antofagasta Minerals (70%); Marubeni Corp. (30%)	173,2
Cía. Minera Spence	BHP Billinton (100%)	166,7

2.2 Escoria de Cobre

Según la Corporación Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), la escoria de cobre se define como una mezcla de óxidos de hierro y silicatos u otros compuestos producidos durante el proceso de fusión y conversión de concentrados sulfurados, que no se realimentan directamente a ninguna operación unitaria considerada en la fuente emisora y que es descartada para su disposición unitaria considerada en la fuente emisora y que es descartada para su disposición final a botadero o para el posterior tratamiento en una unidad de procesamiento de minerales.

Su composición física y química dependen de la naturaleza de los minerales que la componen, y del proceso de enfriado que sufre desde su fase líquida a sólida. Su proceso de formación ocurre a partir de los 1600°C, donde luego es retirada desde los hornos de fundición hasta a los lugares de vertido, donde al enfriarse llega a formar su estructura cristalina/amorfa. Si el proceso de enfriado es rápido, la estructura queda colapsada y mayoritariamente amorfa y sus propiedades serán las de un material altamente reactivo; en cambio si el enfriamiento es lento, la estructura de la escoria será menos amorfa, donde predominarán las estructuras cristalinas que impiden la formación de nuevos enlaces [7].

2.2.1 Composición de la escoria de cobre

Los principales componentes de la escoria de cobre son óxidos, que dependen de la naturaleza de los minerales de los cuales se componen y de los procesos de fundición a los cuales fueron sometidos. Los óxidos que se encuentran en mayor cantidad en la escoria de cobre son los siguientes [5]:

-Óxidos de hierro (FeO , Fe_3O_4)	de 30 a 70%
-Óxidos de silicio (SiO_2)	de 10 a 40%
-Óxidos de zinc (ZnO)	hasta 10%
-Óxidos de calcio (CaO)	hasta 10%
-Óxidos de aluminio (Al_2O_3)	hasta 10%

2.2.1.1 Composición física

La escoria de cobre del centro de acopio de Codelco División Ventanas, es similar a la de muchos otros centros de acopio que se encuentran a lo largo de Chile, su color negro y formas irregulares la hacen similar a un árido tradicional de cantera o río. Entre las características físicas de esta escoria se pueden destacar las siguientes:

-Apariencia: Color negro, textura lisa o porosa, formas irregulares, bordes agudos [8].

- Densidad: 3160 – 3870 (kg/m³).
- Absorción de agua: 0,15 - 0,55 (%).
- Tamaños: Variados, desde 4" hasta menor a 0,08 (mm).

De acuerdo a resultados obtenidos en la micrografía (figura 2.5) [9], se ha demostrado que los granos de la escoria de cobre son esféricos de baja porosidad y de superficie lisa, y además producto de la relación de los picos de difracción con el Halo amorfo en difractogramas, sugieren una formación de la estructura básicamente cristalina (figura 2.6) [11]. El porcentaje de la fase vítrea presente, puede variar desde 45% para las enfriadas lentamente, hasta 95% para las enfriadas bruscamente [10].



Figura 2.5: Microscopía electrónica de barrido de un grano de escoria de cobre (5000x ampliación, fuente: Almeida 2007)

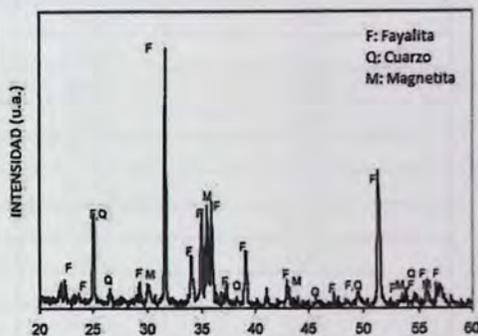


Figura 2.6: Difractograma de escoria de cobre de la minera "The Black Sea Cooper Works" Samsun, Turquía. (Fuente: Alp 2008)

2.2.1.2 Composición cristaloquímica

Como se ha mencionado anteriormente la escoria de cobre contiene gran cantidad de óxidos y hierro, donde las principales componentes son la Fayalita y Maguemita, además se pueden encontrar presentes óxidos de Calcio-Aluminio (CaAl₂O₄), Silicato de Cinc (Zn₂SiO₄), óxidos de Cobre-Hierro (CuFe₂O₄).

En una muestra de escoria de cobre en la fundición de Codelco División Ventanas, se pueden observar mediante fluorescencia de rayos X (FDX), los principales componentes y las concentraciones de los elementos y óxidos que presenta dicha muestra (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Análisis de Fluorescencia de Rayos X, muestra de escoria de cobre en fundición de Codelco División Ventanas.

Elemento	Concentración (%)	Óxido	Concentración (%)
Fe	48,16	Fe ₂ O ₃	68,85
O	34,76	–	–
Si	8,92	SiO ₂	19,08
Zn	1,82	ZnO	2,26
Ca	1,48	CaO	2,07
Al	1,37	Al ₂ O ₃	2,59
Cu	0,86	CuO	1,08
Mg	0,57	MgO	0,95
Na	0,55	Na ₂ O	0,75
K	0,46	K ₂ O	0,55
S	0,29	SO ₃	0,73
Ti	0,18	TiO ₂	0,31
Pb	0,1	PbO ₂	0,12
Co	0,09	CoO	0,12
Ba	0,07	BaO	0,07
Mn	0,07	MnO ₂	0,11
Mo	0,06	MoO ₃	0,09
Cr	0,03	Cr ₂ O ₃	0,05
Sb	0,03	Sb ₂ O ₅	0,04
Ni	0,02	NiO	0,03
P	0,02	P ₂ O ₅	0,06
Sn	0,01	SnO ₂	0,02
Zr	0,01	ZrO ₂	0,02
Sr	0,01	SrO	0,01

Fuente: CODELCO Div. Ventanas 2015.

En la revisión de diversos estudios, se puede observar que la escoria de cobre en general posee composiciones muy similares, como se indica en la tabla 2.3, donde se muestran los resultados obtenidos por los siguientes autores: Ortizola (2006); Almeida (2007); Al-Jabri (2011), En estos resultados los contenidos de Fe₂O₃ son mayores al 60%, así también el SiO₂ contiene concentraciones mayores al 20%, sin embargo otros óxidos tales como el ZnO, CaO, y Al₂O₃ están levemente sobre el 2%, además de otros metales pesados bajo el 1% [8].

Tabla 2.3: Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante fluorescencia, Fuente: Orizola (2006); Moura (1999); Al-Jabri (2011).

Origen/Concentración (%)	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	ZnO	CaO	Al ₂ O ₃	CuO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂
Botadero Ventanas, Chile	68,85	19,08	2,26	2,07	2,59	1,08	0,95	0,75	0,55	0,76	0,31
Caletones (Orizola 2006)	66,76	22,76	0,29	1,23	3,44	1,43	0,76	0,68	0,68	0,61	0,52
Brasil (Moura 1999)	55	26	0,9	2	—	1,4	2,7	1,1	0,6	—	—
(Al-Jabri 2011)	53,42	33,05	—	6,06	2,79	0,46	1,56	0,28	0,61	1,89	—

2.2.2 Tipos de escoria de cobre

Los tipos de escoria de cobre se clasifican principalmente por la naturaleza de los minerales que la componen, y por el proceso de enfriamiento que sufre éste en el lugar de vertido, según estas variables las escorias de cobre se pueden clasificar por:

- (1) Grado de silicatos
 - Escoria Básica
 - Escoria Neutra
 - Escoria Ácida

- (2) Tiempo de enfriamiento
 - Escoria Expandida
 - Escoria Granallada
 - Escoria de Botadero

(1) Grado de silicatos

Principalmente, la composición de la escoria es en base a óxidos, encontrando mayoritariamente óxidos de fierro (Fe₃O₄), óxido de sílice (SiO₂), óxidos de aluminio (Al₂O₃), óxidos de calcio (CaO), entre otros.

La sílice en esta combinación tiene condición ácida, que también la tiene la alúmina si su proporción es comparable a la de la sílice, mientras los otros componentes tienen un carácter básico.

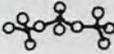
Las escorias fundidas siempre tienen una acción química notable sobre los materiales que están en contacto, esta acción es muy diferente si su carácter químico es ácido o básico. Para poder evaluar este carácter, esta la opción de utilizar los siguientes índices [12]:

➤ **Índice de Silicación (i):** Es la razón entre el contenido de oxígeno de la proporción sílice que forma la escoria, y el contenido en oxígeno de la proporción de todos los óxidos que la forman (incluyendo Al_2O_3), como sigue en la siguiente expresión.

$$i = \frac{\text{Oxígeno de } SiO_2}{\text{Oxígeno de las Bases}} \quad (\text{ec. 2.1})$$

Si el índice de silicación es igual a uno, la escoria será neutra; si es mayor que uno, es ácida; y si es menor que uno, será básica, como se puede observar en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Estructura molecular de la escoria de cobre segun el índice de silicación.

Tipo de Escoria	Grado de Silicato*	Ejemplos de Composiciones	Aniones Principales	Estructuras Moleculares
Básica	< 1	$3FeO \cdot SiO_2$ $2FeO \cdot CaO \cdot SiO_2$	O^{2-} , SiO_4^{4-}	 SiO_4^{4-}
Neutra	1	$2CaO \cdot SiO_2$ $CaO \cdot FeO \cdot SiO_2$	SiO_4^{4-}	
Ácida	> 1	$4CaO \cdot 3SiO_2$ $2CaO \cdot 2FeO \cdot 3SiO_2$	Cadena de aniones de silicato	 $Si_3O_{10}^{6-}$
		$4(CaO \cdot SiO_2)$ $3(CaO \cdot 2SiO_2)$	Anillo de aniones de silicatos Anillos de aniones de silicato conectados	 $Si_4O_{12}^{6-}$  $Si_6O_{15}^{6-}$

Fuente: Lopez 2006.

➤ **Grado de Saturación (r):** Es la razón entre la cantidad total de gr/mol de los componentes básicos (CaO - MgO - MnO - FeO) y la cantidad de gr/mol de los componentes ácidos (incluso Al_2O_3). Para fines prácticos, es suficiente calcular la razón entre las proporciones de las dos clases de componentes, como indica la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\%CaO + \%MgO + \%MnO + \%FeO}{\%SiO + \%Al_2O_3} \quad (\text{ec. 2.2})$$

Según la ecuación 2.2, si el grado de saturación es igual a uno, la escoria es neutra; si es mayor a uno, es básica; y si es menor que uno, la escoria es acida.

(2) Tiempo de enfriamiento

Como ya se ha mencionado la escoria viene como un residuo del proceso piro-metalúrgico de extracción del cobre, por lo que este material es removido del lugar en forma líquida, para luego ser colocado en los centros de acopio en donde se depositan estos residuos; desde el proceso de vertido en fase líquida hasta alcanzar su condición sólida, pasa un tiempo de enfriado que es relativo a las condiciones circundantes, las cuales son fundamentales para su formación en fases cristalinas o vítreas.

Los tipos de escoria de cobre se pueden clasificar en las siguientes tres categorías según el tiempo de enfriado:

➤ Escoria de Botadero:

Este tipo de escoria se obtiene por un proceso de enfriamiento lento, en el cual la escoria fundida es vertida directamente en el lugar de acopio definitivo, donde se enfriará lentamente hasta llegar a temperatura ambiente.

En este proceso de enfriado, se facilita la regular y ordenada disposición de los átomos que conforman la estructura cristalina, formando sólidos con formas regulares (ver figura 2.7). Este tipo de escoria tiene una superficie más lisa y una mayor masa por unidad de volumen, además de una mayor resistencia al desgaste.



Figura 2.7: Escoria de botadero, acopio Codelco Ventanas.

La escoria de botadero, es la que se encuentra en mayor cantidad en los centros de acopio de Codelco división Ventanas, y la que será utilizada para llevar a cabo este trabajo.

➤ Escoria Expandida:

En el proceso de formación de este tipo de escorias no se producen modificaciones o reacciones químicas que alteren su composición, sin embargo el rápido proceso de enfriado no permite una ordenada disposición de los átomos, lo cual termina formando estructuras amorfas o vítreas (ver figura 2.8), dando como resultado escorias con mayor porosidad y con una menor masa por unidad de volumen.



Figura 2.8: Escoria expandida, acopio de Codelco Ventanas.

➤ Escoria Granallada:

Este tipo de escoria se obtiene por enfriado rápido, es expandida por la aplicación de una cantidad controlada de agua, aire y vapor. La solidificación acelerada aumenta la naturaleza vesicular, produciendo un material ligero que posteriormente es triturado y clasificado por fracciones para darle un respectivo uso tecnológico a las escorias (ver figura 2.9) [14].



Figura 2.9: Escoria de cobre granallada

Este tipo de escorias es utilizado comúnmente para procesos de granallado, donde ésta es expulsada a grandes presiones por medio de compresores, de manera de pulir superficies metálicas que se encuentran con pintura y/o corrosión

2.2.3 Estudio de impacto ambiental

Según el Ministerio de Salud en el "Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos; Decreto supremo N° 148/ Artículo N° 23" señala que la escoria de cobre no es considerada un residuo minero peligroso, y además en el "Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en lugares de trabajo; Decreto N° 594/ Artículo N° 66" la consideran dentro de los límites permisibles.

Si bien según los análisis que existen actualmente de la escoria de cobre, especialmente la escoria de estudio correspondiente a la generada en la planta de fundición de Codelco Ventanas, no presenta un riesgo para las personas ni el medio ambiente, sin embargo la acumulación de este residuo genera un impacto visual para los vecinos del sector, además de la alteración en los suelos en el lugar de acopio de la escoria.



Figura 2.10: Imagen satelital botadero de escoria, Codelco Ventanas, 2004-2016. Fuente: google Earth.

El año 2013 la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) realizó un estudio del suelo en donde se encuentra la escoria de cobre producida en Codelco Ventanas, los resultados obtenidos para el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), indicó que en ciertos sectores se exceden los concentrados de ciertos elementos que son considerados tóxicos (ver tabla 2.5), además considerando que el volumen de escoria ha ido en aumento (ver figura 2.10), es de importancia realizar un estudio exhaustivo del tipo de elementos que se podrían considerar dañinos para el medio ambiente y para la salud; por esto es pertinente realizar un análisis profundo a la escoria de cobre, para determinar sus componentes y analizar las cantidades se podría considerar tóxico alguno de ellos, respecto a la cantidad en que se presentan en una muestra de material de escoria.

Tabla 2.5: Concentraciones de metales en suelos de botadero de escoria de cobre de Codelco División Ventanas

Punto		1 (Botadero 1)	2 (Botadero 2-1)	3 (Botadero 2-2)	4 (Botadero 2-3)	5 (Humedal 1)	6 (Humedal 2)
Coordenadas WGS 84 19S		N 6.372.287 E 267.808	N 6.372.485 E 267.863	N 6.372.485 E 267.863	N 6.372.502 E 267.882	N 6.372.269 E 267.810.	N 6.372.229. E 267.826.
Elemento	CRI* ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Mn	28.000	825 +/- 17	1.113 +/- 111	1.719 +/- 484	1.103 +/- 105	1.718 +/- 26	545 +/- 19
Ni	4.000	No Detectado	No Detectado				
Cu	7.400	6.457 +/- 65	70.639 +/- 1575	12.391 +/- 643	11.068 +/- 784	16.082 +/- 124	5.717 +/- 65
Zn	60.000	440 +/- 15	6.990 +/- 214	7.784 +/- 412	9.243 +/- 232	18.46 +/- 28	488 +/- 16
As	12	149 +/- 7	925 +/- 53	344 +/- 76	356 +/- 51	852 +/- 13	583 +/- 13
Se	1.000	10,7 +/- 1,7	No Detectado	No Detectado	No Detectado	55 +/- 3	44 +/- 3
Ag	1.000	No Detectado	164 +/- 27	No Detectado	198 +/- 27	22 +/- 7	37 +/- 9
Cd	100	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado	35 +/- 10	No Detectado
Sb	100	No Detectado	370 +/- 69	358 +/- 75	303 +/- 67	61 +/- 17	No Detectado
Hg	60	No Detectado	No Detectado				
Pb	2.000	201 +/- 7	1.297 +/- 57	1.608 +/- 109	2.198 +/- 75	848 +/- 13	556 +/- 12

*CRI = Criterio de Referencia Internacional. "Risk Management Criteria for Metals at BLM Mining Sites", de la Confederación de Canadá.

Fuente: SMA 2013.

En la tabla 2.4 se encuentran destacados los sectores en donde se superan las concentraciones aceptadas de elementos que se consideran dañinos, según el criterio de referencia internacional.

Según la normativa Ambiental de Canadá utilizada para limitar las cantidades de elementos considerados tóxicos en el suelo del escorial de Codelco Ventanas, los contenidos de cobre en el suelo superan los límites en los sectores 2, 3, 4 y 5; y las cantidades de arsénico son excedidas en los 6 sectores del escorial. Ahora considerando que los análisis fueron realizados al suelo y no a la escoria de cobre como tal, además de no haber una concordancia de estos resultado con los realizados a la escoria mediante fluorescencia de rayos X, se puede inferir que la contaminación de los suelos del escorial se debe principalmente a que esta aldeaño a la planta de fundición, y otras industrias que emiten gases tóxicos que por medio de condensación, decantan en la superficie de las zonas aldeañas contaminando los suelos, el aire y las aguas que están presentes en el lugar.

Las cantidades de cobre según el estudio anterior también supera la normativa internacional, lo cual es de esperar, ya que este es un residuo producto de la extracción de dicho mineral. Considerando que los procesos mineros actuales para la obtención de cobre de alta ley son cada vez más eficaces, las cantidades de cobre en la escoria son despreciables.

2.3 Comportamiento de las mezclas asfálticas

La mezcla asfáltica está compuesta por agregados pétreos y asfalto; por tanto, el comportamiento de la mezcla asfáltica se ve afectado tanto por las propiedades individuales del agregado mineral y del asfalto, como por la interrelación de ambos componentes dentro del sistema [6].

Comportamiento del cemento asfáltico:

El comportamiento de la mezcla, asociado al cemento asfáltico son: la susceptibilidad a la temperatura, la viscoelasticidad, y el envejecimiento. De estas tres la más importante es la susceptibilidad a la temperatura, ya que sus propiedades dependen directamente de ésta, que está asociada al tiempo de carga; ya que las deformaciones a altas temperaturas serán distintas a distintos tiempos de aplicación de carga; a un mayor tiempo de aplicación de carga, la deformación podría ser permanente, en cambio a un tiempo de aplicación corto, la deformación podría ser recuperable. Al contrario si el asfalto se encuentra a bajas temperaturas, este se vuelve muy rígido y a la vez frágil, lo cual puede causar el agrietamiento cuando el pavimento es sometido a cargas que superan la capacidad de la carpeta, independiente del tiempo de aplicación de estas cargas.

El comportamiento viscoelástico del asfalto, se da bajo condiciones intermedias de temperatura, donde se puede comportar como un fluido viscoso, o un sólido elástico, lo que favorece la adhesión con el agregado mineral, y su respuesta a cargas externas.

Además de lo ya mencionado, otra característica importante del asfalto es su composición química, ya que debido a que está compuesto por moléculas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente, produciéndose así la oxidación, que cambia la estructura y composición del asfalto, produciendo lo que se le denomina; envejecimiento del asfalto, lo que forma una estructura más rígida y frágil. El envejecimiento del asfalto se produce más rápidamente a altas temperaturas, por ello el envejecimiento parte en el proceso de producción, luego se vuelve más crítico en pavimentos que se encuentran en climas cálidos.

Comportamiento del agregado mineral:

Los agregados pétreos para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente pueden ser de origen natural, o sintéticos; los agregados naturales se extraen en depósitos fluviales o canteras, y los agregados sintéticos; en este caso la escoria de cobre, se extrae directamente de los centros de acopio mineros. Ambos tipos de agregado mineral necesitan un proceso

de trituración mecánica o chancado, para reducirlos a los tamaños deseados, para poder ser clasificados y separados, para luego evaluar las cantidades que se necesitan para cumplir con la granulometría requerida[6].

Los agregados con mayor angulosidad y rugosidad superficial, generan una mayor resistencia que los agregados de canto rodado y superficie lisa, ya que las partículas angulosas tienden a trabarse y cerrarse mejor dentro de la mezcla, formando así una masa más compacta; en cambio las partículas redondeadas tienden a deslizarse unas sobre otras, lo cual genera deformaciones permanentes dentro de la mezcla (ver figura 2.11). La resistencia al corte de una mezcla de agregados depende de la fricción interna y de su cohesión; que es la tensión normal a la que están sometidos los agregados.

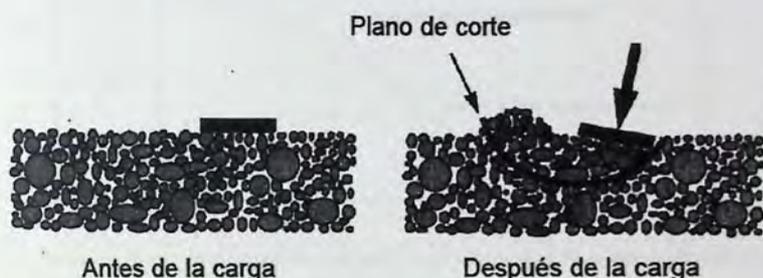


Figura 2.11: Plano de corte producto del desplazamiento del agregado.

La resistencia al corte del agregado dentro de la mezcla puede describirse mediante la ecuación de Mohr-Coulomb que expresa la resistencia al corte de un material de la siguiente manera:

$$\tau = c + \sigma * tg\phi \quad (\text{ec. 2.3})$$

Donde:

- τ = resistencia al corte de la mezcla de agregados.
- C = cohesión del agregado.
- σ = tensión normal a la cual está sujeta el agregado.
- ϕ = ángulo de fricción interna.

Al someter una masa de agregado a tensiones de corte, las partículas se fracturan o arrastran unas sobre otras produciéndose el fenómeno llamado dilatación, que resulta en una expansión o incremento de volumen de la masa de agregados. Los materiales más resistentes, con una mayor densificación y alto ángulo de fricción interna, tienden a dilatarse más que los materiales más débiles.

Comportamiento de mezclas asfálticas

Por un lado el agregado mineral tiene un comportamiento elastoplástico y por otro, el mástico (asfalto más polvo mineral) tiene un comportamiento viscoelástico. De acuerdo a la naturaleza de los componentes de la mezcla asfáltica (agregado mineral más asfalto) y de la interacción entre ambos, la mezcla asfáltica tendrá un comportamiento elástico, viscoelástico, o viscoso, que dependerá de la temperatura y del tiempo de carga que se le aplique [6].

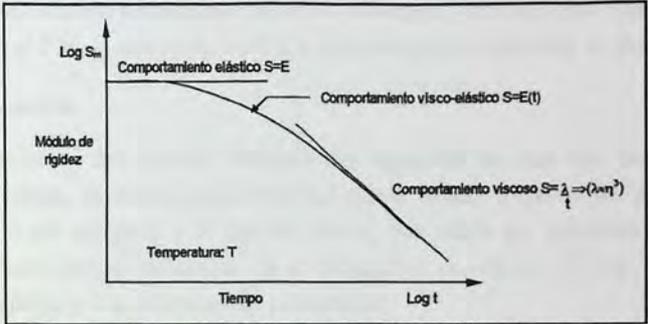


Figura 2.12: Variación de una mezcla asfáltica en función del tiempo de aplicación de una carga, (fuente: Cepeda, 2002)

- Naturaleza del cemento asfáltico

La susceptibilidad térmica del asfalto es un factor que influye notablemente en el comportamiento de la mezcla. Las mezclas asfálticas, elaboradas con asfaltos rígidos son menos propicias a las variaciones de temperatura y velocidad de aplicación de la carga y, en consecuencia, tienen mayor vida a la fatiga; estos asfaltos son utilizados en climas cálidos.

Por otro lado, los asfaltos blandos hacen que las mezclas asfálticas sean más susceptibles a las variaciones de temperatura y velocidad de aplicación de la carga y, en consecuencia, más propensas a la deformación permanente; estos asfaltos son utilizados en climas fríos.

- Contenido de asfalto

El contenido de asfalto es el parámetro que más influye en el comportamiento de las mezclas asfálticas.

Para un tipo de mezcla asfáltica determinado, se tiene que:

- Para valores de porcentajes de asfalto por debajo del óptimo, la resistencia mecánica es mayor, mientras que la resistencia a la fatiga aumentan con el incremento del contenido de asfalto
 - Para valores de porcentajes de asfalto por encima del óptimo, se presenta una disminución de las características mecánicas de la mezcla, incluso aumenta el riesgo de sufrir deformaciones permanentes.
- Porcentaje de vacíos

Las mezclas asfálticas con menor porcentaje de vacíos tienen una mayor vida a la fatiga, en el caso de la deformación permanente sucede lo contrario; para mezclas con porcentajes de vacíos menores al 3 %, la susceptibilidad a la deformación permanente es mayor.

- Granulometría

Aunque la influencia del tamaño máximo del agregado no sea tan notable como el contenido de asfalto, la curva granulométrica puede influir a través de dos factores: el tamaño máximo del agregado y el tipo de curva, que puede ser continua o discontinua. Estos dos factores tienen influencia en el porcentaje de vacíos y, por ende, sobre la resistencia a la fatiga y a la deformación permanente.

- Forma y textura del agregado

La forma y la textura de los agregados, son factores que también afectan la compacidad de la mezcla. Los agregados angulosos, con superficies rugosas, son frecuentemente más difíciles de compactar, lo que lleva a un menor volumen de vacíos para una misma energía de compactación, y en consecuencia un módulo de rigidez más bajo.

Para una misma energía de compactación y misma granulometría, las mezclas asfálticas constituidas por agregados redondeados y lisos presentan menor porcentaje de vacíos y son fáciles de compactar; mientras que las mezclas con agregados triturados resultan con mayor porcentaje de vacíos.

Para una misma energía de compactación, las mezclas asfálticas con agregados redondeados y lisos presentan un incremento en la compacidad y en la duración de la vida a la fatiga, a diferencia de las mezclas con agregados triturados.

- Contenido de finos

La tendencia hacia una mayor cantidad de finos en las curvas granulométricas reduce el porcentaje de vacíos, por lo que el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica aumenta, además aumenta la posibilidad de producirse deformaciones permanentes en la mezcla.

2.4 Propiedades mecánicas consideradas en mezclas asfálticas

Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica dependerán de la calidad del árido, su granulometría y del tipo de ligante a utilizar. Las proporciones en las que éstos se disponen dentro de la mezcla serán fundamentales para su posterior desempeño. Las deformaciones plásticas que se pretenden controlar en las mezclas asfálticas, bajo condiciones de servicio son las siguientes:

Parámetros de interés para evaluar el comportamiento y la calidad de las mezclas asfálticas son los siguientes:

- Temperatura de la mezcla expuesta a radiación solar

Como ya se ha mencionado, la mezcla asfáltica tiene un comportamiento viscoelástico, que depende directamente de la temperatura a la que se encuentra, y al tiempo de carga a la que se someta. El aumento de temperatura de un pavimento está directamente relacionado con el clima en donde se encuentra y a la exposición solar, como ya se sabe el asfalto es de color negro lo cual atrae de mayor manera los rayos ultravioleta, calentando así la superficie de la mezcla, lo cual disminuye su capacidad resistente, por ende aumenta la posibilidad de presentar deformaciones permanentes.

- Comportamiento a bajas temperaturas

El agrietamiento por bajas temperaturas, es atribuido a las deformaciones producto de la contracción de la carpeta asfáltica, a medida que la temperatura desciende hasta alcanzar un nivel crítico. Este tipo de fallas se presenta más por condiciones adversas del clima, que por la aplicación de cargas, y en su mayoría se presentan como fisuras perpendiculares a la dirección del flujo de tránsito vehicular, ver figura 2.13.



Figura 2.13: Agrietamiento por bajas temperaturas.

Normalmente este tipo de falla ocurre en lugares fríos, donde las tensiones inducidas producto de la contracción de la carpeta asfáltica, superan la resistencia a tracción de la mezcla en algún punto del pavimento, generando fisuras que generalmente aparecen producto del efecto acumulativo de varios ciclos climáticos fríos.

- Comportamiento en presencia de humedad

La permeabilidad de una mezcla asfáltica, es un parámetro importante a la hora de caracterizar una mezcla asfáltica, la presencia de humedad o la filtración de ésta en la carpeta de rodadura podrían debilitar la capacidad resistente de ésta, induciendo distintos tipos de falla y deterioro de la mezcla asfáltica. Además la capacidad de drenar el flujo de aguas hacia las orillas de la calzada, ayuda a mantener un tráfico vehicular más seguro y rápido.

- Resistencia al deslizamiento

Una de las principales características que debe poseer un pavimento, es contar con una superficie que asegure una buena adherencia con los neumáticos en todo instante, y especialmente cuando se realizan maniobras de frenado y giros horizontales.

Esta adherencia, o resistencia al deslizamiento va disminuyendo en el tiempo, llegando a constituirse como un tipo importante de defecto superficial de los pavimentos, debido a que influye decisivamente en la seguridad del usuario [25].

La fricción que presenta un pavimento bajo condición húmeda (resistencia al deslizamiento), es una importante consideración en el desempeño de un pavimento, ya que de esto depende la adherencia que existirá entre la superficie del pavimento y los neumáticos de un vehículo en condiciones desfavorables.

- Desgaste superficial

La disgregación del agregado pétreo en pavimentos flexibles se produce por cargas abrasivas y condiciones ambientales que afectan la unión entre los componentes de una mezcla asfáltica, lo que produce el deterioro de un pavimento, generando discontinuidades e interrupciones en la superficie, muchas veces los desprendimientos comienzan desde la orilla de la calzada, y se extienden hasta la zona por donde transitan los vehículos, generando riesgos y costos de reparación asociados.

- Fatiga

La resistencia a la fatiga es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir el agrietamiento producido por cargas reiteradas, las cuales actúan sobre un pavimento flexible en condiciones de servicio. La falla por fatiga es conocida como falla de piel de cocodrilo, por la disposición que tienen las grietas sobre el pavimento como se muestra en la figura 2.14.



Figura 2.14: Falla por fatiga (Piel de Cocodrilo).

Generalmente la falla por fatiga es atribuida a una cantidad de cargas mayor a las que fueron consideradas en el diseño de la carpeta, por esta razón es común ver ese tipo de falla en pavimentos antiguos. Otro motivo por el cual se puede formar la falla por fatiga, es cuando las cargas exceden la capacidad resistente del pavimento, es decir, las cargas de tránsito superan la capacidad estructural de la carpeta de rodadura.

Este tipo de falla puede presentar problemas mayores, cuando la capacidad de drenaje de agua de la calzada es ineficiente, ya que la humedad se puede infiltrar a las capas subyacentes a la carpeta, debilitándolas y generando una pérdida de la capacidad resistente.

- Ahuellamiento

El ahuellamiento, es un tipo de falla permanente que se atribuye a las cargas reiteradas que generan las ruedas de los vehículos sobre una carpeta de rodadura. Estas deformaciones además de generar huellas longitudinales, pueden producir el levantamiento del pavimento, producto del desplazamiento de la masa asfáltica hacia los extremos de la huella.

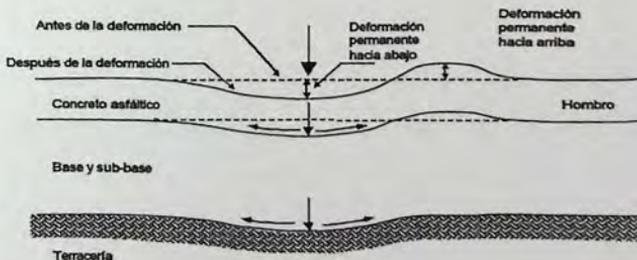


Figura 2.15: Mecanismo típico de deformación permanente por trayectoria de ruedas.

Las principales causas por las que se produce la falla por ahuellamiento en pavimentos asfálticos, son las siguientes:

- a) Baja cantidad de vacíos de aire en la mezcla (menores al 4%).
- b) Exceso de vacíos de aire en la mezcla (mayores al 8%).
- c) Exceso de cemento asfáltico en la mezcla (superior al % óptimo).
- d) Baja cantidad de agregado pétreo chancado en la mezcla.
- e) Deformaciones en las capas subyacentes.
- f) Grado de compactación insuficiente.
- g) Condiciones críticas de tráfico; altas temperaturas, exceso de carga y baja velocidad.

En este trabajo, el estudio y evaluación de cada uno de los parámetros anteriormente mencionados, serán fundamentales para discutir la factibilidad del uso de escoria de cobre en mezclas asfálticas en caliente. Cabe mencionar que los ensayos seleccionados para medir estos parámetros son la manera más efectiva de simular las condiciones de tráfico y ambientales a las que se verá afectado un pavimento durante su vida útil.

2.5 Áridos en mezclas asfálticas

Los áridos en mezclas asfálticas, además de ser el componente principal de dicha mezcla, tienen la función de entregar el soporte estructural a la capa que conforman, de manera de distribuir las cargas que soportarán, por medio del contacto y trabazón de las partículas de áridos que existen dentro de la mezcla, buscando limitar las deformaciones permanentes, que se producen debido a las condiciones de servicio a las que estará expuesta esta capa estructural.

2.5.1 Requisitos para áridos en mezclas asfálticas

La calidad de los áridos y su distribución en la mezcla asfáltica son fundamentales para lograr un buen comportamiento de ésta, por lo cual es necesario estudiar física y químicamente la composición del árido a utilizar, además de lograr la distribución granulométrica más adecuada, para el tipo de diseño que se requiere.

Para lograr incorporar la escoria de cobre como árido alternativo en mezclas asfálticas, es necesario estudiarla como tal, de forma de evaluar sus propiedades y clasificarla según sus características. Para ello se analizará mediante la normativa actual que se encuentra en el volumen 5 del Manual de Carreteras.

2.5.2 Áridos en mezclas asfálticas en caliente

Los tamaños de las partículas de áridos para mezclas asfálticas en caliente, se clasifican en sección gruesa, fina y polvo de roca. Cada una de estas categorías deberá cumplir con los requerimientos mínimos que exige la normativa actual, de tal manera que la mezcla garantice un desempeño adecuado según los requerimientos del proyecto.

Los áridos deberán ajustarse a los siguientes requisitos [16].

2.5.2.1 Fracción Gruesa

Corresponde a la fracción retenida en tamiz 2,5 mm (ASTM N° 8), la cual deberá estar constituida por partículas chancadas, tenaces, limpias, entendiéndose por limpias, partículas libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas ajustándose a los requisitos que se indican en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Requisitos de los áridos para mezclas asfálticas en caliente [16].

ENSAYES	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA				MÉTODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Desgaste Los Ángeles (máx) (1)	25%	35%	35%	30%	8.202.11
Desintegración con Sulfato de Sodio (máx)	12%	12%	12%	12%	8.202.17
Partículas Chancadas (mín)	90%	70%	60%	90%	8.202.6
Partículas Lajeadas (máx)	10%	15%	15%	10%	8.202.6
Adherencia Método Estático (mín)	95%	95%	95%	95%	8.302.29
Adherencia Método Dinámico (mín) (2)	95%	95%	95%	95%	8.302.31

(1) El Proyecto podrá especificar otro valor de desgaste de Los Ángeles, debidamente justificado, el cual no podrá superar 35%.

(2) La adherencia dinámica sólo se exigirá en áreas con precipitación media anual superior a 350 mm. Si no cumplen los áridos con esta exigencia, se podrán utilizar previa incorporación de un aditivo que mejore la adherencia en obra.

2.5.2.2 Fracción fina

Corresponde a la fracción fina que pasa por tamiz 2,5 mm (ASTM N° 8), la cual deberá estar constituida por agregados, o provenientes de la trituración de rocas o gravas, las que deberán cumplir con las condiciones exigidas al árido grueso. Sobre el desgaste de Los Ángeles, las partículas deberán ser duras, tenaces y libres de arcilla o sustancias perjudiciales.

Estos áridos se emplearán en la preparación de mezclas densas, semidensas, gruesas y finas, debiendo cumplir con los requisitos indicados en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Requisitos de los finos para mezclas asfálticas en caliente [16].

ENSAYES	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA				MÉTODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	8.102.4
Adherencia Riedel-Weber (1)	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	8.302.30
Desintegración por sulfato de sodio (máx) (2)	15%	15%	15%	15%	8.202.17

(1) Si no cumplen los áridos con esta exigencia, se podrán utilizar previa incorporación de un aditivo que mejore la adherencia en obra.

(2) Sólo se exigirá cumplimiento en obras ubicadas en las Regiones XIa y XIIa y en la alta cordillera o cuando lo indique el Proyecto.

2.5.2.3 Polvo Mineral (Filler)

Si se requiere adicionar filler de aportación, éste deberá estar constituido por polvo mineral fino, como cemento hidráulico, cal u otro material de origen calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, debiendo ajustarse a la granulometría que se señala en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Granulometría del filler [16].

TAMICES		% QUE PASA EN PESO
(mm)	(ASTM)	
0,630	(N° 30)	100
0,315	(N° 50)	95 - 100
0,080	(N° 200)	70 - 100

2.5.2.4 Mezcla de áridos

Los áridos combinados debencumplir con los requisitos indicados en la Tabla 2.9 para las distintas fracciones de áridos que deben combinarse en proporciones tales que la mezcla resultante cumpla con alguna de las bandas granulométricas del Manual de Carreteras; en este trabajo se utilizará la banda IV-A-12 de granulometría semidensa (ver tabla 2.10).

Tabla 2.9: Requisitos para áridos combinados [16].

ENSAYES	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA				MÉTODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Sales solubles (máx)	2%	3%	3%	3%	8.202.4
Equivalente en arena (mín)	50%	45%	40%	50%	8.202.9

Tabla 2.10: Granulometría semidensa, banda IV-A-12 [16].

DENOMINACIÓN		IV - A - 12 % QUE PASA EN PESO
TAMICES (mm)	(ASTM)	
20	3/4"	100
12,5	1/2"	80 - 95
10	3/8"	70 - 85
5	N° 4	43 - 58
2,5	N° 8	28 - 42
0,63	N° 30	13 - 24
0,315	N° 50	8 - 17
0,16	N° 100	6 - 12
0,08	N° 200	4 - 8

2.6 Asfalto

El asfalto es una sustancia negra, pegajosa, sólida o semisólida dependiendo de la temperatura en que se encuentre, su origen puede provenir de depósitos naturales o del proceso de destilación del petróleo, fracción más gruesa de este. Hoy en día la mayoría del asfalto que se utiliza es artificial, derivado del petróleo, compuesto por hidrocarburos no volátiles que permanecen después de refinar el petróleo para obtener gasolina y otros productos.

2.6.1 Especificaciones para asfaltos

Los cementos asfálticos se clasifican según su grado de viscosidad absoluta. En Chile se utilizan dos tipos: CA 14 que posee una viscosidad entre los 1400 a 2400 poises y CA 24 con una viscosidad mayor o igual a 2400 poises. En su mayoría estos cementos asfálticos son utilizados en las mezclas asfálticas en caliente.

En este trabajo el cemento asfáltico a utilizar será un CA-24, que se ocupa principalmente en la confección de mezclas asfálticas en caliente, para capas de base, intermedia (binder) o rodadura, y se usa preferentemente en zonas cálidas y templadas [15].

Las siguientes especificaciones son referidas al cemento asfáltico CA 24, cuya viscosidad absoluta será mayor o igual que 2400 poises y será medida a 60°C y 300 mm [16].

El cemento asfáltico será homogéneo, libre de agua y no deberá formar espuma cuando se caliente a 175°C.

El muestreo y ensaye de los cementos asfálticos estará de acuerdo con los siguientes métodos establecidos por la Dirección de Vialidad en el Volumen 8 del Manual de Carreteras [17]:

-Muestreo	Método 8.302.1
-Viscosidad absoluta	Método 8.302.15
-Penetración	Método 8.302.3
-Ductilidad	Método 8.302.8
-Punto de inflamación	Método 8.302.9
-Solubilidad	Método 8.302.11
-Ensaye de la mancha	Método 8.302.7
-Punto de ablandamiento	Método 8.302.16
-Ensaye de película delgada rotatoria	Método 8.302.33
-Índice de Penetración	Método 8.302.18

La exigencia para el cemento asfáltico CA-24, de acuerdo con su grado de viscosidad se muestra en la tabla 2.11 [17]:

Tabla 2.11: Especificaciones para el cemento asfáltico CA-24.

ENSAYES	GRADO DE VISCOCIDAD
	CA-24
Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	Mín. 2400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	Mín 40
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100
Ensaye de la Mancha (% xilol)	Máx. 30%
Solubilidad en tricloroetileno, %	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	Informar
Índice de Penetración	-2,0 a +1,0
Película Delgada Rotatoria:	Máx. 0,8
- Pérdida por calentamiento (%)	Informar
- Viscosidad absoluta a 60°C, 300 mm Hg, poises	Mín. 100
-Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Máx. 4
Índice de Durabilidad	

2.7 Diseño de mezclas asfálticas

Para la dosificación de las mezcla asfálticas a realizar, mezclas con árido tradicional, y mezclas con escoria de cobre, se realizará según el método de diseño Marshall, descrito en el Manual de Carreteras volumen 8, sección 8.302.47, donde se busca encontrar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla, que garantice un buen desempeño de la carpeta de rodadura en condiciones de servicio. Las propiedades de las mezclas asfálticas se determinarán en probetas preparadas según el método descrito en 8.302.40 del MC-V8, y su dosificación se efectuará a través del método descrito en 8.302.47 del MC-V8.

2.7.1 Requerimientos para mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas de granulometrías densas, semidensas, gruesas y finas, deberán cumplir con lo indicado en las Tablas 2.12 y 2.13.

Tabla 2.12: Requisitos para mezclas asfálticas en caliente.

TIPO DE MEZCLA ASFALTICA	ESTABILIDAD (N)	FLUENCIA (0,025mm)		HUECOS EN LA MEZCLA (%)	
	Mín.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Rodadura	9.000	8	16	4,0	6,0
Intermedia	8.000	8	16	3,0	8,0
Base Gruesa	6.000	8	16	5,0	10,0
Superficie Fina	4.000	8	16	3,0	8,0

Tabla 2.13: Porcentajes mínimos de vacíos en el agregado mineral (VAM).

TAMAÑO NOMINAL (mm)	MINIMO DE VACIOS (VAM) (%)
25	13,0
20	14,0
12,5	15,0
10	16,0
5	18,0
2,5	21,0
1,25	23,5

Una vez fijada una granulometría que cumpla con la banda especificada, se confeccionará la banda de trabajo, aplicando las tolerancias señaladas en el Método descrito en 8.302.47 del MC-V8.

3 Capítulo III: Propiedades de la escoria de cobre como árido

En el presente capítulo se evaluarán las propiedades de la escoria de cobre como árido, por medio de los ensayos descritos en el volumen 8 del Manual de Carreteras, verificando que se cumplan cada uno de los requerimientos mencionados en el capítulo anterior, y también se compararán estos resultados con los obtenidos en un árido tradicional, proveniente del río Aconcagua de la V región, de esta manera se pretende obtener información de las características y propiedades de la escoria, para lograr incorporar ésta, en mezclas asfálticas en caliente.

3.1 Granulometría de la escoria

La granulometría permite separar por tamaños las partículas de áridos de escoria de cobre que se encuentran divididas en material grueso y fino, de esta manera se puede definir la distribución porcentual de los tamaños de las partículas que se encuentran en el agregado pétreo [18].

Los resultados obtenidos en la granulometría general que se realizó a la escoria de cobre del lugar de acopio se muestran a continuación en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Granulometría general de la escoria de cobre.

Tamiz	M. MUESTRA = 20.300 (gr)		RESULTADOS	
	M. Retenida (gr)	% Pasa	% Retenido	
1 ½"	0,0	100,0	0,0	
1"	130,8	99,4	0,6	
¾"	85,0	98,9	0,4	
½"	7739,0	60,8	38,1	
3/8"	4089,0	40,7	20,1	
Nº4	3831,0	21,8	18,9	
Nº8	1826,0	12,8	9,0	
Nº16	1059,0	7,6	5,2	
Nº30	632,1	4,5	3,1	
Nº50	374,0	2,6	1,8	
Nº100	242,7	1,4	1,2	
Nº200	143,6	0,7	0,7	
R	114,6	0,2	0,6	

3.3 Índice de lajas

Índice de Lajas se refiere al 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; este índice se emplea principalmente en agregados para tratamientos superficiales [19], sin embargo se calculará para tener otro parámetro de referencia de la escoria de cobre como árido.

Se realizó el procedimiento para determinar el índice de lajas según lo dispuesto en el MC-V8 sección 8.202.7, obteniendo como resultado lo siguiente:

- Índice de lajas para escoria de cobre = **10,4**
- Referencia, índice de lajas para árido del río Aconcagua = **11,1**

Observación: En la determinación del índice de lajas se observa un menor valor para la escoria de cobre respecto a los áridos del río Aconcagua, lo cual indica que la escoria presenta formas más esféricas en sus partículas.

3.4 Resistencia al desgaste

Este parámetro, describe la resistencia de los agregados pétreos a sufrir desintegración física, producto de cargas abrasivas que ejercen presión sobre la masa de áridos que conforman una capa de rodadura, o base granular. Los áridos deben ser capaces de ser durables y poder resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida útil del pavimento.

El ensaye que se utiliza para calcular el desgaste en pétreos de diámetros mayores a 2.5mm, es el ensaye, desgaste los Ángeles [20], que se realiza mediante la máquina del mismo nombre, agregando una carga abrasiva, conformada por bolas de acero dispuestas en el interior de la máquina, que golpean a los áridos contra las paredes a medida que esta gira.

Los resultados obtenidos en el ensaye de desgaste Los Ángeles según lo dispuesto en el MC-V8 sección 8.202.11 fueron los siguientes:

Tabla 3.3: Desgaste Los Ángeles, según grado de áridos

GRADOS DE ENSAYE	DESGASTE LOS ANGELES (%)		Exigencia
	Escoria de Cobre	Árido río Aconcagua	
4	20,3	-	Máx. 25%
5	18,4	11	
6	19,8	10	
7	19,8	15,8	

Observación: En el ensaye de desgaste los Ángeles, la escoria de cobre presenta una menor resistencia al desgaste, que indica una mayor fragilidad de las partículas, o una menor tolerancia a la deformación, en comparación a los áridos del río Aconcagua. Sin embargo cabe mencionar que las densidades de la escoria son superiores a las del árido tradicional, lo que produce un aumento de la interacción y energía de impacto en el desarrollo del ensayo, lo que finalmente podría influir en términos de los resultados finales.

3.5 Densidad y absorción

3.5.1 Densidad aparente suelta

La densidad aparente suelta es un indicador relevante en términos de trabajabilidad y transporte de áridos, ya que si bien las maquinarias de transporte y colocación de mezclas, tienen gran capacidad de carga, ésta no debe ser excedida, para no dañar las mismas, ni sobrepasar las cargas máximas permitidas en los caminos por los cuales transitarán.

En este método se establecen los procedimientos para determinar la densidad aparente de los agregados pétreos. Es aplicable en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas [21].

El procedimiento para determinar la densidad aparente suelta, es realizado según lo dispuesto en el MC-V8 sección 8.202.19, donde se obtuvieron los siguientes resultados para árido grueso, retenido sobre tamiz N°8, y árido fino, bajo tamiz N°8:

Tabla 3.4: Densidad aparente suelta

Árido	Escoria de Cobre	Río Aconcagua
Densidad aparente suelta (grueso)	2.105 (kg/m ³)	1.451 (kg/m ³)
Densidad aparente suelta (fino)	2.257 (kg/m ³)	1.695 (kg/m ³)

Observación: Para ambos tamaños de árido de escoria, las densidades aparentes sueltas fueron mayores considerablemente en la escoria de cobre, lo que influiría en un aumento de los costos de transporte de este material, desde el lugar de acopio a plantas chancadoras y lugar de colocación.

3.5.2 Densidad real, neta y absorción

La densidad real o gravedad específica del árido, es la propiedad física que relaciona la masa de áridos por unidad de volumen, sin considerar su distribución, y se expresa en kg/m^3 . La densidad del material pétreo dependerá de los vacíos internos que contenga, estos vacíos pueden ser poros accesibles, que son permeables y abiertos, o pueden ser poros cerrados, inaccesibles, que se encuentran dentro de la partícula sólida; es decir, la densidad real dependerá netamente de las condiciones de grano del material y de su composición atómica.

El material a utilizar en la construcción de pavimentos no debe poseer grandes absorciones de agua, debido a que ésta modifica las propiedades del árido.

El procedimiento para determinar la densidad real, neta y absorción de agua, para áridos gruesos y finos, es realizado según lo dispuesto en el MC-V8 sección 8.202.20 y 8.202.21 respectivamente, donde se obtuvieron los siguientes resultados [22] y [23]:

Tabla 3.5: Resultados densidad real de áridos

Fracción	Escoria de Cobre		Árido río Aconcagua	
	Gruesa	Fina	Gruesa	Fina
Densidad real seca (kg/m^3)	3.790	3.775	2.648	2.622
Densidad neta (kg/ m^3)	3.821	3.826	2.733	2.739
Absorción (%)	0,2	0,4	1,2	1,6

Observación: Como ya se ha mencionado, una de las características de la escoria de cobre de botadero, es su alta densidad, por sobre los $3.700 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, mientras que la densidad de un árido tradicional está en el orden de los $2.600 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, esto se debe básicamente a la composición atómica de la escoria y su baja porosidad, lo cual se ve reflejado en la baja absorción que presentó en comparación al árido tradicional

4 Capítulo IV: Escoria de cobre como árido en mezclas asfálticas en caliente

4.1 Mezcla asfáltica en caliente

Para evaluar la escoria de cobre como árido en mezclas asfálticas en caliente, se utilizará el método de diseño Marshall, de esta manera se encontrará el contenido óptimo de asfalto en la mezcla, además de otros parámetros relevantes como densidad, estabilidad y vacíos de aire.

Para la reconstitución de la banda granulométrica, se utilizará una dosificación semidensa para concreto asfáltico en caliente, dentro de la banda granulométrica IV-A-12 del Manual de Carreteras, con cemento asfáltico CA-24 y un tamaño máximo de partículas de 20 mm, para tránsito pesado

Para tener una referencia y evaluar la mezcla con árido de escoria, se utilizará la misma dosificación para árido del río Aconcgua y escoria de cobre.

4.1.1 Características del cemento asfáltico CA-24 utilizado en la mezcla

Tabla 4.1: Características del cemento asfáltico CA-24 de PROVISA.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
Viscosidad 60°C	Poises	3730	Mín. 2400
Penetración 25°C, 100gr, 5 seg.	0,1mm	60	Mín. 40
Ductilidad 25°C, 5cm/mín	cm	>100	Mín. 100
Ensaye de la mancha	% Xilol	-30	Máx. 30
Solubilidad en Tricloroetileno	%	99.8	Mín. 99
Punto de inflamación	°C	>232	Mín. 232
Punto de ablandamiento	°C	52.3	Informar
Índice de penetración		-0.2	-2.0 a +1.0
Película Delgada Rotatoria			
Pérdida por calentamiento	%	0,03	Máx. 0.8
Viscosidad 60°C	Poises	8880	Informar
Ductilidad 25°C, 5cm/min	cm	>100	Mín. 100
Índice de durabilidad		2.4	Máx. 4.0

Mediante el nomograma de Heukelum del MC-V8 se obtiene la caracterización del ligante asfáltico, obteniéndose así las temperaturas de mezclado y compactación para la mezcla.

A partir de los valores de los ensayos químicos realizados al ligante asfáltico, específicamente ensayos de penetración, punto de ablandamiento, punto de fragilidad Frass, viscosidad cinemática y viscosidad absoluta, se traza una recta, la cual se traslada en forma paralela hasta el punto ubicado en la parte superior del diagrama. La intersección de esta última recta con la escala de índice de penetración entrega el valor de IP (índice de penetración) para el ligante analizado, este índice proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos a los cambios de temperatura.

A partir de la recta trazada, se determinan las temperaturas de mezclado y compactación para el ligante analizado; ésta se obtiene de la intersección entre 2 Poise y 3 Poise respectivamente de la recta trazada, y la temperatura se obtiene a través de una línea vertical a esta intersección. Para el CA-24 utilizado se tienen los siguientes resultados:

- ✓ Temperatura de mezclado: 154 °C
- ✓ Temperatura de compactación: 146 °C
- ✓ Tolerancia +/- 3°C

Nota: El asfalto no debe mantenerse a la temperatura de mezclado por más de 1 hora, para evitar el envejecimiento prematuro de este.

4.1.2 Evaluación de áridos para mezclas asfálticas en caliente

De acuerdo a la evaluación de las propiedades de la escoria de cobre y su comportamiento con el ligante asfáltico se puede determinar la factibilidad de utilizar la escoria como agregado pétreo en distintos tipos de mezclas asfálticas en caliente, como en carpeta de rodadura, capa intermedia (binder), o base asfáltica (abierta o cerrada); sin embargo se pondrá énfasis a la alternativa propuesta en este trabajo, que es utilizar la mezcla asfáltica con árido de escoria como carpeta estructural de rodadura, por lo que se realizará el posterior diseño Marshall enfocado en este tipo de solución.

Resultados obtenidos:

Tabla 4.2: Resultados para fracción gruesa de áridos para mezclas asfálticas en caliente.

ENSAYES	RESULTADO		REQUERIMIENTO SEGÚN TIPO DE MEZCLA			
	Escoria de Cobre	Árido Tradicional	Rodadura	Intermedia	Base	
					Gruesa	Abierta
Desgaste Los Angeles (máx)	19%	13%	25%	35%	35%	30%
Desintegración con Sulfato de Sodio (máx)	2,5%	0,7%	12%	12%	12%	12%
Partículas Chancadas (mín)	100%	97%	90%	70%	60%	90%
Partículas Lajeadas (máx)	0%	0%	10%	15%	15%	10%
Adherencia Método Estático (mín)	(+)95	(+)95	95%	95%	95%	95%
Adherencia Método Dinámico (mín)	(+)95	(+)95	95%	95%	95%	95%
Adherencia Método del Hervido (mín)	(+)95	(+)90	95%	95%	95%	95%

Tabla 4.3: Propiedades para fracción fina de áridos para mezclas asfálticas en caliente.

ENSAYES	RESULTADO		REQUERIMIENTO SEGÚN TIPO DE MEZCLA			
	Árido Tradicional	Escoria de Cobre	Rodadura	Intermedia	Base	
					Gruesa	Abierta
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Adherencia Riedel-Weber	3-8	2-9	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5

Observaciones:

-Tanto la escoria de cobre como el árido del río Aconcagua cumplen con todos los requerimientos que se exigen para utilizar el agregado pétreo en mezclas asfálticas en caliente como; carpeta de rodadura, capa intermedia, o bases.

-En ensayos de adherencia, particularmente en el método del hervido, la escoria de cobre presentó una mejor adherencia que el árido tradicional, ver figura 4.1.



Figura 4.1: Método del Hervido, resultados para escoria de cobre (1) y árido del río Aconcagua (2).

- La mejor adherencia entre ligante y agregado pétreo de escoria, tiene una mejor unión debido a las propiedades moleculares de la escoria, ya que ésta es electrónicamente más negativa que un árido tradicional lo que fortalece la adhesión con el ligante.

4.1.3 Reconstitución de banda granulométrica

La reconstitución de la mezcla dentro de la banda granulométrica IV-A-12 será de la siguiente manera:

Tabla 4.4: Reconstitución de la mezcla para banda IV-A-12

Tamiz	% Pasa	
	IV-A-12	Reconstitución
3/4"	100	100
1/2"	80 - 95	90
3/8"	70 - 85	74
Nº4	43 - 58	48
Nº8	28 - 42	33
Nº30	13 - 24	17
Nº50	8 - 17	13
Nº100	6 - 12	10
Nº200	4 - 8	7

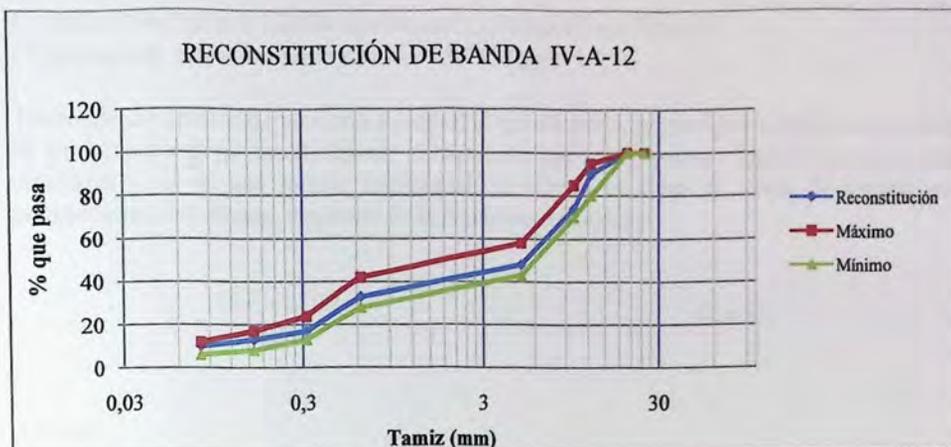


Figura 4.2: Curva de reconstitución de la mezcla de escoria de cobre para banda IV-A-12.

4.1.4 Confección de las probetas Marshall

Teniendo las proporciones de masa de áridos de cada tamaño para confeccionar la mezcla, se procederá a realizar las probetas Marshall, que requieren 1.100 gramos de árido, para la confección de mezcla de árido tradicional; resultando probetas de diámetro constante de 4" (101,6 mm), y aproximadamente 2½" (63,5 mm) de altura.

Los áridos del río Aconcagua que cumplen con la dosificación anterior, se encuentran separados en tres tamaños, gravilla (13-17 mm), gravilla (6-13 mm) y Polvo de roca (0-6 mm), además del filler de aportación.

La mezcla de áridos del río Aconcagua se divide en las siguientes proporciones:

- 1) Gravilla 13-17 = 18%
- 2) Gravilla 6-13 = 30%
- 3) Polvo de Roca 0-6 = 50%
- 4) Filler = 2%

Como el árido de escoria de cobre tiene una densidad mayor, para poder lograr probetas de dimensiones similares a las de una mezcla tradicional, se calcula la masa de árido que se necesita, utilizando la densidad real seca ponderada para cada árido, de la siguiente manera:

$$\text{Densidad real ponderada árido del río Aconcagua} = 2.655 \times 0,18 + 2.635 \times 0,3 + 2.625 \times 0,5 + 2629 \times 0,02$$

$$\text{Densidad real ponderada árido del río Aconcagua} = 2.633 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Densidad real ponderada árido de escoria = $3.790 \times 0,67 + 3.775 \times 0,33$

Densidad real ponderada árido escoria = **3.785 (kg/m³)**

Teniendo las densidades ponderadas según el tipo de árido, se prosigue a realizar el cálculo de masa necesaria para confeccionar probetas con mezcla de escoria, logrando dimensiones similares a las de una mezcla tradicional; se calcula el valor de masa de escoria por proporcionalidad directa, mediante de la siguiente ecuación:

$$M = \frac{\rho_{EC} * 1100}{\rho_{AT}} \quad (\text{ec.4.1})$$

Donde:

- ρ_{AT} = densidad de árido tradicional
- ρ_{EC} = densidad de árido de escoria de cobre
- M = masa de escoria necesaria para confeccionar probetas Marshall

Reemplazando:

$$M = \frac{3785 * 1100}{2633}$$

$$M = 1581 \text{ (gr)}$$

$$M \approx 1600 \text{ (gr)}$$

La mezcla requerida para la confección de las probetas, se realizó mediante el método Marshall, descrito en 8.302.40 del Manual de Carreteras. El procedimiento para la confección de las probetas Marshall se realizó de la siguiente manera:

- Preparación del árido

Se colocan las cápsulas con áridos dentro del horno a una temperatura de 15°C superior a la temperatura de mezclado, por un mínimo de dos horas. De esta manera se pretende mantener la temperatura de mezclado del árido cuando este es sacado del horno.

- Condicionamiento del ligante asfáltico y colocación

El cemento asfáltico es dejado en el horno hasta que éste alcance la temperatura de mezclado; para la incorporación de ligante al árido, se pesa la cantidad de agregado de la cápsula y se multiplica por el porcentaje de asfalto que se aplicará; los porcentajes de

asfalto varían en 0,5% para cada tipo de mezcla; en mezcla con escoria de cobre los porcentajes de asfalto van de 2,5% a 4,5% y en mezcla de árido tradicional va de 4% a 6%. Teniendo la masa de asfalto requerida, esta se vierte sobre el árido y se comienza a mezclar, hasta que todas las partículas de árido queden cubiertas por el ligante; se realizan 3 probetas por variable y el proceso se repite para cada porcentaje de asfalto que lleva cada mezcla.

➤ Compactación de probetas

Luego de realizada la mezcla agregado-ligante, esta se vierte, dentro de un molde de acero Marshall, y es acomodado con una espátula proporcionando 15 golpes por la orilla y 10 golpes en el centro, luego de acomodar la mezcla se aplican 75 golpes con el martillo compactador por no más de 90 segundos, rápidamente se invierte la probeta y aplica la misma cantidad de golpes en un tiempo no mayor al indicado. Finalmente las probetas se dejan enfriar para que logren alcanzar temperatura ambiente antes de ser desmoldadas.



Figura 4.3: Probetas Marshall.

4.2 Porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla según diseño Marshall

Para obtener el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, se deben obtener los valores máximos en densidad y estabilidad, además del porcentaje de asfalto para 5% de huecos de aire de la mezcla, luego estos tres porcentajes de asfalto son promediados, obteniéndose así el porcentaje óptimo de asfalto a utilizar.

En las mezclas en estudio se realizaron las siguientes variables respecto al agregado pétreo:

1. Material de escoria de cobre 100%.
2. Material de escoria de cobre 98.8% y 1,2% de filler de aportación.
3. Material de escoria de cobre 98.6% y 1,4% de filler de aportación.
4. Material de escoria de cobre 98,4% y 1,6% de filler de aportación.
5. Árido del río Aconcagua 98% y 2% de filler de aportación.

Notas:

-Los porcentajes de filler son referidos a la masa de árido que contiene cada mezcla.

-Para cada porcentaje de asfalto se confeccionan 3 probetas, 15 especímenes en total, más 4 mezclas sin compactar por cada tipo de mezcla.

-Las mezclas asfálticas no compactadas se realizan para determinar las densidades máximas de las mezclas sin compactar (DMM).

-En el proceso de mezclado y compactación de las probetas Marshall, se deben calentar todos los elementos de manera de que la mezcla se encuentre a las temperaturas más cercanas de mezclado y compactación, para evitar diferencias térmicas que pueden afectar la confección de la mezcla.

-El porcentaje óptimo de asfalto se calculará para las mezclas realizadas con escoria de cobre y árido tradicional, para así poder comparar las cantidades necesarias de asfalto que requiere cada una, además con estos óptimos se realizan las mezclas necesarias para el estudio del comportamiento mecánico de pavimentos flexibles, utilizando escoria de cobre como agregado pétreo.

4.2.1 Óptimo por densidad

La densidad real de las mezclas compactadas, se calcula mediante el procedimiento descrito en MC-V8 método 8.302.38 y la altura de las probetas fueron medidas según MC-V8 método 8.302.41. Las densidades tanto para las mezclas con escoria de cobre y mezcla tradicional, se muestran a continuación en las tablas 4.5 y 4.6:

Tabla 4.5: Densidades de las probetas Marshall de escoria de cobre (1,4% de filler).

% Asfalto	N° Probeta	Masas (gr)			Abs. Agua (%)	Densidad (kg/m ³)	Prom. Densidad (kg/m ³)
		Seco	Bajo agua	S.S.S.			
2,5%	1	1.586,2	1.110,2	1.591,5	1,10	3.286	3.283
	2	1.632,9	1.142,6	1.638,7	1,17	3.282	
	3	1.629,8	1.138,7	1.634,1	0,87	3.280	
3,00%	1	1.636,7	1.148,9	1.640,6	0,79	3.319	3.312
	2	1.642,1	1.144,8	1.646	0,78	3.267	
	3	1.634,5	1.149,1	1.635,5	0,21	3.351	
3,5%	1	1.659,1	1.167,1	1.659,3	0,04	3.361	3.373
	2	1.662,5	1.172,2	1.662,6	0,02	3.380	
	3	1.658,9	1.169,5	1.659	0,02	3.379	
4,00%	1	1.650,9	1.158,3	1.651,1	0,04	3.340	3.335
	2	1.650,2	1.158,9	1.650,3	0,02	3.348	
	3	1.651,5	1.155,9	1.652,3	0,16	3.317	
4,5%	1	1.644,9	1.155,8	1.645,6	0,14	3.349	3.362
	2	1.641,7	1.157,0	1.641,9	0,04	3.376	
	3	1.664,5	1.171,1	1.664,8	0,06	3.362	

Resultados obtenidos para los distintos tipos de mezcla:

Tabla 4.6: Densidades máximas para cada tipo de mezcla.

Mezcla asfáltica	asfalto	Óptimo por densidad (kg/m ³)
Escoria de cobre	4%	3.320
Escoria de cobre con 1,2% de filler	4%	3.334
Escoria de cobre con 1,4% de filler	3,5%	3.373
Escoria de cobre con 1,6% de filler	4%	3.406
Árido del río Aconcagua con 2% de filler	5,5%	2.393

Observaciones:

-En las mezclas con escoria se puede observar que la mayor densidad se obtiene con un 4% de asfalto, alcanzando la mayor densidad la mezcla de escoria de cobre con 1,6% de filler.

-La diferencia entre la mezcla de escoria y la de árido de río Aconcagua, es de aproximadamente 1.000 (kg/m³), esto es de esperar debido a que la escoria de cobre tiene una densidad real superior a la de un árido tradicional.

4.2.2 Óptimo por estabilidad

Para ensayar las probetas Marshall y encontrar el valor máximo de estabilidad, se realiza la medición de este parámetro, siguiendo lo estipulado en MC-V8 método 8.302.40.

Las estabilidades tanto para mezcla con escoria de cobre y mezcla tradicional, se muestran a continuación en las tablas 4.7 y 4.8:

Tabla 4.7: Estabilidad para la mezcla compuesta con escoria de cobre (1,4% de filler).

% Asfalto	Nº Probeta	Fluidez Corregida (0,25mm)	Estabilidad Lectura (N)	Factor Corrección Altura	Estabilidad Corregida (N)	Promedio Fluidez (0,25mm)	Promedio Estabilidad (N)
2,5%	1	95	11.601	1,04	12.065,04	92	11.756
	2	87	11.119	1,01	11.263,55		
	3	90	12.083	0,99	11.938,00		
3,00%	1	111	16.820	1,04	17.493,16	104	17.300
	2	96	16.920	0,99	16.750,84		
	3	105	16.977	1,04	17.656,00		
3,5%	1	114	13.617	1,04	14.161,68	120	15.765
	2	130	17.757	1,01	17.987,84		
	3	116	14.562	1,04	15.144,48		
4,00%	1	140	13.966	1,07	14.957,59	124	14.728
	2	121	13.795	1,04	14.346,80		
	3	111	14.306	1,04	14.878,24		
4,5%	1	185	13.152	1,04	13.678,08	140	14.495
	2	130	14.562	1,01	14.751,31		
	3	105	14.477	1,04	15.056,08		

Resultados obtenidos para los distintos tipos de mezcla:

Tabla 4.8: Optimo por estabilidad

Mezcla asfáltica	% asfalto	Óptimo por Estabilidad (N)	Fluidez (0,25mm)
Escoria de cobre	3%	16.509	9,4
Escoria de cobre con 1,2% de filler	3%	16.794	10
Escoria de cobre con 1,4% de filler	3%	17.300	12,2
Escoria de cobre con 1,6% de filler	3%	12.526	14,4
Árido del río Aconcagua con 2% de filler	5,5%	13.320	15,7
Exigencia (MC-V5)	-	Mín. 9.000	Mín. 8 – Máx. 16

En las siguientes figuras (4.4 y 4.5), se muestran la estabilidad y fluidez resultante para los mezclas con árido tradicional y con escoria de cobre:

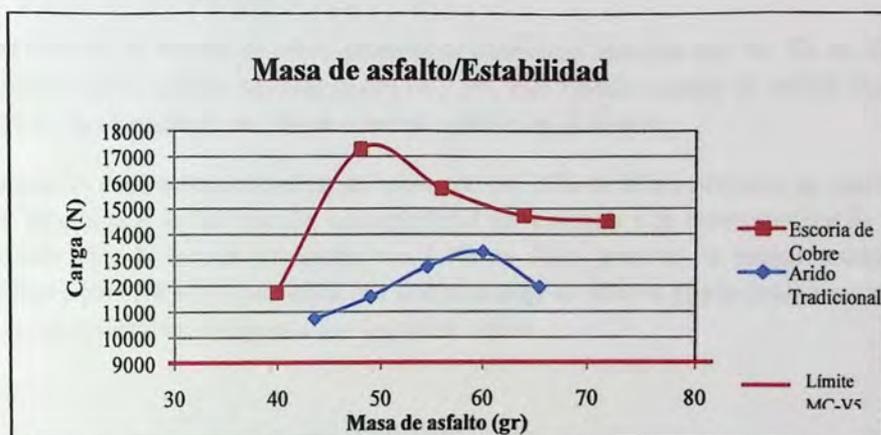


Figura 4.4: Gráfico de estabilidad para mezclas de escoria y tradicional.

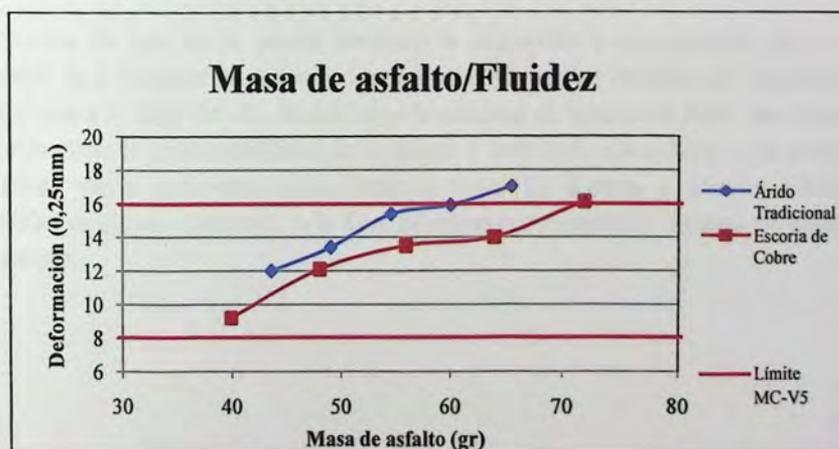


Figura 4.5: gráfico de fluidez para mezclas de escoria y tradicional.

Observaciones:

-La mezcla asfáltica producida con escoria de cobre alcanza una mayor estabilidad, en comparación a la mezcla tradicional, producto de una mejor adherencia con el ligante, y por sus partículas 100% chancadas.

- Durante la confección de las mezclas asfálticas se pudo observar que la mezcla de escoria de cobre presenta una gran susceptibilidad a la cantidad de filler aplicada, por lo que se compararon 3 proporciones distintas; 1,2%, 1,4%, 1,6%, donde la mezcla más favorable en términos de estabilidad y fluidez fue la que contiene un 1,4% de filler de aportación. Esta condición tiene directa relación con el espesor de la pasta que se forma entre el ligante asfáltico y el filler, dando una consistencia optima para alcanzar una adherencia adecuada con las partículas del agregado.

-Las mezclas de escoria de cobre alcanzan su estabilidad máxima con un 3% de ligante, mientras el árido del río Aconcagua con un 5,5%, esto llevado a masa de asfalto significa una baja aproximada de un 20% de cemento asfáltico en la mezcla.

-La mezcla compuesta por escoria de cobre con un 1,6% de filler, presentó la estabilidad más baja, lo cual indica una alta susceptibilidad de la mezcla a la incorporación de filler; por otra parte la mezcla de escoria con 1,4% de filler, presentó la mayor estabilidad, superior a los 17(KN) lo cual indica que este porcentaje de filler es el adecuado para utilizar en la mezcla asfáltica compuesta con escoria de cobre.

4.2.3 Óptimo para 5% de huecos de aire en la mezcla

Los huecos de aire en la mezcla permiten la expansión y contracción de la mezcla, ayudando así a controlar las deformaciones producidas por los cambios de temperatura que se producen a lo largo del día, sin embargo la cantidad de huecos no debe ser excesiva, ya que se perdería la impermeabilidad de la mezcla y sería más susceptible a las condiciones climáticas que se presenten, como lluvias o nieve. En Europa y Estados Unidos este parámetro es el más importante a la hora de obtener el porcentaje óptimo de asfalto para una mezcla.

Densidad máxima de la mezcla (Dmm) para distintos porcentajes de asfalto

Escoria de cobre:

Tabla 4.9: EC, Dmm según % de asfalto.

%Asfalto	2,5	3	3,5	4	4,5
Dmm (kg/m³)	3.554	3.514	3.474	3.436	3.399

Árido del río Aconcagua:

Tabla 4.10: AT, Dmm según % de asfalto.

%Asfalto	4	4,5	5	5,5	6
Dmm (kg/m³)	2.528	2.511	2.494	2.478	2.462

El porcentaje de huecos de aire en la mezcla (Va), se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$Va = 100 \times \frac{Dmm - G}{Dmm} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Donde:

- Va : Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%)
- Dmm: Densidad máxima de la mezcla (kg/m³)
- G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m³)

Los huecos de aire (Va) obtenidos en mezcla de escoria de cobre y de árido de río Aconcagua se muestran a continuación en las tablas 4.11 y 4.12:

Tabla 4.11: Huecos de aire para mezcla de escoria de cobre.

%Asfalto	2,5	3	3,5	4	4,5
Dmm (kg/m³)	3.554	3.514	3.474	3.436	3.399
G (kg/m³)	3.283	3.312	3.330	3.362	3.373
Va (%)	7,6	5,7	4,2	2,1	0,7

Tabla 4.12: Huecos de aire para mezcla de árido del río Aconcagua.

%Asfalto	4	4,5	5	5,5	6
Dmm (kg/m ³)	2.528	2.511	2.494	2.478	2.462
G (kg/m ³)	2.318	2.329	2.360	2.380	2.393
Va (%)	8,3	7,2	5,4	3,9	2,8

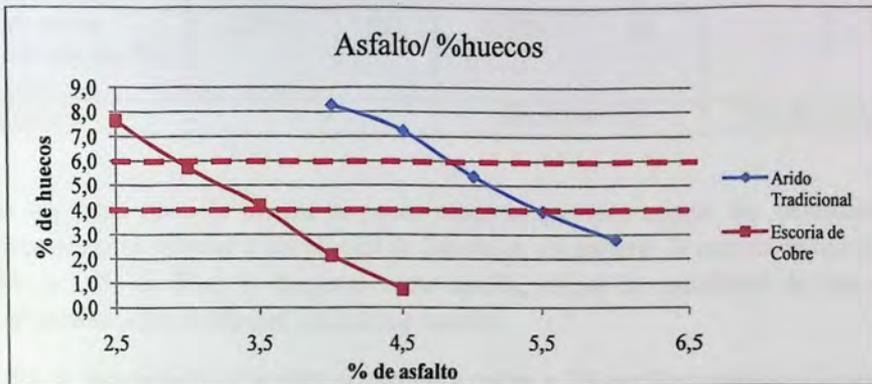


Figura 4.6: Huecos de aire para mezclas con escoria de cobre y tradicional

Resultados obtenidos para los distintos tipos de mezcla:

Tabla 4.13: Óptimo para 5% de huecos de aire

Material	asfalto	Va	Exigencia Va
Escoria de cobre 100%	3,23%	5%	Mín.4% - Máx.6%
Escoria de cobre con 2% de filler	3,2%	5%	
Escoria de cobre con 1,4% de filler	3,1%	5%	
Árido del río Aconcagua con 2% de filler	5,3%	5%	

Observaciones:

-En la mezcla con escoria de cobre a medida que se incorpora filler, se requiere menos asfalto para lograr obtener un 5% de huecos de aire en la mezcla.

-En todos los tipos de mezcla, siempre la mezcla producida con escoria de cobre necesita menos asfalto para lograr una cantidad de huecos de aire cercana al 5%.

Tabla 4.14: Resumen de resultados.

Material	Máx. Densidad (kg/m ³)	Óptimo asfalto (%)	Máx. Estabilidad (N)	Óptimo asfalto (%)	Huecos de aire	Óptimo asfalto (%)
Escoria de cobre 100%	3.373	3,5	16.509	3	5%	3,23
Escoria de cobre con 1,4% de filler	3.406	3,5	17.300	3		3,2
Árido del río Aconcagua con 2% de filler	2.393	5,5	13.320	5,5		5,4
Exigencia	-----		Mín. 9.000 (N)		Mín.4%-Máx.6%	

-En los cinco tipos de mezcla se puede observar que se cumplen los requerimientos dispuestos en el volumen 8 del Manual de Carreteras, sin embargo la mezcla de escoria con 1,2% y 1,6% de filler, se descartan como opción, ya que la estabilidad de esta decae considerablemente en relación a las demás mezclas.

-1,4% de filler referido a la masa de escoria de cobre, y 2% de filler referido a la masa de árido del río Aconcagua, corresponden a cantidades de masa similares de filler, lo que hace más comparables ambos tipos de mezcla.

4.2.1 Otros parámetros obtenidos en el diseño Marshall

4.2.1.1 Densidad efectiva del agregado, MC-V8

La densidad efectiva del agregado mediante la expresión:

$$\rho E = \frac{100}{\frac{(100+Pb)}{Dmm} - \frac{Pb}{pb}} \quad (\text{ec. 4.3})$$

Donde:

- ρE : Densidad efectiva del agregado (kg/m³)
- Pb : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%)
- Dmm : Densidad máxima de la mezcla suelta (kg/m³)
- pb : Densidad de la mezcla

Tabla 4.15: Densidad efectiva de los agregados pétreos.

	Árido Escoria de cobre	Árido Tradicional	Unidad
Pb:	3,5	5,0	%
Dmm:	3.474	2.494	(Kg/m3)
ρb:	1.046	1.046	(Kg/m3)
ρE:	3.781,2	2.679,5	(Kg/m3)

4.2.1.2 Absorción de asfalto, MC-V8

El asfalto absorbido se expresa como un porcentaje referido al agregado y se calcula con la siguiente ecuación:

$$Pba = \left(\frac{1}{\rho_{RS}} - \frac{1}{\rho_{RS}} \right) \times \rho_b \times 100 \quad (\text{ec. 4.4})$$

Donde:

- Pba : Porcentaje de asfalto absorbido, referido al agregado (%).
- ρRS : Densidad real seca del agregado (kg/m3).
- ρE : Densidad efectiva del agregado (kg/m3).
- ρb : Densidad del asfalto (kg/m3).

Tabla 4.16: Absorción de asfalto.

	Árido Escoria de cobre	Árido Tradicional	Unidad
ρRS:	3.750	2.633	(kg/m3)
ρE:	3.781,2	2.679,5	(kg/m3)
ρb:	1.046	1.046	(kg/m3)
Pba	0,2	0,7	(%)

4.2.1.3 Contenido de asfalto útil MC-V8

El contenido de asfalto útil (Pbu) de una mezcla, corresponde al contenido de asfalto total menos el contenido de asfalto absorbido por el agregado.

Se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$Pbu = Pb - Pba \quad (\text{ec. 4.5})$$

Donde:

Pbu : Porcentaje de asfalto útil referido al agregado (%).

Pb : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%).

Pba : Porcentaje de asfalto absorbido referido al agregado (%).

Tabla 4.17: Contenido de asfalto útil en mezclas con escoria de cobre.

%Asfalto	2,5	3	3,5	4	4,5
Pbu (%)	2,3	2,8	3,3	3,8	4,3

Tabla 4.18: Contenido de asfalto útil en mezclas con árido del río Aconcagua.

%Asfalto	4	4,5	5	5,5	6
Pbu (%)	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3

4.2.1.4 Cálculo de los vacíos en el agregado mineral (VAM), MC-V8

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM), se calcula de acuerdo a la fórmula:

$$VAM = 100 \times \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} \times \frac{100}{100 + Pb} \right) \quad (\text{ec. 4.6})$$

Donde:

- VAM : Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%).
- G : Densidad de la mezcla compactada (kg/m³).
- ρ_{RS} : Densidad real seca del agregado (kg/m³).
- Pb : Porcentaje de asfalto referido al agregado (%).

Tabla 4.19: Vacíos en el agregado mineral en mezclas de escoria de cobre.

<i>%Asfalto</i>	2,5	3	3,5	4	4,5
<i>G (kg/m³)</i>	3.283	3.312	3.330	3.362	3.373
<i>PRS (kg/m³)</i>	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750
<i>VAM (%)</i>	14,6	14,2	14,2	13,8	13,9

Tabla 4.20: Vacíos en el agregado mineral en mezclas de árido del río Aconcagua.

<i>%Asfalto</i>	4	4,5	5	5,5	6
<i>G (kg/m³)</i>	2.318	2.329	2.360	2.380	2.393
<i>PRS (kg/m³)</i>	2.633	2.633	2.633	2.633	2.633
<i>VAM (%)</i>	15,3	15,3	14,6	14,3	14,2

4.2.1.5 Cálculo del porcentaje de huecos llenos con asfalto

El porcentaje de huecos llenos con asfalto (VLL), se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$VLL = 100 \times \left(1 - \frac{Va}{VAM}\right) \quad (\text{ec. 4.7})$$

Donde:

- VLL : Porcentaje de huecos llenos con asfalto (%).
- Va : Porcentaje de huecos de aire en la mezcla (%).
- VAM : Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%).

Escoria de cobre:

Tabla 4.21: Huecos llenos con asfalto en mezclas con escoria de cobre.

<i>%Asfalto</i>	2,5	3	3,5	4	4,5
<i>Va (%)</i>	7,6	5,7	4,2	2,1	0,7
<i>VAM (%)</i>	14,6	14,2	14,2	13,8	13,9
<i>VLL (%)</i>	47,6	59,8	70,7	84,5	94,7

Árido del río Aconcagua:

Tabla 4.22: Huecos llenos con asfalto en mezclas con árido del río Aconcagua.

%Asfalto	4	4,5	5	5,5	6
Va (%)	8,3	7,2	5,4	3,9	2,8
VAM (%)	15,3	15,3	14,6	14,3	14,2
VLL (%)	46,0	52,9	63,3	72,5	80,5

Resultados correspondientes a la mezcla asfáltica con escoria de cobre:

Tabla 4.23: Resultados para la mezcla asfáltica con escoria de cobre (1,4% de filler).

CONTENIDO ASFALTO	DENSIDAD	ESTABILIDAD	FLUENCIA	VA	VAM	VLL
%	[kg / m3]	[N]	[0.25 mm]	[%]	(%)	[%]
2.5	3.326	11.756	92	7,6	14,6	47,6
3	3.376	17.300	12,2	5,7	14,2	59,8
3.5	3.400	15.765	120	4,2	14,2	70,7
4	3.408	14.728	124	2,1	13,8	84,5
4.5	3.387	14.495	140	0,7	13,9	94,7

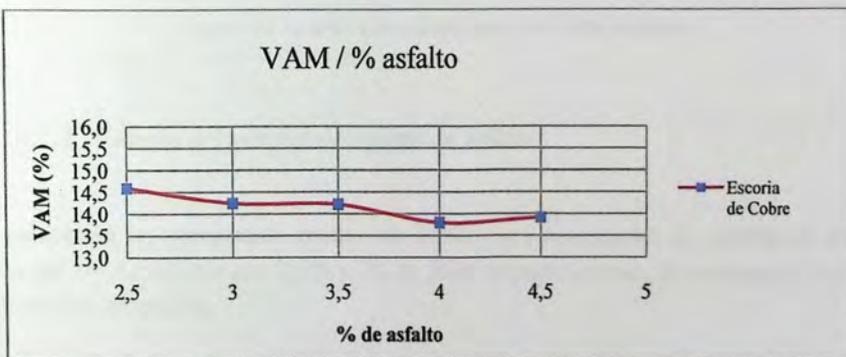


Figura 4.7: Gráfico vacíos en el agregado mineral v/s % asfalto.

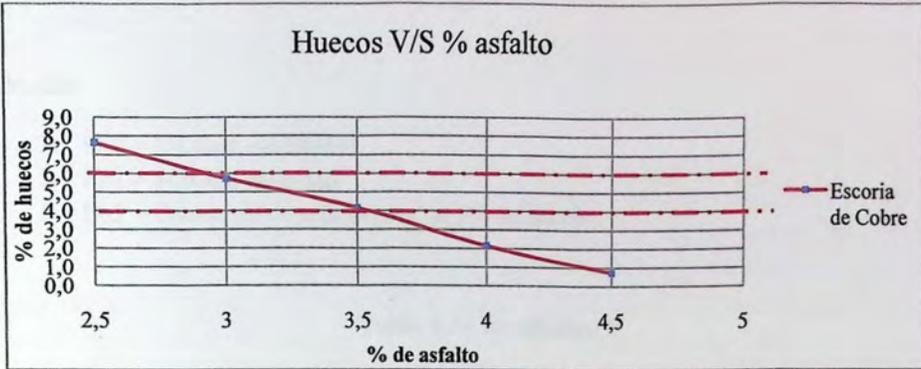


Figura 4.8: Gráfico huecos de aire v/s % asfalto

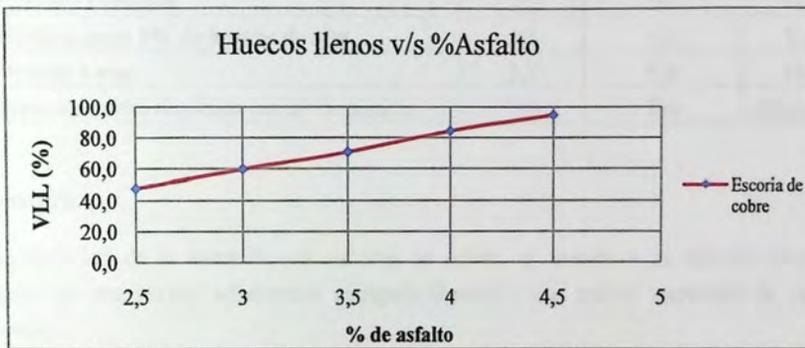


Figura 4.9: Gráfico huecos llenos de asfalto v/s % de asfalto

4.2.2 Cálculo del porcentaje óptimo de asfalto

Se calcularán los porcentajes óptimos de asfalto para las mezclas de escoria de cobre y árido del río Aconcagua con 1,4% y 2% de filler respectivamente, de manera de comparar ambos tipos de mezcla.

El contenido óptimo de asfalto se calcula como la media aritmética de los tres valores obtenidos, es decir:

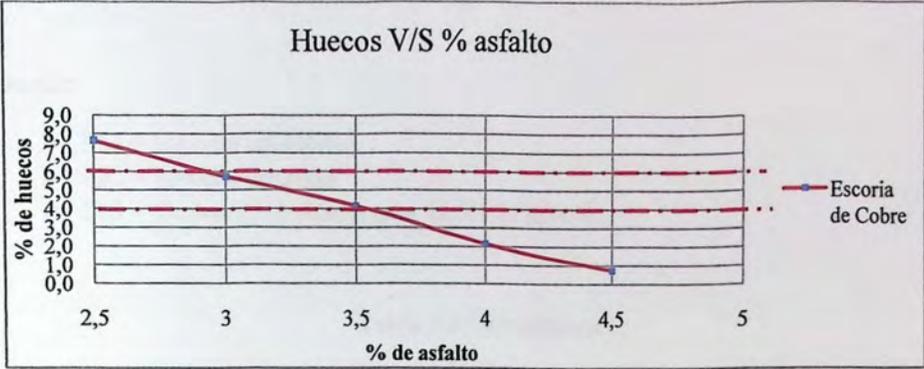


Figura 4.8: Gráfico huecos de aire v/s % asfalto

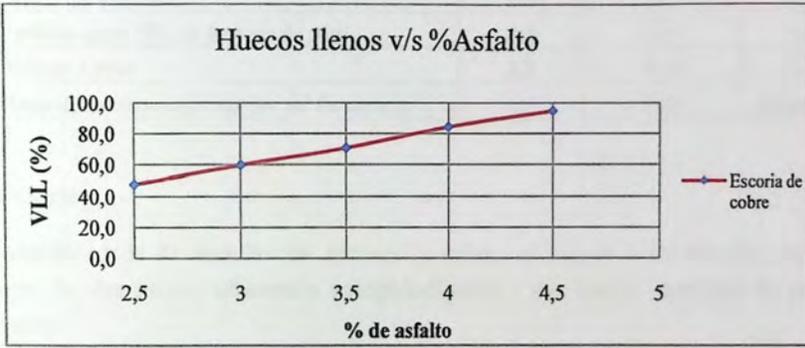


Figura 4.9: Gráfico huecos llenos de asfalto v/s % de asfalto

4.2.2 Cálculo del porcentaje óptimo de asfalto

Se calcularán los porcentajes óptimos de asfalto para las mezclas de escoria de cobre y árido del río Aconcagua con 1,4% y 2% de filler respectivamente, de manera de comparar ambos tipos de mezcla.

El contenido óptimo de asfalto se calcula como la media aritmética de los tres valores obtenidos, es decir:

$$Pb \text{ óptimo} = \frac{Pb1 + Pb2 + Pb3}{3} \quad (\text{ec. 4.8})$$

Donde:

- Pb1 = Máxima estabilidad.
- Pb2 = Máxima densidad.
- Pb3 = Contenido de asfalto para un 5% de huecos.

Tabla 4.24 Resultados:

Asfalto	E. Cobre	A. Tradicional	unidad
Absorción de Asfalto	0,2	0,7	%
Óptimo Estabilidad	3	5,5	%
Óptimo Densidad	3,5	5,5	%
Óptimo para 5% de huecos de aire	3,2	5,6	%
Óptimo a usar	3,2	5,5	%
Masa de asfalto requerida por m ³ de mezcla	106	130	(Kg/m ³)

Comentarios:

-La estabilidad de la mezcla con escoria de cobre, es mayor a la mezcla tradicional, producto de una mayor adherencia agregado-ligante y una mayor cantidad de partículas chancadas.

-La mezcla de escoria de cobre sin filler, y con 1,2% presentaron mayor disgregación de partículas durante los ensayos.

-La incorporación de filler en un 1,4% a la mezcla con escoria de cobre, ayuda a mejorar sus propiedades, en estabilidad y densidad.

-La incorporación de filler en un 1,6% a la mezcla con escoria de cobre, disminuye considerablemente su estabilidad, lo cual indica una disminución en la trabazón de las partículas de agregado, posiblemente debido a un exceso de material fino pegado a las partículas más gruesas.

-La escoria de cobre presenta una menor absorción de asfalto, por lo que aumenta el porcentaje útil de éste, como resultado se obtiene una diferencia aproximada, entre mezcla tradicional y mezcla con escoria de cobre, de 24 kilogramos de asfalto por metro cúbico de mezcla, lo cual significaría un ahorro considerable.

5 Capítulo V: Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura en pavimentos, están sujetas a múltiples acciones que afectan su vida útil. Estas acciones se relacionan principalmente con el paso de los vehículos y el medio ambiente, contribuyendo en diferente medida al daño de la mezcla. Considerando un comportamiento estable de las capas subyacentes a la carpeta de rodadura, los principales deterioros en mezclas asfálticas son: las deformaciones permanentes y el agrietamiento por fatiga. Estos tipos de deterioros pueden presentarse en pavimentos nuevos o antiguos, dependiendo del mecanismo de falla al que estén relacionados; estos mecanismos de falla pueden presentarse a corto o largo plazo; a corto plazo predominan la susceptibilidad de la mezcla a condiciones ambientales como humedad o bajas temperaturas; o pueden ser fallas a largo plazo, asociadas a las cargas reiteradas de tráfico, a la rigidez de la mezcla por el envejecimiento del asfalto, o al exceso de este.

5.1 Parámetros influyentes en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica

5.1.1 Estabilidad

De acuerdo a los valores obtenidos en el diseño de mezclas del capítulo anterior:

- Mezcla con escoria de cobre: 17.300 (N)
- Mezcla con árido tradicional: 13.320 (N)

5.1.2 Rigidez

Para caracterizar la rigidez de una mezcla asfáltica se debe determinar su módulo elástico (módulo resiliente), que es un parámetro imprescindible para realizar el dimensionamiento de un pavimento.

Se realizó el ensayo para obtener el módulo resiliente según el método AASHTO T294-92I, para las mezclas con escoria de cobre y mezclas con árido del río Aconcagua, donde se obtienen los siguientes resultados:

Mezcla con escoria de cobre:

Probeta	1	2	3	4	Promedio
Tiempo de carga (subida) (ms)	123,8	123,2	123,3	124,3	123,65
Deformación horizontal (μm)	5	4,9	5	5	4,975
Deformación horizontal (%)	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
Módulo resiliente medido (MPa)	4.083	3.682	4.244	3.917	3.981,5
Módulo resiliente ajustado (MPa)	4.107	3.689	4.264	3.928	3.997

Mezcla con árido del río Aconcagua:

Probeta	1	2	3	4	Promedio
Tiempo de carga (subida) (ms)	122,8	123,7	123,2	122,8	123,125
Deformación horizontal (μm)	4,9	5	5	5	4,975
Deformación horizontal (%)	0,0048	0,005	0,0049	0,005	0,004925
Módulo resiliente medido (MPa)	1.888	2.044	2.028	3.110	2.267,5
Módulo resiliente ajustado (MPa)	1.895	2.052	2.030	3.113	2.272,5

En los resultados del ensayo de módulo resiliente se puede observar que el módulo de rigidez de la mezcla compuesta con escoria de cobre es mayor que el módulo de la mezcla con árido del río Aconcagua, lo cual indica que la mezcla de escoria es más rígida, lo que indica que su tolerancia a las deformaciones es mayor.

5.1.3 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción de la mezcla asfáltica, es un buen indicador de la capacidad de resistir el agrietamiento en condiciones en donde las tensiones inducidas en la mezcla superan la capacidad de resistencia a la tracción.

La resistencia a tracción de la mezcla se realiza mediante el ensayo de tracción indirecta (RTI o ITS), según la Norma NLT-346/90 "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas".

Procedimiento del ensaye:

- 1) Esta vez se realiza el ensayo en condición seca, para luego comparar resultados con los ensayos a baja temperatura (Ciclo de hielo-deshielo), y en condición húmeda, de esta manera evaluar la susceptibilidad de la mezcla bajo estas condiciones.
- 2) Para realizar el ensaye se utilizan 3 probetas Marshall para la mezcla con escoria de cobre y 3 para la mezcla con árido del río Aconcagua, estas probetas se acondicionan durante 2 horas a una temperatura de 20° C antes de ser ensayadas.
- 3) Luego se aplica la carga a una velocidad de deformación de 50 mm/min, y se registra la carga máxima y la deformación vertical que se produce hasta alcanzar la falla de la probeta.

Para calcular la resistencia a la tracción indirecta se aplica la siguiente ecuación:

$$RTI = \frac{2P}{\pi hd} \quad (\text{ec. 5.1})$$

Donde:

- RTI = resistencia a la tracción indirecta.
- P = carga máxima en Newton.
- H = Altura del espécimen, mm.
- D = diámetro del espécimen, mm.
- $\pi = 3,14159\dots$

Resultados para ensayo RTI en condición seca:

Tabla 5.1: RTI para mezcla con escoria de cobre en condición seca.

Probeta	H (mm)	Diámetro (mm)	Carga máx. (N)	Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1	60,3	101,6	11.626	1,8	12.091
2	60,9	101,6	11.799	2,1	12.145
3	60,4	101,6	10.380	2	10.777
Promedio			11.268	2	11.671

Tabla 5.2: RTI para mezcla con árido del río Aconcagua en condición seca.

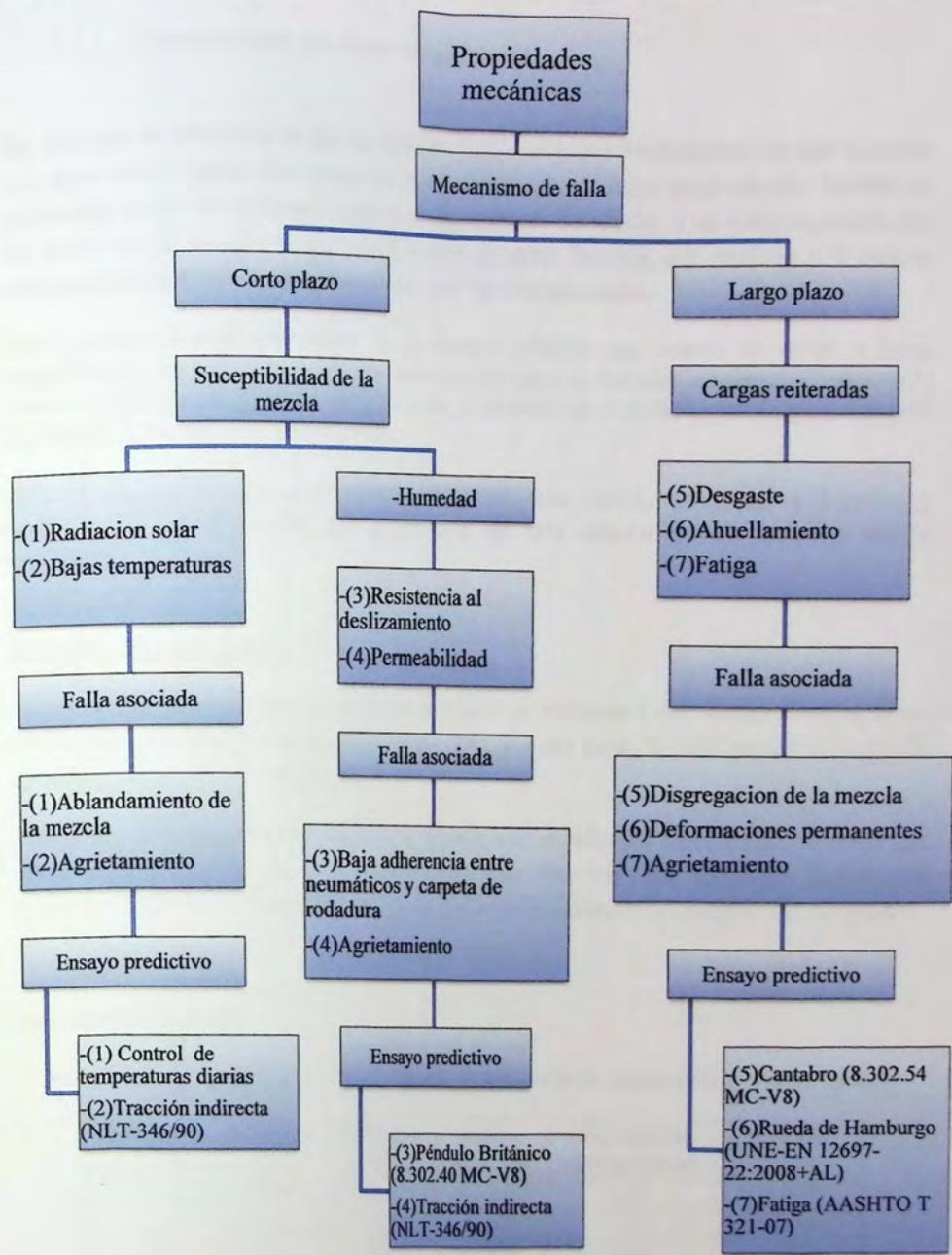
Probeta	H (mm)	Diámetro (mm)	Carga máx. (N)	Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1	63,9	101,6	8.450	1,5	8.292
2	64,5	101,6	10.350	1,9	10.062
3	64,1	101,6	11.750	2,3	11.486
Promedio			10.183	1,9	9.947

Observaciones:

Como se puede observar, la mezcla compuesta con escoria de cobre presentó una mayor resistencia a la tracción, además demostró ser más tolerante a la deformación, lo que indica que la mezcla tendría una mayor resistencia a fallas inducidas por esfuerzos de tensión.

Más adelante se utiliza el mismo ensayo para determinar la susceptibilidad de la mezcla a la falla por tracción, en condiciones de hielo-deshielo y en humedad.

5.2 Diagrama de estudio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas



5.3 Comportamiento a corto plazo

5.3.1 Agrietamiento por bajas temperaturas

En este tipo de deterioro el ligante asfáltico juega un papel fundamental, ya que mientras más duro sea el ligante, más propenso es a la fisuración por bajas temperaturas. También es influyente un alto nivel de oxidación o envejecimiento del asfalto, o un porcentaje muy alto de vacíos en la mezcla, o una combinación de estos factores, que vuelven a la mezcla asfáltica más susceptible al agrietamiento por bajas temperaturas.

Para evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica con escoria de cobre a bajas temperaturas, se realiza la medición de la resistencia a la tracción, mediante el ensayo de tracción indirecta (RTI), según NLT-346/90, simulando un ciclo de hielo-deshielo a la cual se somete la mezcla para ser ensayada.

Para el ensaye se utilizan 3 probetas Marshall, con escoria de cobre, y 3 probetas tradicionales, de árido del río Aconcagua, de esta manera poder comparar ambos resultados.

Procedimiento del ensaye:

Preparación de probetas: las probetas a ensayar se enfriaron a -10°C , por 6 horas, luego se colocan bajo agua a una temperatura de 25°C , por dos horas, de esta manera se pretende simular un ciclo de hielo-deshielo.

Ejecución del ensaye: Las probetas a ensayar son sacadas del agua luego de pasar dos horas sumergidas, y son ensayadas rápidamente una tras otra mediante compresión diametral, registrando para cada probeta la resistencia máxima y la deformación alcanzada.

Resultados obtenidos:

Tabla 5.3: Resultados RTI para mezcla con escoria de cobre a baja temperatura.

Probeta	H (mm)	Diámetro (mm)	Carga máx. (N)	Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1	60,4	101,6	11.041	1,3	11.659
2	61,0	101,6	11.085	1,1	11.696
3	58,7	101,6	10.894	1,4	11.724
Promedio			11.007	1,3	11.693

Referencia mezcla EC en condición seca:

Deformación vertical (mm)	RTI (N)
2	11.671

Tabla 5.4: Resultados RTI para mezcla con árido del río Aconcagua a baja temperatura.

Probeta	H (mm)	Diámetro (mm)	Carga máx. (N)	Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1	61,4	101,6	10.255	0,4	10.470
2	60,3	101,6	10.125	0,8	10.517
3	60,8	101,6	9.856	1	10.157
Promedio			10.079	0,7	10.381

Referencia mezcla AT en condición seca:

Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1,9	9.947

Observaciones:

-En ambos tipos de mezcla, la capacidad de deformación se ve disminuida tras la aplicación de un ciclo de hielo-deshielo, sin embargo la capacidad resistente se incrementa levemente en las mezclas de escoria de cobre y árido del río Aconcagua en relación a las mezclas ensayadas a temperatura ambiente.

-Para el ensayo bajo condiciones de hielo-deshielo la escoria de cobre presentó una mayor capacidad de deformación, y una mayor resistencia a la falla por tracción indirecta, en comparación a la mezcla con árido del río Aconcagua; esto puede tener relación a la mayor trabazón que se genera en las partículas de escoria de cobre, además de la mejor adherencia que presenta este material con el ligante asfáltico.

5.3.2 Comportamiento en presencia de humedad

Para caracterizar la influencia de la humedad en la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica, se realiza nuevamente el ensayo (RTI) según NTL-346/90, sometiendo las probetas a compresión diametral, de esta manera se pretende determinar la permeabilidad de la mezcla, y la influencia de la humedad en su resistencia.

En el ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.5: Resultados RTI para mezcla de escoria de cobre en condición húmeda.

Probeta	H (mm)	Diámetro (mm)	Carga máx. (N)	Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1	60,3	101,6	10.513	2,5	10.933
2	60,4	101,6	11.324	1,6	11.757
3	60,9	101,6	11.976	2,6	12.317
Promedio			11.271	2,2	11.669

Referencia mezcla EC en condición seca:

Deformación vertical (mm)	RTI (N)
2	11.671

Tabla 5.6: Resultados RTI para mezclas con árido del río Aconcagua en condición húmeda.

Probeta	H (mm)	Diámetro (mm)	Carga máx. (N)	Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1	62,3	101,6	9.741	1,5	9.805
2	60,2	101,6	9.617	0,8	10.006
3	61,2	101,6	9.679	1,2	9.910
Promedio			9.679	1,2	9.907

Referencia mezcla AT en condición seca:

Deformación vertical (mm)	RTI (N)
1,9	9.947

Observaciones:

-Para ambos tipos de mezcla, tanto para la mezcla de escoria como para la mezcla tradicional, prácticamente no existe diferencia entre los resultados obtenidos para las mezclas secas y húmedas, lo que indica que las mezclas tienen una buena impermeabilidad, lo cual tiene sentido ya que contienen una baja cantidad de vacíos (aproximadamente 5%), además un porcentaje de agregado pétreo fino que sella de mejor manera la superficie de la mezcla.

-En ambos tipos de mezcla en condiciones húmedas se observa un leve aumento de la deformación vertical, en relación a la mezcla seca, esto se debe a la humedad que influye en la capa externa de la probeta, ablandando la superficie que está en contacto con las barras de la prensa.

5.3.3 Temperatura máxima de la mezcla bajo radiación solar

El asfalto usado en climas templados, particularmente el utilizado en este trabajo (cemento asfáltico CA-24), tiene un punto de ablandamiento a temperaturas cercanas a los 55° Celsius, sin embargo la conductividad térmica y almacenamiento de calor en una mezcla asfáltica, dependen del asfalto y de las propiedades del agregado mineral; por esta razón se medirán las temperaturas de la mezcla asfáltica utilizando escoria de cobre como árido, y se comparará con las temperaturas alcanzadas en una mezcla tradicional bajo las mismas condiciones.

Para realizar la medición de las temperaturas máximas de las mezclas bajo radiación solar, se realiza un ensaye en donde se utilizan dos probetas Marshall, una compuesta con escoria de cobre y otra con árido del río Aconcagua; las probetas se perforan en el centro a una profundidad de 5 centímetros mediante un taladro; de esta manera se puede introducir un termómetro digital en cada mezcla, para obtener las temperaturas de ambas; además se registra la temperatura ambiente a lo largo de todo el ensayo, como se ve en la figura 5.1, de esta manera se obtienen las variaciones de temperatura durante un día soleado.



Figura 5.1: Registro de temperaturas para mezclas asfálticas bajo radiación solar.

Ejecución del de ensaye:

Condiciones del ensayo: Las probetas Marshall se ensayan un día completamente despejado y en un lugar cerrado que no presenta mayor influencia de viento.

Tiempo de ensayo: Las probetas Marshall son colocadas al aire libre la noche anterior al ensayo; luego, en el día del ensayo, la temperatura de las mezclas, y la temperatura ambiente, fueron registradas cada 30 minutos, desde las 8:00 am hasta las 20:00 hrs.

Resultados: Con el registro de las temperaturas, se puede evaluar el comportamiento térmico de ambas mezclas y determinar la temperatura máxima alcanzada en las horas de mayor radiación solar.

Los resultados obtenidos en el ensayo son los siguientes:

- Día de ensaye: 4-*Octubre-2016*
- Escala de temperaturas: *grados Celsius*

Tabla 5.7: Registro de temperatura diaria de las mezclas asfálticas.

Hrs	T° Ambiente	T° E. Cobre	T° A. Tradicional
8:00:00	10,2	11,3	11
8:30:00	12,7	14	13,4
9:00:00	15	16,2	15,6
9:30:00	19	21,9	20,1
10:00:00	22	27	23,5
10:30:00	25	29	27
11:00:00	28,3	32,1	30,2
11:30:00	30	34,4	33
12:00:00	31,2	35,6	34,7
12:30:00	32,2	39	37
13:00:00	33,9	42	43,8
13:30:00	35	45,7	46,6
14:00:00	35,6	47,8	48,3
14:30:00	35,5	49,4	49,8
15:00:00	36	49,9	50,3
15:30:00	33,2	49,5	48,9
16:00:00	33	48,6	47,4
16:30:00	32,1	48	47
17:00:00	31,2	47,2	46,3
17:30:00	30,4	46,1	45,2
18:00:00	27,7	43,4	42,6
18:30:00	25	37,7	35,8
19:00:00	22,5	32,6	31
19:30:00	20,3	26,9	25,6
20:00:00	18,1	21,1	20,1

Con el registro de temperaturas presentado en la tabla anterior, se elabora un gráfico, para comprender mejor el comportamiento térmico de ambas mezclas a lo largo del día.

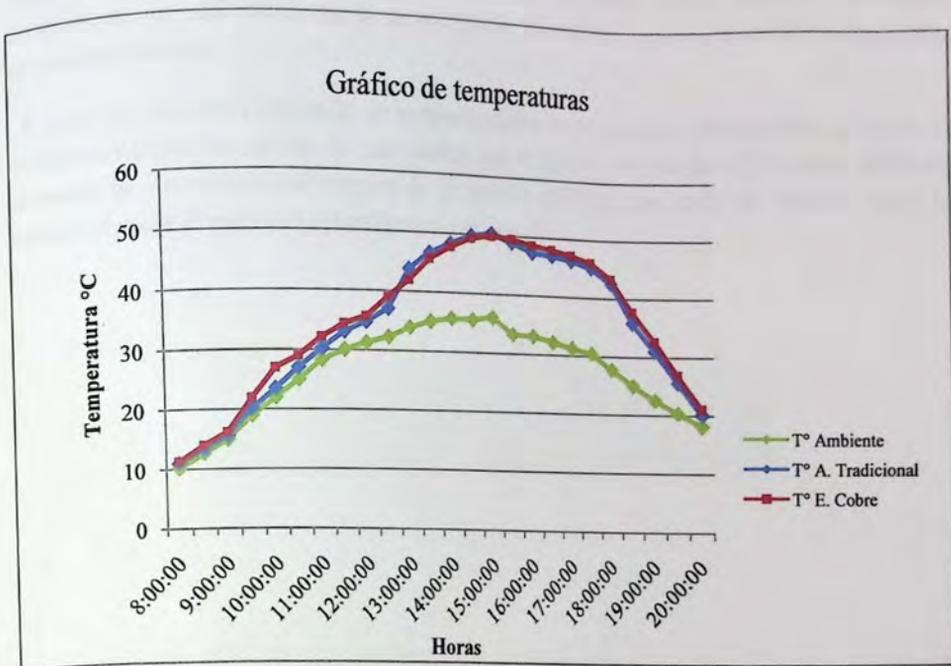


Figura 5.2: Gráfico de temperaturas de mezclas asfálticas a distintas horas del día.

Como se observa en el gráfico anterior, la mezcla de escoria de cobre comienza a aumentar de temperatura a mayor velocidad, respecto a su mezcla tradicional, pero al llegar a las 15 hrs, la cual es la hora donde ambas mezclas alcanzan la mayor temperatura, la mezcla tradicional presenta una temperatura levemente superior, luego al transcurso de la tarde al disminuir la temperatura ambiente y la radiación solar, la mezcla con escoria de cobre disminuye su temperatura a menor velocidad.

Observaciones:

-La mayor velocidad de aumento de temperatura de la escoria de cobre, durante las horas de la mañana, se debe a una mayor conductividad térmica del agregado mineral, debido a su composición ferrosa.

-La mezcla tradicional alcanza una temperatura máxima, levemente mayor a la temperatura de la mezcla con escoria, posiblemente por contener una mayor cantidad de asfalto.

-Durante el transcurso de la tarde la mezcla con escoria de cobre presenta una mayor temperatura, lo cual indica que la mezcla posee una mayor capacidad de almacenamiento de energía térmica.

-A pesar de las leves diferencias de temperatura que se presentaron entre ambas mezclas, el comportamiento fue similar, lo cual indica que el uso de escoria de cobre como árido no aumenta la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica, por ende no induce a que la mezcla alcance el punto de ablandamiento del asfalto.

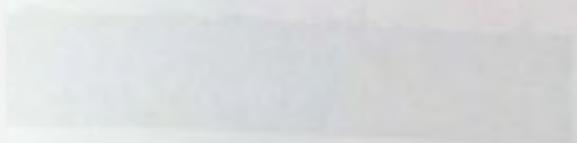


Figura 13. [Illegible text]

El primer punto de control de la calidad de los materiales se realiza al momento de la recepción de los mismos en el sitio de obra, para lo cual se debe contar con un personal capacitado que realice las pruebas de control de calidad de los materiales, de acuerdo a lo establecido en el Manual de Control de Calidad de Materiales de Construcción, publicado por el Comité Colombiano de Normas Técnicas y Estándares (CCTE) en el año 2008, el cual establece los procedimientos de control de calidad de los materiales de construcción que se utilizarán en la obra.

El segundo punto de control de la calidad de los materiales se realiza al momento de la recepción de los mismos en el sitio de obra, para lo cual se debe contar con un personal capacitado que realice las pruebas de control de calidad de los materiales, de acuerdo a lo establecido en el Manual de Control de Calidad de Materiales de Construcción, publicado por el Comité Colombiano de Normas Técnicas y Estándares (CCTE) en el año 2008, el cual establece los procedimientos de control de calidad de los materiales de construcción que se utilizarán en la obra.

Para lograr cumplir la finalidad de la presente investigación se realizó un estudio de campo, en el cual se midió la temperatura de la mezcla de asfalto en el momento de su colocación en el sitio de obra, de acuerdo a lo establecido en el Manual de Control de Calidad de Materiales de Construcción, publicado por el Comité Colombiano de Normas Técnicas y Estándares (CCTE) en el año 2008, el cual establece los procedimientos de control de calidad de los materiales de construcción que se utilizarán en la obra.

5.3.4 Resistencia al deslizamiento

Las características de la textura del pavimento que intervienen en la fricción en condición húmeda son: la microtextura, con rugosidades que van desde $1\ \mu\text{m}$ a $0,5\ \text{mm}$, y la macrotextura; con rugosidades que van desde los $0,5\ \text{mm}$ hasta los $5\ \text{mm}$. Por esto en el diseño y construcción de pavimentos se debe proveer una textura (microtextura y macrotextura), que permita una adecuada fricción cuando la superficie este húmeda [26].

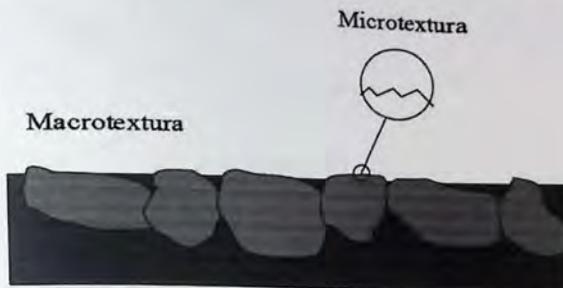


Figura 5.3: Microtextura y Macrotextura de un pavimento.

El ensaye para determinar la resistencia al deslizamiento mediante el péndulo Británico mide la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas, provisto en su extremo de una zapata de goma, una de cuyas aristas roza, con una presión determinada, sobre la superficie a ensayar, y en una longitud fija. Esta pérdida de energía refleja las características antideslizantes de la superficie y se mide el ángulo de oscilación del péndulo [24].

El ensaye mediante el péndulo Británico, entrega valores puntuales de resistencia al deslizamiento, por lo que no es apto para medir tramos extensos, debido a la baja repetitividad espacial que presenta el péndulo, a diferencia de otros instrumentos de medición de resistencia al deslizamiento como el equipo SCRIM; sin embargo y considerando que aún no existe una carpeta de rodadura asfáltica que este confeccionada con escoria de cobre como agregado pétreo, este ensayo puede dar un buen indicador de la resistencia al deslizamiento que presentará un pavimento compuesto por esta mezcla.

Para lograr medir la resistencia al deslizamiento de la mezcla asfáltica realizada con escoria de cobre, se utilizará el péndulo británico, según lo estipulado en el método de control 8.502.16 del MC-V8, donde se mide en condición húmeda la resistencia al deslizamiento de 3 probetas de árido de escoria de cobre, y 3 probetas de árido del río Aconcagua, para poder comparar ambos resultados.

Una vez centrado el aparato de medición y la mezcla firme y húmeda en la parte inferior, se deja caer el péndulo y se registra el BPN, que está determinado por el ángulo que alcanza el péndulo después de hacer contacto con la superficie de la mezcla; mientras más alto el BPN (menor ángulo), mayor resistencia al deslizamiento presenta la superficie.



Figura 5.6: Imagen de la ejecución del ensayo de resistencia al deslizamiento mediante el Péndulo Británico.

El procedimiento anterior se repite 5 veces por muestra, registrando la temperatura del agua antes de humedecer la mezcla, y el BPN luego de cada contacto entre la zapata de goma del péndulo con la superficie de la mezcla asfáltica.

Resultados:

Tabla 5.8: Resultado de las lecturas registradas mediante el péndulo Británico.

Pista	Huella	Temperatura Agua °C	Promedio Lecturas (BPN)	Valor Corregido (BPN)	Resistencia al deslizamiento (RD)	Orientación
EC - 1	Externa	18,0	70	70	0,7	Norte a Sur
EC - 2	Externa	18,0	76,2	76	0,76	Norte a Sur
EC - 3	Externa	18,0	77,6	77	0,77	Norte a Sur
AT - 1	Externa	19,1	69,2	69	0,69	Norte a Sur
AT - 2	Externa	20,0	70	70	0,7	Norte a Sur
AT - 3	Externa	21,0	69,4	70	0,7	Norte a Sur

Promedios para ambos tipos de mezcla:

Mezcla	Promedio (RD)
EC	0,74
AT	0,70

Observaciones:

-La mezcla compuesta con escoria de cobre presenta una mejor resistencia al deslizamiento en condiciones desfavorables (húmeda), respecto a la mezcla con árido del río Aconcagua, lo que indica que la mezcla con escoria tiene una textura más rugosa con mayor capacidad antideslizante.

-Para poder medir a una escala más representativa el coeficiente de roce en una carpeta de rodadura compuesta con escoria de cobre como agregado pétreo, mediante el equipo SCRIM u otro método, se necesita la disponibilidad de un tramo de prueba, ya que debe disponer de extensas longitudes de pavimento para evaluar la resistencia al deslizamiento de una manera más continua, considerando zonas de frenado y curvas.

-El método del péndulo británico es representativo para caracterizar la resistencia al deslizamiento en velocidades medianas, cercanas a los 50 km/hr.

-Los métodos para medir la resistencia al deslizamiento se realizan en condición húmeda, con el fin de simular las condiciones más desfavorables a las que se enfrenta el tráfico vehicular sobre el pavimento, en términos de adherencia.

5.4 Comportamiento a largo plazo

5.4.1 Resistencia al desgaste superficial

La resistencia al desgaste superficial de una mezcla asfáltica indica el nivel de cohesión que existe en ella, y la capacidad de resistir la disgregación producto de las cargas abrasivas a las que se somete una carpeta de rodadura en condiciones de servicio. Para lograr medir la resistencia al desgaste de una mezcla asfáltica compuesta con escoria de cobre como árido, se someterá la mezcla a un ensaye que simula el desgaste acelerado en la superficie, lo cual logra medir mediante el ensaye "desgaste Cantabro, según el método 8.302.54 del MC-V8", que se realiza para mezclas asfálticas abiertas, donde se somete cada probeta a 300 revoluciones dentro de la máquina de desgaste los Ángeles, luego se calcula el desgaste, midiendo la pérdida de masa de cada probeta.

Se compara el desgaste de la mezcla asfáltica de escoria de cobre, con una mezcla asfáltica tradicional con árido del río Aconcagua. Logrando así comparar los resultados obtenidos en mezclas del tipo semidensas destinadas a carpetas de rodadura.

5.4.1.1 Confección de probetas Marshall

La confección de probetas Marshall, se realiza según el método 8.302.40 del MC-V8, utilizando los porcentajes óptimos de asfalto que se calcularon anteriormente en el diseño Marshall, para mezclas semidensas con granulometría dentro de la banda IV-A-12.

Las mezclas asfálticas sometidas al ensayo de desgaste de Cantabro son las siguientes:

- 1) Escoria de cobre con 3,2% de asfalto (sin filler).
- 2) Escoria de cobre con 3,2% de asfalto y 1,4% de filler.
- 3) Árido del río Aconcagua con 5,2% de asfalto y 2% de filler.

Para cada tipo de mezcla se confeccionan 4 probetas, de esta manera el desgaste será la media aritmética entre los cuatro resultados obtenidos para cada mezcla.

5.4.1.2 Adaptación del ensayo de desgaste Cantabro

En el ensayo de desgaste Cantabro, la gravedad juega un papel fundamental, ya que influye directamente en la dinámica del ensayo y por ende en los resultados, ver figura 5.7. Para medir el desgaste superficial de la mezcla con escoria de cobre existe un inconveniente, ya que el ensayo está diseñado para mezclas asfálticas con áridos tradicionales con densidades que no superan los 3.000 kg/m^3 , mientras que la densidad real de la escoria de cobre supera los 3.700 kg/m^3 ; por esto se obtienen probetas Marshall con masas del orden de los 1.650 gramos.

Debido a la gran diferencia de masa que existe entre las probetas con escoria de cobre y las probetas con árido del río Aconcagua (aproximadamente 500 gramos), se busca una solución que consiste en encontrar un factor de reducción, que se aplica a las probetas compuestas con escoria de cobre luego de ser ensayadas, de esta manera se pretende suprimir la influencia en el desgaste, producto del aumento de energía potencial gravitacional durante el ensayo.

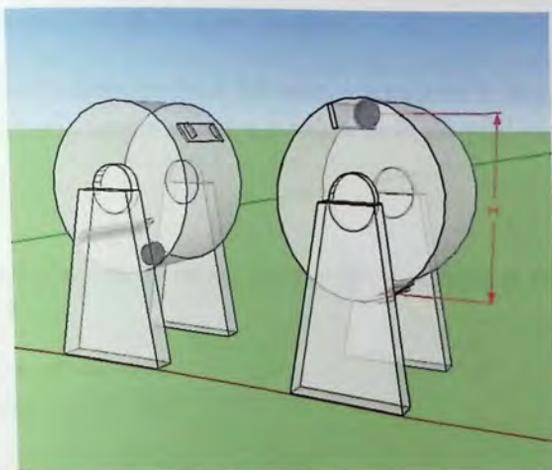


Figura 5.7: Ensayo desgaste de Cantabro.

Mediante la siguiente ecuación se puede mostrar la diferencia de energía potencial entre probetas de escoria con masa " m_1 ", y probetas tradicionales con masa " m_2 ", siendo $m_1 > m_2$.

$$Ep = mgh$$

(ec. 5.3)

$$\left. \begin{array}{l} Ep1 = m1 \cdot g \cdot h \\ Ep2 = m2 \cdot g \cdot h \end{array} \right\} m1 \neq m2 \Rightarrow Ep1 \neq Ep2$$

Para tener un valor aproximado de la diferencia de energía potencial entre ambos tipos de probetas, se reemplazan los valores en la ecuación anterior;

- Para las masas de mezcla asfáltica de escoria de cobre M1, y masas de mezcla asfáltica de árido tradicional M2, se tienen valores cercanos a los siguientes:

- M1 = 1.650 (gr)
- M2 = 1.150 (gr)

- La altura H de caída de las probetas y la aceleración de gravedad G, son constantes en este ensayo, y tienen los siguientes valores:

- H = 710 (mm); correspondiente al diámetro de la máquina de desgaste los Ángeles.
- G = 9,81 (m/s²); correspondiente a la aceleración de gravedad en la superficie de la tierra.

- Luego reemplazando los valores para cada tipo de probetas se tienen los siguientes resultados:

- Ep1 = 11,5 (J)
- Ep2 = 8 (J)

La diferencia aproximada de energía potencial que existe en el ensayo de desgaste entre las probetas de escoria de cobre EC, y las probetas de árido tradicional AT, es de 3,5 (J), lo que indica que las probetas EC tendrán un desgaste asociado a este aumento de energía potencial durante el ensayo.

Para buscar un valor representativo del desgaste superficial que tendría una mezcla realizada con escoria de cobre, y este valor se pueda comparar con el desgaste superficial

que se produciría bajo las mismas condiciones en una mezcla con árido tradicional, se realizó el siguiente experimento:

Hipótesis:

Debido a la mayor masa que presentan las probetas confeccionadas con escoria de cobre respecto a las probetas tradicionales, se infiere que las probetas de escoria de cobre presentan un desgaste superficial adicional (no representativo), que está asociado a una mayor energía potencial a la que estará expuesta la probeta durante la ejecución del ensaye; por esto se buscará experimentalmente encontrar un factor de reducción que se aplicará a los resultados de desgaste de las probetas de escoria.

Desarrollo del experimento:

Para poder comparar los desgastes de ambos tipos de mezcla, se optó por modificar 4 probetas tradicionales, incorporando dispositivos de plomo en su interior; estos dispositivos se colocaron en el proceso de confección de las probetas, ubicándolos de manera centrada para no alterar la posición del centro de masa, ni inducir la falla de la probeta durante el ensayo, producto de un excesivo estrechamiento de alguna de sus paredes. Una vez compactada la mezcla, la masa de las probetas tradicionales, con dispositivo de plomo en el interior, pesan alrededor de 1.650 gramos, lo que se asemeja a la masa de las probetas compuestas con escoria.

Para confeccionar las probetas de mezcla con árido tradicional con plomo en el interior, se siguió el siguiente procedimiento:

-Se confeccionan 4 dispositivos de plomo de diámetro 50 mm y altura 30 mm (ver figura 5.11), calculados de tal manera, que la densidad del plomo (11.340 kg/m^3), y el volumen que el dispositivo ocupara dentro de la probeta ($58,9 \text{ cm}^3$), sumen en total entre dispositivo y la mezcla asfáltica alrededor de 1650 gramos.

1) Confección de los dispositivos de plomo

- Ecuación para calcular las dimensiones de los dispositivos de plomo:

$$(VAT - Vdp) \times \rho_{AT} + Vdp \times \rho_{dp} = VEC \times \rho_{EC}$$

(ec. 5.4)

Donde:

- VAT: Volumen probeta de árido Tradicional.
- VEC: Volumen probeta de escoria de cobre.
- V_{dp}: Volumen dispositivo de plomo.
- ρ_{AT}: Densidad de mezcla con árido del río Aconcagua y 5,5% de asfalto, 2,36(gr/cm³)
- ρ_{EC}: Densidad de mezcla con escoria de cobre y 3,2% de asfalto, 3,31(gr/cm³)
- ρ_{dp}: Densidad del plomo, 11,34 (gr/cm³)

Reemplazando los valores de las densidades en la ecuación:

$$(\pi \cdot R^2 \cdot H - \pi \cdot r^2 \cdot h) \cdot 2,36 + \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot 11,34 = \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot 3,31$$

$$\pi \cdot (R^2 \cdot H - r^2 \cdot h) \cdot 2,36 + \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot 11,34 = \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot 3,31$$

Luego reemplazando; H = 6,2cm y R = 5,08cm, que corresponden a la geometría de las probetas Marshall:

$$(5,08^2 \cdot 6,2 - r^2 \cdot h) \cdot 2,36 + r^2 \cdot h \cdot 11,34 = 5,08^2 \cdot 6,2 \cdot 3,31$$

$$(160 - r^2 \cdot h) \cdot 2,36 + r^2 \cdot h \cdot 11,34 = 530$$

$$378 - 2,36 \cdot r^2 \cdot h + 11,34 \cdot r^2 \cdot h = 530$$

$$8,98 \cdot r^2 \cdot h = 152$$

$$r^2 \cdot h = 152/8,98$$

$$r^2 \cdot h = 16,9$$

$$r = \sqrt{\frac{16,9}{h}}$$

Luego se itera dando valores a la altura "h" para encontrar un valor de radio "r", que entregue dimensiones al dispositivo de plomo de tal manera que no generen estrechamientos considerables en las dimensiones internas de la probeta asfáltica.

Tabla 5.9: Iteración para encontrar las dimensiones del dispositivo de plomo.

Valores para "h" (cm)	Valor de "r" (cm)	Valor de "d" (cm)	Volumen (cm ³)	Masa (gr)
1	4	8	50	570
1,5	3,5	7	58	655
2	3	6	57	641
2,5	2,5	5	49	557
3	2,5	5	59	668
3,5	2	4	44	499
4	2	4	50	570
4,5	2	4	57	641
5	2	4	63	713

De la iteración anterior, para el dimensionamiento del dispositivo de plomo se eligieron los valores de 3 centímetros de altura y 5 centímetros de diámetro (ver figura 5.8), ya que estas dimensiones permiten un espesor suficiente de las paredes internas de las probetas, para resistir el rompimiento de estas.



Figura 5.8: Dispositivos de plomo.

2) Confección de probetas con dispositivo de plomo

Para confeccionar las probetas se realiza el método de diseño Marshall, utilizando los óptimos de asfalto correspondientes a cada tipo de mezcla.

Para incorporar los dispositivos de plomo dentro de las probetas, se realiza lo siguiente:

Luego de efectuada la mezcla de árido con asfalto, se extrae una cantidad de masa de mezcla asfáltica suelta de 139 gramos, que corresponden al volumen que ocupará el dispositivo de plomo (59 cm³) dentro de la probeta, (la masa de mezcla extraída se calcula

mediante la densidad de mezcla asfáltica compactada determinada anteriormente en el diseño Marshall); luego de tener la cantidad necesaria de mezcla asfáltica para la confección de las probetas, se vierte de forma distribuida en el molde de las probetas, el equivalente al 26% de la mezcla que quedó en el bol de mezclado, encima se coloca el disco de plomo lo más centrado posible, luego se coloca el resto de la mezcla (ver figuras 5.9 y 5.10). Finalmente se prosigue a la compactación de 75 golpes por cara de la probeta, y se deja enfriar a temperatura ambiente.



Figura 5.9: Confección de probeta con dispositivo de plomo

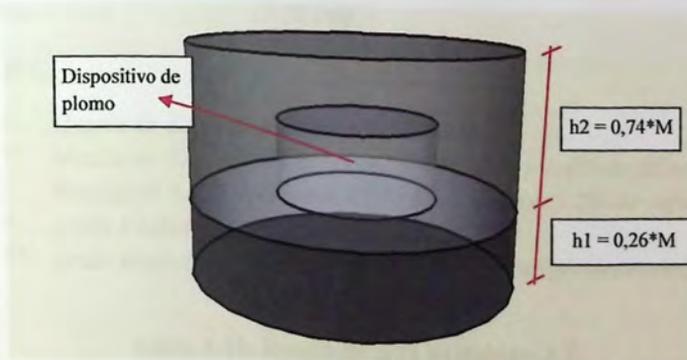


Figura 5.10: Mezcla asfáltica con dispositivo de plomo, M es la masa total de la mezcla asfáltica

5.4.1.3 Ejecución del ensaye y obtención del factor de reducción.

Antes de ensayar las probetas se mantienen a una temperatura de 20°C +/- 3°C, por un tiempo de dos horas; luego se mide la masa de las probetas de árido tradicional del río Aconcagua, 4 probetas convencionales (AT) y 4 probetas con dispositivo de plomo en el interior (AT*).

Una vez ensayadas ambas mezclas de árido del río Aconcagua (con y sin dispositivo de plomo), se calcula el porcentaje de masa de pérdida para ambos tipos de probeta mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Desgaste} = (M_i - M_f)/(M_i) \times 100 \quad (\text{ec. 5.5})$$

5.4.1.4 Resultados

Datos de las probetas Marshall:

- T° Mezclado (°C) : 154°C +/- 3°C
- T° Compactación (°C) : 146°C +/- 3°C
- T° Ensayo : 20°C +/- 3°C
- N° Golpes por cara : 75
- Diámetro cte. : 10,16 (cm)

Nomenclatura:

- EC: Mezcla de Escoria de Cobre con 3,2% de asfalto.
- EC*: Mezcla de Escoria de Cobre con 3,2% de asfalto y 1,4% de filler.
- AT: Mezcla de Árido tradicional del río Aconcagua con 5,2% de asfalto.
- AT*: Árido tradicional con dispositivo de plomo.
- AT**: Árido tradicional influenciado por aumento de energía potencial.

Tabla 5.10: Resultados para las probetas AT.

Probeta N°	H. Promedio (cm)	V. Geométrico (cm³)	M. inicial (gr)	M. final (gr)	Desgaste (%)
1	6,2	501,7	1.153,6	1.049,6	9,0
2	6,2	499,4	1.153,5	1.064,2	7,7
3	6,2	501,4	1.153,7	1.050,3	9,0
4	6,0	486,4	1.152,4	1.078,3	6,4

Promedio de desgaste: 8,04%

Tabla 5.11: Resultados para las probetas AT*.

Probeta N°	M. dispositivo (gr)	H. Promedio (cm)	V. Geométrico (cm³)	M. inicial (gr)	P. final (gr)	Desgaste (%)
1	625	5,9	479,0	1.608,0	1.280,0	20,4
2	638	6,2	501,1	1.627,0	1.322,1	18,7
3	667	6,4	517,7	1.632,0	1.354,9	17,0
4	670	6,3	507,0	1.653,0	1.409,4	14,7

Promedio de desgaste: 17,71%

Se puede observar el aumento del desgaste superficial en la mezcla tradicional debido a la incorporación del dispositivo de plomo, sin embargo, al medir la masa de las probetas de árido tradicional con el dispositivo de plomo en su interior, se están considerando dos densidades distintas, la de la mezcla asfáltica, y la del dispositivo que permanece inalterable dentro de la probeta. Por lo que la medición de masas se ve alterada por la presencia de un material ajeno a la mezcla asfáltica.

Para determinar el desgaste "real" que sufre una mezcla asfáltica, producto de un aumento en la energía potencial en el ensayo de desgaste, se utiliza una ecuación, que extrae virtualmente el dispositivo de plomo que hay en el interior de la mezcla, y lo reemplaza por otro, esta vez con las características propias de la mezcla asfáltica.

El porcentaje real de pérdida de masa generado por el aumento de energía potencial durante el ensayo de las probetas AT*, se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

$$Mi^* = Mi - Mdp + \left[\left(\frac{Mdp}{\rho_p} \right) \times \frac{(Mi - Mdp)}{Vt - \frac{Mdp}{\rho_p}} \right] \quad (\text{ec. 5.6})$$

$$Mf^* = Mf - Mdp + \left[\left(\frac{Mdp}{\rho_p} \right) \times \frac{(Mi - Mdp)}{Vt - \frac{Mdp}{\rho_p}} \right] \quad (\text{ec. 5.7})$$

Donde:

- Mi^* : Masa inicial, sin considerar el dispositivo de plomo en el interior de la probeta.
- Mf^* : Masa final, (después del ensayo), sin considerar el dispositivo de plomo en el interior de la probeta.
- Mi : Masa inicial de la probeta incluyendo el dispositivo de plomo en el interior.
- Mf : Masa final de la probeta incluyendo el dispositivo de plomo en el interior.

- Mdp : Masa del dispositivo de plomo.
- Vt : Volumen total de la probeta.
- ρd : densidad del plomo (11.340 kg/m^3)

La fórmula que permite calcular la masa real de las probetas considerando sólo el aumento de energía potencial durante el ensaye de Cantabro es la siguiente:

$$\text{Desgaste (\%)} = (M_i^* - M_f^*) / (M_i^*) \times 100 \quad (\text{ec. 5.8})$$

Luego los resultados de desgaste **real** de las probetas tradicionales aumentando la energía potencial durante el ensaye son:

Tabla 5.12: Resultados probetas AT.**

M. inicial* (gr)	M. final* (gr)	Desgaste (%)
1110,82	740,17	33,37
1114,08	770,62	30,83
1088,70	776,08	28,72
1112,68	750,10	32,59

Promedio de desgaste: 31,37%

Ahora con el resultado anterior se puede observar la diferencia de desgaste para un mismo tipo de mezcla de árido tradicional, aumentando la energía potencial en aproximadamente 3,5 (J) durante el ensayo.

Desgaste en condiciones normales = **8,04%**

Desgaste con aumento de energía potencial = **31,37%**

Antes de calcular el desgaste superficial de las probetas de mezcla de escoria de cobre EC, y mezcla de escoria de cobre con 1,4% de filler EC*, se calculará el factor de reducción de energía potencial, asociado a la mayor masa de estas probetas en relación a las tradicionales.

El factor de reducción "FR" se calcula de la siguiente manera:

$$FR = \frac{\text{Promedio de desgaste AT}}{\text{Promedio de desgaste AT*}} \quad (\text{ec. 5.9})$$

Reemplazando;

$$FR = \frac{8,04}{31,37}$$

$$FR = 0,2562$$

Resultados de desgaste para las probetas de mezcla de escoria de cobre EC, y mezcla de escoria de cobre con 1,4% de filler EC*:

Tabla 5.13: Resultados para las probetas EC.

Probeta N°	H. Promedio (cm)	V. Geométrico (cm³)	M. inicial (gr)	M. final (gr)	Desgaste (%)	Desgaste*FR (%)
1	6,26	507,1	1641,6	1254,7	23,6	6,0
2	6,24	505,8	1644,4	1138,1	30,8	7,9
3	6,32	512,6	1639,6	1284,0	21,7	5,6
4	6,23	505,0	1648,9	1324,9	19,6	5,0

Promedio de Desgaste (%): 23,92

6,13

Tabla 5.14: Resultados para las probetas EC*.

Probeta N°	H. Promedio (cm)	V. Geométrico (cm³)	M. inicial (gr)	M. final (gr)	Desgaste (%)	Desgaste*FR (%)
1	6,2	499,0	1644,7	1400,5	14,8	3,8
2	6,2	499,2	1653,9	1434,0	13,3	3,4
3	6,1	494,5	1650,3	1457,9	11,7	3,0
4	5,9	481,8	1607,7	1444,4	10,2	2,6

Se puede observar en los resultados de mezclas de escoria de cobre, que la mezcla con filler tiene una mayor resistencia al desgaste; ahora se comparan todos los resultados obtenidos en este ensaye:



Figura 5.11: Probetas después del ensaye de Cantabro.

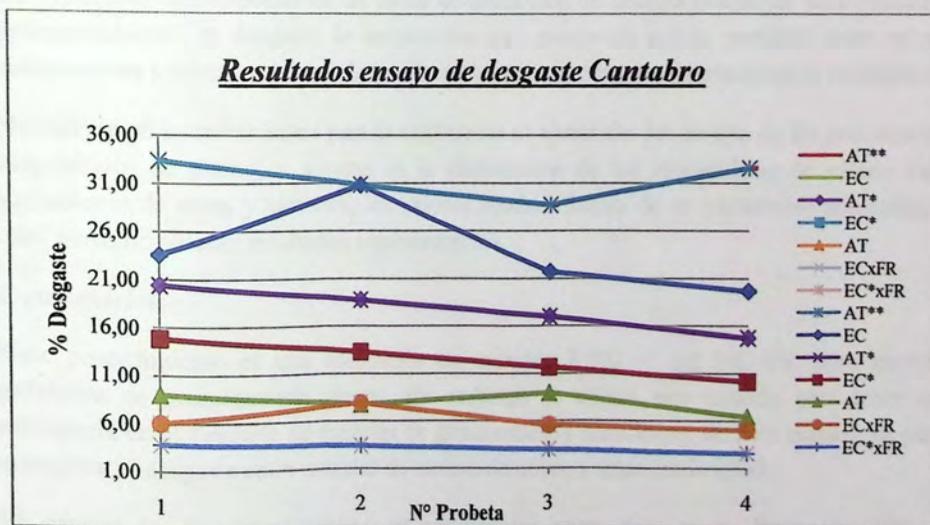


Figura 5.12: Gráfico experimental de desgaste superficial para distintos tipos de mezcla.

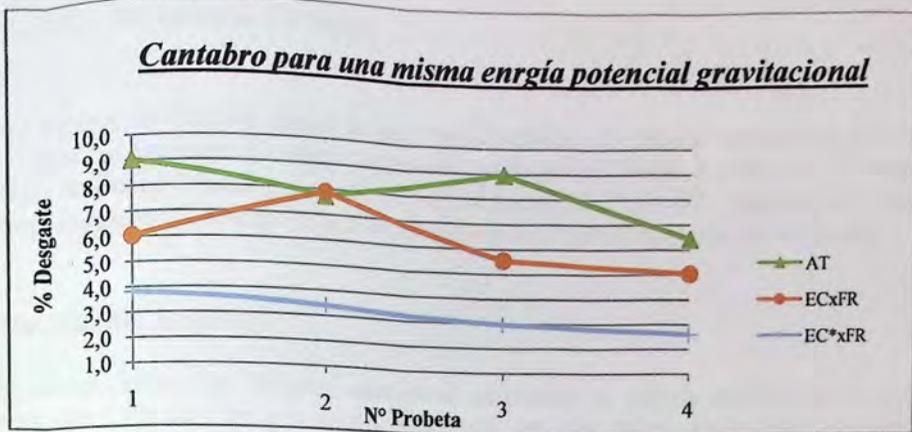


Figura 5.13: Gráfico de desgaste superficial para una misma energía potencial durante el ensayo Cantabro.

Observaciones:

Para las mezclas de escoria de cobre, la mezcla con escoria y 1,4% de filler presentó una mayor resistencia al desgaste, lo que indica que la incorporación de filler en la mezcla mejora la unión entre partículas y mantiene la mezcla mejor confinada.

La obtención experimental de un factor de reducción de energía potencial para evaluar el comportamiento en desgaste de las mezclas con escoria de cobre, permitió tener valores comparables y cercanos a los valores obtenidos para el desgaste de una mezcla tradicional.

No existieron inconvenientes para la confección ni ejecución del ensayo de las probetas con dispositivos de plomo; y aunque en la elaboración de los dispositivos de plomo hubo variaciones de masa y tamaños, los valores estaban dentro de un parámetro aceptable, lo cual permitió obtener resultados representativos.

Comentarios:

Este procedimiento es una adaptación del método 8.302.54 del MC-V8, para mezclas asfálticas de granulometría abierta, sin embargo se utilizó este método para tener una referencia en el desgaste de mezclas de granulometría semidensa; de esta manera se pudo comparar el desgaste entre mezclas de escoria de cobre y árido tradicional.

El ensayo de desgaste Cantabro, en condiciones secas tiene como límite un 20% de desgaste según el requisito para diseño de mezclas asfálticas abiertas drenantes, según la tabla 5.414.204.A del MC-V5. Como era de esperar los resultados en el desgaste de las mezclas analizadas fue bajo, debido a que corresponden a mezclas asfálticas semidensas.

5.4.2 Resistencia a la fatiga

Para simular la vida a la fatiga de una mezcla asfáltica en caliente compuesta con escoria de cobre, se evaluará su comportamiento a las cargas reiteradas por medio del ensayo de "Viga de Cuatro Puntos", según la normativa AASHTO T 321-07. Además se evaluará el comportamiento a la fatiga de la mezcla asfáltica tradicional, en modo de referencia.

Procedimiento de ensayo:

-Se confeccionan dos probetas prismáticas, utilizando la mezcla asfáltica de escoria de cobre con 1,4% de filler, y la mezcla tradicional con árido del río Aconcagua, estas probetas se compactan mediante el compactador de amasado al grado de compactación, que permite alcanzar la densidad calculada en el diseño Marshall para cada mezcla.

-Los moldes prismáticos son colocados dentro de un horno a 85°C, durante 5 días, de esta manera se simula el envejecimiento a largo plazo de la mezcla asfáltica según el método de diseño AASHTO, año 1993.

-De cada molde prismático se extraen por medio de corte 2 vigas de dimensiones; 6,3 cm de ancho, 5 cm de altura, y 38 cm de largo.

-Antes de ensayar cada viga, estas deben permanecer a una temperatura de 20°C por un periodo de 2 horas.

Ejecución del ensayo:

-Las 2 probetas correspondientes a cada mezcla se ensayan a deformaciones de 500 y 300 micro strain respectivamente.

-En cada ensayo la deformación del espécimen es constante, y la fuerza variable. El ensayo se detiene cuando la viga disminuye en un 50% su módulo de rigidez inicial.

Tabla 5.15: Resultados de ensayo de fatiga.

Material	M. escoria de cobre		M. árido tradicional	
	V1	V2	V1	V2
Probetas	10	10	10	10
Frecuencia (Hz)	500	300	500	300
Micro strain ($\mu\epsilon$)	7.117	7.747	6.362	8.121
Rigidez inicial (Mpa)	3.559	3.874	3.448	4.325
50% de rigidez	1.700	9.408	2.213	15.166
Ciclos				



Figura 5.14: Ejecución del ensayo de fatiga.

- Resultados para deformación constante de 500 micro strain:

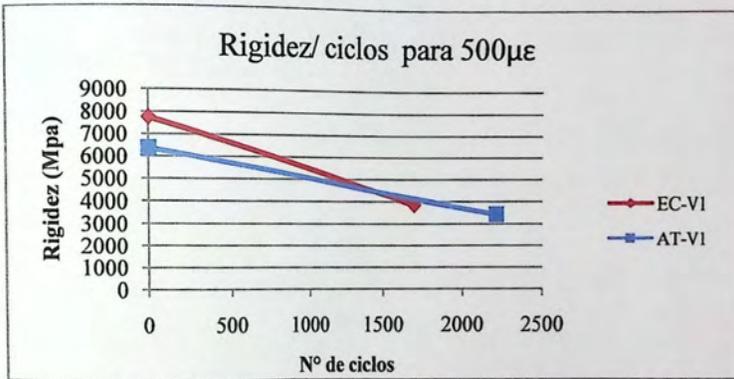


Figura 5.15: Gráfico de Fatiga a un 50% de rigidez, deformación cte. (500µε).

- Resultados para deformación constante de 300 micro strain:

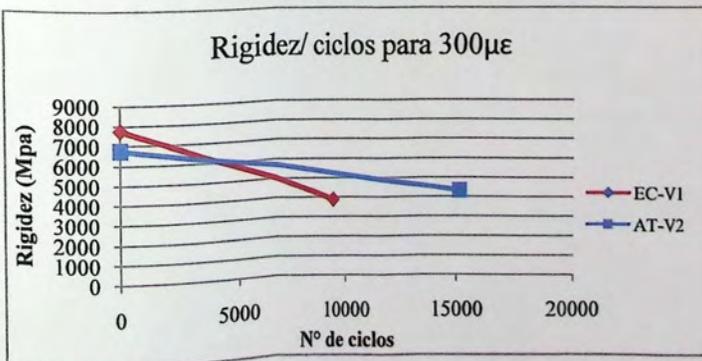


Figura 5.16: Gráfico de Fatiga a un 50% de rigidez, deformación cte. (300µε).

Observaciones:

La mezcla de escoria de cobre presentó nuevamente una mayor rigidez inicial en comparación a la mezcla de árido tradicional; además la mezcla de escoria presentó una menor resistencia a la fatiga, lo que indica que la mezcla podría ser más susceptible a la falla de agrietamiento por cargas reiteradas.

El análisis a fatiga para ambos tipo de mezcla se realizó a deformación constante y fuerza variable. Considerando la mayor rigidez de la mezcla de escoria, y su mayor densidad, se puede inferir que la menor vida a la fatiga que presentó la mezcla de escoria se debe a una mayor disipación de energía de las muestras durante el ensayo producto de la mayor rigidez.

Si bien la mezcla de escoria presentó una menor vida a la fatiga, en comparación a la mezcla tradicional, los resultados están dentro de un rango aceptable.

5.4.3 Resistencia al ahuellamiento

Para simular el comportamiento o resistencia al ahuellamiento de la mezcla asfáltica en estudio, se someterá la mezcla al ensayo de rueda cargada de Hamburgo (HWTD), según la normativa española UNE-EN 12697-22:2008+Al; donde además se compararán los resultados obtenidos en el mismo ensayo, para la mezcla asfáltica tradicional con árido del río Aconcagua.

Para realizar el ensayo de rueda de Hamburgo, y predecir la deformación permanente por ahuellamiento de las mezclas asfálticas a estudiar, se realizará el siguiente procedimiento:

1) Confección de probetas SUPERPAVE:

-Para la confección de las probetas SUPERPAVE, se utilizan los porcentajes óptimos de asfalto obtenidos anteriormente en el diseño Marshall para cada tipo de mezcla se confeccionan 4 probetas SUPERPAVE; 2 de escoria de cobre con 1,4% de filler, y 2 con árido del río Aconcagua.

-La compactación de las probetas se realiza mediante el compactador giratorio, con un número de 75 giros correspondientes a un diseño estructural de hasta 3 millones de ejes equivalentes.



Figura 5.17: probetas SUPERPAVE para ensayo de ahuellamiento.

Tabla 5.16: Probetas SUPERPAVE de escoria de cobre.

Espécimen	1	2
Masa (gr)	6.669,6	6.681,7
Densidad (kg/m ³)	3.410	3.406
Altura (mm)	113,9	113,8

Tabla 5.17: Probetas SUPERPAVE de árido del río Aconcagua.

Espécimen	1	2
Masa (gr)	4.703,9	4.698,7
Densidad (kg/m ³)	2.322	2.329
Altura (mm)	119,1	117,6

2) Envejecimiento de las probetas SUPERPAVE:

Las probetas deben mantenerse en el horno a 135°C por 4 horas, de esta manera se consigue el envejecimiento del asfalto en la mezcla según el método de diseño AASHTO, año 1993.

3) Corte de las probetas SUPERPAVE:

-Las probetas SUPERPAVE deben ser cortadas cuidadosamente; en primer lugar se cortan a la mitad de manera de formar dos probetas con la mitad de la altura de la probeta inicial; luego se cortan los extremos de ambas a una distancia de 1,5 centímetros del borde, de esta manera se pueden unir ambas partes de la probeta en forma de ocho, lo que permite posicionar el espécimen formado en el molde del ensayo.

4) Ejecución del ensaye:

El ensaye de ahuellamiento se realiza de manera simultánea para dos moldes correspondientes a la misma mezcla, de esta manera el resultado de ahuellamiento será la media aritmética entre los dos resultados.

Antes de ensayar los especímenes a ensayar, se colocan en los moldes de la máquina de Hamburgo, sumergidos en agua a 50°C por 2 horas.

Se coloca sobre ambas ruedas de Hamburgo una carga de 30 kg, luego se comienza el ensaye programando el equipo para un número de 20.000 pasadas. La temperatura del agua donde están sumergidas las probetas debe ser 50°C +/- 3°C durante todo el ensayo, que dura aproximadamente 6 horas.

El equipo de medición de ahuellamiento (rueda de Hamburgo), registra el perfil de deformaciones y profundidad de la huella en el centro del espécimen por cada pasada de la rueda de carga, además se registran las temperaturas a lo largo de todo el ensaye.



Figura 5.18: Probetas de escoria de cobre antes y después del ensayo de Ahuellamiento

Resultados:

Mezcla asfáltica compuesta con escoria de cobre:

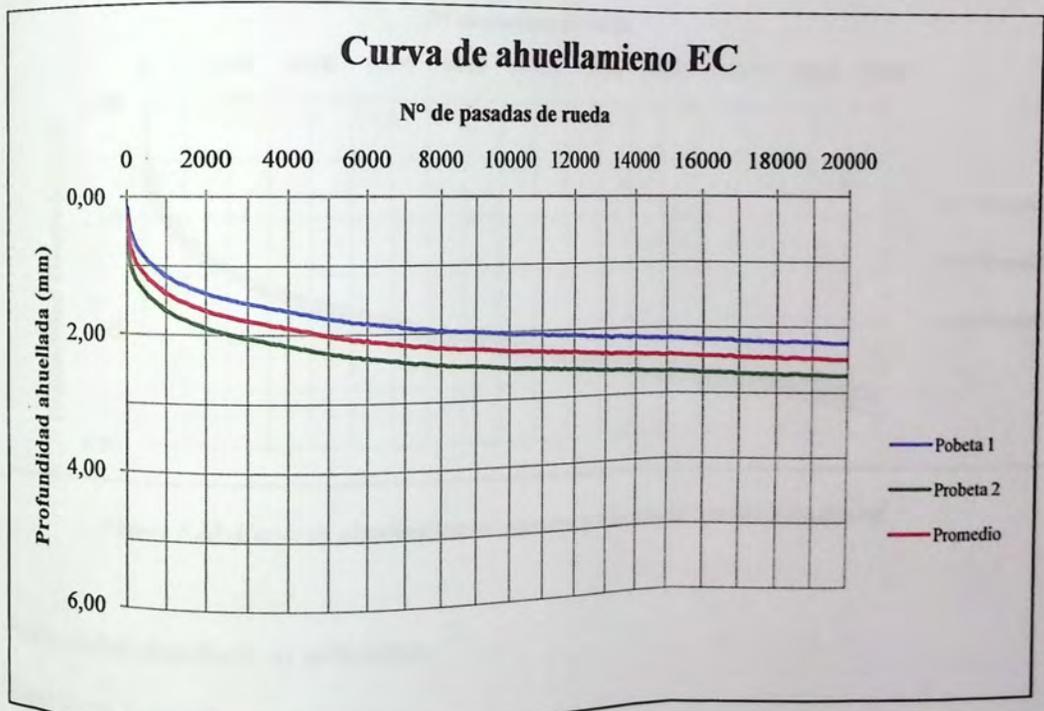


Figura 5.19: Curva de Ahuellamiento en especímenes de mezcla con escoria de cobre.

Profundidad ahuellada en milímetros:

Espécimen 1 = 2,25 mm

Espécimen 2 = 2,75 mm

Valor medio de ahuellamiento de la mezcla = 2,5 mm

Mezcla asfáltica tradicional compuesta con árido del río Aconcagua:

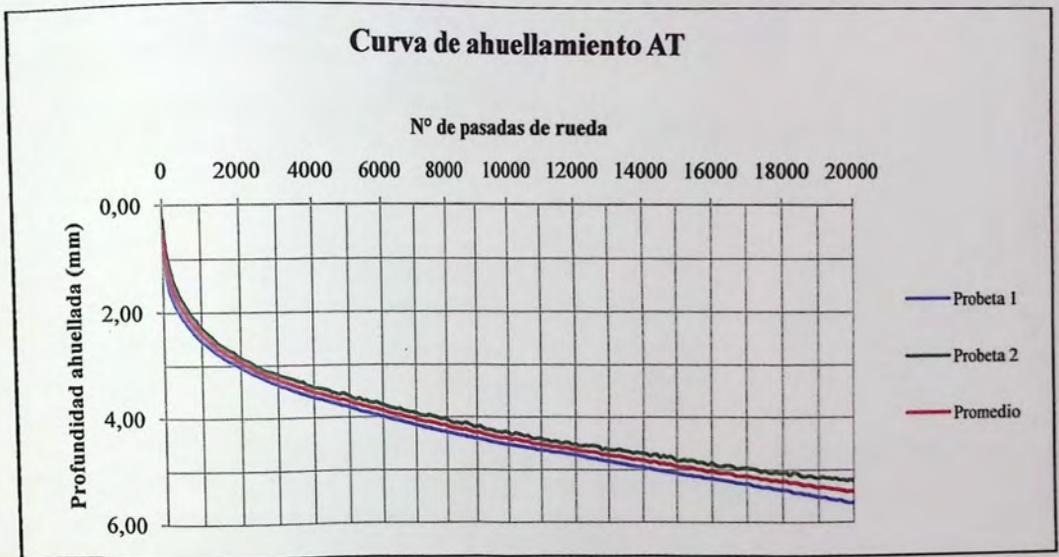


Figura 5.20: Curva de Ahuellamiento en especímenes de mezcla con árido tradicional.

Profundidad ahuellada en milímetros:

Espécimen 1 = 5,63 mm

Espécimen 2 = 5,21 mm

Valor medio de ahuellamiento de la mezcla = 5,42 mm

Observaciones:

Los resultados obtenidos en el ensayo de ahuellamiento tienen congruencia con los resultados de estabilidad y fluidez calculados en el diseño Marshall, ya que la mezcla con escoria de cobre presentó una mayor estabilidad, y una menor fluidez, lo que se ve reflejado en su gran capacidad de resistencia al ahuellamiento.

Los resultados de resistencia al ahuellamiento obtenidos en la mezcla de escoria de cobre son comparables al de una mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros, como la utilizada en la carpeta de rodadura del aeropuerto A. Merino Benítez, que obtuvo en el ensayo de rueda de Hamburgo una profundidad de huella de 3,27 mm; (dato entregado por el Laboratorio Nacional de Vialidad).

6 Capítulo VI: Evaluación del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas asfálticas en caliente

Según los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se evalúa la factibilidad de utilizar la escoria de cobre como agregado pétreo en mezclas asfálticas en caliente.

Para la evaluación del comportamiento mecánico se analizarán los resultados obtenidos en el capítulo anterior de manera de estimar cual es la condición más favorable en la cual se podría utilizar esta solución de pavimento. La evaluación de la mezcla estudiada se realiza dando énfasis al deterioro de la mezcla a largo plazo, ya que este es un indicador imprescindible para estimar la vida útil de un pavimento compuesto con este material.

En el caso de considerar que la mezcla asfáltica sea deficiente en una o más características mecánicas, se recomienda usar este tipo de solución para capas estructurales intermedias, o caminos colectores que presentan diseños con menor demanda estructural.

Para llevar a cabo esta evaluación del comportamiento mecánico de la mezcla se sigue el siguiente procedimiento:

- 1) Comparación de propiedades mecánicas entre M. EC y M. AT.
- 2) Mecanismo de falla que controla el deterioro de la mezcla estudiada.
- 3) Observaciones.

Con el procedimiento a desarrollar se puede destacar las ventajas y desventajas de la utilización de la mezcla asfáltica utilizando escoria de cobre como agregado pétreo, además se puede visualizar de mejor manera el análisis realizado en el capítulo anterior.

La evaluación de la factibilidad mecánica de la mezcla con escoria y su futura utilización en pavimentos, parte de la base de que este es un subproducto de desecho minero que no genera daños a la salud de las personas ni al medio ambiente, como ya se mencionó en el marco teórico de este trabajo.

La mezcla asfáltica de escoria a evaluar, es la que contienen un 1,4% de filler, ya que ésta presentó mejores propiedades mecánicas en el desarrollo de los ensayos.

6.1 Comparación de propiedades mecánicas

Tabla 6.1: Propiedades mecánicas a corto plazo.

Propiedad mecánica	M. EC	M. AT	Ensayo	Exigencia	Ventaja	Desventaja
Estabilidad (N)	17.300	13.320	Diseño Marshall (8.302.40 MC-V8)	Mín 9.000	Mayor capacidad resistente	
Fluidez (0,025mm)	14,5	15,4	Diseño Marshall (8.302.40 MC-V8)	Mín. 8 - Máx. 16	---	Menor tolerancia a la deformación
Densidad (kg/m ³)	3.406	2.393	Diseño Marshall (8.302.40 MC-V8)	Entre 2.000 y 3.000 (kg/m ³)	---	Menor trabajabilidad de la mezcla
Resistencia a tracción (N)	11.669	9.907	Tracción indirecta (NLT-346/90)	---	Mayor capacidad de carga sin producir la fractura	---
Temperatura máxima bajo radiación solar °C	49,9	50,3	Temperaturas diarias	---	Menor probabilidad de llegar al punto de ablandamiento del asfalto	---
Resistencia al deslizamiento (RD)	0,74	0,70	Péndulo Británico (8.502.16 MC-V8)	---	Condiciones de tráfico más seguras	---

Tabla 6.2: Propiedades Mecánicas a largo plazo.

Propiedad mecánica	M. EC	M. AT	Ensayo	Ventaja	Desventaja
Desgaste Superficial (%)	3,2	8,04	Cantabro (8.302.54 MC-V8)	Menor disgregación de agregado mineral en la mezcla	---
Ahuellamiento (mm)	2,5	5,42	UNE-EN 12697-22:2008+A1	Mayor resistencia a deformaciones permanentes y desplazamientos de la mezcla producto de las cargas reiteradas	---
Resistencia a la fatiga (Deformación-ciclos)	(500-1.700) (300-9.408)	(500-2.213) (300-15.166)	AASHTO T 321-07	---	Mayor probabilidad de sufrir agrietamiento producto de cargas reiteradas

6.2 Comparación de los mecanismos de falla a largo plazo

6.2.1 Resistencia al desgaste

	M. EC	M. AT
Desgaste (%)	3,2	8,04

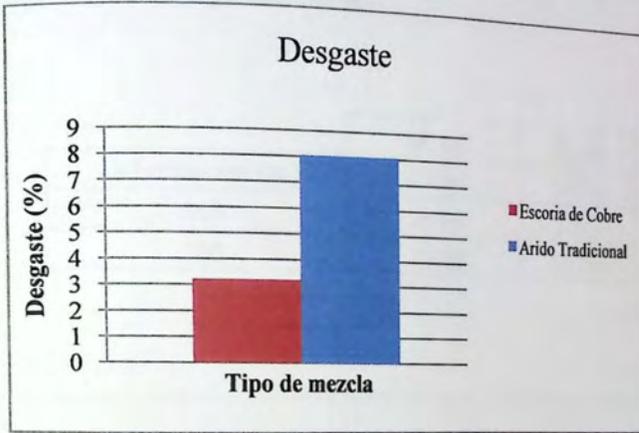


Figura 6.1: Comparación de desgaste en mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas compuestas con escoria de cobre como agregado pétreo tuvieron un mejor comportamiento en el ensayo de desgaste, lo que indicaría que la mezcla posee una mejor adherencia entre partículas y ligante asfáltico en relación a la mezcla tradicional analizada.

La resistencia al desgaste que presentó la mezcla de escoria, indica que esta mezcla tendrá una resistencia superior a la mezcla tradicional, lo que favorecería la continuidad de una carpeta de rodadura.

6.2.2 Resistencia a la fatiga

En el ensayo de fatiga donde la deformación controlada se aplica hasta disminuir en un 50% el modulo de rigidez inicial de cada mezcla asfáltica, para lograr la fatiga de las mezclas es necesario aplicar fuerzas variables oscilatorias que deforman las vigas en su parte central.

Para comparar ambos tipos de mezcla se analizan los gráficos de fatiga y se determinan las tendencias de cada recta de a siguiente manera:

	M. EC	M. AT
Deformación ($\mu\epsilon$)	Ciclos	Ciclos
500	1.700	2.213
300	9.408	15.166

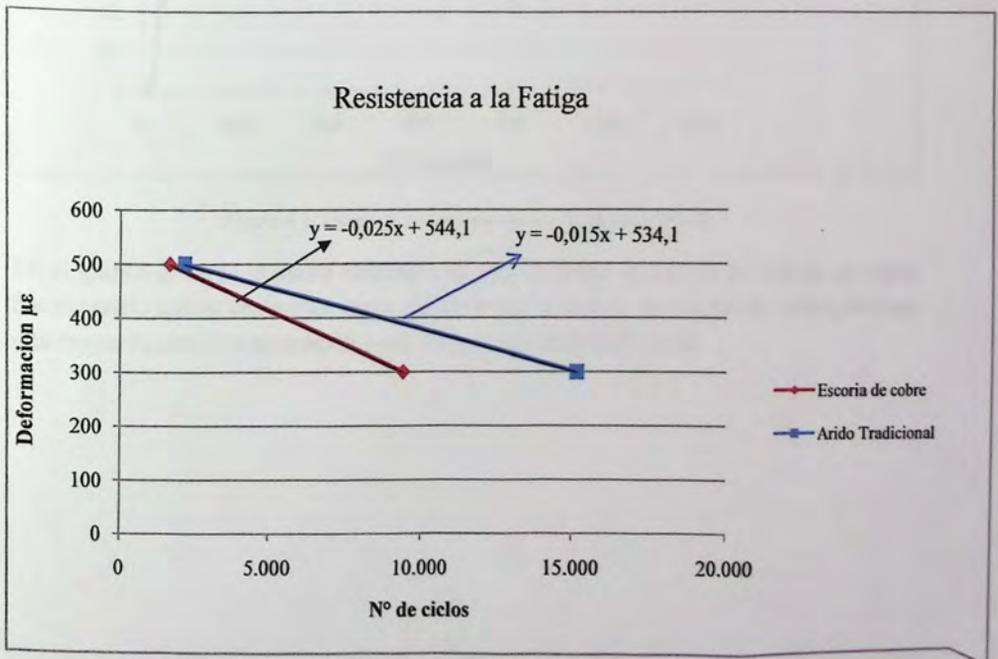


Figura 6.2: Resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas.

Para estudiar más a fondo el porqué la resistencia a la fatiga es menor en la mezcla con escoria de cobre, se analizan los ciclos de carga y disipación de energía para ambos tipos de mezcla, con escoria de cobre y árido tradicional, de esta manera observar cómo se comporta cada mezcla durante el ensayo de fatiga considerando que son mezclas con módulos de rigidez distintos.

Evaluación de los ciclos de carga durante el ensayo de fatiga a deformación de $500 \mu\epsilon$:

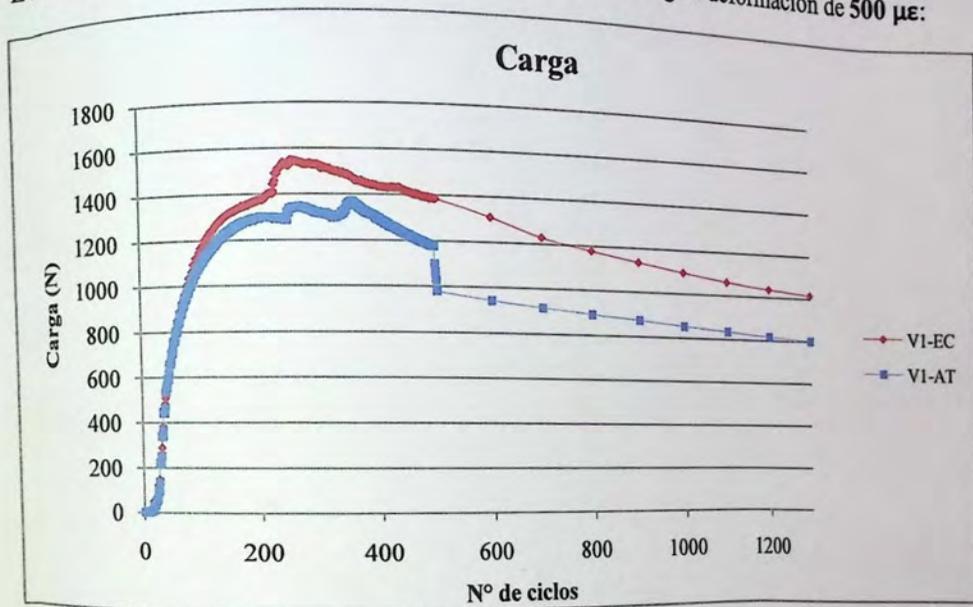


Figura 6.3: Ciclos de carga para ensayo de fatiga a $500 \mu\epsilon$.

En el gráfico de carga se puede observar que para deformar la mezcla de escoria de cobre fue necesario aplicar una mayor carga debido a que la mezcla de escoria de cobre presenta una mayor rigidez en comparación a una mezcla con árido tradicional.

Evaluación de disipación de energía durante el ensaye fatiga a deformación de $500 \mu\epsilon$:

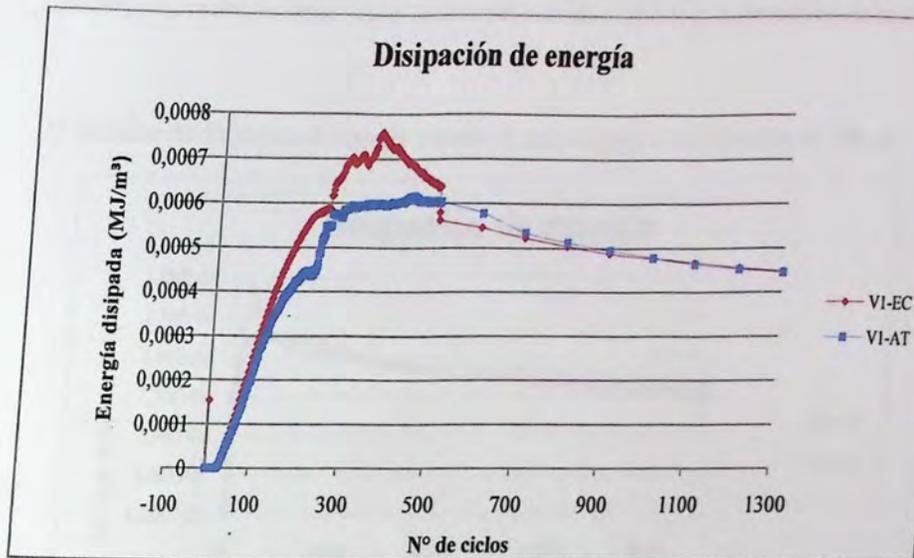


Figura 6.4: Disipación de energía durante el ensaye de fatiga a $500 \mu\epsilon$.

De los gráficos de disipación de energía se puede observar una mayor disipación de energía en la mezcla con escoria de cobre, lo que indica que presenta una mayor resistencia a las deformaciones, por ende fue necesaria aplicar una mayor energía para lograr deformar la mezcla.

Evaluación de los ciclos de carga durante el ensayo de fatiga a deformación de $300 \mu\epsilon$:

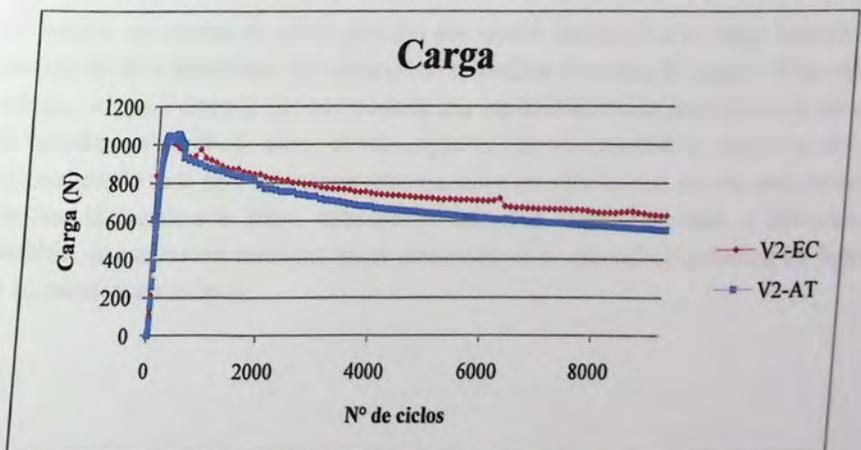


Figura 6.5: Ciclos de carga para ensayo de fatiga a $300 \mu\epsilon$.

Se puede observar que en el grafico de cargas es similar para ambos tipos de mezcla, sin embargo los ciclos de carga siguen siendo mayores para deformar la mezcla de escoria.

Evaluación de disipación de energía durante el ensaye fatiga a deformación de $300 \mu\epsilon$:

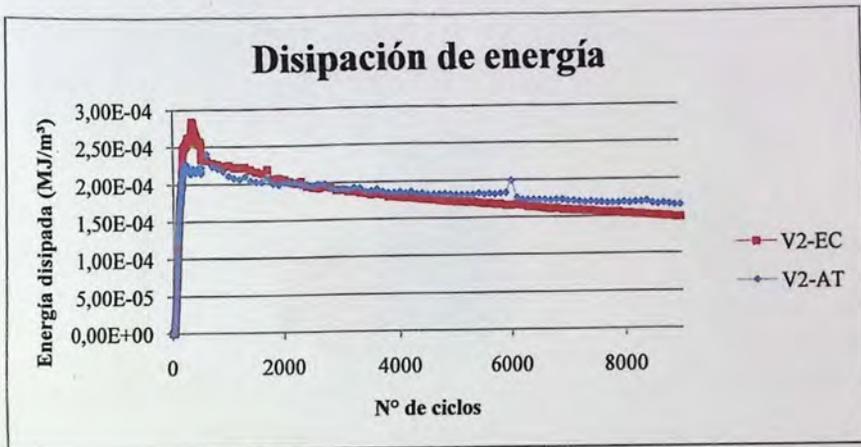


Figura 6.6: Ciclos de carga para ensayo de fatiga a $300 \mu\epsilon$.

En el grafico se puede observar una disipación de energía similar para ambos tipos de mezcla, sin embargo es levemente mayor en la mezcla con escoria de cobre.

Observación:

La mezcla con escoria de cobre presentó una menor resistencia a la fatiga respecto a la mezcla de árido tradicional, sin embargo en el análisis de curvas de carga y disipación de energía, se puede observar que es necesaria una mayor sollicitación para deformar las vigas de mezcla con escoria de cobre, debido a que ésta mezcla presenta un mayor modulo de rigidez, por lo tanto para un análisis más excautivo en mezclas con escoria será necesario estudiar la mezcla a la fatiga, aplicando el ensaye a fuerza controlada y deformación variable, de esta manera tener una mejor estimación de la vida útil de la mezcla en función de su resistencia a la fatiga.

6.2.1 Resistencia al ahuellamiento

	M. EC	M. AT
Ahuellamiento (mm)	2,5	5,42

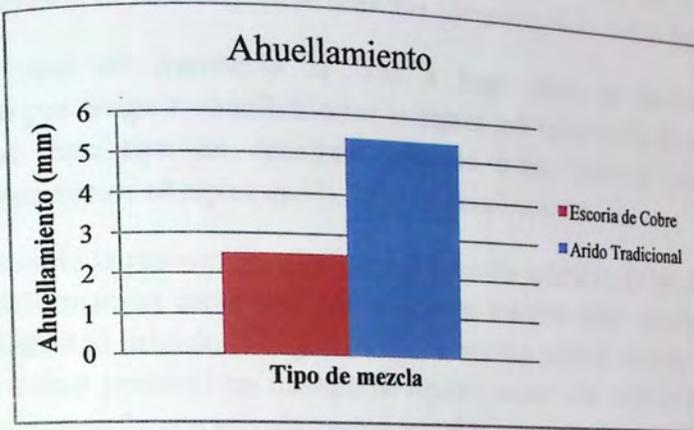


Figura 6.7: Comparación de ahuellamiento de mezclas asfálticas.

La mezcla asfáltica compuesta con escoria de cobre, presentó una notable mayor resistencia al ahuellamiento en relación a la mezcla compuesta con árido tradicional, lo que indica que la muestra con escoria de cobre tiene una mayor resistencia a la deformación permanente producto de una mayor trabazón del agregado mineral.

La resistencia al ahuellamiento de la mezcla con escoria indica que esta mezcla tiene una gran capacidad de resistir deformaciones plásticas, por lo que podría considerarse su uso en tramos de alta demanda de cargas.

6.3 Comportamiento mecánico a largo plazo de las mezclas estudiadas

Si bien la mezcla con escoria de cobre en general presentó más ventajas en su comportamiento mecánico, la vida útil respecto a la fatiga de esta mezcla, es aproximadamente un 30% menor a la de un árido tradicional, por esto la falla que controlaría el diseño de una carpeta de rodadura con esta mezcla será la falla a la fatiga.

Considerando que es inevitable la falla a largo plazo de pavimentos flexibles, principalmente por fatiga o ahuellamiento; se espera que una carpeta de rodadura falle por fatiga, ya que este tipo de deterioro conocido como "piel de cocodrilo" produce discontinuidades menos abruptas que la falla por ahuellamiento.

El ensaye que mide la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas, (Viga de cuatro puntos), se realiza a deformación constante, por lo que las mezclas están sometidas a ciclos con fuerzas de acuerdo al módulo de rigidez de la respectiva mezcla, en este trabajo la mezcla de escoria de cobre presentó un módulo de rigidez mayor a la mezcla tradicional, lo que implicaría que la mezcla con escoria estuvo sometida a mayores fuerzas solicitantes durante el ensaye, lo que llevado a términos reales, sería comparar ejes equivalentes de distinta carga, por lo que este ensaye no entrega el verdadero comportamiento a la fatiga que tendrían materiales con mayores módulos de rigidez, por lo cual se recomienda realizar el ensaye a fuerza constante y deformación variable.

7 Capítulo VII: Diseño estructural de un tramo de prueba utilizando escoria de cobre como agregado pétreo.

En este capítulo se realizará el diseño estructural de la carpeta de rodadura para un tramo de prueba de 100 metros de longitud, en la obra: “mejoramiento ruta F-50 (etapa III), sector Lo Orozco-Quilpué, provincia de Valparaíso, región de Valparaíso”. Para realizar este diseño estructural, se utilizarán los datos de CBR de la subrasante base y subbase granular, las cuales están estipuladas en las bases del respectivo contrato. Además se utilizarán los datos de ejes equivalentes, y niveles de confiabilidad indicados para el proyecto.

En el diseño de la carpeta de rodadura con mezcla asfáltica utilizando escoria de cobre como agregado pétreo, se buscará verificar que el espesor calculado de la carpeta de rodadura, sea menor o igual al espesor de la carpeta de rodadura utilizada en el proyecto, de esta manera se podrá realizar el tramo de prueba con la mezcla de escoria y así reemplazar la carpeta de rodadura entregando continuidad a la vía.

El diseño estructural de la carpeta de rodadura se realiza mediante los parámetros dispuestos en el método AASHTO del año 1.993 y MC-V3 vigente desde diciembre del 2002, el cual incorpora algunas adaptaciones a la realidad del país y algunos conceptos de los métodos mecanicistas. Además se utilizará el programa PAVIVIAL para calcular los espesores de las capas estructurales.

7.1 Diseño estructural de las capas asfálticas y granulares

En consideración a que en este trabajo se evaluó la utilización de mezcla asfáltica en caliente utilizando escoria de cobre como agregado pétreo en carpetas de rodadura, se propone remplazar la carpeta con árido tradicional del proyecto en un tramo de 100 metros, por una carpeta de mezcla asfáltica con escoria de cobre. Las demás capas estructurales serán las calculadas en el proyecto por lo tanto los valores y parámetros son obtenidos por los estudios realizados en los respectivos tramos de la obra.

En el método AASHTO los conceptos que se utilizan para el cálculo de los parámetros de diseño son las propiedades del asfalto, la drenabilidad de las capas granulares, el módulo resiliente de la subrasante, entre otros aspectos.

La ecuación de diseño propuesta por el método AASHTO 93 es la siguiente:

$$EE = (NE+25,4)^{9,36} \times 10^{-(16,40 + Z_R \times S_0)} \times M_R^{2,32} \times [(p_i - p_f) / (p_i - 1,5)]^{1/\beta} \quad (\text{ec.7.1})$$

$$\text{En que } \beta = 0,40 + [97,81 / (NE+25,4)]^{5,19} \quad (\text{ec. 7.2})$$

Donde:

- EE : ejes equivalentes de 80 KN acumulados durante la vida de diseño.
- NE : número estructural (mm).
- Z_R : coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte.
- S_0 : desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.
- M_R : módulo resiliente del suelo de la subrasante (MPa).
- p_i : índice de serviciabilidad inicial.
- p_f : índice de serviciabilidad final.

La estructura de pavimento asfáltico debe satisfacer el requerimiento de número estructural dado por la siguiente ecuación:

$$NE = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (\text{ec. 7.3})$$

Donde:

NE = Número Estructural

a_i = Coeficiente estructural

D_i = Espesor de las capas

m_i = Coeficiente de drenaje

La fracción del número estructural total que debe asignarse a las capas asfálticas depende de la temperatura media anual ponderada del aire, las solicitaciones prevista (EE), para la vida útil de diseño y el Módulo Resiliente de la subrasante.

7.2 Parámetros de diseño

Ubicación del tramo de prueba: Tramo Ruta 68 – Acceso a Colliguay, DM 295,73 a 16.639,33 entre el kilometro 5 y 6.

Los parámetros de entrada para la aplicación del método, teniendo en consideración la categoría del camino, el tránsito solicitante y la capacidad de soporte del suelo de fundación son los siguientes:

- Tránsito y Ejes Equivalentes

La solución estructural a adoptar, está asociada a la solicitud de tránsito, la cual es representada en los Ejes Equivalentes (EE) acumulados que experimentará el camino en estudio a la vida de diseño adoptada.

De acuerdo al estudio de tránsito efectuado por esta consultora, se tienen los siguientes EE acumulados a 10 y 20 años de vida de diseño:

Tabla 7.1: Ejes equivalentes para calculados para 20 años.

Tramo	Dm		Longitud (m)	EE 10 años	EE 20 años
	De	A			
Ruta 68 - Acceso a Colliguay	295,73	16.639,33	16.343,60	3.237,194	9.398,123

El proyecto considera una vida útil de la carpeta de rodadura de 20 años, según los estudios realizados.

- Nivel de Confiabilidad y Desviación estándar

El nivel de confiabilidad y la desviación estándar permiten manejar en forma conjunta la incertidumbre respecto a los parámetros de diseño.

El nivel de confiabilidad se obtiene del MC-V3 y es función de la solicitud de tránsito (EE), que experimentará el camino. Según lo indicado, se adoptaron los siguientes niveles de confiabilidad por tramo.

Tabla 7.2: Nivel de confiabilidad según ejes equivalentes.

Tramo	Dm		Confiabilidad	Zr
	De	A		
Ruta 68 - Acceso a Colliguay	295,73	16.639,33	60%	0,253

La desviación estándar corresponde a la desviación o error combinado que es función de los EE y el coeficiente de variación del módulo resiliente de los suelos de fundación, la cual se obtiene de la Tabla 3.604.104.A del MC-V3.

Se adopta una desviación estándar de 0.45, para el Tramo de Ruta 68 – Acceso a Colliguay, considerando que el coeficiente de variación es menor a un 15%.

- Pérdida de serviciabilidad en la vida de diseño

El método AASHTO considera el índice de serviciabilidad como parámetro de deterioro del pavimento [27]. Para un pavimento de asfalto se considera un nivel de serviciabilidad inicial y final de 4,2 y 2,0 respectivamente, según lo indicado en la Tabla 3.604.102.A del MC-V3.

- Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (TMAPA)

El (TMAPA) se determina adoptándose el valor correspondiente a una estación tipo que posea una temperatura similar a la de la zona en estudio. De este modo, se escoge la Estación Valparaíso – Punta Ángeles, la cual posee un TMAPA de 14,3 °C, según la Tabla 3.604.108.A del MC-V3.

- Coeficiente de Drenaje

Este coeficiente permite ajustar el coeficiente estructural de las capas granulares no tratadas, en función de las condiciones del drenaje del proyecto. Su valor se determina de la Tabla 3.604.106.3 del MC-V3 en función del nivel de precipitaciones de la zona donde se

encuentra ubicado el camino, el tipo de subrasante y el porcentaje de finos permitido en las capas granulares. En este caso, se adoptó $C_d = 1,15$.

- Módulo Resiliente de la Subrasante (M_R)

Este parámetro, caracteriza el suelo de fundación para el diseño de pavimentos asfálticos y de acuerdo a los antecedentes de mecánica de suelos que se disponen se adoptan los siguientes M_R de diseño.

Ruta 68 – Acceso a Colliguay: $M_r = 76,8$ (Mpa)

Otros Coeficientes

Se definen los coeficientes estructurales en conformidad con lo recomendado por el Manual de Carreteras Volumen 3.

Relaciones que permiten estimar el coeficiente estructural (a) de concretos asfálticos en función del módulo elástico y de la estabilidad Marshall.

$$a_1 = 0,0052 \cdot E^{(0,555)} \quad E: \text{Modulo Elástico en (MPa)} \quad (\text{ec. 7.4})$$

$$a_1 = 0,0078 \cdot EM^{(0,441)} \quad EM : \text{Estabilidad Marshall en (N)} \quad (\text{ec. 7.5})$$

Tabla 7.3: Coeficientes estructurales

Mezcla	Modulo Elástico (Mpa)	a1	Estabilidad (N)	a2
E. Cobre	3.337	0,46931673	17.300	0,57686333
A. Tradicional	2.272,50	0,37919535	13.320	0,51404479
Min. MC-V3	-	-	9.000	0,43242973

En la tabla anterior se muestran los valores de coeficientes estructurales de las mezclas estudiadas en este trabajo. Para realizar el diseño del espesor de la capeta de rodadura se utiliza el valor mínimo de coeficiente estructural exigido por el MC-V3, de esta manera se realiza un diseño más conservador, considerando que el espesor de la capa será el valor mínimo exigido por el MC-V3 correspondiente a 50 [mm].

Coefficiente estructural para Concreto Asfáltico de Superficie: **0.43**

Otros coeficientes estructurales:

- Concreto Asfáltico Capa Intermedia : 0.41
- Base Asfáltica de Graduación Gruesa : 0.33
- Base Granular CBR ≥ 80% : 0.13
- Sub base Granular CBR ≥ 40% : 0.12

Con los parámetros y coeficientes indicados precedentemente, la información recopilada de la estructura de pavimentos existente y aplicando el método utilizado en el programa de diseño Pavivial, contenido en el MC-V3, se determinaron las soluciones estructurales que se muestran a continuación.

- **Ruta 68 – Acceso a Colliguay, EE 9.398,123; CBR 10, MPa 76.**

TEMP MEDIA ANUAL PONDERADA DEL AIRE [°C] (En la zona de proyecto)		14.3	[TMAPA]
NUMERO ESTRUCTURAL: SOBRE LA BASE (mm) :		57	CALCULAR N E BASE
TOTAL (mm) :		88	CALCULAR N E TOTAL
ESPEORES DE LAS CAPAS			
	ESPEOR (mm)	COEFICIENTE ESTRUCT	DRENAJE N. ESTRUCTURAL PARCIAL [mm]
CAPAS LIGADAS			
CARPETA ASFALTICA	50	0.43	= 21.5
CAPA INTERMEDIA	50	0.41	= 20.5
BASE ASFALTICA	50	0.33	= 16.5
			=
			=
CAPAS NO LIGADAS			A NIVEL DE BASE [mm] : 59
BASE GRANULAR	150	0.13	1.15 = 22.4
SUBBASE GRANULAR	150	0.12	1.15 = 20.7
			TOTAL [mm] : 102
VERIFICACIÓN DE NUMERO ESTRUCTURAL			
A NIVEL DE BASE: ➤ QUE LO REQUERIDO			
TOTAL: ➤ QUE LO REQUERIDO			

Figura 7.2: Resultados de diseño estructural, mediante programa PAVIVIAL.

7.1

- Cantidades de escoria de cobre y cemento asfáltico para construcción del tramo de prueba:

Tabla 7.4: Cantidades de material para la confección del tramo de prueba.

Tipo de mezcla	EC	AT	Unidad
Largo del tramo de prueba	100	100	(m)
Ancho del tramo de prueba	7	7	(m)
Espesor de la carpeta de rodado	0,05	0,05	(m)
Volumen de mezcla necesaria	35	35	(m³)
Densidad de la mezcla	3.321	2.393	(kg/m ³)
% de asfalto	3,2	5,5	%
Densidad de asfalto CA-24	1.046	1.046	(kg/m ³)
Masa de asfalto requerida	3.719,5	4.606,5	(kg)
Volumen de asfalto requerido	3,6	4,4	(m³)
Masa de agregado requerido	112.515,5	79.148,5	(kg)
Volumen de agregado requerido	31,4	30,6	(m³)

Observaciones:

-En el cálculo del espesor de la carpeta de rodadura, se cumple con el espesor de 50 (mm) especificada en el proyecto, por lo que es factible realizar el tramo de prueba con mezcla de escoria de cobre, considerando además que los coeficientes estructurales de la mezcla con escoria son mayores a los de la mezcla con árido tradicional.

-Para la construcción del tramo de prueba es necesario utilizar 3,6 m³ de asfalto, lo que representa un ahorro de cemento asfáltico, aproximadamente de un 20% respecto al tipo de mezcla con árido del río Aconcagua.

-La carpeta de rodadura se calcula con el espesor mínimo de 50 mm exigido en el Manual de Carreteras, además el tramo de prueba debe presentar continuidad respecto al tramo diseñado en el proyecto.

8 Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones:

- Mediante los muestreos realizados en el centro de acopio de escoria de cobre, se obtuvieron masas de áridos de distintos tamaños que lograron satisfacer la granulometría utilizada, cumpliendo con la banda IV-A-12, de mezcla semidensa, para condiciones de tráfico pesado. Las muestras obtenidas no presentaron materiales externos, como contaminantes, ni suelos de otro material, por lo cual se pudo realizar un correcto análisis de las mezclas asfálticas en caliente compuestas en un 100% con escoria de cobre.
- En los análisis de fluorescencia de rayos X realizados a las muestras de escoria de cobre de Codelco División Ventanas, no se encontraron concentraciones elevadas de elementos considerados tóxicos, satisfaciendo así los límites permisibles en la normativa actual de Chile, que regula las concentraciones de estos elementos según el Decreto Supremo N° 148/ Artículo N°23. Además la escoria de cobre como residuo minero, se encuentra dentro de los límites permisibles, según el Decreto N° 594/ Artículo N° 66, que regula las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, esto indica que la escoria de cobre no produciría daños al medio ambiente, ni a la salud de los trabajadores que tendrán contacto directo con el material, ya sea en su proceso de extracción, como en su posterior chancado y utilización en obras viales.
- En el diseño de mezclas asfálticas en caliente compuestas con escoria de cobre se obtuvo una cantidad óptima de asfalto correspondiente al 3,2%, lo que significa un ahorro en la confección de la mezcla en comparación a las mezclas asfálticas tradicionales. Además cabe considerar que este residuo actualmente no tiene costo, lo cual generaría un ahorro considerable en el desarrollo de obras viales dentro de la región y una solución importante para reducir las grandes cantidades que existen actualmente de este material en el país.
- En la confección de la mezcla asfáltica se observó que es necesaria la incorporación de un 1,4% de masa de filler cálcico, ya que mejora considerablemente la resistencia a la disgregación de la mezcla, además con este porcentaje de filler mejoran las propiedades mecánicas de la mezcla; por esta razón los ensayos de comportamiento mecánico se realizaron agregando filler de aportación.
- En el desarrollo de los ensayos de comportamiento mecánico a corto plazo, realizados a la mezcla de escoria, y comparando éstos con los resultados obtenidos en mezclas tradicionales compuestas con árido del río Aconcagua, que es el árido comúnmente utilizado en la Región de Valparaíso, se observó un mejor desempeño de la mezcla compuesta con escoria en todos los casos, tales como; estabilidad, resistencia a la tracción, menor temperatura bajo radiación solar, mayor módulo resiliente, y mayor coeficiente de

roce. Esto indica que la utilización de la escoria de cobre como agregado pétreo no sólo cumple con los requerimientos estipulados en el Manual de Carreteras, sino que además puede tener aplicaciones que mejorarían el desempeño de pavimentos.

-En los resultados obtenidos en los ensayos que simulan el deterioro de la mezcla a largo plazo, la mezcla compuesta con escoria presentó un mejor comportamiento en cuanto al desgaste superficial de la mezcla y resistencia al ahuellamiento, en comparación a la mezcla tradicional., lo que se refleja en el mayor módulo resiliente que posee, y además en la gran resistencia a las deformaciones plásticas según los resultados obtenidos en Estabilidad Marshall y ensaye de "Rueda Cargada de Hamburgo".

-La mezcla de escoria presentó menor tolerancia a la fatiga en comparación a la mezcla tradicional, posiblemente por la mayor rigidez que presenta esta mezcla, y por la menor cantidad de ligante asfáltico que posee.

-En el tramo de prueba realizado con escoria de cobre el espesor de la carpeta de rodadura es mayor al requerido estructuralmente, lo que podría aumentar la resistencia a las cargas de tráfico y por ende la vida útil de éste.

Recomendaciones:

-Se recomienda utilizar filler de aportación en mezclas asfálticas compuestas con escoria de cobre, ya que en los resultados obtenidos en el ensaye Desgaste Cantabro, si bien la mezcla de escoria de cobre sin filler presentó un bajo desgaste superficial, la mezcla con escoria de cobre con 1,4% de filler, aumentó la resistencia al desgaste en más de un 100%, lo cual indica una mayor cohesión entre las partículas. Además, en el desarrollo de los ensayos que requerían someter la mezcla asfáltica a altas temperaturas, la mezcla sin filler presenta baja adherencia entre partículas gruesas con el material fino, lo cual genera la disgregación de la mezcla; en cambio la mezcla asfáltica con escoria y 1,4% de filler, presentó una buena adherencia de partículas de distinto tamaño incluso en presencia de altas temperaturas, esto también se ve reflejado en una mayor estabilidad de la mezcla.

-Según los resultados obtenidos en los ensayos que simulan el deterioro de la mezcla a largo plazo, se recomienda utilizar este tipo de solución como carpeta de rodadura en zonas de tráfico pesado, como; parques industriales, recintos mineros, puertos, aeropuertos y estacionamientos, debido a la gran resistencia de la mezcla a las deformaciones permanentes.

-En cuanto a la resistencia a la fatiga de la mezcla con escoria, se recomienda estudiar más a fondo el deterioro causado por las cargas reiteradas de tráfico, ya que en este estudio se considera el ensaye de fatiga a ciclos de deformación constante, y la mezcla de escoria al

poseer una mayor rigidez, necesita fuerzas mayores para lograr dicha deformación, lo que acelera la fatiga de la mezcla, y posteriormente se traduce a condiciones de terreno con ejes equivalentes de mayor carga. Por esta razón, en este trabajo se realizó un diseño estructural para un tramo de prueba que se llevará a cabo en la obra: "Mejoramiento de ruta F-50, Sector Lo Orozco", de esta manera, se podrá realizar un seguimiento del deterioro causado en la carpeta de rodadura, producto del tráfico vehicular.

-Considerando la mayor estabilidad presentada en las mezclas asfálticas producidas con escoria de cobre, se podría estudiar la posibilidad de reducir los espesores en carpetas de rodadura, y por ende abaratar los costos en la construcción obras viales.

-Finalmente, considerando los resultados obtenidos en este trabajo de título, se recomienda utilizar la escoria de cobre como agregado pétreo en mezclas asfálticas en caliente, ya sea como carpeta de rodadura, capa intermedia o base asfáltica, ya que cumple con los requerimientos estipulados en la normativa actual respecto al diseño de pavimentos, y además presenta mejoras en algunas propiedades mecánicas en comparación a un árido tradicional. Además, utilizar este material significaría un ahorro considerable en la construcción de carreteras y vías dentro del país, y por otra parte una solución sustentable para disminuir la gran acumulación histórica que existe de este material a lo largo de Chile. Si bien la escoria de cobre no es un residuo que produce daños directos al medio ambiente, genera un impacto a la geografía del lugar, y un impacto visual a los vecinos de ciudades y comunas aledañas a los depósitos de este material. Por otra parte, hoy en día existe una gran escasez de recursos de áridos, que son extraídos en canteras y ríos, además se sabe que la explotación de estos recursos genera un impacto ambiental y una alteración al ecosistema y geografía en los lugares de extracción, por esto, impulsar la ingeniería sustentable y promover la utilización de recursos alternativos es un aporte que genera la ingeniería civil al desarrollo de la sociedad moderna, respetando al medio ambiente y pensando en el bienestar de las futuras generaciones.

9 Bibliografía

- [1] <https://www.codelco.com>, Sección Prensa, julio 2015.
- [2] www.rankia.cl/blog/, mayores productores de cobre en el mundo.
- [3] diario.latercera.com, Economía del cobre en Chile, Enero 2016
- [4] <https://www.codelco.com>, Codelco educa
- [5] Consuelo Sepúlveda Estay, 2006. Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro. Memoria para optar al título de ingeniero civil químico.
- [6] Paul Garnica Anguas, Mayra Flores Flores, José Antonio Gómez López, Horacio Delgado Alamilla. Caracterización geométrica de mezclas asfálticas. Publicación técnica No 267 Sanfandila, Qro, 2005.
- [7] Karina Cecilia Gomez Hernandez, 2014. Comportamiento Electroquímico del Acero de Refuerzo en el Hormigón con Adición de Escoria de Cobre bajo un ambiente salino. Tesis para optar al título de: Ingeniero Civil en Obras Civiles.
- [8] Ivan Alejandro Oyarzun Kneer, 2013. Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón, Tesis para optar al título de: Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Austral.
- [9] ALMEIDA, W; J. PEREIRA; M. BATISTA. 2007. Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete. J Mater Sci
- [10] Sebastián Andrés Orizola Gómez, 2006. USO DE ESCORIA DE COBRE EN CEMENTOS. Memoria para optar al título de ingeniero civil
- [11] ALP, I.; H. DEVECI; H. SÜNGÜN. 2008. Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. Journal of Hazardous Materials.
- [12] ANGIOLANI, A.1960. Introducción a la química industrial; Fundamentos químicos y tecnológicos con 150 figuras. Santiago, Editorial Andres Bello. 700 p.-
- [13] LÓPEZ, J. 2008. Determinación de la actividad del cobre en el sistema (SiO₂-Cu₂-FeO). Tesis Ing. Met. y Mat. Instituto Politécnico Nacional, Dep. de Ing. Met. y Mat. 71 p.-
- [14] ROJAS F. 2004. Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción. Tesis Ing. Civil Metalúrgico. Atacama, Unv. de Atacama,

- [15] Asfalchile, Cementos Asfálticos por Viscosidad CA-24 y CA-14, Ficha técnica.
- [16] Manual de Carreteras. Volumen 5, sección 5.408 Mezclas asfálticas en caliente.
- [17] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.301 Especificaciones para asfaltos.
- [18] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.202.3 Agregados pétreos: Método para tamizar y determinar la granulometría.
- [19] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.202.7 Agregados pétreos: Método para determinar el índice de lajas.
- [20] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.202.11 Agregados pétreos: Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los Ángeles.
- [21] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.202.19 Agregados pétreos: Método para determinar la densidad aparente.
- [22] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.202.20 Agregados pétreos: Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en pétreos gruesos.
- [23] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.202.21 Agregados pétreos: Método para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en pétreos finos.
- [24] Manual de Carreteras. Volumen 8, sección 8.502.16 Auscultaciones y prospecciones: Método para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento con el péndulo Británico (TRRL).
- [25] Gaete, R., de Solminihaç, H., Echeverría, G. Estudio de la resistencia al deslizamiento en pavimentos asfálticos en Chile. Revista de Ingeniería de Construcción N°4, Departamento de Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Marzo 1988.
- [26] Transportation Research board. Evaluation of pavement friction Characteristics, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C. -2000.
- [27] Método de diseño AASHTO, Año 1993.

10 Anexos

10.1 Anexos

10.1.1 Descripción del Proyecto

Actividad	Inicio	Fin	Duración	Precedentes	Relaciones
1. Definición del alcance	15/01/2023	31/01/2023	15 días		
2. Análisis de requisitos	01/02/2023	15/02/2023	14 días	1	
3. Diseño de software	16/02/2023	31/02/2023	15 días	2	
4. Desarrollo de software	01/03/2023	31/03/2023	30 días	3	
5. Pruebas de software	01/04/2023	15/04/2023	14 días	4	
6. Despliegue de software	16/04/2023	31/04/2023	15 días	5	
7. Mantenimiento de software	01/05/2023	31/05/2023	30 días	6	

10.1 Ensayes

10.1.1 Desgaste los Ángeles

Tamaño de Partículas				Grados de Ensaye							
Tamices		Granulometría		1	2	3	4	5	6	7	
mm	ASTM	% pasa	% parcial ret.	(80 - 40)	(50 - 25)	(40 - 20)	(40 - 10)	(20 - 10)	(10 - 5)	(5 - 2,5)	
80 - 63	(3 - 2½)										
63 - 50	(2½ - 2)										
50 - 40	(2" - 1½")										
40 - 25	(1½" - 1")										
25 - 20	(1" - ¾")										
20 - 12,5	(¾" - ½")	90	10				10	10			
12,5 - 10	(½" - 3/8")	74	16				16	16			
10 - 6,3	(3/8" - ¼")	60	14						14		
6,3 - 5	(¼" - 4)	48	12						12		
5 - 2,5	(4 - 8)	33	15							15	
Sumatoria % parcial retenido			67				26	26	26	15	
Masa Inicial de Muestra (gr)				10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	
Numero				12		12	11	8	6		
Masa (gr)				5000 ± 25		5000 ± 25	4584 ± 25	3330 ± 25	2500 ± 25		
Numero de Revoluciones				1000		500					
M. Inicial (gr)							5010	5000	5000	5000	
M. Final (gr)							3995	4080	4012	4009	
Desgaste Los Angeles							20,3	18,4	19,8	19,8	

10.1.2 Reconstitución de mezclas

GRANULOMETRIA GENERAL A. BITUMIX				
% RET. MUESTRA				
	18% MEZCLA	30% MEZCLA	50% MEZCLA	2% MEZCLA
Tamiz	Grav.(13-17)	Grav.(6-13)	P. Roca (0-16)	Filler
1 1/2"				
1"				
3/4"	100			
1/2"	43	100		
3/8"	2	73	100	
Nº4	1	2	91	
Nº8	1	1	62	
Nº16	1	1	42	
Nº30		1	30	
Nº50		1	21	100
Nº100		1	15	97
Nº200		1	11	84
R				
M (gr) =	198	330	550	22
M acum. (gr) =	198	528	1078	1100

RECOSTITUCION DE MEZCLA CON E. COBRE C/FILLER

Banda IV-A-12	Mezcla EC	% Retenido	Rec. Mezcla	Acum.
100	100	0	0	
100	100	0	0	
100	100	0	0	
80 - 95	90	10	160	160
70 - 85	74	16	256	416
43 - 58	48	26	416	832
28 - 42	33	15	240	1072
	23	10	160	1232
13 - 24	17	6	96	1328
8 - 17	13	4	64	1392
6 - 12	10	3	47,3	1439,3
4 - 8	7	3	45,1	1484,5
		7	93,5	1578,0

Filler	Tamiz		
	Nº100	3	0,7
	Nº200	13	2,9
	R	84	18,5
	Σ =		1600

10.1.3 Densidad de la escoria de cobre

Densidad de la escoria de cobre parte gruesa

Densidad Real Sobre N°8

(M. Ret. Entre 3/4" y N°8)

	A	B	
P. Sumergido	2593	2584	(gr)
P. SSS	3521	3506	(gr)
P. Seco	3513	3499	(gr)

Diferencia

Den. Real seca	3785,56	3795,01	(kg/m ³)	9,45	(kg/m ³)
Den. Neta	3818,48	3824,04	(kg/m ³)	5,57	(kg/m ³)
Absorción	0,23	0,20	(%)	0,03	(%)

Den. Real seca 3790,29 (kg/m³)

Den. Neta 3821,26 (kg/m³)

Absorción 0,21 (%)

Densidad de la escoria parte fina

Densidad Real bajo N°8

(M. Ret. Entre N°8 y N°200)

	A	B	
P. Matraz + Agua	657,5	646,5	(gr)
P. SSS	182,32	210,48	(gr)
P. Seco	181,6	209,83	(gr)
M. + A. + Muest.	791,7	801,4	(gr)

Diferencia

Den. Real seca	3773,90	3775,28	(Kg/m ³)	1,38	(Kg/m ³)
Den. Neta	3831,22	3819,95	(Kg/m ³)	11,27	(Kg/m ³)
Absorción	0,40	0,31	(%)	0,09	(%)

Den. Real seca 3774,59 (Kg/m³)

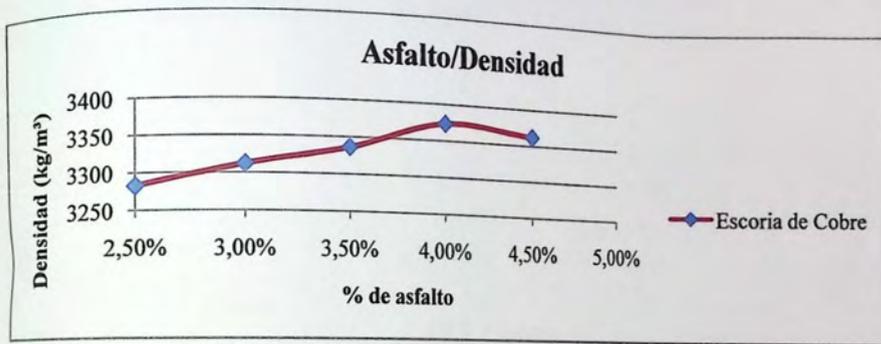
Den. Neta 3825,59 (Kg/m³)

Absorción 0,35 (%)

10.1.4 Densidad de mezclas asfálticas

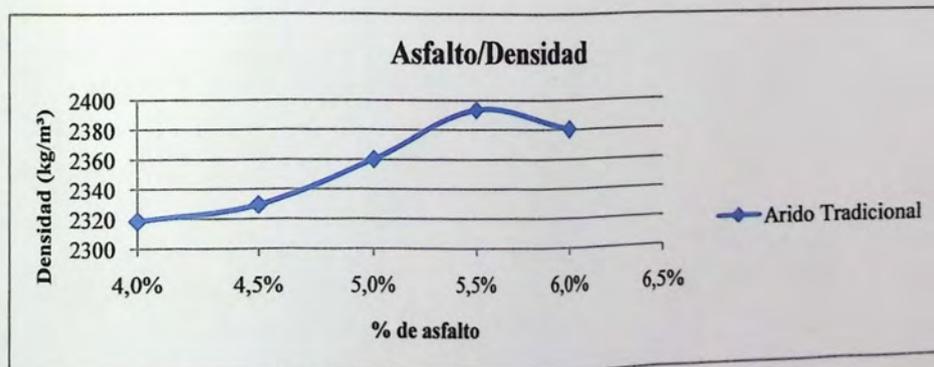
Escoria de Cobre

% Asfalto	Densidad (kg/m ³)
2,50%	3283
3,00%	3312
3,50%	3336
4,00%	3373
4,50%	3362



Árido Tradicional (del río Aconcagua)

% Asfalto	Densidad (kg/m ³)
4,0%	2318
4,5%	2329
5,0%	2360
5,5%	2393
6,0%	2380



10.2 Figuras



Figura 10.1: Botadero de escoria de cobre Codelco Ventanas.



Figura 10.2: Muestreo aleatorio de escoria de cobre.



Figura 10.3: Cuarteo de agregado de escoria.



Figura 10.4: Tamizado de escoria.



Figura 10.5: reconstitución de banda IV-A-12.



Figura 10.6: Agregados pétreos a temperatura de 154°C +/- 3°C.



Figura 10.7: Mezclado de agregados con ligante asfáltico.



Figura 10.8: Preparación de la mezcla asfáltica para compactar a 146°C +/- 3°C.



Figura 10.9: compactador Marshall.



Figura 10.10: Desmolde de probetas.



Figura 10.11: Probetas Marshall.



Figura 10.12: Prensa Marshall.



Figura 10.13: Probeta ensayada a compresión diametral RTI.



Figura 10.14: Probetas después de ensaye RTI.



Figura 10.15: Probetas Superpave después de ensaye de ahuellamiento.



Figura 10.16: Vigas para ensaye de fatiga.

10.3 Ficha técnica CA-24 y Nomograma de Heukelom

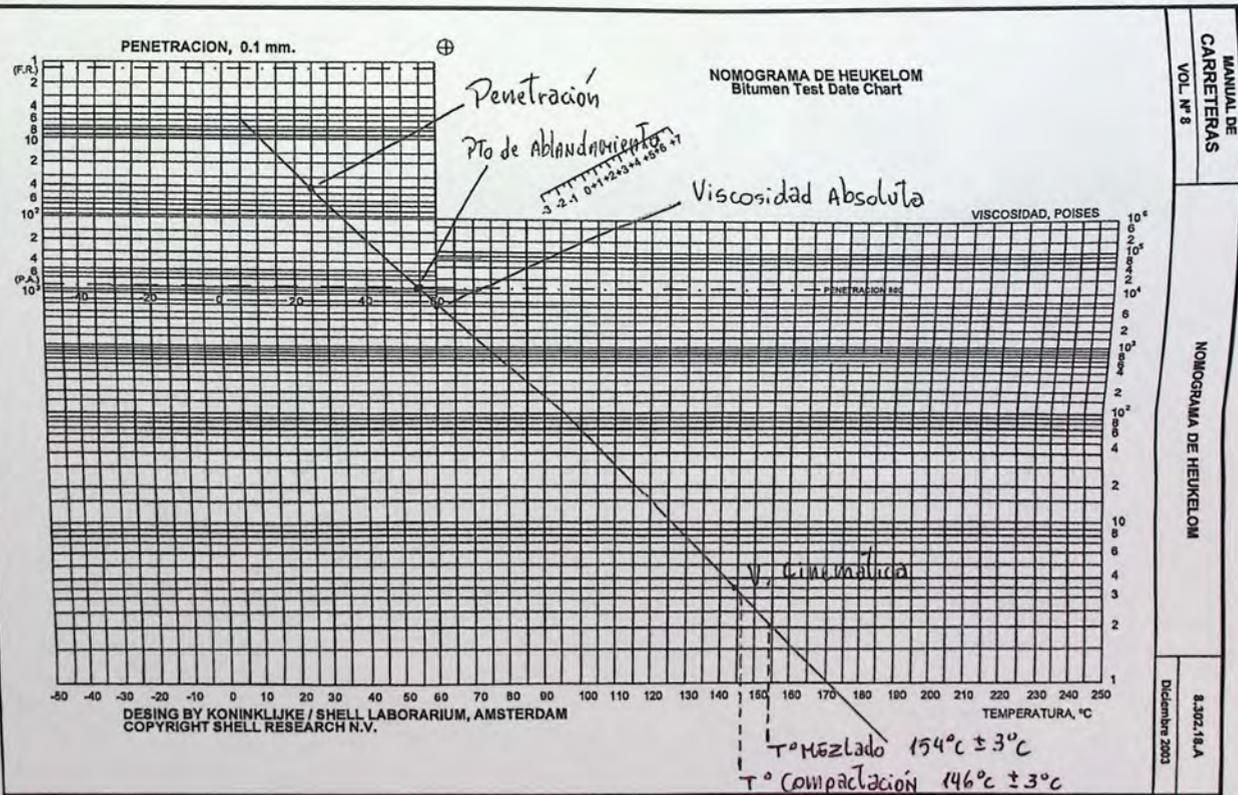


FICHA TECNICA

Especificaciones de Cementos Asfálticos

(Vol. 8, capítulo 8.300, tabla 8.301.1.A)

Ensayo	C.A. 14		C.A. 24		Método/Norma
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	
Viscosidad absoluta a 60°C, (Poise)	1400		2400		Manual de Carreteras 8.302.15
Penetración, 25°C, 100g, 5s, (0,1 mm)	40		40		8.302.3
Ductilidad, 25°C, 5 cm/s, (cm)	100		100		8.302.8
Mancha: Heptano-Xilol, (%Xilol)		30		30	8.302.7
Punto de inflamación, (°C)	232		232		8.302.9
Punto de ablandamiento, (°C)	Informar		Informar		8.302.16
Índice de penetración, (IP)	-2,0	1,0	-2,0	1,0	8.302.18
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	99		99		8.302.11
Ensayo de Película Delgada Rotatoria:					8.302.33
- Pérdida por calentamiento, (%)		0,8		0,8	8.302.33
- Viscosidad absoluta a 60°C, (Poise)	Informar		Informar		8.302.15
- Ductilidad, 25°C, 5cm/s, (cm)	100		100		8.302.8
Índice de durabilidad, (ID)		4,0		4,0	Residuo/Original



MANUAL DE
CARRETERAS
VOL. N° 8

NOMOGRAMA DE HEUKELOM

8.302.18.A
Diciembre 2003