



Facultad de Ingeniería.
Escuela de Construcción Civil.

Evaluación de la influencia del contenido de escoria de cobre en la elaboración de lechadas asfálticas.

Por

Felipe Javier Astorga Montaña.

Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al título de Ingeniero en Construcción.

Profesor guía: Sara Ojeda Herrera.

Abril, 2018

*Dedicado especialmente a mi abuela.
Juana de Dios Rojas. Gracias por todo.*

Agradecimientos.

En primer lugar, agradezco a mi familia por la confianza depositada en mí durante mi carrera universitaria. Agradecido infinitamente de mis padres, quienes día a día se sacrificaron por entregarme la mejor educación.

También debo agradecer a todos aquellos que alegraban el día con su presencia y simpatía, me refiero a mis amigos, quienes fueron parte de mi proceso de formación universitaria. Carlos Pardo, quien fue mi amigo durante todo mi proceso universitario y gran apoyo en la realización de mi investigación. Katherine Cisterna y Fernando Terraza compañeros que conocí al final de mi proceso y que son parte importante de la finalización de mi etapa de pregrado. Sira Sandoval, gracias por el apoyo y motivación permanente en la realización de mi investigación, también por compartir tus alegrías conmigo y ser parte de las mías.

Quiero destacar la labor de los profesores, quienes me entregaron sus conocimientos para así crecer y poder desarrollarme como un profesional íntegro.

Agradezco también a los miembros del Laboratorio Regional de Vialidad de Valparaíso, quienes estuvieron conmigo compartiendo, enseñando y corrigiendo a lo largo de toda esta investigación. Gracias.

ÍNDICE GENERAL.

Glosario.....	8
Lista de Abreviaturas y Siglas.....	9
Lista de Ilustraciones.....	10
Lista de Tablas.....	11
Resumen.....	14
Abstract.....	15
1. Introducción.....	17
1.1. Planteamiento del problema.....	18
1.2. Pregunta de investigación.....	19
1.3. Objetivo general.....	19
1.4. Objetivos específicos.....	19
1.5. Hipótesis.....	19
1.6. Alcances de la investigación.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	20
2. Marco teórico.....	21
2.1. Fundición y Refinería CODELCO División Ventanas.....	21
2.1.1. Escoria de cobre.....	21
2.1.2. Tipos de escoria de cobre.....	23
2.1.3. Según el grado de silicatos.....	23
2.1.4. Según el tiempo de enfriamiento.....	24
2.1.5. Características de la escoria de cobre.....	24
2.2. Pavimentos.....	25
2.2.1. Pavimentos rígidos.....	25
2.2.2. Pavimentos flexibles.....	25
2.2.3. Pavimentos semiflexibles.....	26
2.2.4. Capas de protección.....	26
2.3. Lechada asfáltica.....	27
2.3.1. Determinación del contenido teórico de emulsión de la lechada asfáltica.....	29
2.3.2. Consistencia de la lechada asfáltica.....	30
2.3.3. Contenido de asfalto.....	30
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
3. Metodología de la investigación.....	33
3.1. Secuencia metodológica.....	33

3.2.	Factorial de ensayo.	34
3.3.	Constantes del desarrollo experimental.	34
3.4.	Desarrollo experimental.	35
3.4.1.	Consistencia de lechadas asfálticas.	35
3.4.2.	Desgaste de lechadas asfálticas.	36
3.4.3.	Exudación de lechadas asfálticas.	37
CAPÍTULO IV: RESULTADO EXPERIMENTAL.		38
4.	Resultados.	39
4.1.	Resultados escoria de cobre.	39
4.1.1.	Granulometría de la escoria de cobre según método 8.202.3.	39
4.1.2.	Material fino menor que 0,08 mm según método 8.202.4.	40
4.1.3.	Densidad aparente de la escoria de cobre según método 8.202.19.	41
4.1.4.	Densidad real (ρ_{RS}), densidad neta (ρ_N) y absorción de agua (α) en pétreos gruesos (escoria de cobre) según método 8.202.20.	41
4.1.5.	Densidad real (ρ_{RS}), densidad neta (ρ_N) y absorción de agua (α) en pétreos finos (escoria de cobre) según método 8.202.21.	41
4.2.	Desarrollo de lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón.	42
4.2.1.	Requisitos de los áridos para lechadas asfálticas con árido tradicional proveniente de Bitumix Concón.	42
4.2.2.	Granulometría árido proveniente de Bitumix Concón.	42
4.2.3.	Análisis de emulsión asfáltica CSS-1h.	43
4.2.4.	Diseño de lechada asfáltica con árido Bitumix Concón.	44
4.2.5.	Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón.	45
4.2.6.	Dosificaciones de lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón.	46
4.2.7.	Resultado método de abrasión en medio húmedo y método de rueda de carga de lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón.	47
4.2.8.	Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con árido de Bitumix Concón.	50
4.2.9.	Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.	51
4.3.	Reemplazo parcial y total del árido tradicional por escoria de cobre	52
4.3.1.	Requisitos de la escoria de cobre para ser utilizada como árido para lechadas asfálticas.	52
4.4.	Análisis de emulsión asfáltica CSS-1h.	52
4.5.	Diseño de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre.	52

4.5.1.	Emulsión teórica.	52
4.5.2.	Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.	53
4.5.3.	Dosificaciones de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.	54
4.5.4.	Resultado método de abrasión en medio húmedo de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.	55
4.5.5.	Resultado de método de rueda de carga de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.	57
4.5.6.	Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con reemplazo total de escoria de cobre.	58
4.5.7.	Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.	59
4.6.	Diseño de lechada asfáltica con reemplazo de 60% de escoria de cobre.	60
4.6.1.	Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.	60
4.6.2.	Dosificaciones de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.	60
4.6.3.	Resultado método de abrasión en medio húmedo de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.	61
4.6.4.	Resultado método de rueda de carga de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.	63
4.6.5.	Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con reemplazo de 60% de escoria de cobre.	64
4.6.6.	Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.	65
4.7.	Diseño de lechada asfáltica con reemplazo de 30% de escoria de cobre.	66
4.7.1.	Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.	66
4.7.2.	Dosificaciones de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.	66
4.7.3.	Resultado método de abrasión en medio húmedo de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.	67
4.7.4.	Resultado método de rueda de carga de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.	69
4.7.5.	Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con reemplazo de 30% de escoria de cobre.	70
4.7.6.	Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.	71
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.		72
5.	Análisis y conclusiones.	73

5.1. Análisis.....	73
5.1.1. Consistencia de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.	73
5.1.2. Desgaste de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.	74
5.1.3. Exudación de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.	75
5.2. Conclusiones.	76
ANEXOS.	78
Anexo A.	79
i. Densidad real, densidad neta y absorción de pétreos gruesos. Árido Bitumix Concón.	79
ii. Densidad aparente suelta de árido Bitumix Concón.....	79
iii. Densidad real, densidad neta, y absorción de pétreos finos. Árido Bitumix Concón.....	79
iv. Determinación del porcentaje de huecos de los áridos.	79
iv.1. Determinación del porcentaje de huecos de árido Bitumix Concón.	80
iv.2. Determinación del porcentaje de huecos de la escoria de cobre.....	80
Anexo B.....	81
I. Elaboración de mezclas de lechadas asfálticas.....	81
II. Proceso de ensayo de lechadas asfálticas.	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
Bibliografía.....	84

Glosario.

Agente Emulsivo: La sustancia química, agregada al agua y al asfalto, que mantiene al asfalto en suspensión estable en el agua.

Cátodos de cobre: Son placas de cobre de alta pureza que se obtienen en el proceso de electro refinación y electro obtención. Estos cátodos también se llaman cátodos de cobre electrolítico de alta pureza y tienen una concentración de 99,9%.

Cohesión: Es la fuerza aglomerante del ligante con el agregado; ayuda a aumentar la resistencia al corte de la mezcla; varía con la temperatura; y aumenta con la cantidad de asfalto hasta un máximo, para luego decrecer.

Emulsión asfáltica: Las emulsiones asfálticas están compuestas por una dispersión de asfalto en agua, agentes emulsificantes y aditivos.

Lechada Asfáltica: Una mezcla de emulsión asfáltica, agregado fino bien graduado, filler mineral u otros aditivos, y agua. Se aplica en espesores de 3 a 10 mm y se emplea para renovar superficies de pavimento y retardar el ingreso de humedad y de aire en el pavimento subyacente. Las lechadas asfálticas sellarán fisuras menores, proveerán una textura superficial uniforme y restaurarán los valores de fricción.

Pirometalúrgico: Procesos para obtención y refino o refinación de metales utilizando calor, como en el caso de la fundición.

Quiebre: El fenómeno de separación del agua y el asfalto comenzado el proceso de curado. La velocidad de rotura está controlada principalmente por el agente emulsivo.

Resistencia al Deslizamiento: Es una cualidad que debe presentar un pavimento especialmente mojado para ofrecer resistencia.

Lista de Abreviaturas y Siglas.

AMH: Abrasión en medio húmedo.

ASTM: Asociación americana de ensayo de materiales.

CODELCO: Corporación nacional del cobre.

ENAMI: Empresa nacional de minería.

MOP: Ministerio de obras públicas.

RAP: Pavimento asfáltico reciclado.

Lista de Ilustraciones.

Ilustración 2.1 "Proceso de operación de refinería y fundición del cobre"	22
Ilustración 2.2 "Diseño típico de pavimento rígido."	25
Ilustración 2.3 "Estructura convencional de un pavimento flexible"	26
Ilustración 2.4 "Diseño típico de pavimento semiflexible."	26
Ilustración 2.5 "Determinación del contenido óptimo de asfalto."	31
Ilustración 3.1 "Placa de escurrimiento para ensaye de consistencia de lechadas asfálticas" ...	35
Ilustración 3.2 "Equipo de abrasión en medio húmedo."	36
Ilustración 3.3 "Equipo de rueda de carga."	37
Ilustración 4.1 "Curva granulométrica de muestra de escoria de cobre"	40
Ilustración 4.2 "Curva granulométrica árido Bitumix Concón."	43
Ilustración 4.3 "Grafico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco"	48
Ilustración 4.4 "Grafico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco"	50
Ilustración 4.5 "Contenido óptimo de emulsión referido al agregado seco."	50
Ilustración 4.6 "Materiales para determinar la consistencia de lechadas asfálticas."	53
Ilustración 4.7 "Consistencia adecuada de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre."	54
Ilustración 4.8 "Grafico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco"	56
Ilustración 4.9 "Grafico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco"	58
Ilustración 4.10 "Contenido óptimo de emulsión referido al agregado seco con reemplazo total de escoria de cobre."	58
Ilustración 4.11 "Grafico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco."	62
Ilustración 4.12 "Grafico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco"	64
Ilustración 4.13 "Contenido óptimo de emulsión referido al agregado seco con reemplazo de 60% de escoria de cobre."	64
Ilustración 4.14 "Grafico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco."	68
Ilustración 4.15 "Grafico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco"	70
Ilustración 4.16 "Contenido óptimo de emulsión referido al agregado seco con reemplazo de 60% de escoria de cobre."	70
Ilustración 5.1 "Gráfico contenido de escoria de cobre vs contenido de agua en lechadas asfálticas con distinto contenido de escoria de cobre."	73
Ilustración 5.2 "Gráfico de desgaste de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre."	74
Ilustración 5.3 "Grafico de exudación de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre."	75
Ilustración 0.1 "Elaboración de mezclas lechadas asfálticas."	81
Ilustración 0.2 "Ensayo de abrasión en medio húmedo y rueda de carga."	82

Lista de Tablas.

Tabla 2.1 “Composición y estructura de la escoria de cobre según su grado de silicatos.”	23
Tabla 2.2 ”Características físicas de la escoria de cobre”	24
Tabla 2.3 “Requisitos de los áridos para lechada asfáltica.”	28
Tabla 2.4 “Granulometrías de los áridos para lechada asfáltica”	28
Tabla 2.5 ”Determinación de los coeficientes a, b, c, d, e.”	30
Tabla 3.1 “Diseño factorial de ensayos para muestras de lechadas asfálticas.”	34
Tabla 3.2 “Cantidad máxima de arena adherida para verificar diseño según método de rueda de carga.”	37
Tabla 4.1 “Tamaño máximo absoluto y tamaño máximo nominal de la muestra de escoria de cobre.”	39
Tabla 4.2 “Granulometría escoria de cobre”	39
Tabla 4.3 “Material fino menor que 0,08 mm.”	40
Tabla 4.4 ”Densidad aparente suelta”	41
Tabla 4.5 “Densidad real, densidad neta y absorción de agua en pétreos gruesos (escoria de cobre).”	41
Tabla 4.6 “Densidad real, densidad neta y absorción en pétreos finos (escoria de cobre).”	41
Tabla 4.7 “Requisitos de los áridos para lechadas asfálticas.”	42
Tabla 4.8 “Granulometría de árido Bitumix Concón Tipo C-1 para lechadas asfálticas.”	42
Tabla 4.9 “Análisis emulsión asfáltica tipo CSS-1h”	43
Tabla 4.10 “Coeficientes para determinar la superficie específica”	44
Tabla 4.11 “Resultado de superficie específica y emulsión asfáltica teórica.”	45
Tabla 4.12 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con árido de Bitumix Concón.”	45
Tabla 4.13 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas patrón para ensayo de abrasión en medio húmedo.”	46
Tabla 4.14 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas patrón para ensayo de rueda de carga.”	46
Tabla 4.15 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón”	47
Tabla 4.16 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón.”	47
Tabla 4.17 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón”	49
Tabla 4.18 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón.”	49
Tabla 4.19 “Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con árido de Bitumix Concón.”	51
Tabla 4.20 “Requisitos de los áridos para lechadas asfálticas.”	52
Tabla 4.21 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre.”	53
Tabla 4.22 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre para ensayo de abrasión en medio húmedo.”	54
Tabla 4.23 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre para ensayo de rueda de carga.”	55

Tabla 4.24 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre”	55
Tabla 4.25 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.”	56
Tabla 4.26 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre”	57
Tabla 4.27 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.”	57
Tabla 4.28 “Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con reemplazo total de escoria de cobre.”	59
Tabla 4.29 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”	60
Tabla 4.30 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre para ensayo de abrasión en medio húmedo.”	60
Tabla 4.31 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre para ensayo de rueda de carga.”	61
Tabla 4.32 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”	61
Tabla 4.33 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”	62
Tabla 4.34 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.” ...	63
Tabla 4.35 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”	63
Tabla 4.36 “Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”	65
Tabla 4.37 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”	66
Tabla 4.38 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre para ensayo de abrasión en medio húmedo.”	66
Tabla 4.39 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre para ensayo de rueda de carga.”	67
Tabla 4.40 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”	67
Tabla 4.41 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”	68
Tabla 4.42 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.” ...	69
Tabla 4.43 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”	69
Tabla 4.44 “Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”	71
Tabla i.1 “Densidad real, densidad neta, y absorción de árido Bitumix Concón.”	79

Tabla i.2 “Densidad aparente suelta árido Bitumix Concón.”.....	79
Tabla i.3 “Densidad real, densidad neta, y absorción de pétreos finos Bitumix Concón.”	79
Tabla i.4 “Porcentaje de huecos árido Bitumix Concón.”	80
Tabla i.5 “Porcentaje de huecos escoria de cobre.”	80

Resumen.

Los pavimentos asfálticos están sometidos a un desgaste constante provocando daños en la carpeta asfáltica. Mientras los daños no sean de carácter estructural, estas carpetas asfálticas pueden ser rejuvenecidas mediante lechada asfáltica.

La lechada asfáltica es un método preventivo que alarga la vida útil de los pavimentos, generalmente la lechada asfáltica tiene una vida útil entre 3 y 5 años, pero se han encontrado casos de hasta 15 años cuando la lechada asfáltica es ocupada como método preventivo en pavimentos sin daños estructurales.

El uso de la escoria de cobre en lechadas asfálticas entrega beneficios de disminución del estado de oxidación de las carpetas asfálticas; mejor cohesión entre árido (escoria de cobre)-ligante.

Según los estudios realizados, las mezclas de lechadas asfálticas con escoria de cobre que fueron sometidas a los ensayos correspondientes ven mejoradas sus propiedades. La pérdida de material o desgaste de lechadas asfálticas se ve disminuido a medida que se aumenta el contenido de escoria de cobre, en cambio, la exudación de lechadas asfálticas es mayor a medida que el contenido de escoria de cobre va aumentando, pero sin sobrepasar el nivel de exudación máximo permitido.

Palabras-claves: *asfalto, lechada asfáltica; mantenimiento preventivo, escoria de cobre.*

Abstract.

The asphalt pavements are subject to constant wear causing damage to the asphalt folder. While the damage is not structural, these asphalt binders can be rejuvenated using slurry seal.

The slurry seal is a preventive method that extends the useful life of the pavements, generally the slurry seal has a useful life between 3 and 5 years, but cases of up to 15 years have been found when the slurry seal is used as a preventive method in pavements without structural damage.

The use of copper slag in slurries seals provides benefits of reducing the oxidation state of the asphalt binders; better cohesion between aggregate (copper slag) -asphalt.

According to the studies carried out, the mixtures of slurries seals with copper slag have improved their properties; the loss of material or wear of slurries seals is diminished as the copper slag content increases; however, the exudation of slurries seals is greater as the copper slag content increases, but without exceeding the maximum exudation level allowed.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES.

1. Introducción.

Chile es el principal productor de cobre del mundo (Mayorga, 2014) ,en las últimas décadas la economía chilena ha estado dominada por su producción. El cobre llegó a representar más del 20 % de los ingresos fiscales (Meller, 2012).

Desde el comienzo de la era industrial las escorias de los materiales vítreos que quedan cuando los metales se extraen piro metalúrgicamente de los minerales se han considerado residuos. La escoria de cobre se produce durante las etapas de fundición mate y conversión de la producción piro metalúrgica de cobre. Durante la fundición mate se forman dos fases líquidas separadas: la mata rica en cobre (sulfuros) y la escoria (óxidos) (Gorai y Jana, 2003).

En Chile las fundiciones de cobre existentes generan grandes volúmenes de residuos, entre los que encontramos escorias de fundición de cobre (Cendoya, 2009). Actualmente en Chile se registran depósitos de alrededor de 100 años de antigüedad (Demetrio et al., 2000) y se considera un pasivo ambiental que puede permanecer en los lugares de acopio por décadas, lo que involucra la ocupación de grandes extensiones de superficies de terreno (Nazer et al., 2010). Por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor 2,2 ton de escoria, y a nivel nacional se producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas por año de escoria de cobre.

A nivel mundial, la escoria de cobre es usada en diversos sectores productivos, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre (Sepúlveda, 2006). Ha sido investigada como un sustituto parcial del cemento, usada como gravilla para líneas de ferrocarriles (Nazer et al., 2010) debido a que si son sometidas a un proceso de molienda adquieren características similares a las de un árido (Cendoya, 2009), también se ha estudiado como sustituto del material pétreo en hormigones, morteros (Wu et al., 2010), azulejos, ladrillos ,y también en infraestructura vial, dándole utilidad en mezclas asfálticas en caliente (Muñoz, 2013).

El vertido o eliminación de esta escoria causa desechos en el ambiente que podrían ser utilizados para otras actividades.

En esta investigación la escoria de cobre será utilizada en la elaboración de lechadas asfálticas, material de construcción que está compuesto principalmente por un árido bien graduado granulométricamente, emulsión asfáltica y agua para otorgar consistencia a la mezcla, esta mezcla se aplica en frío, proporcionando y otorgando una nueva utilidad a la escoria de cobre, a su vez, aprovechando al máximo las propiedades que este residuos pueda darle a la lechada asfáltica, cuya función principal es detener la oxidación, rejuvenecer, y darle características antideslizantes a los pavimentos asfálticos alargando la vida útil de estos.

1.1. Planteamiento del problema.

La construcción de caminos con mezclas asfálticas toman gran importancia para el desarrollo de un país, ya que permite la movilización de personas y productos desde y hacia diferentes lugares, generando así un incremento en las actividades económicas de las regiones (Benítez, 2015), sin embargo, para mantener una movilización adecuada y segura es necesario contar con pavimentos en un estado óptimo de tránsito

Los pavimentos en base a mezclas asfálticas están sometido a un constante desgaste, disminución de contenido de vacíos y pérdida de áridos debido al tránsito continuado de vehículos lo que en el tiempo se traduce en el daño estructural del pavimento.

Las características de los pavimentos en base a mezclas asfálticas han sido investigadas con distintos materiales.

La escoria de cobre es uno de los agregados que ha sido estudiado en mezclas asfálticas con pavimento asfáltico reciclado (RAP), ayudando a mejorar la pérdida de propiedades que sufre el material con el paso del tiempo debido a sus propiedades físicas y químicas, ya que, posee hierro libre; ergo, alta densidad, dureza (Shi et al., 2008), y elevada angulosidad. También, el uso de escoria de cobre como agregado fino en varias mezclas asfálticas proporciona una buena cohesión y mejora las propiedades mecánicas de las mezclas (Pundhir et al., 2005), a su vez, reduce el volumen de escorias de cobre acopiadas y la lixiviación asociada a éstas (Raposeiras et al., 2017).

Los resultados de Marshall y el ensayo de resistencia a la tracción indirecta muestran que el uso de escoria de cobre mejora la estabilidad de Marshall, la gravedad específica y la resistencia a la tracción (Behnood et al., 2015).

Por otra parte, existen acciones continuas para asegurar el funcionamiento constante de todo tipo de infraestructura con niveles de confort, y seguridad aceptables, estas acciones se conocen como mantenimiento preventivo (León et al., 2015). Actualmente la lechada asfáltica es una de las técnicas de mantenimiento preventivo que se ha utilizado ampliamente en varios países.

Se determinó que la lechada asfáltica como capa protectora para rejuvenecer una superficie pavimentada trae algunas ventajas como ahorros de tiempo y dinero al prevenir la fatiga del pavimento, protege las capas inferiores de la entrada del agua y desprendimiento de partículas con lo que se logra aumentar la vida útil del pavimento (Duarte, 1995) ,también permite brindar soluciones para sellar los pavimentos que presentan un estado de oxidación muy avanzado.

La escoria de cobre presenta un estado de oxidación avanzado, es decir, su condición de oxidación no puede aumentar más, disminuyendo la tasa y el grado de reacción química entre el oxígeno y el asfalto (Brock, 1994), a su vez, la escoria de cobre posee una baja absorción lo que permite una disminución en la pérdida de cohesión entre el agregado y el ligante, ya que, la humedad presente en los áridos genera pérdida de resistencia en la interface entre el ligante asfáltico y el agregado pétreo, esto hace que la tasa de acumulación de la deformación permanente aumente debido a la pérdida de cohesión de la mezcla por humedad.(Rondón, 2016).

Mediante esta investigación experimental se propone la evaluación de una lechada asfáltica con escoria de cobre en reemplazo parcial y total del árido tradicional mediante un análisis del contenido de escoria de cobre que indicará si la lechada asfáltica con escoria de cobre cumple con las características de una lechada asfáltica; si podrá disminuir el desgaste abrasivo, y determinar el comportamiento a la exudación.

1.2. Pregunta de investigación.

- ¿Tendrá influencia el contenido de escoria de cobre en la mejora del comportamiento de las lechadas asfálticas?

1.3. Objetivo general.

- Evaluar la influencia del contenido de escoria de cobre en la elaboración de lechadas asfálticas.

1.4. Objetivos específicos.

- Determinar la consistencia de lechadas asfálticas con distinto contenido de escoria de cobre
- Determinar desgaste de lechadas asfálticas con distinto contenido de escoria de cobre.
- Determinar exudación de lechadas asfálticas con distinto contenido de escoria de cobre.

1.5. Hipótesis.

- La lechada asfáltica con escoria de cobre que mejorará el comportamiento de las lechadas asfálticas.

1.6. Alcances de la investigación.

- La investigación se realizará en las dependencias del laboratorio de vialidad del Ministerio de Obras Públicas de la región de Valparaíso.
- Se utilizará escoria de cobre proveniente de la división ventana de CODELCO.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

2. Marco teórico.

2.1. Fundición y Refinería CODELCO División Ventanas.

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

La División Ventanas está encargada de tratar los concentrados provenientes de las Divisiones Andina, Teniente y una gran cantidad de pequeñas y medianas mineras agrupadas en ENAMI y existentes entre la IV y VI región, como parte del trato del traspaso de la división. Sumado a esto, en División Ventanas se produce ácido sulfúrico, granalla de plata y lingotes de oro en menor cantidad. Como las instalaciones de esta división se encuentran en el borde costero, la zona de Ventanas posee un área importante en cuanto a biodiversidad. El principal impacto producido en esta zona corresponde al depósito de escoria de cobre, desecho proveniente de la actividad de fundición. CODELCO Ventanas posee una capacidad anual de producción de 400000 toneladas en su refinería, 420.000 toneladas en su fundición y 360.000 toneladas de ácido sulfúrico. (CODELCO, 2016).

2.1.1. Escoria de cobre.

Uno de los productos obtenidos de la extracción de cobre son los cátodos. Para obtener una pureza del 99,99% en estos elementos, tal como lo requiere el mercado, existen 2 tipos de procesos posibles a aplicar. Estos procesos dependen principalmente del estado en que se encuentre el cobre en la naturaleza, pudiendo estar de forma oxidada o sulfurada. Los minerales sulfurados son extraídos de la mina, pasan a una etapa de reducción de tamaño que permite liberar las especies valiosas contenidas en ellos, posteriormente a una concentración y fundición de minerales hasta llegar a la etapa de electro refinación, lo que permite obtener los cátodos deseados (Sepúlveda, 2006).

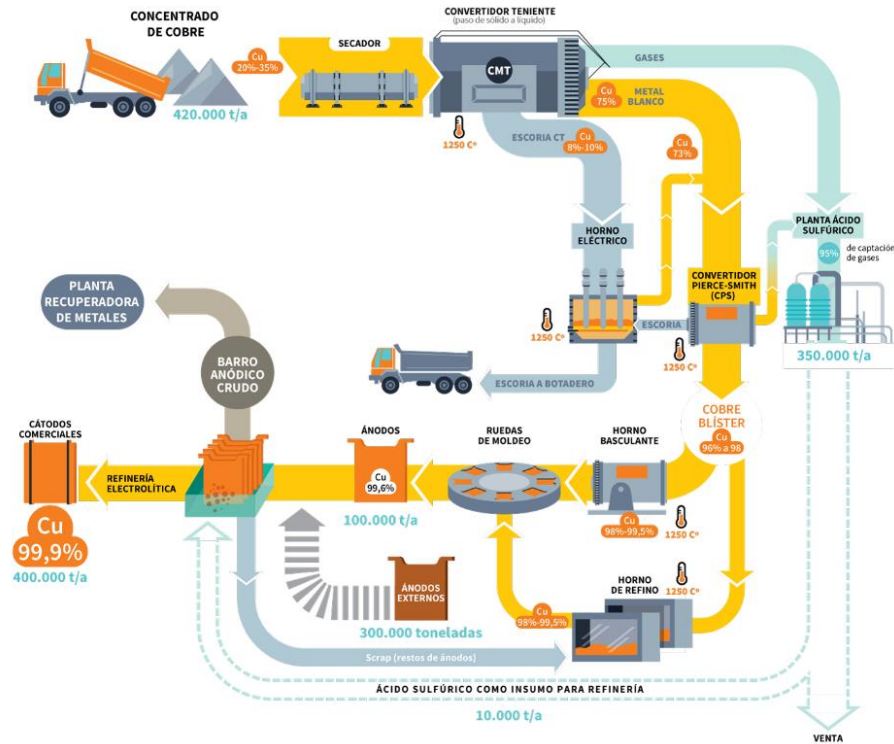


Ilustración 2.1 "Proceso de operación de refinería y fundición del cobre"

(Fuente: CODELCO transparente.)

La escoria de cobre se obtiene como material de desecho del proceso de refinación del cobre, el que se realiza a través de los procesos pirometalúrgicos de minerales sulfurados de cobre, que previos a la fusión han sido concentrados mediante proceso de flotación.

Durante la fundición del material concentrado se producen dos fases líquidas separables o inmiscibles; la mata rica en cobre y la escoria de cobre. La mata, según su contenido de cobre, continúa luego del proceso de refinación, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre.

2.1.2. Tipos de escoria de cobre.

Los tipos de escoria de cobre se diferencian por:



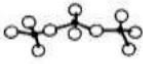
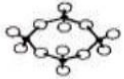

- El grado de silicatos
- El tiempo de enfriamiento.

2.1.3. Según el grado de silicatos.

Debido a que principalmente la escoria de cobre está compuesta en base a óxido de Hierro, óxido de Sílice, de Aluminio y de Calcio entre otros, varía su grado de silicatos en función a la combinación que estos óxidos presenten. Para evaluar si la escoria posee carácter químico neutro, ácido o básico, se utiliza tanto el Índice de Silicatación como el Grado de saturación. (Kneer, 2013)

El Índice de Silicatación, 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 Cuando este índice es igual a uno, la escoria es catalogada como neutra. En caso de ser mayor que uno es ácido, mientras que cuando es menor a uno se considera básica (Angiolani, 1960).

Tabla 2.1 “Composición y estructura de la escoria de cobre según su grado de silicatos.”

Tipo de Escoria	Grado de Silicato*	Ejemplos de Composiciones	Aniones Principales	Estructuras Moleculares
Básica	< 1	3FeO*SiO ₂ 2FeO*CaO* SiO ₂	O ²⁻ , SiO ₄ ⁴⁻	 SiO ₄ ⁴⁻
Neutra	1	2CaO*SiO ₂ CaO*FeO* SiO ₂	SiO ₄ ⁴⁻	
		4CaO*3 SiO ₂ 2CaO*2FeO*3 SiO ₂	Cadena de aniones de silicato	 Si ₃ O ₁₀ ⁸⁻
Acida	> 1	4(CaO* SiO ₂)	Anillo de aniones de silicatos	 Si ₄ O ₁₂ ⁶⁻
		3(CaO*2SiO ₂)	Anillos de aniones de silicato conectados	 Si ₆ O ₁₅ ⁶⁻

(Fuente: López, 2008.)

2.1.4. Según el tiempo de enfriamiento.

El material, luego del proceso pirometalúrgico, es removido en estado líquido para ser colocado en los centros de acopio donde se depositan los residuos. Desde el proceso de vertido en fase líquida hasta alcanzar la condición sólida, el material pasa por un tiempo relativo de enfriado. Este tiempo es fundamental para definir la formación en fases cristalinas o vítreas.

Los tipos de escoria expandida son los obtenidos por enfriamiento rápido, luego de ser expandida debido a la aplicación de una cantidad controlada de aire, agua 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.

La escoria granallada se obtiene cuando el material pasa de estado líquido a sólido en el menor tiempo posible. Una de las técnicas para conseguir esto consiste en verter la escoria fundida en un granallado, el cual consiste en un pozo que contiene una cantidad de agua constante, la cual se renueva de acuerdo con la granulación que se realice. En este caso se produce un enfriamiento brusco, en donde el material pasa de temperaturas cercanas a los 1150 °C hasta llegar a temperaturas menores a los 100 °C. Luego de realizada la granulación se separa el agua de la escoria para llevarla finalmente a la zona de acopio. Este proceso no genera modificaciones químicas que alteren la composición de la escoria, pero al ser un proceso de enfriamiento rápido, no permite una correcta disposición de los átomos, lo cual termina formando estructuras amorfas o vítreas, registrando un material con mayor porosidad y menor densidad. Este material es comúnmente utilizado para procesos de granallado de superficies.

Finalmente, la escoria de botadero se obtiene por un proceso de enfriamiento lento, en el cual la escoria fundida se vierte directamente en el lugar de acopio definitivo, en donde se enfriará de manera lenta hasta alcanzar la temperatura ambiente. Este proceso lento permite una mejor redistribución de los átomos, lo cual conforma una estructura cristalina, con baja porosidad, alta densidad y estructura con forma regular (Pérez, 2017).

2.1.5. Características de la escoria de cobre.

Las características físicas de la escoria de cobre están directamente relacionadas con el tiempo de enfriamiento, es decir, lo que se demora en pasar desde la fase líquida a la fase sólida.

Tabla 2.2 "Características físicas de la escoria de cobre"

Apariencia	De color negro, textura lisa o porosa
Forma de partículas	Irregular con bordes agudos
Densidad kg/m ³	3160-3870
Absorción de agua %	0,15-0,55
Dureza	4-6

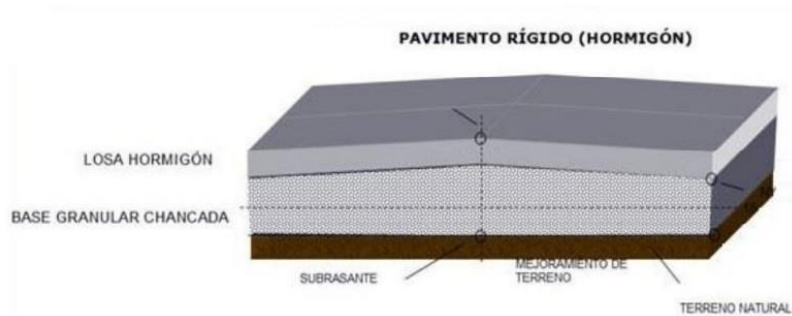
(Fuente: Kneer, 2013.)

2.2. Pavimentos.

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas de tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas.

2.2.1. Pavimentos rígidos.

Constituido por una losa de hormigón con o sin armadura apoyada sobre una capa de Sub base granular, colocada directamente sobre la subrasante.



*Ilustración 2.2 "Diseño típico de pavimento rígido."
(Fuente: Curso laboratorio MOP.)*

2.2.2. Pavimentos flexibles.

Está constituido por una serie de capas que permiten transmitir las cargas de tránsito hasta el terreno natural sin que este se deforme. No siempre es necesario colocar todas las capas señaladas en la ilustración 2.3, depende del tránsito, tipo de suelo, etc.

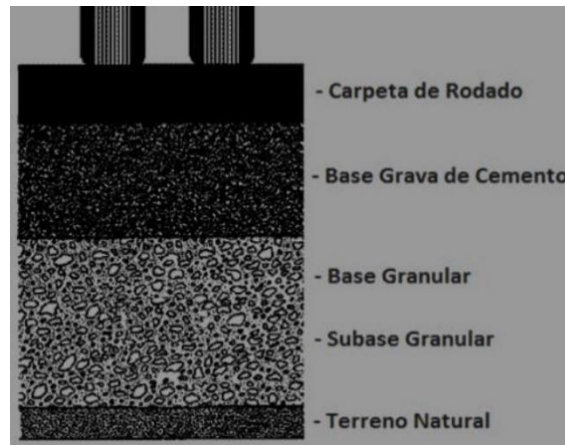
La calidad estructural de estas capas varía con la profundidad. En un pavimento flexible, las diferentes capas pueden ser granulares y asfálticas.



*Ilustración 2.3 “Estructura convencional de un pavimento flexible”
(Fuente: Curso laboratorio MOP.)*

2.2.3. Pavimentos semiflexibles.

Los pavimentos semiflexibles se caracterizan por usar una carpeta de rodado asfáltica y como base una grava cemento (estabilizada con cemento).



*Ilustración 2.4 “Diseño típico de pavimento semiflexible.”
(Fuente: Curso laboratorio MOP.)*

2.2.4. Capas de protección.

Corresponde a todas aquellas capas que no aportan estructura al pavimento. Dentro de esta clasificación tenemos:

a) Riegos asfálticos.

Consiste en la aplicación de un asfalto líquido, ya sea sobre una capa granular o sobre una capa asfáltica.

b) Riegos asfalto-agregado.

Estos corresponden a riegos asfálticos cubiertos por una o más capas de agregado ya sea, arena fina (para preservar por corto tiempo bases estabilizadas) o grava (para tratamiento superficial simple o doble). El espesor del tratamiento lo da el tamaño del agregado pétreo de la primera capa, por cuanto las capas sucesivas de agregados pétreos sólo llenan huecos de la capa anterior.

c) Sellos de mezcla.

Corresponde a una mezcla de ligante asfáltico cubierto con capa(s) de agregado colocado sobre un pavimento existente. Dependiendo del tamaño del agregado será la función u objetivo de cada sello. Es cualquier tipo de mezcla colocada en espesores delgados para corregir fallas funcionales.

d) Sellos de fricción.

Mezclas abiertas colocadas en espesores delgados para mejorar el drenaje superficial (Zúñiga, 2015).

e) Lechadas asfálticas.

2.3. Lechada asfáltica.

La lechada asfáltica es una mezcla asfáltica compuesta por una emulsión asfáltica, áridos finos bien graduados granulométricamente, agua y filler. Cuando estos componentes se mezclan en proporciones adecuadas se obtiene, una mezcla fluida y homogénea.

Después de la evaporación del agua, constituye un micro aglomerado en frío, impermeable y denso. En esta mezcla, la arena conforma el esqueleto mineral que da el espesor a la lechada asfáltica, y el filler junto el asfalto entregan la cohesión de la mezcla.

Las lechadas asfálticas se aplican en pavimentos estructuralmente sanos, no le otorga estructura al pavimento, pero si son efectivas en la mantención preventiva de tratamientos superficiales y concretos asfálticos, son ventajosas ya que, son de rápida aplicación y presentan una buena textura superficial, otorgando características antideslizantes al pavimento, son capaces de corregir irregularidades superficiales menores, protegiendo las capas estructurales, retardando su deterioro. La aplicación oportuna de lechadas asfálticas sobre la carpeta de rodado previene las tensiones superficiales originadas por la oxidación del asfalto y, en consecuencia, las fisuras superficiales. Las lechadas asfálticas se clasifican dependiendo de su uso final y de los requisitos basados principalmente en el tamaño del árido.

i. Asfalto.

En las lechadas asfálticas deberán utilizarse emulsiones asfálticas de quiebre lento, de los tipos CSS-1, CSS-1h, SS-1, SS-1h, y CSS-1h de quiebre controlado, que cumplan con la especificación correspondiente.

La función de la emulsión asfáltica es proveer de cohesión al esqueleto mineral e impedir el paso del agua y el aire al interior de la lechada y las capas inferiores asegurando la durabilidad del pavimento asfáltico.

ii. Áridos.

Los áridos deberán ser limpios, angulares y bien graduados. Áridos limpios son aquellos libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas. Los áridos deberán ser chancados, aceptándose incorporación de arena natural hasta 20% total del árido.

Los áridos deberán cumplir con especificaciones según los métodos de ensaye corresponden a los especificados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 “Requisitos de los áridos para lechada asfáltica.”

Ensaye	Exigencia	Método
Equivalente Arena.	Min. 45%	8.202.9
Desgaste de los Ángeles	Max 25%	8.202.11
Índice de Plasticidad.	NP	8.102.4
Adherencia Riedel-Weber.	0 - 5	8.302.30
Índice de Trituración Total.	Max 3,5%	8.202.8
Adherencia Método Estático.	Min 95%	8.302.29
Partículas Chancadas.	Min 90%	8.202.6

(Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)

El tipo de granulometría a utilizar depende del tamaño del árido, y debe cumplir con la granulometría establecida para lechadas asfálticas según indica la tabla 2.4.

Tabla 2.4 “Granulometrías de los áridos para lechada asfáltica”

Tamices		Bandas Granulométricas Porcentaje en Peso Que Pasa			
(mm)	(ASTM)	Tipo A-1	Tipo B-1	Tipo C-1	Tipo D-1
12.5	1/2"				100
10	3/8"		100	100	85-98
5	N.º 4	100	85-95	70-90	62-80
2,5	N.º 8	85-95	62-80	45-70	41-61
1,25	N.º 16	60-80	45-65	28-50	28-46
0,63	N.º 30	40-60	30-50	18-34	18-34
0,315	N.º 50	25-42	18-35	12-25	11-23
0,16	N.º 100	15-30	10-24	7-17	6-15
0,08	N.º 200	10-20	5-15	5-11	4-9

(Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)

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

iii. Agua.

El agua debe ser potable, compatible con la mezcla de la lechada asfáltica. Deberá estar libre de materias orgánicas, sales nocivas y otros contaminantes.

iv. Diseño.

Según indica el Manual de carretera se determina el contenido de emulsión y la dosis de aplicación de lechada, sobre la base de cálculos teóricos, para producir una película de asfalto.

El diseño preliminar es básicamente una estimación del contenido de asfalto para cubrir los agregados con una película de cierto espesor.

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

$$Et = \left(4,5 \frac{\sqrt[5]{\text{superficie especifica}}}{R} \right) - 1$$

Donde:

Et: Emulsión teórica tentativa referida al agregado seco (%).

R: Residuo asfáltico de la Emulsión. (decimal)

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

a: % de árido mayor a 10 mm.

b: % de árido que pasa por tamiz 10 mm y queda retenido en tamiz 5 mm.

c: % de árido que pasa por tamiz 5 mm y queda retenido en tamiz 0,315 mm.

d: % de árido que pasa por tamiz 5 mm y queda retenido en tamiz 0,315 mm.

e: % de árido que pasa por tamiz 0,08 mm.

Tabla 2.5 "Determinación de los coeficientes a, b, c, d, e."

	a	b	c	d	e
Tamiz (mm)	>10	5-10	0,315-5	0,08-0,315	Pasa 0,08
Factor	0,17	0,3	2,3	12	135

(Fuente: Manual de Carretera Volumen 8.)

2.3.2. Consistencia de la lechada asfáltica.

Permite definir la cantidad de agua óptima para una correcta trabajabilidad de la mezcla. La consistencia se determina mediante el Método 8.302.45: Método para determinar la consistencia de lechadas asfálticas.

2.3.3. Contenido de asfalto.

El contenido de asfalto se determina mediante los resultados del Método 8.302.46: Método de abrasión en medio húmedo y el Método 8.302.53: Método de la rueda carga.

Los rangos óptimos son el contenido de asfalto correspondiente a la máxima pérdida por abrasión permitida (540 g/m²) y se considera una adherencia de arena máxima, según indica la tabla 3.2 para un tránsito de vehículos superior a 1000 por día.

El contenido de asfalto óptimo será, el promedio del contenido de asfalto de los rangos óptimos, o bien, el contenido de asfalto correspondiente al punto de intersección de las curvas.

En el desarrollo de esta investigación el contenido de asfalto óptimo para las mezclas de lechadas asfálticas será determinado por el contenido de asfalto correspondiente al punto de intersección de las curvas.

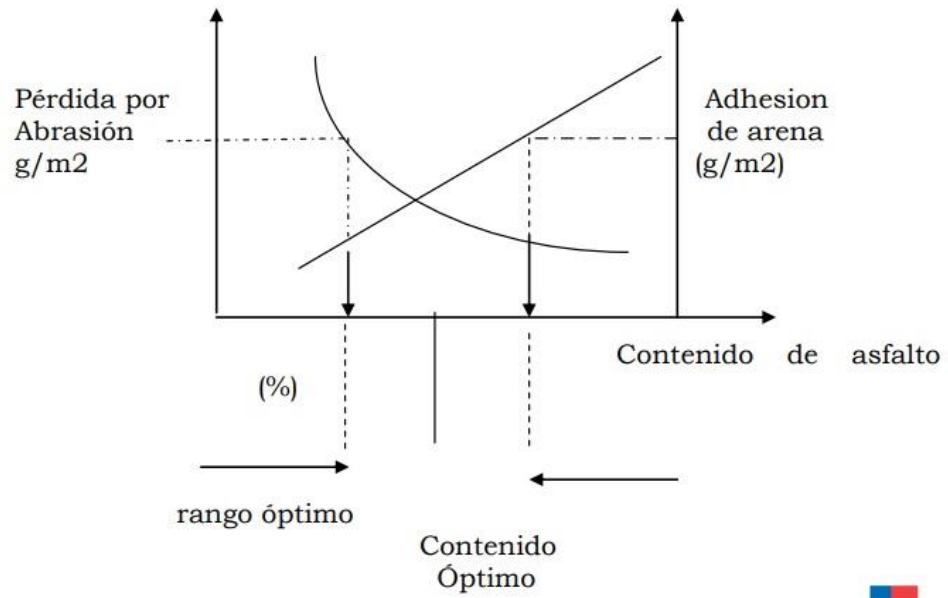
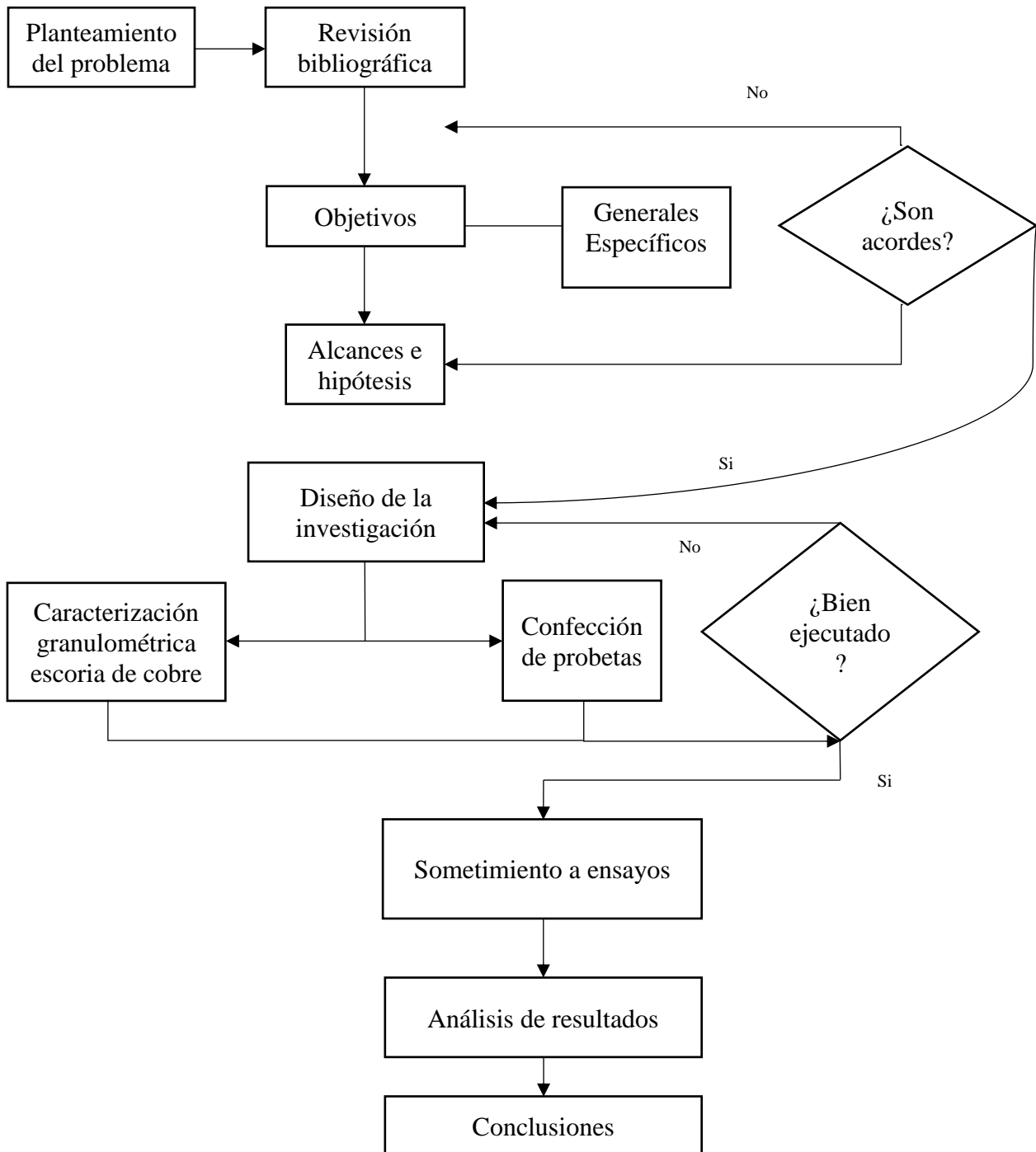


Ilustración 2.5 "Determinación del contenido óptimo de asfalto."
(Fuente: Curso Laboralista MOP.)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3. Metodología de la investigación.

3.1. Secuencia metodológica.



3.2. Factorial de ensayo.

Se reemplazará el árido tradicional con distintos porcentajes de escoria de cobre en las mezclas de lechadas asfálticas, hasta llegar a la totalidad de reemplazo, debido a que el fin es poder determinar la influencia del material en la fabricación de lechadas asfálticas pasando por distintos contenidos de escoria de cobre.

Tabla 3.1 “Diseño factorial de ensayos para muestras de lechadas asfálticas.”

Variables	Patrón			Mezcla I			Mezcla II			Mezcla III		
% Escoria de cobre	0%			30%			60%			100%		
% Árido tradicional	100%			70%			40%			0%		
% Emulsión asfáltica	8%	11%	14%	7%	10%	13%	6%	9%	11%	5%	7%	10%
Desgaste de lechadas asfálticas	P.A1	P.A2	P.A3	M.IA1	M.IA2	M.IA3	M.IIA1	M.IIA2	M.IIA3	M.IIIA1	M.IIIA2	M.IIIA3
	P.A1	P.A2	P.A3	M.IA1	M.IA2	M.IA3	M.IIA1	M.IIA2	M.IIA3	M.IIIA1	M.IIIA2	M.IIIA3
	P.A1	P.A2	P.A3	M.IA1	M.IA2	M.IA3	M.IIA1	M.IIA2	M.IIA3	M.IIIA1	M.IIIA2	M.IIIA3
Exudación de lechadas asfálticas	P.B1	P.B2	P.B3	M.IB1	M.IB2	M.IB3	M.IIB1	M.IIB2	M.IIB3	M.IIIB1	M.IIIB2	M.IIIB3
	P.B1	P.B2	P.B3	M.IB1	M.IB2	M.IB3	M.IIB1	M.IIB2	M.IIB3	M.IIIB1	M.IIIB2	M.IIIB3
	P.B1	P.B2	P.B3	M.IB1	M.IB2	M.IB3	M.IIB1	M.IIB2	M.IIB3	M.IIIB1	M.IIIB2	M.IIIB3

(Fuente: Elaboración propia.)

A: Desgaste de lechadas asfálticas.

B: Exudación de lechadas asfálticas.

P: Patrón.

M: Muestras con reemplazo de escoria de cobre.

I; II; III: número de mezcla.

1; 2; 3: Contenido de asfalto.

3.3. Constantes del desarrollo experimental.

Para determinar el tipo de lechada asfáltica que se fabricara, en primer lugar, se establece la clasificación de la granulometría del árido incorporado en la mezcla asfáltica en frío. La granulometría de la lechada asfáltica a usar es Tipo C-1.

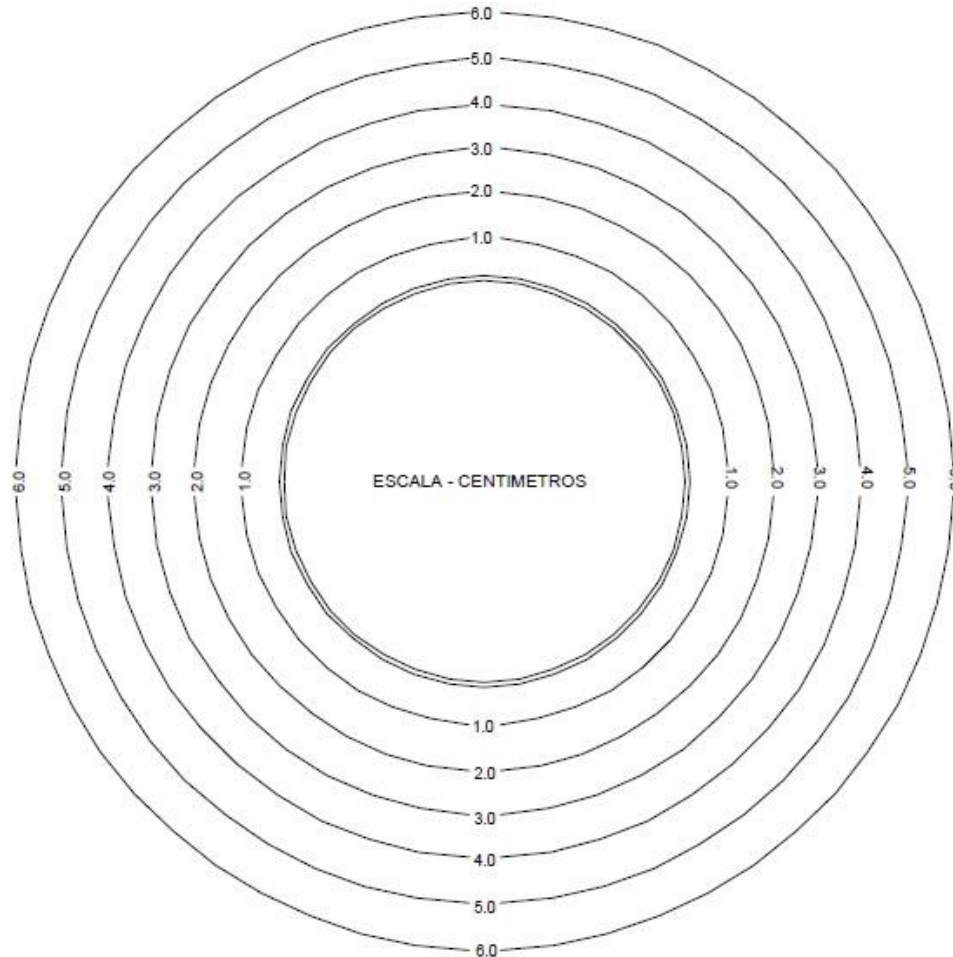
La emulsión asfáltica, constante en el proceso de fabricación de lechadas asfálticas es del tipo CSS-1h.

3.4. Desarrollo experimental.

3.4.1. Consistencia de lechadas asfálticas.

Se realizarán mezclas de lechadas asfálticas con los distintos contenidos de escoria de cobre. La cantidad de agua de la mezcla determinara la trabajabilidad de las lechadas asfálticas.

Sobre una placa de escurrimiento indicada en la ilustración 3.1 se pone un molde troncocónico con el diámetro mayor hacia abajo, y centrado, luego se deposita la mezcla de lechada asfáltica en el molde y se levanta de manera vertical, dejando desplazar la mezcla sobre la placa de escurrimiento. Se registra el desplazamiento en centímetros (con aproximación de 0,5) tomando el promedio de cuatros puntos que deja la escala de círculos. Cuando el promedio se encuentre entre 2-3, se entenderá que la mezcla de lechada asfáltica tiene una consistencia adecuada de trabajo, y el porcentaje de agua agregado será el indicado.



*Ilustración 3.1 "Placa de escurrimiento para ensaye de consistencia de lechadas asfálticas"
(Fuente: Manual de Carreteras. Volumen 8.)*

3.4.2. Desgaste de lechadas asfálticas.

Se confeccionarán probetas circulares, que serán de 27 cm de diámetro y de espesor 1,15 veces el tamaño máximo absoluto, y se someterán a la acción abrasiva de una goma en equipo tipo Hobart durante 5 minutos.



*Ilustración 3.2 “Equipo de abrasión en medio húmedo.”
(Fuente: Curso Laboratorista MOP.)*

El desgaste de lechada asfáltica estará en función de la masa de la probeta antes del desgaste, la masa de la probeta después del desgaste, y el área de desgaste de la probeta de lechada asfáltica.

La variable dependiente estará dada por el peso perdido por el desgaste en la superficie de la probeta sometida a la abrasión en medio húmedo (gr/m^2). La variable independiente está dada por la cantidad de emulsión asfáltica de la mezcla puesta en la probeta (% emulsión asfáltica).

3.4.3. Exudación de lechadas asfálticas.

Se confeccionarán probetas rectangulares previamente curadas y moldeadas de 381 mm de longitud, 51 mm de ancho, y con un espesor de 1,25 veces el tamaño máximo nominal del agregado. Las probetas serán colocadas bajo la acción de una rueda neumática cargada (56 kg) que pasara en forma cíclica sobre la superficie en una razón de 1000 ciclos (ida y vuelta), se colocarán 300 gr de arena normalizada y caliente sobre la superficie de la probeta y se repetirán 100 ciclos adicionales. La arena se pegará a la superficie de acuerdo con el nivel de exudación presentado por la probeta.



Ilustración 3.3 “Equipo de rueda de carga.”
(Fuente: Curso Laboratorista MOP.)

La exudación de la lechada asfáltica estará en función de la masa inicial de la probeta, masa final de la probeta, el área de probeta para adherencia de arena y el contenido de asfalto.

La variable dependiente estará dada por el peso adherido en la superficie de la probeta sometida a la rueda de carga (gr/m²). La variable independiente está dada por la cantidad de emulsión asfáltica de la mezcla puesta en la probeta (% emulsión asfáltica).

Tabla 3.2 “Cantidad máxima de arena adherida para verificar diseño según método de rueda de carga.”

TMDA vehículos/día	Adhesión de arena (gr/m ²) Max.
< 500	750
500 a 1000	650
> 1000	540

(Fuente: Manual de carretera. Volumen 8.)

CAPÍTULO IV: RESULTADO EXPERIMENTAL.

4. Resultados.

4.1. Resultados escoria de cobre.

4.1.1. Granulometría de la escoria de cobre según método 8.202.3.

El tamaño máximo absoluto y el tamaño máximo nominal de la muestra se indican en la tabla 4.1

Tabla 4.1 “Tamaño máximo absoluto y tamaño máximo nominal de la muestra de escoria de cobre.”

Tamaño máximo absoluto de la muestra (Da)	20 (mm)
Tamaño máximo nominal de la muestra (Dn)	20(mm)

(Fuente: Elaboración propia.)

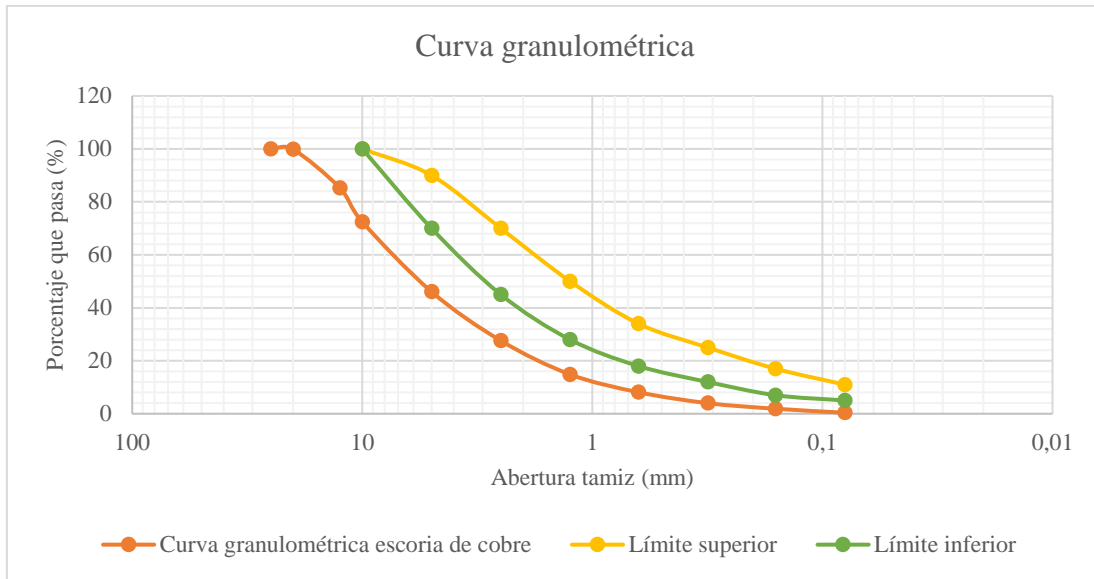
La granulometría de la muestra se indica en la tabla 4.2 y su curva granulométrica en la ilustración 4.1.

Tabla 4.2 “Granulometría escoria de cobre”

Tamices		Peso Retenido	% Retenido	% Que Pasa
(mm)	(ASTM)			
	1"	0	0	100,0
20	3/4"	10	0,15	99,9
12.5	1/2"	996	14,65	85,2
10	3/8"	868	12,76	72,4
5	N.º 4	1794	26,38	46,1
2,5	N.º 8	1256	18,47	27,6
1,25	N.º 16	866	12,74	14,9
0,63	N.º 30	458	6,74	8,1
0,315	N.º 50	280	4,12	4,0
0,16	N.º 100	144	2,12	1,9
0,08	N.º 200	102	1,50	0,4

(Fuente: Elaboración propia.)

La granulometría de la muestra de escoria de cobre de botadero de la División Ventana de Codelco no cumple con la Banda granulométrica Tipo C-1. Esta fuera de los límites superior e inferior, como se indica en la ilustración 4.1.



*Ilustración 4.1 “Curva granulométrica de muestra de escoria de cobre”
(Fuente: Elaboración propia.)*

4.1.2. Material fino menor que 0,08 mm según método 8.202.4.

Tabla 4.3 “Material fino menor que 0,08 mm.”

Peso muestra inicial	615 gr	J
Peso muestra final	600 gr	K
Diferencia	15 gr	$L=(J-K)$
Fino por lavado	2,44 gr	$(L/J)*100$

(Fuente: Elaboración propia.)

4.1.3. Densidad aparente de la escoria de cobre según método 8.202.19.

Tabla 4.4 "Densidad aparente suelta"

Muestra	Molde (gr)	Molde + escoria de cobre (gr)	Escoria de cobre (gr)	Volumen molde (gr)	Da (kg/m ³)
1	3287	9996	6709	3019	2,222
2	3287	9817	6530	3019	2,163
				Promedio	2,193

(Fuente: Elaboración propia.)

4.1.4. Densidad real (ρ_{RS}), densidad neta (ρ_N) y absorción de agua (α) en pétreos gruesos (escoria de cobre) según método 8.202.20.

Tabla 4.5 "Densidad real, densidad neta y absorción de agua en pétreos gruesos (escoria de cobre)."

Muestra	Peso SSS	Peso sumergido	Peso seco	Densidad real seca (kg/m ³)	Densidad neta (kg/m ³)	Absorción
1	2723	2011	2714	3811,80	3860,60	0,33
2	2198	1621	2191	3797,23	3843,86	0,32
				Promedio	3804,51	0,33

(Fuente: Elaboración propia.)

4.1.5. Densidad real (ρ_{RS}), densidad neta (ρ_N) y absorción de agua (α) en pétreos finos (escoria de cobre) según método 8.202.21.

Tabla 4.6 "Densidad real, densidad neta y absorción en pétreos finos (escoria de cobre)."

Muestra	Peso matraz + agua	Peso SSS	Peso seco	Peso matraz + agua + escoria de cobre	Densidad real seca (kg/m ³)	Densidad neta (kg/m ³)	Absorción
1	647,7	230,1	229,26	817,7	3814,64	3868,71	0,37
2	643	210	209,31	797,7	3784,99	3832,81	0,33
				Promedio	3799,82	3850,76	0,35

(Fuente: Elaboración propia.)

4.2. Desarrollo de lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón.

4.2.1. Requisitos de los áridos para lechadas asfálticas con árido tradicional proveniente de Bitumix Concón.

Tabla 4.7 "Requisitos de los áridos para lechadas asfálticas."

Ensaye	Resultado	Exigencia	Método
Equivalente Arena.	49,7%	Min. 45%	8.202.9
Desgaste de los Ángeles	14,7%	Max 25%	8.202.11
Índice de Plasticidad.	NP	NP	8.102.4
Adherencia Riedel-Weber.	2-7	0 - 5	8.302.30
Índice de Trituración Total.	2,8%	Max 3,5%	8.202.8
Adherencia Método Estático.	>95%	Min 95%	8.302.29
Partículas Chancadas.	100%	Min 90%	8.202.6

(Fuente: Elaboración propia.)

4.2.2. Granulometría árido proveniente de Bitumix Concón.

La granulometría del árido proveniente de Bitumix Concón está dentro de los límites de la banda granulométrica Tipo C-1 para lechadas asfálticas como se indica en la tabla 4.8, y como se muestra en la ilustración 4.2. La granulometría del árido Bitumix Concón será reproducida en peso por escoria de cobre, en su reemplazo parcial o total, según corresponda.

Tabla 4.8 "Granulometría de árido Bitumix Concón Tipo C-1 para lechadas asfálticas."

Tamices		% Retenido	% Que Pasa
(mm)	(ASTM)		
	1"	0	100
20	3/4"	0	100
12.5	1/2"	0	100
10	3/8"	0	100
5	N.º 4	14	86
2,5	N.º 8	30	56
1,25	N.º 16	18	38
0,63	N.º 30	11	27
0,315	N.º 50	8	19
0,16	N.º 100	5	14
0,08	N.º 200	4	10

(Fuente: Elaboración propia.)

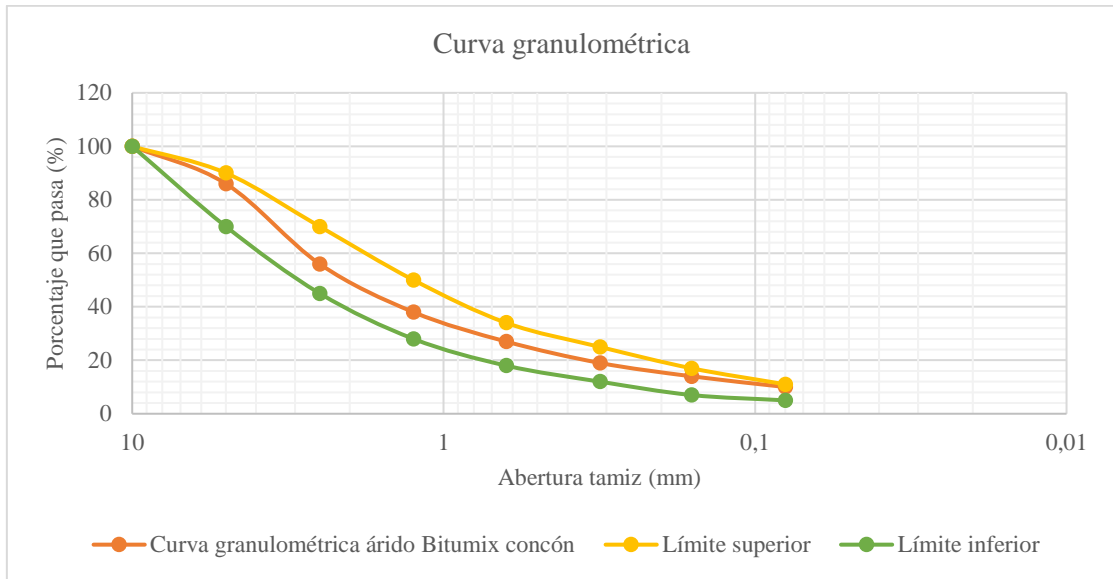


Ilustración 4.2 "Curva granulométrica árido Bitumix Concón."
(Fuente: Elaboración propia.)

4.2.3. Análisis de emulsión asfáltica CSS-1h.

Los resultados del análisis de emulsión asfáltica indicados en la tabla 4.9 cumple con los parámetros establecidos en el manual de carretera.

Tabla 4.9 "Análisis emulsión asfáltica tipo CSS-1h"

Análisis	Resultado	Especificación	
		Min	Max
Viscosidad a 25°C, (sSf)	43	20	100
Estabilidad en almacenamiento, 24 horas (%)	0,08	-	1
Tamizado, (%)	0,02	-	0,1
Carga de partícula	Positiva	Positiva	
Residuo por destilación, (%)	63,3	57	-
Ensayes al residuo			
Penetración a 25 °C, 100g, 5s, (0,1mm)	70	40	90
Ductilidad a 25 °C, 5cm/min., (cm)	66,4	40	-
Ensaye de la mancha, (% xilol)	-30	-	30

(Fuente: Química latinoamericana.)

4.2.4. Diseño de lechada asfáltica con árido Bitumix Concón.

La emulsión teórica es un parámetro tentativo que indica una cercanía al porcentaje óptimo de emulsión de mezclas de lechadas asfálticas.

Calculo de la superficie específica para la determinación de la emulsión teórica.

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

Tabla 4.10 "Coeficientes para determinar la superficie específica"

a	b	c	d	e
0	14	67	9	10

(Fuente: Elaboración propia.)

Cálculo de la emulsión teórica.

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

Donde:

Et: Emulsión teórica tentativa referida al agregado seco (%).

R: Residuo asfáltico de la Emulsión. (decimal)

Los resultados del cálculo de la superficie específica, para luego poder encontrar la emulsión teórica se encuentran detallados en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 “Resultado de superficie específica y emulsión asfáltica teórica.”

Superficie específica	16,2
Residuo asfáltico de la emulsión (decimal)	0,630
Emulsión teórica tentativa referida al agregado seco (%)	11,5

(Fuente: Elaboración propia.)

4.2.5. Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón.

Mediante pruebas de tanteo variando el porcentaje de agua referido al agregado seco se determinó que el contenido de agua para que la trabajabilidad de la lechada asfáltica con árido de Bitumix Concón es 7% referido al peso del agregado seco como se indica en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con árido de Bitumix Concón.”

Consistencia	
Agua	Trabajabilidad de lechada asfáltica
10%	Sobrepasado
7%	2-3
5%	Baja

(Fuente: Elaboración propia.)

4.2.6. Dosificaciones de lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón.

La dosificación de las mezclas de lechada asfáltica con árido de Bitumix Concón que serán sometidas al método de abrasión en medio húmedo se indica en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas patrón para ensayo de abrasión en medio húmedo.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	PA.1	PA.2	PA.3
Contenido de Emulsión	8	11	14
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	7	7	7

(Fuente: Elaboración propia.)

La dosificación de las mezclas de lechada asfáltica con árido de Bitumix Concón que serán sometidas al método rueda de carga se indica en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas patrón para ensayo de rueda de carga.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	PB.1	PB.2	PB.3
Contenido de Emulsión	8	11	14
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	7	7	7

(Fuente: Elaboración propia.)

4.2.7. Resultado método de abrasión en medio húmedo y método de rueda de carga de lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón.

Los resultados obtenidos del método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón se muestran la tabla 4.15.

Tabla 4.15 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
PA.1	8	7	1243,2	1227,5	0,0174366	898,72
PA.1	8	7	1222,7	1203,1	0,0206120	952,04
PA.1	8	7	1287,9	1273,0	0,0158368	938,50
PA.2	11	7	1302,6	1298,7	0,0172034	228,12
PA.2	11	7	1311,3	1305,5	0,0169717	342,63
PA.2	11	7	1285,6	1279,9	0,0191134	298,32
PA.3	14	7	1263,9	1260,5	0,0193593	176,30
PA.3	14	7	1198,1	1194,4	0,0167415	222,88
PA.3	14	7	1205,4	1201,4	0,0208672	189,58

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones como se indica en la tabla 4.16.

Tabla 4.16 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón.”

	%Emulsión	%Agua	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
PA.1	8	7	929,75
PA.2	11	7	289,69
PA.3	14	7	196,25

(Fuente: Elaboración propia.)

El grafico de pérdida de abrasión en medio húmedo vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.3.



*Ilustración 4.3 “Gráfico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco”
(Fuente: Elaboración propia.)*

Los resultados obtenidos del método de rueda de carga para lechadas asfálticas con árido de Bitumix Concón se muestran la tabla 4.17.

Tabla 4.17 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Rueda de carga gr/m ²
PB.1	8	7	712,8	717,1	0,01355	318,21
PB.1	8	7	678,4	682,4	0,01355	296,54
PB.1	8	7	721,3	724,1	0,01355	203,36
PB.2	11	7	699,1	703,3	0,01355	309,02
PB.2	11	7	705,8	710,3	0,01355	332,63
PB.2	11	7	710,9	714,5	0,01355	267,32
PB.3	14	7	677,2	682,6	0,01355	397,30
PB.3	14	7	708,6	712,9	0,01355	316,33
PB.3	14	7	715,3	721,2	0,01355	437,77

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones según se indica en la tabla 4.18

Tabla 4.18 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con árido Bitumix Concón.”

	%Emulsión	%Agua	Rueda de carga gr/m ²
PB.1	8	7	272,70
PB.2	11	7	302,99
PB.3	14	7	383,80

(Fuente: Elaboración propia.)

El grafico de adherencia de arena vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.4.

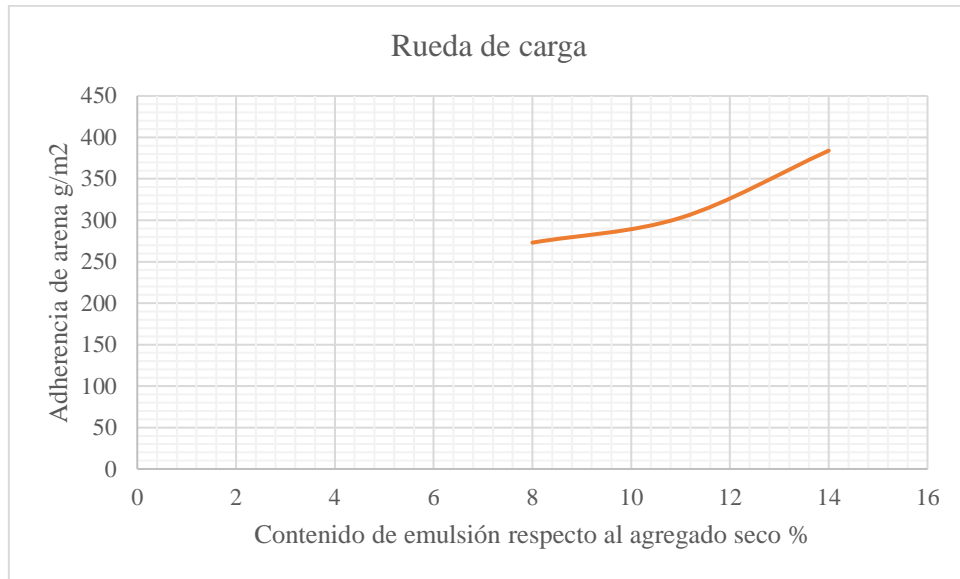


Ilustración 4.4 “Gráfico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco”
(Fuente: Elaboración propia.)

4.2.8. Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con árido de Bitumix Concón.

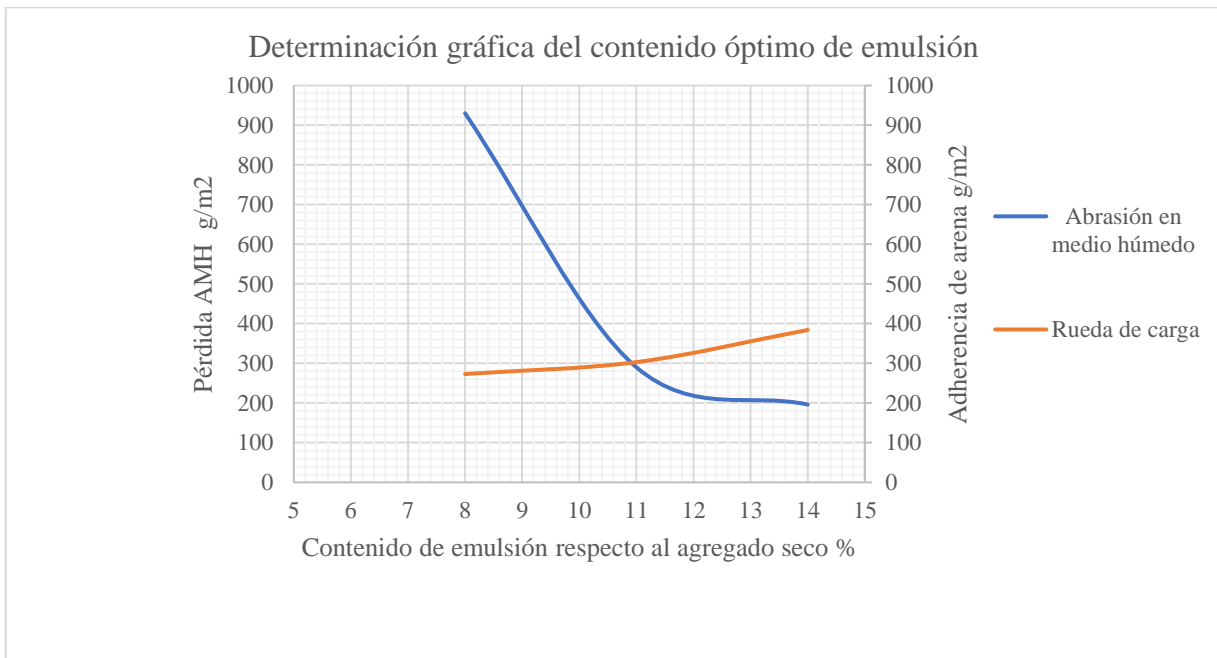


Ilustración 4.5 “Contenido óptimo de emulsión referido al agregado seco.”
(Fuente: Elaboración propia.)

El contenido óptimo de emulsión asfáltica se infiere de la intersección que se representa en el gráfico. Según indica la ilustración 4.5. El contenido óptimo de emulsión asfáltica corresponde a un 11%.

4.2.9. Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.*Tabla 4.19 “Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con árido de Bitumix Concón.”*

Emulsión CSS-1h	11%	$\pm 0,5\%$
Agua	7%	$\pm 2\%$

(Fuente: Elaboración propia.)

4.3. Reemplazo parcial y total del árido tradicional por escoria de cobre

4.3.1. Requisitos de la escoria de cobre para ser utilizada como árido para lechadas asfálticas.

La escoria de cobre cumple con las exigencias de los áridos para lechadas asfálticas como se muestra en la tabla 4.20.

Tabla 4.20 “Requisitos de los áridos para lechadas asfálticas.”

Ensaye	Resultado	Exigencia	Método
Equivalente Arena.	46%	Min. 45%	8.202.9
Desgaste de los Ángeles	19,76%	Max 25%	8.202.11
Índice de Plasticidad.	NP	NP	8.102.4
Adherencia Riedel-Weber.	2-9	0 - 5	8.302.30
Índice de Trituración Total.	2,2%	Max 3,5%	8.202.8
Adherencia Método Estático.	>95%	Min 95%	8.302.29
Partículas Chancadas.	100%	Min 90%	8.202.6

(Fuente: Elaboración propia.)

4.4. Análisis de emulsión asfáltica CSS-1h.

Los resultados de las exigencias de la emulsión asfáltica CSS-1h se encuentran en la tabla 4.9.

4.5. Diseño de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre.

4.5.1. Emulsión teórica.

La emulsión teórica depende netamente de la superficie específica y el residuo asfáltico de la emulsión asfáltica, como se indica en el capítulo 4.2.4. Sin embargo, al ocupar la variable de la superficie específica en mezclas de lechadas asfálticas con contenido de escoria de cobre se aprecia un exceso de emulsión asfáltica debido a que la escoria de cobre ocupa un mayor peso en un volumen menor al ser comparado con un árido tradicional propiamente tal., en consecuencia, mediante la experiencia visual se determinó que el porcentaje de emulsión teórica con respecto al peso del agregado seco ira en disminución a medida que se aumente el contenido de escoria de cobre en mezclas de lechadas asfálticas.

4.5.2. Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.



Ilustración 4.6 “Materiales para determinar la consistencia de lechadas asfálticas.”
(Fuente: Elaboración propia.)

Mediante pruebas de tanteo variando el porcentaje de agua referido al agregado seco se determinó que el contenido de agua para que la trabajabilidad de la lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre es 2,5% referido al peso del agregado seco como se indica en la tabla 4.21.

Tabla 4.21 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre.”

Consistencia	
Agua	Trabajabilidad de lechada asfáltica
10%	Sobrepasado
5%	Sobrepasado
2,5%	2-3

(Fuente: Elaboración propia.)



*Ilustración 4.7 “Consistencia adecuada de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre.”
(Fuente: Elaboración propia.)*

4.5.3. Dosificaciones de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.

Las dosificaciones de las mezclas de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre serán sometidas al método de abrasión en medio húmedo se indica en la tabla 4.22.

Tabla 4.22 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre para ensayo de abrasión en medio húmedo.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	M.IIIA1	M.IIIA2	M.IIIA3
Contenido de Emulsión	5	7	10
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	2,5	2,5	2,5

(Fuente: Elaboración propia.)

La dosificación de las mezclas de lechada asfáltica con reemplazo total de escoria de cobre que serán sometidas al método rueda de carga se indica en la tabla 4.23.

Tabla 4.23 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre para ensayo de rueda de carga.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	M.IIB1	M.IIB2	M.IIB3
Contenido de Emulsión	5	7	10
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	2,5	2,5	2,5

(Fuente: Elaboración propia.)

4.5.4. Resultado método de abrasión en medio húmedo de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.

Tabla 4.24 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
M.IIA1	5	2,5	1509,9	1505,9	0,0151747	263,60
M.IIA1	5	2,5	1558,2	1552,6	0,0181458	308,61
M.IIA1	5	2,5	1600,9	1598,0	0,0136848	211,91
M.IIA2	7	2,5	1404,1	1400,3	0,0151747	250,42
M.IIA2	7	2,5	1611,8	1608,4	0,0151747	224,06
M.IIA2	7	2,5	1575,7	1572,2	0,0162860	214,91
M.IIA3	10	2,5	1582,8	1580,6	0,0162860	135,09
M.IIA3	10	2,5	1555,2	1553,9	0,0138929	93,573
M.IIA3	10	2,5	1435,5	1432,4	0,0181458	170,84

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones según se indica en la tabla 4.25.

Tabla 4.25 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
M.IIIA1	5	2,5	261,37
M.IIIA2	7	2,5	229,79
M.IIIA3	10	2,5	133,17

(Fuente: Elaboración propia.)

El grafico de pérdida de abrasión en medio húmedo vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.8.

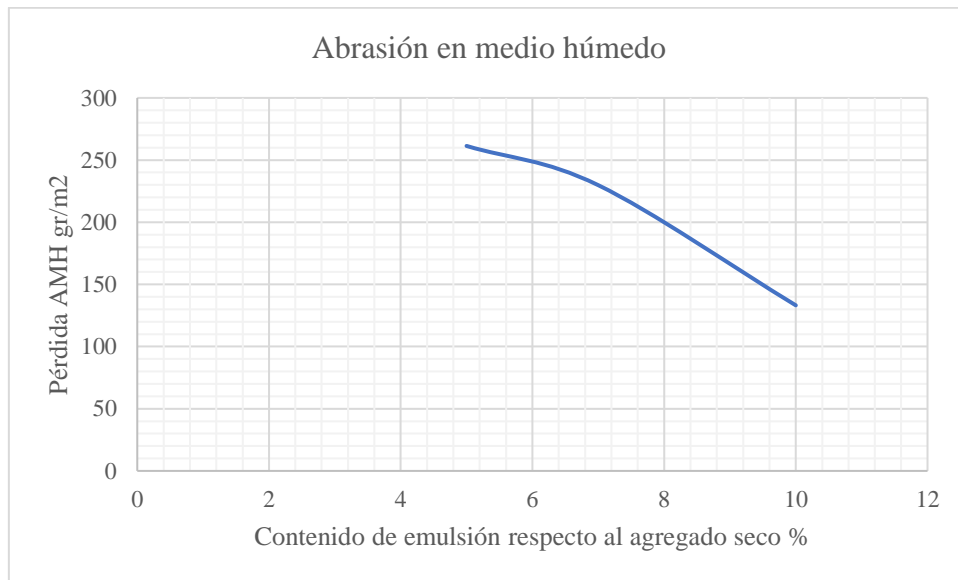


Ilustración 4.8 “Gráfico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco”

(Fuente: Elaboración propia.)

4.5.5. Resultado de método de rueda de carga de lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.

Tabla 4.26 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Rueda de carga gr/m ²
M.IIIA1	5	2,5	812,8	815,8	0,01355	221,40
M.IIIA1	5	2,5	942,4	945,0	0,01355	191,88
M.IIIA1	5	2,5	784,9	787,2	0,01355	169,74
M.IIIA2	7	2,5	769,2	773,0	0,01355	280,44
M.IIIA2	7	2,5	851,8	856,7	0,01355	361,62
M.IIIA2	7	2,5	924,1	928,3	0,01355	309,96
M.IIIA3	10	2,5	794,0	799,0	0,01355	369,00
M.IIIA3	10	2,5	812,2	818,8	0,01355	487,08
M.IIIA3	10	2,5	745,7	751,0	0,01355	391,14

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método de rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones según se indica en la tabla 4.27.

Tabla 4.27 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Rueda de carga gr/m ²
M.IIIA1	5	2,5	194,34
M.IIIA2	7	2,5	317,34
M.IIIA3	10	2,5	415,74

(Fuente: Elaboración propia.)

El gráfico de adherencia de arena vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.9.

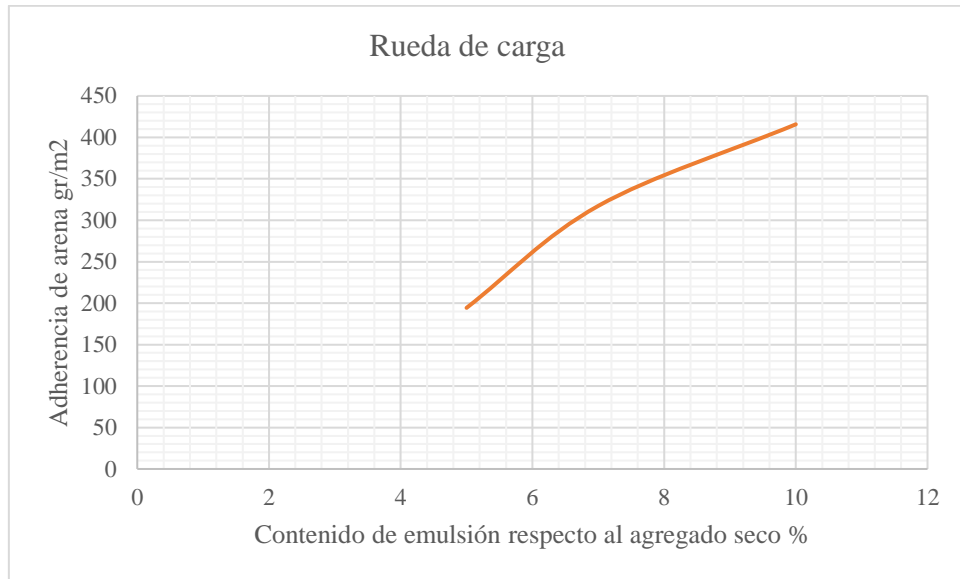


Ilustración 4.9 “Gráfico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco”
(Fuente: Elaboración propia.)

4.5.6. Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con reemplazo total de escoria de cobre.

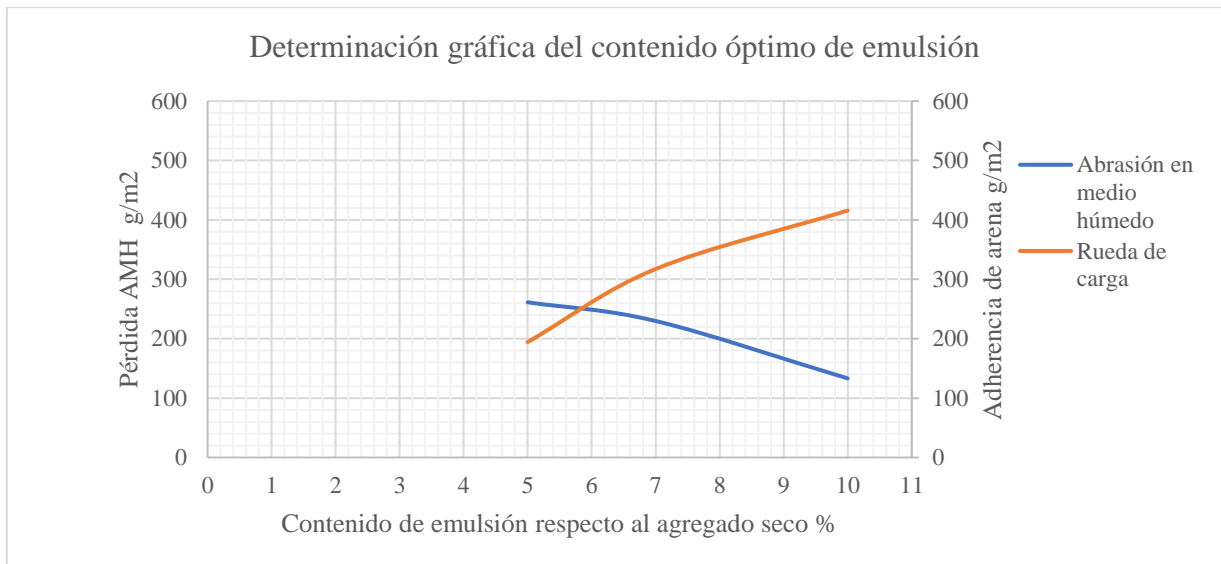


Ilustración 4.10 “Contenido óptimo de emulsión referida al agregado seco con reemplazo total de escoria de cobre.”
(Fuente: Elaboración propia.)

El contenido óptimo de emulsión asfáltica se infiere de la intersección que se representa en el gráfico. Según indica la ilustración 4.10. El contenido óptimo de emulsión asfáltica corresponde a un 5,8%.

4.5.7. Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.

Tabla 4.28 “Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con reemplazo total de escoria de cobre.”

Emulsión CSS-1h	5,8%	± 0,5%
Agua	2,5%	± 2%

(Fuente: Elaboración propia.)

4.6. Diseño de lechada asfáltica con reemplazo de 60% de escoria de cobre.

4.6.1. Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.

Mediante pruebas de tanteo variando el porcentaje de agua referido al agregado seco se determinó que el contenido de agua para que la trabajabilidad de la lechada asfáltica con reemplazo de 60% de escoria de cobre es 3,5% referido al peso del agregado seco como se indica en la tabla 4.29.

Tabla 4.29 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”

Consistencia	
Agua	Trabajabilidad de lechada asfáltica
5%	Sobrepasado
4%	Sobrepasado
3,5%	2-3

(Fuente: Elaboración propia.)

4.6.2. Dosificaciones de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.

Las dosificaciones de las mezclas de lechada asfáltica con reemplazo de 60% de escoria de cobre serán sometidas al método de abrasión en medio húmedo se indica en la tabla 4.30.

Tabla 4.30 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre para ensayo de abrasión en medio húmedo.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	M.IIA1	M.IIA2	M.IIA3
Contenido de Emulsión	6	9	11
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	3,5	3,5	3,5

(Fuente: Elaboración propia.)

La dosificación de las mezclas de lechada asfáltica con reemplazo de 60% de escoria de cobre que serán sometidas al método rueda de carga se indica en la tabla 4.31.

Tabla 4.31 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre para ensayo de rueda de carga.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	M.IIB1	M.IIB2	M.IIB3
Contenido de Emulsión	6	9	11
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	3,5	3,5	3,5

(Fuente: Elaboración propia.)

4.6.3. Resultado método de abrasión en medio húmedo de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.

Tabla 4.32 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
M.IIA1	6	3,5	1353,8	1340,7	0,0232352	563,80
M.IIA1	6	3,5	1330,5	1318,3	0,0224318	543,87
M.IIA1	6	3,5	1327,8	1315,1	0,0211241	601,21
M.IIA2	9	3,5	1366,5	1359,7	0,0213825	318,02
M.IIA2	9	3,5	1200,2	1194,2	0,0224318	267,48
M.IIA2	9	3,5	1377,6	1372,1	0,0208672	263,57
M.IIA3	11	3,5	1349,4	1345,8	0,0248846	144,67
M.IIA3	11	3,5	1248,6	1245,5	0,0203583	152,27
M.IIA3	11	3,5	1356,3	1352,5	0,0221671	171,43

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones tal como se indica en la tabla 4.33.

Tabla 4.33 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	% Agua	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
M.IIA1	6	3,5	569,63
M.IIA2	9	3,5	283,02
M.IIA3	11	3,5	156,12

(Fuente: Elaboración propia.)

El grafico de pérdida de abrasión en medio húmedo vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.11.

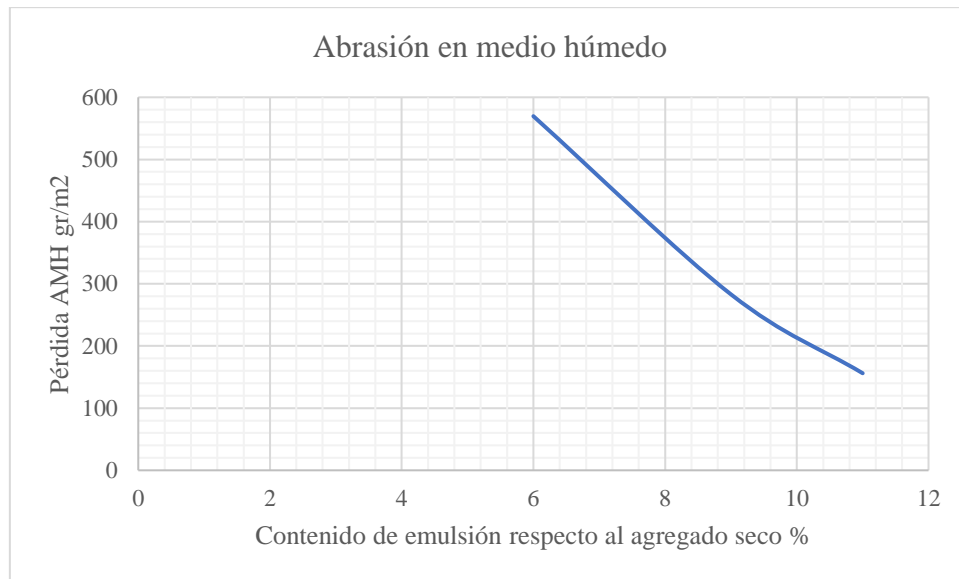


Ilustración 4.11 “Gráfico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco.”

(Fuente: Elaboración propia.)

4.6.4. Resultado método de rueda de carga de lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.

Tabla 4.34 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Rueda de carga gr/m ²
M.IIA1	6	3,5	754,4	756,4	0,01355	147,60
M.IIA1	6	3,5	700,0	701,8	0,01355	132,84
M.IIA1	6	3,5	765,2	767,1	0,01355	140,22
M.IIA2	9	3,5	793,3	797,7	0,01355	324,72
M.IIA2	9	3,5	817,3	821,6	0,01355	317,34
M.IIA2	9	3,5	796,6	801,1	0,01355	332,10
M.IIA3	11	3,5	798,7	805,4	0,01355	494,46
M.IIA3	11	3,5	713,4	720,3	0,01355	509,23
M.IIA3	11	3,5	676,2	683,5	0,01355	538,75

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones tal como se indica en la tabla 4.35.

Tabla 4.35 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Rueda de carga gr/m ²
M.IIB1	6	3,5	140,22
M.IIB2	9	3,5	324,72
M.IIB3	11	3,5	514,15

(Fuente: Elaboración propia.)

El grafico de adherencia de arena vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.12.

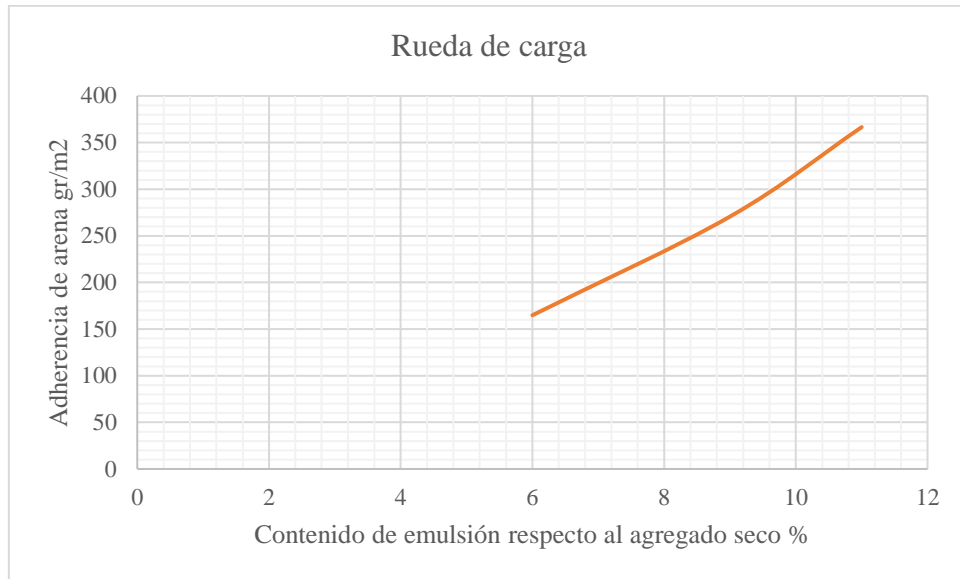


Ilustración 4.12 “Gráfico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco”
(Fuente: Elaboración propia.)

4.6.5. Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con reemplazo de 60% de escoria de cobre.

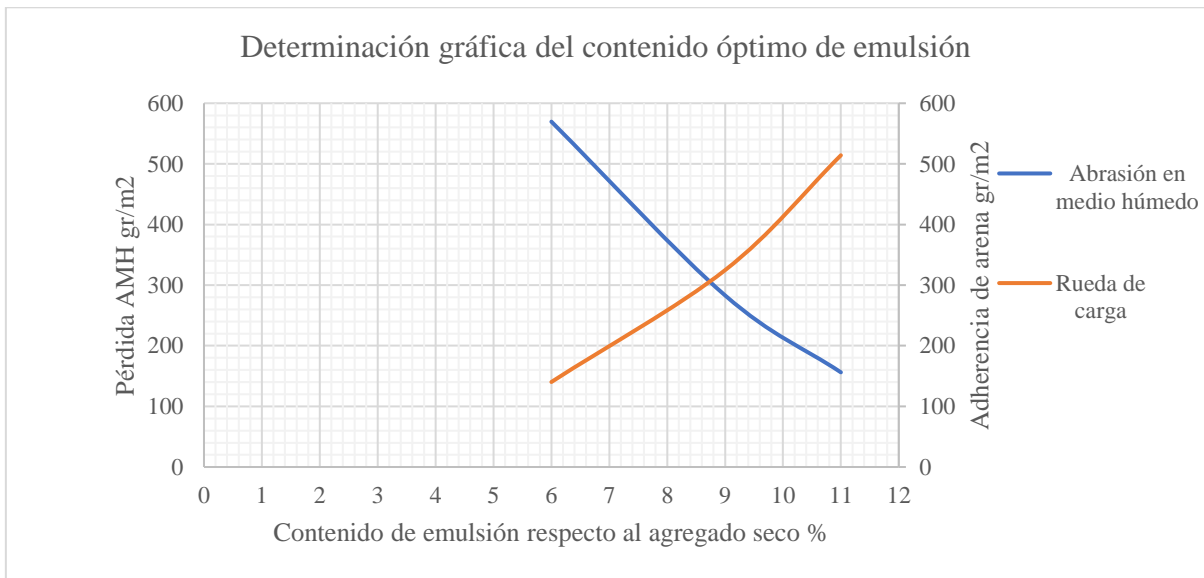


Ilustración 4.13 “Contenido óptimo de emulsión referido al agregado seco con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”

(Fuente: Elaboración propia.)

El contenido óptimo de emulsión asfáltica se infiere de la intersección que se representa en el gráfico. Según indica la ilustración 4.13. El contenido óptimo de emulsión asfáltica corresponde a un 8,7%.

4.6.6. Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.

Tabla 4.36 "Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con reemplazo de 60% de escoria de cobre."

Emulsión CSS-1h	8,7%	± 0,5%
Agua	3,5%	± 2%

(Fuente: Elaboración propia.)

4.7. Diseño de lechada asfáltica con reemplazo de 30% de escoria de cobre.

4.7.1. Consistencia de mezcla de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.

Mediante pruebas de tanteo variando el porcentaje de agua referido al agregado seco se determinó que el contenido de agua para que la trabajabilidad de la lechada asfáltica con reemplazo de 30% de escoria de cobre es 5,5% referido al peso del agregado seco como se indica en la tabla 4.37.

Tabla 4.37 “Determinación de consistencia de lechada asfáltica con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”

Consistencia	
Agua	Trabajabilidad de lechada asfáltica
7%	Sobrepasado
5,5%	2-3
4%	Muy baja

(Fuente: Elaboración propia.)

4.7.2. Dosificaciones de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.

Las dosificaciones de las mezclas de lechada asfáltica con reemplazo de 30% de escoria de cobre serán sometidas al método de abrasión en medio húmedo se indica en la tabla 4.38.

Tabla 4.38 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre para ensayo de abrasión en medio húmedo.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	M.IA1	M.IA2	M.IA3
Contenido de Emulsión	7	10	13
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	5,5	5,5	5,5

(Fuente: Elaboración propia.)

La dosificación de las mezclas de lechada asfáltica con reemplazo de 30% de escoria de cobre que serán sometidas al método rueda de carga se indica en la tabla 4.39.

Tabla 4.39 “Dosificación de mezclas de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre para ensayo de rueda de carga.”

Componente	Porcentaje referido al agregado		
	M.IB1	M.IB2	M.IB3
Contenido de Emulsión	7	10	13
Filler	0	0	0
Agua de premezclado	5,5	5,5	5,5

(Fuente: Elaboración propia.)

4.7.3. Resultado método de abrasión en medio húmedo de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.

Tabla 4.40 “Abrasión en medio húmedo en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
M.IA1	7	5,5	1353,8	1340,7	0,0232352	563,80
M.IA1	7	5,5	1330,5	1317,3	0,0224318	588,45
M.IA1	7	5,5	1244,9	1233,7	0,0213825	523,79
M.IA2	10	5,5	1366,5	1360,7	0,0213825	271,25
M.IA2	10	5,5	1200,2	1193,2	0,0224318	312,06
M.IA2	10	5,5	1252,7	1247,5	0,0211241	246,16
M.IA3	13	5,5	1349,4	1345,8	0,0248846	144,67
M.IA3	13	5,5	1248,6	1245,5	0,0203583	152,27
M.IA3	13	5,5	1391,7	1388,6	0,0198557	156,13

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones como se muestra en la tabla 4.41.

Tabla 4.41 “Resultado método abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Abrasión en medio húmedo gr/m ²
M.IA1	7	5,5	558,68
M.IA2	10	5,5	276,49
M.IA3	13	5,5	151,02

(Fuente: Elaboración propia.)

El grafico de pérdida de abrasión en medio húmedo vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.14.

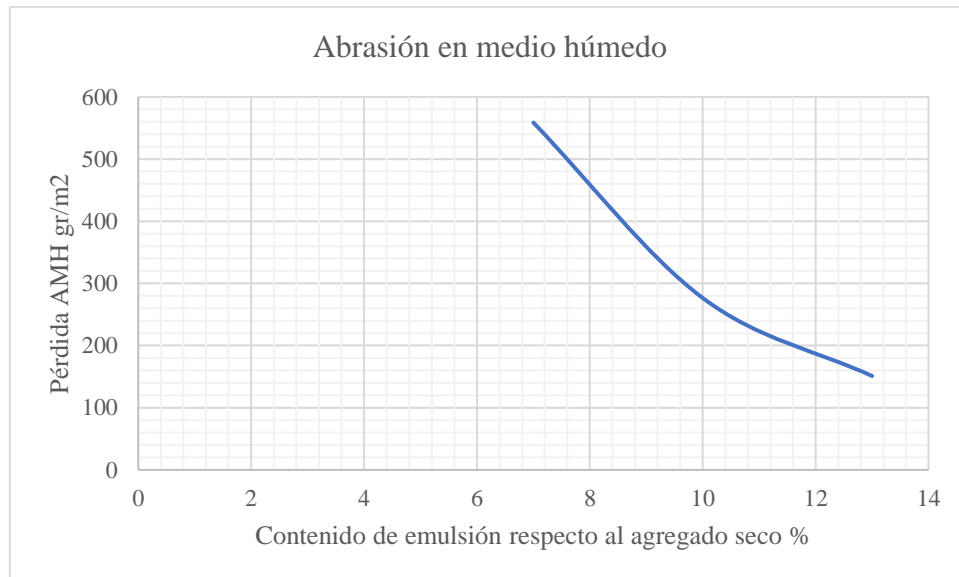


Ilustración 4.14 “Gráfico Pérdida de abrasión en medio húmedo vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco.”

(Fuente: Elaboración propia.)

4.7.4. Resultado método de rueda de carga de lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.

Tabla 4.42 “Rueda de carga en función del porcentaje de emulsión asfáltica para un contenido de agua total constante en lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Mi (gr)	Mf (gr)	Área (m ²)	Rueda de carga gr/m ²
M.IB1	7	5,5	767,9	769,7	0,01355	132,84
M.IB2	7	5,5	711,0	713,2	0,01355	162,36
M.IB3	7	5,5	689,4	692,1	0,01355	199,26
M.IB1	10	5,5	834,1	838,5	0,01355	324,72
M.IB2	10	5,5	766,6	769,5	0,01355	214,02
M.IB2	10	5,5	726,2	729,9	0,01355	273,06
M.IB3	13	5,5	798,7	803,4	0,01355	346,86
M.IB3	13	5,5	713,4	718,8	0,01355	398,52
M.IB3	13	5,5	676,2	681,0	0,01355	354,24

(Fuente: Elaboración propia.)

El resultado final de método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre será el promedio de las distintas dosificaciones como se muestra en la tabla 4.43.

Tabla 4.43 “Resultado método rueda de carga para lechadas asfálticas con reemplazo de 30% de escoria de cobre.”

	%Emulsión	%Agua	Rueda de carga gr/m ²
M.IB1	7	5,5	164,82
M.IB2	10	5,5	270,60
M.IB3	13	5,5	366,54

(Fuente: Elaboración propia.)

El grafico de adherencia de arena vs el contenido de emulsión asfáltica respecto al agregado seco se indica en la ilustración 4.15.

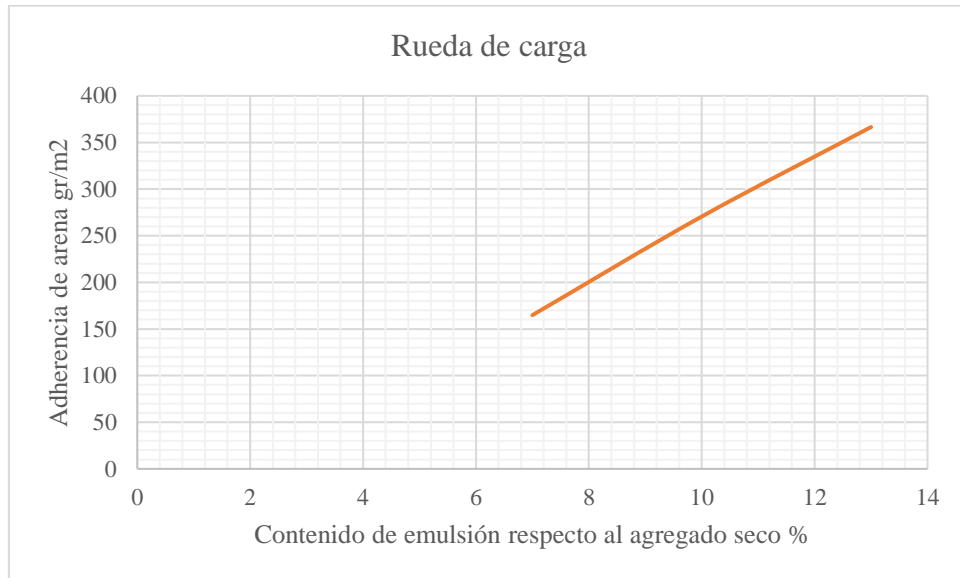


Ilustración 4.15 “Gráfico Adherencia de arena vs Contenido de emulsión respecto al agregado seco”
(Fuente: Elaboración propia.)

4.7.5. Contenido de emulsión asfáltica óptima referida al agregado seco con reemplazo de 30% de escoria de cobre.

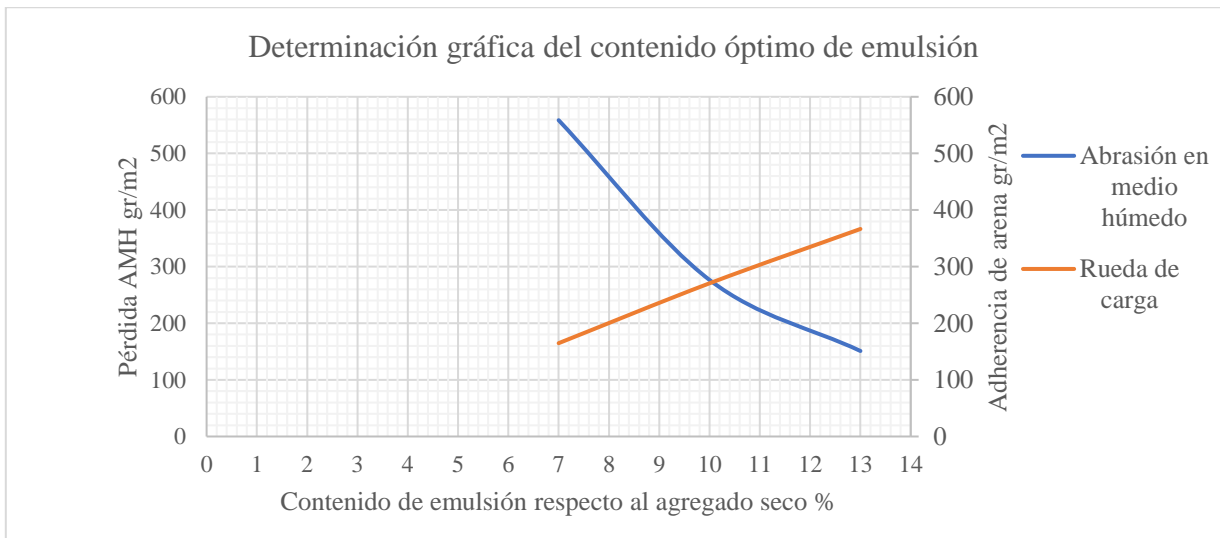


Ilustración 4.16 “Contenido óptimo de emulsión referido al agregado seco con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”
(Fuente: Elaboración propia.)

El contenido óptimo de emulsión asfáltica se infiere de la intersección que se representa en el gráfico. Según indica la ilustración 4.16. El contenido óptimo de emulsión asfáltica corresponde a un 10%.

4.7.6. Dosificación recomendada con respecto al agregado seco en peso.

Tabla 4.44 “Dosificación recomendada para lechadas asfálticas Tipo C-1 con reemplazo de 60% de escoria de cobre.”

Emulsión CSS-1h	10%	± 0,5%
Agua	5,5%	± 2%

(Fuente: Elaboración propia.)

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.

5. Análisis y conclusiones.

5.1. Análisis.

5.1.1. Consistencia de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.

A medida que el contenido de escoria de cobre va aumentando en las mezclas de lechadas asfálticas, el contenido de agua de premezclado para asegurar la trabajabilidad de lechadas asfálticas va disminuyendo.

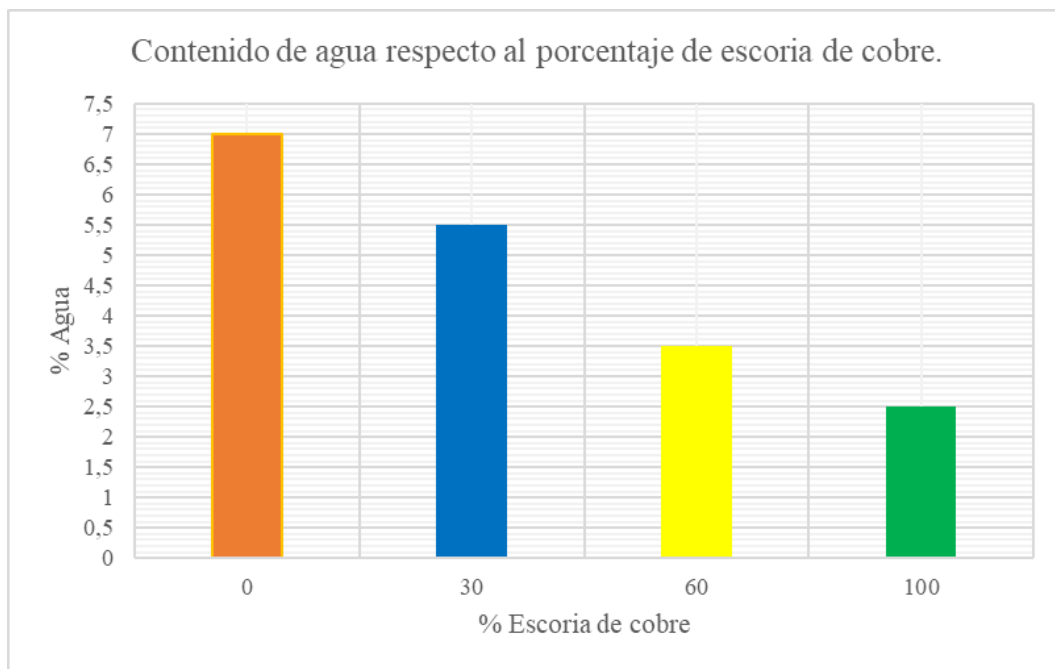


Ilustración 5.1 “Gráfico contenido de escoria de cobre vs contenido de agua en lechadas asfálticas con distinto contenido de escoria de cobre.”
(Fuente: Elaboración propia.)

5.1.2. Desgaste de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.

Las lechadas asfálticas con contenido de escoria de cobre sufren un menor desgaste. A medida que el contenido de escoria de cobre va aumentando en las mezclas de lechadas asfálticas el desgaste por abrasión en medio húmedo se ve disminuido.

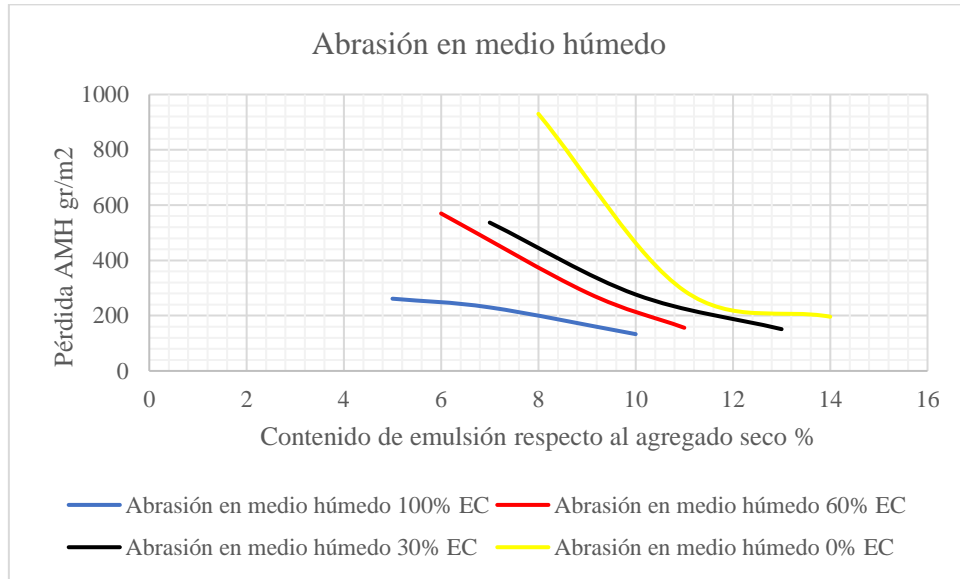


Ilustración 5.2 “Gráfico de desgaste de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.”
 (Fuente: Elaboración propia.)

5.1.3. Exudación de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.

Las lechadas asfálticas con contenido de escoria de cobre aumentan la exudación. A medida que se aumenta el contenido de escoria de cobre la exudación de mezclas de lechadas asfálticas se ve aumentada.

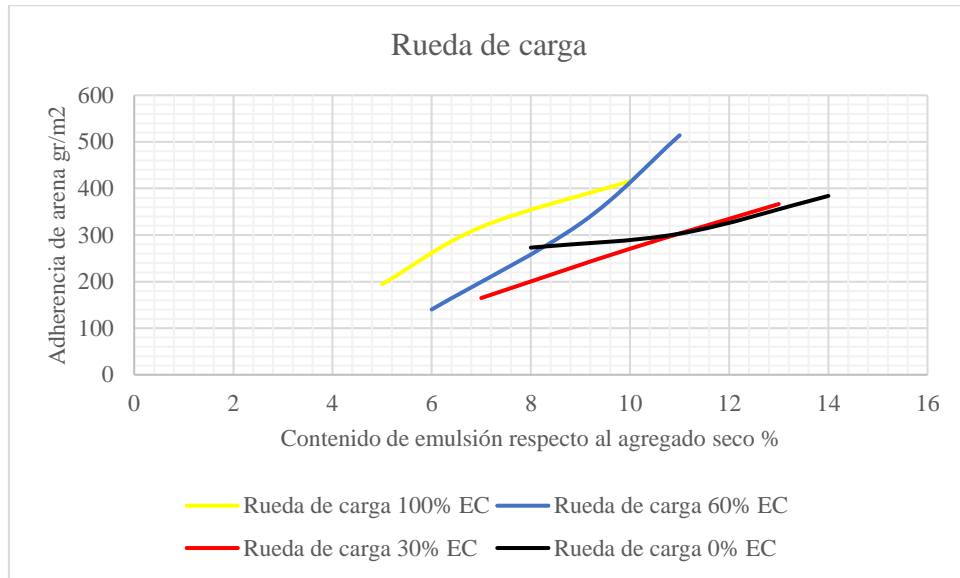


Ilustración 5.3 “Grafico de exudación de lechadas asfálticas con distintos contenidos de escoria de cobre.”
(Fuente: Elaboración propia.)

5.2. Conclusiones.

Las lechadas asfálticas son un método de conservación para pavimentos que se encuentran desgastados o levemente agrietados, este tipo de tratamiento asfáltico es un método preventivo que tiene que ser utilizado antes que se produzcan daños estructurales en las carpetas asfálticas existente, de lo contrario, será un gasto de recurso innecesario.

Un uso adecuado y a tiempo de lechadas asfálticas rejuvenecerá el pavimento, mejorando las características antideslizantes, y también deteniendo la oxidación del pavimento, alargando la vida útil y ahorrando en la construcción de una nueva carpeta asfáltica, que sin un método preventivo terminará siendo dañada por completo.

Mediante la investigación se evaluó la influencia del contenido en peso de la escoria de cobre en la elaboración de lechadas asfálticas. Parámetros como las características físicas de la escoria de cobre, consistencia, desgaste y exudación de la mezcla de lechada asfáltica fueron estudiadas arrojando resultados factibles para la elaboración.

En mezclas de lechadas asfálticas con distintos contenidos escoria de cobre se determinó la consistencia de las lechadas asfálticas, donde se determinó agregar 2,5 % de agua para lechadas asfálticas con reemplazo total de escoria de cobre; 3,5% de agua para lechadas asfálticas con 60% de reemplazo de escoria de cobre, y 5,5% de agua para lechadas asfálticas con 30% de reemplazo de escoria de cobre, en cambio, para árido tradicional proveniente de Bitumix Concón fue de 7%.

Los resultados obtenidos indicaron que a medida que se aumenta el contenido de escoria de cobre en las mezclas de lechadas asfálticas, el contenido de agua disminuye debido a que la escoria de cobre tiene un 0,33% de absorción, en cambio, el árido proveniente de Bitumix Concón tiene 1,73% de absorción de agua.

Cabe destacar que en los resultados obtenidos del ensayo de desgaste de los ángeles la escoria de cobre según indica la tabla 4.20. sufrió un mayor desgaste que el árido tradicional según indica la tabla 4.7., el mayor desgaste de la escoria de cobre está influenciado también por la densidad del material, lo que implica que este pese más por unidad de volumen, generando una mayor fuerza de impacto, por tanto, no es extraño que en el parámetro mencionado la escoria de cobre tenga valores más altos, pero dentro de las exigencias establecidas por el manual de carretera para el ensayo de desgaste de los ángeles.

En lo que se refiere al desgaste de lechadas asfálticas, este es provocado por la pérdida del ligante, seguido progresivamente por el árido, esto tiene su origen en la cohesión que se logra entre el ligante y el árido.

Mediante el método de abrasión en medio húmedo, los resultados indicaron que, al aumentar el contenido de escoria de cobre en mezclas de lechadas asfálticas, el desgaste disminuía. Esta disminución de debe principalmente a que la cohesión del agregado de escoria de cobre y el ligante asfáltico (emulsión asfáltica css-1h) es mejor que la cohesión de agregado tradicional y ligante asfáltico.

Según resultados de los agregados, los valores de densidad aparente suelta, y valores como la densidad real seca de la escoria de cobre están por sobre las del árido tradicional, sin embargo, los resultados de porcentaje de huecos en los agregados indican que el comportamiento es muy similar, por tanto, una dosificación con árido tradicional o con escoria de cobre se deberían comportar de manera parecida al ser sometidas al tránsito, sin presenciar exudación. sin embargo, los resultados de lechadas asfálticas con distinto contenido de escoria de cobre indican que a medida que se aumenta el contenido de escoria de cobre las mezclas de

lechadas asfálticas presentan un aumento en su exudación, sin embargo, en algunos puntos de la curva de mezclas de lechadas asfálticas con árido proveniente de Bitumix concón la exudación es mayor, debe quedar claro que el punto de emulsión óptima está por debajo de las demás curvas, quedando así evidenciado el aumento de exudación a medida que se aumenta el contenido de escoria de cobre en las mezclas de lechadas asfálticas.

Los poros accesibles en menor cantidad que presenta la escoria de cobre son responsables de que la exudación se vea aumentada a medida un mayor contenido de escoria de cobre en mezclas de lechadas asfálticas, debido a que, el árido tradicional tiene mayor cantidad de poros accesibles.

Las lechadas asfálticas con contenido parcial y total de escoria de cobre cumplen con las exigencias establecidas para la elaboración de lechadas asfálticas, para así poder dar características antideslizantes, rejuvenecer, proteger y detener la oxidación de carpetas asfálticas existentes que están sometidas a un constante desgaste y cargas de tránsito.

ANEXOS.

Anexo A.

i. Densidad real, densidad neta y absorción de pétreos gruesos. Árido Bitumix Concón.

Tabla i.1 “Densidad real, densidad neta, y absorción de árido Bitumix Concón.”

Muestra	Peso SSS	Peso sumergido	Peso seco	Densidad real seca (kg/m ³)	Densidad neta (kg/m ³)	Absorción
1	2184	1371	2155	2650,68	2748,72	1,35
2	2158	1360	2118	2654,14	2794,20	1,89
Promedio				2652,41	2771,46	1,62

(Fuente: Elaboración propia.)

ii. Densidad aparente suelta de árido Bitumix Concón.

Tabla i.2 “Densidad aparente suelta árido Bitumix Concón.”

Muestra	Molde (gr)	Molde + escoria de cobre (gr)	Escoria de cobre (gr)	Volumen molde (m ³)	Da (kg/m ³)
1	3535	8066	4531	0,003001	1509,83
2	3535	8068	4533	0,003001	1510,50
Promedio					1510,163

(Fuente: Elaboración propia.)

iii. Densidad real, densidad neta, y absorción de pétreos finos. Árido Bitumix Concón.

Tabla i.3 “Densidad real, densidad neta, y absorción de pétreos finos Bitumix Concón.”

Muestra	Peso matraz + agua	Peso SSS	Peso seco	Peso matraz + agua + escoria de cobre	Densidad real seca (kg/m ³)	Densidad neta (kg/m ³)	Absorción
1	647,7	172	169,1	755,7	2642,19	2767,59	1,71
2	643	163	160,2	734,9	2253,16	2345,53	1,75
Promedio					2447,68	2556,56	1,73

(Fuente: Elaboración propia.)

iv. Determinación del porcentaje de huecos de los áridos.

$$V = 1 - \frac{Da}{Dr}$$

En donde:

V: Porcentaje de huecos del agregado.

Da: Densidad aparente suelta.

Dr: Densidad real seca.

iv.1.Determinación del porcentaje de huecos de árido Bitumix Concón.

Tabla i.4 “Porcentaje de huecos árido Bitumix Concón.”

Densidad real seca (kg/m ³)	Densidad aparente suelta (kg/m ³)	Porcentaje de huecos (%)
2652,41	1510,16	43,06

(Fuente: Elaboración propia.)

iv.2.Determinación del porcentaje de huecos de la escoria de cobre.

Tabla i.5 “Porcentaje de huecos escoria de cobre.”

Densidad real seca (kg/m ³)	Densidad aparente suelta (kg/m ³)	Porcentaje de huecos (%)
3804,51	2192,61	42,37

(Fuente: Elaboración propia.)

Anexo B.**I. Elaboración de mezclas de lechadas asfálticas.**

En la elaboración de lechadas asfálticas a una muestra de escoria de cobre granulométricamente establecida se le agrega una cantidad de agua según indique su dosificación, en consecuencia, su porcentaje referido al agregado seco, posteriormente se revuelve durante 2-3 minutos, para así, luego agregar la emulsión asfáltica en su porcentaje referido al agregado seco, revolviendo durante 3 minutos y obtener la mezcla deseada.



*Ilustración 0.1 "Elaboración de mezclas lechadas asfálticas."
(Fuente: Elaboración propia.)*

II. Proceso de ensayo de lechadas asfálticas.

Las mezclas de lechadas asfálticas luego de ser vertidas en sus respectivos moldajes y posteriormente haberse producido el quiebre de estas, se someten a sus respectivos ensayos con los equipos de abrasión en medio húmedo y rueda de carga.



*Ilustración 0.2 “Ensayo de abrasión en medio húmedo y rueda de carga.”
(Fuente: Elaboración propia.)*

BIBLIOGRAFÍA.

Bibliografía.

- ANGIOLANI, A. 1960. Introducción a la química industrial; Fundamentos químicos y tecnológicos con 150 figuras. Santiago, Editorial Andres Bello. 700 p.-
- BEHNOOD, A., MODIRI GHAREHVERAN, M., GOZALI ASL, F. & AMERI, M. 2015. Effects of copper slag and recycled concrete aggregate on the properties of CIR mixes with bitumen emulsion, rice husk ash, Portland cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 96, 172-180.
- BENÍTEZ BARRETO, A., ARAUJO GARCÉS, A. E. & ZAPATA RAMÍREZ, K. M. 2015. Evaluación de la resistencia de una mezcla asfáltica tibia, sustituyendo en su fabricación, parte del agregado pétreo, por escoria de alto horno.
- BROCK, D. 1994. Oxidación del asfalto. Boletín Técnico T-103S. Astec Industries Inc.
- CENDOYA, P. 2009. EFECTO EN LA RESISTENCIA DE LAS ESCORIAS DE FUNDICIÓN DE COBRE COMO AGREGADO FINO EN EL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DEL HORMIGÓN. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 17, 85-94.
- DEMETRIO, S., AHUMADA, J., DURÁN, M. Á. & MAST, E. 2000. Slag cleaning: the Chilean copper smelter experience. *JOM*, 52, 20.
- DUARTE, U. SLURRY SEAL, UNA RESPUESTA A LA NECESIDAD DE CONSERVACION VIAL. DECIMO SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERIA DE PAVIMENTOS, 1995.
- GORAI, B. & JANA, R. 2003. Characteristics and utilisation of copper slag—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 39, 299-313.
- KNEER, I. A. O. INFLUENCIA DE LAS ESCORIAS DE COBRE EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN.
- LEÓN, A., FERNANDO, L. & PULIDO RONCANCIO, F. A. 2015. Estudio de tratamiento superficial Slurry Seal para conservación de pavimentos flexibles incorporando gravas finas para mejorar características de textura superficial.
- MAYORGA CALDERON, M. Análisis prospectivo del mineral de cobre en el mundo, Latinoamérica y Colombia.
- MELLER, P. 2012. El rol del cobre para que Chile alcance el pleno desarrollo. Santiago: Grupo Antofagasta Minerals.

- MUÑOZ RODRÍGUEZ, H. 2013. Análisis de pavimentación (mdc-3) mejoradas con escorias (no ferrosas) de fundición de cobre (ensayo marshall inv-e 748-07). Universidad Militar Nueva Granada.
- NAZER, A., PAVEZ, O., ROJAS, F. & AGUILAR, C. UNA REVISIÓN DE LOS USOS DE LAS ESCORIAS DE COBRE.
- PUNDHIR, N., KAMARAJ, C. & NANDA, P. 2005. Use of copper slag as construction material in bituminous pavements.
- PÉREZ MEJÍAS, Y. E. A. 2017. UTILIZACIÓN DE ESCORIA DE COBRE DE CODELCO VENTANAS COMO AGREGADO PETREO PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES ASFÁLTICOS SIMPLES EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO.
- RAPOSEIRAS, A., MOVILLA, D., VARGAS, A., BILBAO, R. & CIFUENTES, C. 2017. Evaluación de rigidez Marshall, tracción indirecta y módulo resiliente en mezclas asfálticas con RAP y escoria de cobre. Revista ingeniería de construcción, 32, 15-24.
- RONDÓN QUINTANA, H. A., RUGE CÁRDENAS, J. C. & MORENO ANSELMI, L. Á. 2016. Efecto del agua sobre el asfalto y su posible influencia en el daño por humedad en una mezcla asfáltica porosa. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 24, 558-569.
- SEPÚLVEDA ESTAY, C. A. 2006. Utilización de Escorias de Fundición para la Producción de Compuestos de Hierro.
- SHI, C., MEYER, C. & BEHNOOD, A. 2008. Utilization of copper slag in cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling, 52, 1115-1120.
- WU, W., ZHANG, W. & MA, G. 2010. Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete. Materials & Design, 31, 2878-2883.
- ZÚÑIGA, R. 2015. Mezcla asfáltica en caliente. Santiago de Chile: Autor.