



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de la Utilización de Escoria,
Producto de la Extracción de Cobre,
como Árido para Pavimentos Flexibles.

Por

Sergio Sebastián Herrera Bustos

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

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Enero, 2016

Dedicatoria

Este trabajo de título, lo dedico a mis padres Sergio Herrera y Marlene Bustos quienes me han dado más que la vida y son mi ejemplo a seguir, a mi novia Margarita la mujer que cambió mi forma de ver el mundo y que es un apoyo fundamental, a mis hermanos Francisco, Gerardo y Sergio por su apoyo moral y económico sin condiciones.

A mi hermana Priscilla quien fue mi compañera de infancia y mi mejor amiga, aunque no esté presente sé que estará orgullosa de este logro.

A Dios quien me ha permitido empezar y finalizar cada etapa de mi vida.

A mis amigos de toda la vida y los que he conocido en la Universidad, quienes son parte de los momentos buenos y malos, de las locuras que siempre hacen reír, los hermanos que uno elige.

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por guiar mis pasos y entregar las oportunidades que necesitaba no las que solicitaba.

A mi familia y novia por su paciencia, apoyo moral y económico durante este largo proceso que culmina, para dar origen a una nueva etapa con una base profesional.

A mi profesor guía Guillermo Brante quien me otorgo el tema y brindo sus conocimientos para resolver todas mis preguntas en el desarrollo del trabajo. Además de gestionar todos los contactos necesarios para el desarrollo de ensayos.

Al equipo de trabajo del laboratorio de vialidad de la Quinta Región, quienes me orientaron y respondieron las dudas que iba presentando.

A los profesores de la carrera de Ingeniería Civil quienes me han formado como un profesional, un Ingeniero Civil.

A la Universidad por abrir las puertas y brindarme la oportunidad de desarrollarme ética e intelectualmente.

ÍNDICE

Glosario	7
Lista figuras	9
Lista de ecuaciones	11
Lista de tablas	12
1 CAPÍTULO I: Introducción	15
1.1 Introducción	15
1.2 Planteamiento del problema	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 General	19
1.3.2 Específicos	19
1.4 Alcances	19
1.5 Metodología de trabajo	20
2 CAPÍTULO II: Marco teórico	21
2.1 Cobre	21
2.2 Escoria de cobre	22
2.2.1 Composición de la escoria de cobre	23
2.2.2 Clasificación de las escorias de Cobre	26
2.3 Áridos en pavimentos.	28
2.3.1 Requerimientos de áridos en pavimentos	28
3 CAPITULO III: Evaluación de propiedades de la escoria	36
3.1 Granulometría	36
3.2 Densidad Real, Neta y Absorción	37
3.3 Cubicidad	37
3.4 Índice de Plasticidad	38
3.5 Resistencia al Desgaste	38
3.6 Índice de Trituración	39
3.7 Sub-base y Base Granular	39
3.8 Carpeta de Rodado Granular	42
3.9 Lechada Asfáltica	43

3.10	Tratamientos Superficiales	43
3.11	Mezcla Asfáltica en Caliente	44
3.12	Mezcla Asfáltica en Frío	45
3.13	Terraplenes	45
4	CAPÍTULO IV: Análisis de alternativas propuestas	47
4.1	Base y Subbase Granular	47
4.2	Carpeta de rodado granular	47
4.3	Terraplenes	48
4.4	Lechada Asfáltica	48
4.5	Tratamiento Superficial	49
4.6	Mezclas Asfálticas en Caliente	51
4.6.1	Preparación de la mezcla asfáltica	54
4.6.2	Compactación de probetas	54
4.7	Mezclas Asfálticas en Frío	61
4.8	Escoria en Hormigón	61
5	CAPÍTULO V: Solución adoptada; diseño estructural de pavimento flexible	65
5.1	Pavimento Flexible	65
5.2	Método de diseño AASHTO 93	65
5.3	Módulo Resilinte	66
5.4	Diseño estructural del pavimento	67
5.5	Análisis de Costos	70
6	CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones.	73
6.1	Conclusiones	73
6.2	Recomendaciones	75
	Bibliografía	76
	ANEXOS	78
	A.- ENSAYOS	79
	A.1.- Proctor Modificado	80
	A.2.- CBR	82
	A.3.- Trituración del fino	84
	A.4.- Desgaste en máquina de Los Angeles	85
	B.- ANEXO FOTOGRÁFICO	86

B.1.- Fotografías generales	87
B.2.- Tratamiento Superficial	88
B.3.- Mezclas asfálticas en caliente	89
	89
C.- NOMOGRAMA DE HEUKELOM	91

Glosario

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

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

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

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

Deformabilidad: Capacidad de los materiales de agarrar de sufrir deformaciones sin llegar a romperse y provocar su desprendimiento.

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

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

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

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

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

Lechada asfáltica: Mezclas en frío de áridos naturales o chancados con emulsión asfáltica, agua, aditivos líquidos y/o en polvo, de consistencia semi-fluida.

Ligante asfáltico: Ligante de los áridos que le aportan resistencia estructural y textura a las capas. Los ligantes bituminosos proporcionan elasticidad al pavimento, característica por la cual los pavimentos bituminosos reciben el nombre de flexibles.

Mezcla asfáltica en caliente: Combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante en donde el proceso de fabricación implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental.

Mezcla asfáltica en frío: Mezcla de agregado mineral con o sin relleno mineral, con asfalto emulsionado o rebajado cuya aplicación y compactación se realiza en frío.

Módulo resiliente: Módulo que permanece constante en pruebas de carga repetida después de un cierto número de ciclos de carga.

NP: No plástico

Pavimento flexible: Aquellos cuya estructura total se defleca o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él. El uso de pavimentos flexibles se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como pueden ser vías, aceras.

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

Quiebre: Interrumpir o cortar la unión que existe entre el asfalto y el agua en una emulsión.

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

Tratamiento superficial: Aplicación de uno o más riegos alternados de asfalto y de agregado sobre una capa granular.

Terraplén: Tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra.

Lista figuras

Figura 1.1 Producción mundial de Cobre [2].	15
Figura 2.1 Minerales sulfurados [10].	21
Figura 2.2 Minerales oxidados [10].	22
Figura 2.3 Microscopia electrónica de barrido de un grano de escoria de cobre (5000x ampliación), [15].	24
Figura 2.4 Escoria granallada.	27
Figura 2.5 Escoria de botadero, de CODELCO Ventanas.	28
Figura 4.1 Ensayo de consistencia, quiebre inmediato de escoria y emulsión.	49
Figura 4.2 Cancha de prueba de tratamiento superficial simple, con árido de escoria a la izquierda y árido tradicional a la derecha.	51
Figura 4.3 Curva de reconstitución con material de escoria de cobre para de banda IV - A - 12.	52
Figura 4.4 Probetas Marshall, con porcentajes de asfalto de: 2,5%, 3%, 3.5%, 4%, 4.5% y 5%.	54
Figura 4.5 Probetas Marshall sumergidas a 60 °C, simulando condiciones desfavorables.	55
Figura 4.6 Probetas ensayadas en prensa Marshall.	56
Figura 4.7 Probetas Marshall posterior a ensayado	56
Figura 4.8 Curva densidad v/s % asfalto	58
Figura 4.9 Curva estabilidad v/s % asfalto.	58
Figura 4.10 Curva huecos v/s % asfalto	59
Figura 4.11 Curva Huecos llenos v/s % asfalto.	59
Figura 4.12 Curva VAM v/s % asfalto.	60
Figura 4.13 Curva Fluencia v/s % asfalto.	60
Figura 4.14 Probetas de hormigón con reemplazo de fracción gruesa por escoria de cobre, ensayadas a compresión.	62
Figura 5.1 Probetas con 3% de contenido óptimo de asfalto, ensayadas a tracción indirecta (ITS).	67
Figura 5.2 Estructura pavimento flexible a calcular.	71
Figura A-0.1 Gráfica Proctor Modificado y Humedad de Saturación v/s %Humedad	81
Figura A-0.2 Gráfica Resistencia v/s Deformación.	83
Figura A-0.3 Gráfica CBR v/s D.C.S.	83
Figura B-0.1 Canchas de acopio de escoria CODELCO Ventanas.	87
Figura B-0.2 Diferencias de porosidad en la muestra de escoria extraída.	87
Figura B-0.3 Tamaños de escoria, separados por granulometría.	87
Figura B-0.4 Cancha de Prueba, 1 m ² .	88
Figura B-0.5 Emulsión QL-Prime utilizada.	88
Figura B-0.6 Riego con emulsión asfáltica.	88
Figura B-0.7 Árido tradicional a la izquierda, árido de escoria a la derecha	88
Figura B-0.8 Cancha de prueba terminada.	88
Figura B-0.9 Muestras de reconstitución de banda IV-A-12.	89
Figura B-0.10 Muestras en horno sobre 165°C	89
Figura B-0.11 Preparación de probetas.	89
Figura B-0.12 Compactación marshall.	89
Figura B-0.13 Probetas marshall confeccionadas.	89

Figura B-0.14 Probetas resultantes con distintos porcentajes de asfalto.	90
Figura B-0.15 Posterior a ensayo marshall.	90
Figura B-0.16 Prensa con cabezal ITS.	90
Figura B-0.17 Posterior ensayo ITS.	90

Lista de ecuaciones

Ecuación 3.1 Estabilización mecánica	40
Ecuación 3.2 Coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura	45
Ecuación 4.1 Superficie Específica	48
Ecuación 4.2 Contenido de emulsión teórica	48
Ecuación 4.3 Contenido de agua en la mezcla	49
Ecuación 4.4 Dosis del agregado	50
Ecuación 4.5 Dosis de ligante	50
Ecuación 5.1 Ecuación AASHTO 93	66
Ecuación 5.2 Módulo Resiliente	66

Lista de tablas

Tabla 1.1 Minerales de Cobre en Chile y su producción en el año 2012 [1].	17
Tabla 2.1 Principales características físicas de la escoria de cobre.	23
Tabla 2.2 Análisis de Fluorescencia de rayos X, a muestra de la fundición de CODELCO Ventanas.	25
Tabla 2.3 Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante fluorescencia [1].	25
Tabla 2.4 Límites de consistencia o de Atterberg	29
Tabla 2.5 Bandas granulométricas para Subbase, bases y capas de rodadura.	29
Tabla 2.6 Requisitos de los áridos para subbase granular.	30
Tabla 2.7 Requisitos de los áridos para base granular.	30
Tabla 2.8 Requisitos de los áridos para carpeta de rodado granular.	31
Tabla 2.9 Requisitos de los áridos para lechada asfáltica.	31
Tabla 2.10 Granulometrías de los áridos para lechada asfáltica.	32
Tabla 2.11 requisitos de los áridos para tratamiento superficial.	32
Tabla 2.12 Granulometría de materiales para tratamientos superficiales.	32
Tabla 2.13 Requisitos de los áridos para mezclas asfálticas en caliente.	33
Tabla 2.14 Requisitos de los finos para mezclas asfálticas en caliente.	34
Tabla 2.15 Granulometría del <i>filler</i> .	34
Tabla 2.16 Requisitos para áridos combinados.	34
Tabla 2.17 Granulometría semidensa, banda IV - A - 12.	35
Tabla 3.1 Granulometría general de la escoria de cobre.	36
Tabla 3.2 Densidades y absorción de la escoria.	37
Tabla 3.3 Granulometrías, de la escoria a la izquierda y arena a la derecha.	39
Tabla 3.4 Estabilización de materiales y especificación.	40
Tabla 3.5 Estabilizado mecánico con 70% de escoria y 30% de arena.	41
Tabla 3.6 Granulometría de maicillo y su plasticidad	42
Tabla 3.7 Reconstitución con escoria de cobre y maicillo para banda granulométrica TM-40c.	42
Tabla 3.8 Resultados de escoria para los requisitos de carpeta de rodado granular.	42
Tabla 3.9 Granulometría de reconstitución banda tipo C-1.	43
Tabla 3.10 Resultados de escoria para los requisitos de lechada asfáltica.	43
Tabla 3.11 Granulometría de reconstitución TN 10-2,5.	44
Tabla 3.12 Resultados de escoria para los requisitos de tratamientos superficiales.	44
Tabla 3.13 Granulometría de reconstitución banda IV - A - 12.	44
Tabla 3.14 Resultados de escoria fracción gruesa para los requisitos de mezclas asfálticas en caliente.	45
Tabla 3.15 Resultados de escoria fracción fina para los requisitos de mezclas asfálticas en caliente.	45
Tabla 4.1 Parámetros de diseño teórico de lechada asfáltica.	49
Tabla 4.2 Especificaciones de cemento asfáltico de PROVISA.	53
Tabla 4.3 Densidades de diseño Marshall.	55
Tabla 4.4 Resultados de estabilidad y fluidez, para diseño Marshall.	57
Tabla 4.5 Valores relevantes del diseño Marshall.	57

Tabla 4.6 Resultados ensayos de compresión a hormigón H-30, con árido tradicional y reemplazo de escoria.	62
Tabla 4.7 Resumen de aplicaciones de escoria según condiciones, ventajas y desventajas.	63
Tabla 5.1 Módulo resiliente para 3% de contenido óptimo de asfalto.	67
Tabla 5.2 CBR y Módulos Resilientes para árido de escoria.	69
Tabla 5.3 CBRs y Módulos Resilientes para árido tradicional.	69
Tabla 5.4 Diferencia de espesores entre diseños.	70
Tabla 5.5 Costos unitarios actualizados.	71
Tabla 5.6 Cubicaciones y costos de obra vial para árido tradicional.	72
Tabla 5.7 Cubicaciones y costos de obra vial para árido de escoria de cobre.	72

Resumen

El presente trabajo evalúa la utilización de escoria de cobre, un residuo no contaminante, como árido en el diseño estructural de pavimentos flexibles y alternativas relacionadas como la lechada asfáltica, los tratamientos superficiales, bases de rodado granular y paralelamente su incorporación en hormigón.

Permitiendo la utilización de este material, se genera la ingeniería sustentable, al disminuir la contaminación visual de los sectores cercanos de producción de cobre y los costos en la obtención de áridos, mejorando el impacto ambiental al reducir la explotación de terrenos para la obtención de áridos.

Se analizó a nivel de laboratorio de acuerdo a la normativa del Manual de Carreteras, las propiedades físicas y mecánicas de la escoria mediante el cumplimiento de los estándares máximos y mínimos de ésta en cada una de las alternativas planteadas.

Los resultados obtenidos de la evaluación, validan el uso de la escoria de cobre como árido en el diseño estructural de pavimentos flexibles, cumpliendo los requisitos y logrando un resultado mayor en comparación con un árido tradicional.

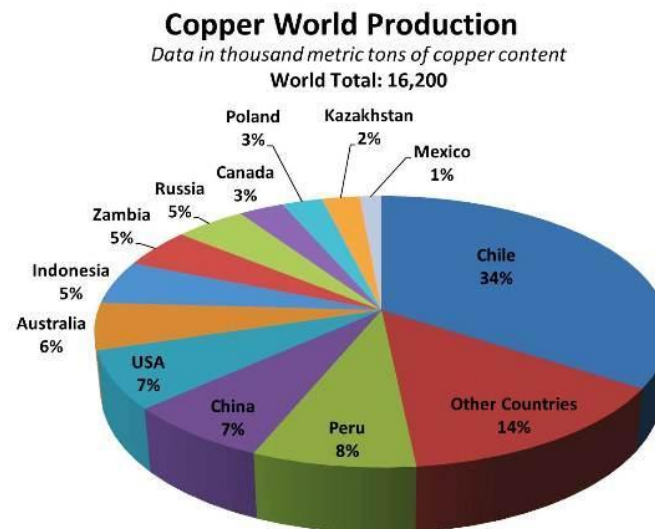
Se concluye que el uso de escoria de cobre como árido, presenta una solución viable técnica y económicamente, debido a su bajo costo de utilización. Finalmente se propone analizar comportamiento mecánico en tramos de prueba, teniendo en cuenta que Codelco Ventanas acepta ceder 525.000 [m³].

Palabras Clave: Escoria de cobre, diseño estructural, ingeniería sustentable, impacto ambiental.

1 CAPÍTULO I: Introducción

1.1 Introducción

Chile un país caracterizado por tener grandes yacimientos de muchos recursos minerales, como el cobre, posicionándose como el mayor productor en el mundo de este mineral, con un 34% en lo que corresponde a la producción mundial, un equivalente de 5.508.000 toneladas métricas, de acuerdo a las estadísticas del *American Resources*, como lo muestra la figura 1.1. Según la Corporación Chilena del Cobre (COCHILCO) [1], la compañía estatal CODELCO, es el principal productor de cobre a nivel nacional, con un 32,5%, el otro 67,5% corresponde a empresas privadas, según lo muestra la tabla 1.1.



La obtención del cobre fino, se basa principalmente en la reducción térmica de minerales sulfurados, generando grandes porcentajes de desechos sólidos, conocidos como escoria de cobre, Khanzadi *et al* (2009), indica que por cada tonelada de fino obtenida, se generan de 2,2 a 3 toneladas de escoria, acumulándose en zonas de acopio, que en su mayoría son espacios a cielo abiertos [1].

La bibliografía nacional relacionada al tema, con que se evalúa el uso de este subproducto, refleja poco interés, aunque internacionalmente se le otorga una mayor importancia a la utilización de la escoria.

La necesidad de construir caminos y la mantención de los mismos, es una condición que en la actualidad crece, la ingeniería procura obtener un diseño viable técnica y económicamente de los pavimentos, teniendo presente que en la confección de éstos, los áridos están presentes en cada etapa, como agregado grueso o fino. Chile se caracteriza por tener grandes depósitos geológicos de áridos naturales, los que actualmente son utilizados, extraídos de lechos de ríos o canteras, generando un gran costo y gran impacto ambiental.

Muy relevante es la necesidad de disminuir la contaminación ambiental, generada por este tipo de sobreexplotación, por lo que la ingeniería civil debe diseñar y/o construir, brindando soluciones sustentables en beneficio del medio ambiente y las personas. El lograr obtener mejoras en un determinado diseño o las mismas características de este con un material reciclado, es aplicar ingeniería sustentable.

En consecuencia en este trabajo se postula, que teniendo en cuenta la disponibilidad de subproductos considerados desechos, como lo son las escorias de cobre, las cuales se les puede mirar como un recurso, bajo los siguientes supuestos:

- Se encuentran en la superficie. (nulo costo de explotación)
- Los volúmenes dispuestos son conocidos.
- La recuperación, reciclaje y reutilización otorga componentes positivas (transporte, disposición, impacto ambiental)[5]

El presente trabajo de título, contempla la evaluación de uso de escoria de cobre como árido alternativo en el diseño estructural de pavimentos flexibles y otras alternativas de uso en el campo de la ingeniería, buscando aplicaciones concretas que ayuden a disminuir la acumulación masiva de este material y a la vez disminuir los costos en el diseño de pavimentos.

Tabla 1.1 Minerales de Cobre en Chile y su producción en el año 2012 [1].

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

1.2 Planteamiento del problema

El diseño de pavimentos, tanto rígidos como flexibles, tiene como componente en todas sus etapas la incorporación de áridos sean estos finos o gruesos, los cuales están clasificados por granulometría, densidad, índice de plasticidad, entre otros ensayos. Chile es un país con grandes yacimientos de áridos, también es uno de los principales productores de cobre en el mundo, aunque el efecto resultante de las operaciones de fusión y conversión en el proceso productivo del cobre, es la escoria, calificado como un material inerte, no contaminante, pero sin un uso específico, es decir es un residuo.

La escoria al ser un material sin uso se deja en sectores de acopio, generando impacto ambiental y social para los lugares vecinos a las áreas de producción del metal. Por ejemplo CODELCO División Ventanas como resultado de sus procesos productivos, genera escoria sin otorgar un uso definido, resultando un elemento visualmente contaminante para el sector.

En consecuencia y como medida sustentable para el medio ambiente y la comunidad, se plantea la utilización de escoria de cobre como agregado pétreo en el diseño de pavimentos flexibles, lo cual plantea para este tipo de solución de rodadura, el problema de verificar el cumplimiento de éste, como árido adecuado de acuerdo al cumplimiento de los requisitos y tolerancias máximas y mínimas regidos por el Manual de Carreteras.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Analizar y evaluar el uso de la escoria proveniente de Codelco División Ventanas como agregado pétreo, en el diseño de los pavimentos flexibles según normativa del Manual de Carreteras.

1.3.2 Específicos

1. Analizar antecedentes bibliográficos del uso de escoria de cobre en pavimentos.
2. Recopilar especificaciones técnicas de áridos utilizados en pavimentos flexibles.
3. Determinar si este material cumple los requisitos técnicos, haciendo uso de ensayos normalizados, según 8.202 del volumen 8 del Manual de Carreteras.
4. Analizar uso de escoria, como árido para tratamientos superficiales y/o lechada asfáltica según 5.404 del volumen 5 del Manual de Carreteras.
5. Analizar uso de escoria, como árido para mezclas asfálticas en caliente según 5.408 del volumen 5 del Manual de Carreteras.
6. Análisis de propiedades estructurales de la mezcla obtenida de escoria con ligante asfáltico, mediante metodología Marshall y determinación de modulo elástico por ensaye ITS (ensayo de tracción indirecta).
7. Proposición de soluciones viables de utilización de escoria como árido de pavimentos flexibles.

1.4 Alcances

Se utiliza escoria proveniente de zona de acopio en planta Ventanas con muestreos aleatorios, según normativa.

Se enfoca el análisis de escoria como agregado pétreo, para pavimentos flexibles.

Se considera la escoria de cobre como material inocuo para la salud de personas, de acuerdo a lo indicado por secretaria medio ambiental, no considerándose así análisis químicos.

1.5 Metodología de trabajo

1. Selección de muestras

Se tomarán muestras de escoria de diferentes puntos del acopio en Codelco Ventanas, obteniendo homogenización para los ensayos y pruebas a realizar.

2. Clasificación y ensayos

Se realizarán ensayos de propiedades de áridos para obras viales según el punto 8.101.1 del volumen 8 del Manual de Carreteras, para la escoria en general, es decir la parte fina y gruesa.

3. Alternativas de uso

Una vez conocidas las propiedades físicas de la escoria, se evaluará la alternativa de utilizarla como alguna de las posibilidades de empleo para las distintas soluciones de carpeta de rodadura flexible, es decir, carpeta de rodado granular según 5.303 del volumen 5 del Manual de Carreteras, lechada asfáltica según 5.404 del volumen 5 del Manual de Carreteras, tratamientos superficiales según 5.407 del volumen 5 del Manual de Carreteras, mezclas asfálticas en caliente según 5.408 del volumen 5 del Manual de Carreteras, mezclas asfálticas en frío según 5.409 del volumen 5 del Manual de Carreteras, base granular 5.302 según volumen 5 del Manual de Carreteras y sub-base granular para pavimentos rígidos y flexibles según 5.301 del Manual de Carreteras, terraplenes 5.205 según volumen 5 del Manual de Carreteras. Alternativamente, evaluar la posibilidad de uso para la confección de hormigón estructural y realizar ensayos de compresión.

4. Análisis de resultados.

Se analizarán los resultados obtenidos, en las diferentes aplicaciones de la escoria como árido. Si los resultados no son los esperados, mediante método de estabilización mecánica con áridos conocidos, reconstitución de bandas o el planteamiento de otras soluciones se pretende lograr el cumplimiento de la escoria como agregado pétreo, en una o más de las aplicaciones anteriores.

En la alternativa de árido de escoria en hormigón estructural, se realizará el análisis mediante la comparación de resultados con áridos tradicionales.

5. Proposición de solución viable a utilizar.

De acuerdo al análisis de resultados, se adoptará una o más soluciones a utilizar para este material. Se propondrá el diseño estructural de un pavimento flexible, mediante el método AASHTO 93, al cual se realizará el análisis y comparación de costos, en el diseño con áridos de escoria y áridos tradicionales, teniendo en cuenta que el costo máximo aceptado por el estado es de \$ 80.000.000 por kilómetro, pretendiendo lograr un costo menor.

6. Conclusiones y recomendaciones.

Las conclusiones se plantearán de acuerdo a los resultados y soluciones obtenidas.

2 CAPÍTULO II: Marco teórico

Comprendiendo que la escoria de cobre, es el elemento de evaluación, necesariamente se debe entender su origen, formación y propiedades. También las características que debe cumplir un árido según lo establecido en la normativa chilena.

2.1 Cobre

El cobre es un elemento metálico, de color rojizo. Muy demandado por la industria actual, empleándose en diversos sectores como la construcción, electricidad, electrónica y computación, por sus diversas propiedades destacando su alta conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, buen conductor térmico, ductilidad y reciclable. También en la medicina tiene valiosas aplicaciones en donde ha desarrollado estudios y demostrado que el cobre tiene propiedades biológicas antimicrobianas, dando excelentes resultados como bacteriostático / fungistático, es decir actuando como limitador del crecimiento de bacterias y hongos patógenos, antimicrobiano, previniendo el crecimiento o provocando la muerte de microbios [1],[2].

El cobre se encuentra asociado a otros minerales en forma de óxidos o sulfuros, los que son extraídos desde depósitos geológicos o yacimientos.

A grandes rasgos el cobre se puede clasificar en dos grupos:

- **Minerales sulfurados**

Frecuentemente son mezclas de sulfuros de cobre y hierro, combinados con compuestos de otros diferentes elementos. Los más importantes en minas chilenas son los mostrados en la figura 2.1 [10]:

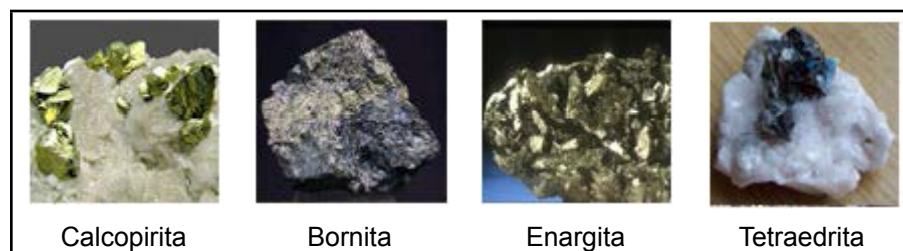


Figura 2.1 Minerales sulfurados [10].

- **Minerales oxidados**

Los minerales oxidados de cobre se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Fueron los primeros explotados. En las minas chilenas, los principales son los mostrados en la figura 2.2 [10]:



Figura 2.2 Minerales oxidados [10].

En Chile y a nivel mundial, la obtención del cobre principalmente es a partir de concentrados de minerales sulfurados, aplicando técnicas piro-metalúrgicas, que permiten la obtención de cobre metálico de alta pureza a partir de los concentrados de minerales de cobre, llevadas a cabo en fundiciones.

La piro-metalurgia del cobre comprende los procesos de fundición y la refinación del cobre, obteniéndose el cátodo de cobre como objeto final de esa cadena productiva. El cual posee un 99,99 % de pureza, es la materia prima para la obtención de nuevos materiales mediante otros procesos industriales. Chile es el mayor productor de cobre a nivel mundial por lo que el cobre es, y ha sido por muchas décadas, la base de la economía chilena [7].

A pesar que este proceso es mucho más costoso, su aplicación ha tenido un gran desarrollo, producto que los minerales sulfurados de cobre se encuentran en mayores proporciones que los minerales oxidados.

2.2 Escoria de cobre

De acuerdo a la definición de CODELCO, la escoria es un material constituido por un 90% o más de sílice y hierro, con algún contenido de cobre residual, que se separa de la mezcla fundida en el interior de hornos de reverbero o convertidores por gravedad, quedando ésta en la parte superior desde donde es retirada en forma separada de la parte donde está el cobre por vaciado del horno [10].

Son un desecho industrial, producto de los procesos piro-metalúrgicos de producción del Cobre. A pesar de ser un desecho, cumple un rol importante durante el proceso producción del metal rojo, ya que sus componentes, disminuyen el punto de fusión (1200°C), lo cual es conveniente para la operación del proceso [11].

En los procesos industriales de obtención de los metales, la escoria se define como una fase vítrea que se forma a partir de los residuos provenientes de los minerales. En los procesos piro-metalúrgicos, se diseñan escorias mediante la adición de fundentes al metal fundido, para la refinación del metal [1].

2.2.1 Composición de la escoria de cobre

La composición física y química de las escorias, depende de la materia prima usada y de la tecnología empleada. Estos sub productos industriales, están constituidos tanto por fases vítreas como cristalinas. Generalmente las escorias se producen a partir de los 1600°C, por lo que, al ser líquidas su posterior estructura cristalina/amorfa dependerá de la forma de enfriamiento. Si éste es rápido la estructura queda colapsada y es mayoritariamente amorfa y sus propiedades serán las de un material altamente reactivo [12]. De esta forma, si el enfriamiento es lento, se tendrá menor cantidad de estructura amorfa o vítrea, predominando estructuras cristalinas impidiendo la formación de nuevos enlaces.

2.2.1.1 Composición Física

Ya se ha visto, que la escoria de cobre puede tener diferentes formaciones, las que van en directa relación a las propiedades físicas. Sin embargo, se pueden observar ciertas características, que se indican en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Principales características físicas de la escoria de cobre.

Apariencia	De color negro, textura lisa para las de botadero y porosas para las granalladas
Forma de las Partículas	Irregular con bordes agudos
Densidad (kg/m ³)	3160 - 3870
Absorción de Agua (%)	0,15 - 0,55
Dureza	4 - 6
Granulometrías	Variada según su formación. Desde 4" hasta material fino menor a 0,08 mm

Un punto de análisis son las fases vítreas y cristalinas, ya que en la fase vítrea, reside el componente hidráulicamente activo de la escoria, por otro lado en la fase cristalina puede considerarse prácticamente como inerte [13]. La fase amorfa o vítrea, supera el 69% en el caso de la escoria de alto horno (EAH), de acuerdo al estudio desarrollado por Amaral (1999) [14], siendo uno de los puntos que favorece el aumento de la resistencia a compresión al fabricar hormigón con estas escorias.

De los resultados obtenidos por micrográfica, como se ve en la figura 2.3, los granos del material son esféricos de baja porosidad y de superficie lisa, además, producto de la relación de los picos de difracción con el halo amorfo en los difractograma, sugieren una formación de la estructura

básicamente cristalina [15]. El porcentaje de fase vítrea presente, puede variar desde 45% para las enfriadas lentamente, hasta 95% para las enfriadas bruscamente [2].

La escoria utilizada en este trabajo, es una escoria de enfriamiento lento como se presenta más adelante, la cual es considerada como inerte.

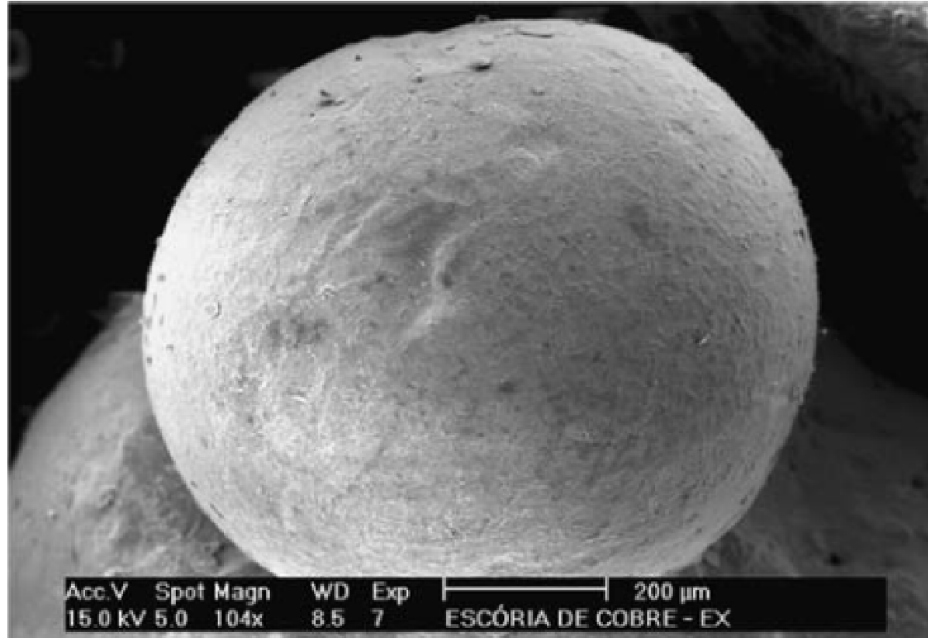


Figura 2.3 Microscopia electrónica de barrido de un grano de escoria de cobre (5000x ampliación), [15].

2.2.1.2 Composición cristaloquímica

En la composición de las escorias se observa un gran contenido de óxidos, también se caracterizan por contener altos contenidos de hierro.

De acuerdo a un estudio de fluorescencia de rayos X, es posible precisar los principales componentes de un material. La tabla 2.2, muestra las concentraciones de los elementos y óxidos presentes en una muestra de escoria de cobre de la zona de estudio, Fundición Ventanas de CODELCO, se observa que existe un 68,85% de óxido de hierro y un 19,08% de óxido de sílice, los demás elementos no se consideran relevantes [1].

La revisión de diferentes estudios, deja ver, que las escorias de cobre en general, poseen composiciones muy similares. La tabla 2.3, muestra los resultados obtenidos por varios autores, encontrándose la presencia de la escoria de botadero de Ventanas.

Tabla 2.2 Análisis de Fluorescencia de rayos X, a muestra de la fundición de CODELCO Ventanas.

Elemento	Concentración (%)	Oxido	Concentración (%)
Fe	48,16	Fe₂O₃	68,85
O	34,76		
Si	8,92	SiO₂	19,08
Zn	1,82	ZnO	2,26
Ca	1,48	CaO	2,07
Al	1,37	Al ₂ O ₃	2,59
Cu	0,86	CuO	1,08
Mg	0,57	MgO	0,95
Na	0,55	Na ₂ O	0,75
K	0,46	K ₂ O	0,55
S	0,29	SO ₃	0,73
Ti	0,18	TiO ₂	0,31
Pb	0,10	PbO ₂	0,12
Co	0,09	CoO	0,12
Ba	0,07	BaO	0,07
Mn	0,07	MnO ₂	0,11
Mo	0,06	MoO ₃	0,09
Cr	0,03	Cr ₂ O ₃	0,05
Sb	0,03	SbO ₅	0,04
Ni	0,02	NiO	0,03
P	0,02	P ₂ O ₅	0,06
Sn	0,01	SnO ₂	0,02
Zr	0,01	ZrO ₂	0,02
Sr	0,01	SrO	0,01

Origen/	Fe ₂ O ₃				Al ₂ O ₃		Mg				
Tabla STYLEREF 1 vs 2. SEQ Tabla 1* ARABIC vs 1 3 Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante fluorescencia [1].											
Concentración (%)	3				3		O				
Botadero Ventanas, Chile	68,85	19,08	2,26	2,07	2,59	1,08	0,95	0,55	0,73	0,31	0,12
Caletones (Orizola 2006)	66,76	22,76	0,29	1,23	3,44	1,43	0,76	0,68	0,61	0,52	0,04
Brasil (Moura 1999)	55	26	0,9	2	-	1,4	1,1	0,6	-	-	-
(Al-Jabri 2011)	53,42	33,05	-	6,06	2,79	0,46	0,28	0,61	1,89	-	-

2.2.2 Clasificación de las escorias de Cobre

Las escorias de cobre se pueden clasificar según:

- El grado de silicatos
- El tiempo de enfriamiento
- ✓ Escoria granallada
- ✓ Escoria de botadero
- ✓ Escoria expandida

2.2.2.1 Según grado de silicatos

La escoria de cobre se obtiene principalmente en la etapa de fundición, formándose por la adición de SiO_2 y/o CaO como fundentes, formándose así escoria fallalítica ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$). Principalmente la composición de la escoria es en base a óxidos, encontrando mayoritariamente óxidos de fierro (Fe_3O_4), óxido de sílice (SiO_2), óxidos de aluminio (Al_2O_3), óxidos de calcio (CaO), entre otros.

La sílice en esa combinación tiene la condición ácida, que además, también la tiene la alúmina, si su proporción es comparable a la de la sílice. Mientras los otros componentes tiene el carácter básico.

Las escorias fundidas tienen siempre una acción química notable sobre los materiales que vienen a contacto, esta acción, es muy diferente si su carácter químico es ácido o básico. Para ello indica opciones para evaluar este carácter según el Índice de Silicatación, si es igual a uno la escoria será neutra, si es mayor que uno es ácida, y si es menor a uno será básica. También está el Grado de Saturación en donde si es igual a uno la escoria es neutra, si es mayor a uno es básica y si es menor que uno será acida [17].

2.2.2.2 Según el tiempo de enfriamiento

Tal como se ha mencionado, la escoria es un material de descarte asociado a un proceso metalúrgico ferroso o no ferroso. La escoria de cobre, se encuentra acopiada en terrenos aledaños a las fundiciones a temperatura ambiente. Como se verá más adelante, el periodo tiempo que demore en pasar de estado líquido a sólido y alcanzar la temperatura ambiente, es fundamental en la formación de las fases Cristalinas o Vítreas, lo que afecta en el poder de reactividad del material [16].

2.2.2.2.1 Escoria Granallada

Este tipo de escoria, se obtiene cuando el material pasa de estado líquido a sólido en el menor tiempo posible. Existen varias técnicas para ello, una de ellas consiste en verter la escoria fundida, en un granallador, el que mantiene una cantidad de agua constante la cual se renueva de acuerdo a la granulación que se vaya realizando, produciéndose un enfriamiento brusco de la escoria. Una vez producida la granulación, es separada el agua de la escoria, esta última siendo llevada posteriormente a canchas de acopio [1].

En este proceso no se producen modificaciones o reacciones químicas que alteren la composición de la escoria, sino que ocurren cambios mecánicos y físicos al cambiar de estado fundente a granos sólidos, formando un material cuya estructura estará constituida mayormente por una estructura amorfa o vítrea. Este tipo de formación, provee a la escoria de cobre una mayor porosidad, aumentando la absorción de agua y con una menor densidad, ésta se muestra en la figura 2.4.



Figura 2.4 Escoria granallada.

2.2.2.2.2 Escoria de Botadero

Este es el tipo de escoria utilizada en el presente informe. Se obtiene por el simple proceso de enfriamiento lento, al verterse en estado líquido, directamente en el lugar de acopio definitivo, o en algún espacio debidamente acondicionado, para luego ser llevado a disposición final. Enfriándose lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente. Este tipo de tratamiento, facilita la cristalización del material, reduciendo la porosidad y de alguna forma limitando la posibilidad de reacción en procesos posteriores. En ella se detectan menor porcentaje de absorción de agua,

además presenta mayor densidad que las escorias granalladas. En la figura 2.5 se observa el vertido de escoria de la Fundición de Ventanas de CODELCO [1].



2.2.2.2.3 Escoria Expandida

Obtenida por enfriamiento rápido, es expandida por la aplicación de una cantidad controlada de agua, aire y vapor. La solidificación acelerada aumenta la naturaleza vesicular produciendo un material ligero que es triturado y clasificado por fracciones, para darle un mayor valor tecnológico a las escorias [16].

2.3 Áridos en pavimentos.

2.3.1 Requerimientos de áridos en pavimentos

Lograr incluir este residuo como una solución de árido alternativo, requiere el cumplimiento de la normativa actual, siendo ésta el volumen 5 y volumen 8 del Manual de Carreteras, estipulando los requerimientos que rigen para los áridos, enfocando como área de estudio la zona central del país. En el volumen 8, se distingue lo siguiente:

8.101.1 Suelos: Especificaciones para Sub-bases, Bases y Carpetas de Rodado Granular.

2.3.1.1 Requerimientos Generales

Las siguientes especificaciones definen las calidades y graduaciones de mezclas de arena – arcilla, gravas o escorias seleccionadas, arenas o material triturado proveniente de agregados pétreos o escorias o cualquier combinación de estos materiales, para ser utilizados como sub-bases, bases y capas de rodaduras [18].

1.1 Los agregados gruesos, retenidos sobre tamiz 5 mm (N° 4), deben ser partículas resistentes, durables, constituidas de fragmentos de roca, grava o escorias. Materiales que se quiebran con los ciclos de hielo-deshielo y humedad-sequedad, no deben ser usados.

1.2 Los agregados finos, que pasan por tamiz 5 mm (N° 4), deben estar constituidos por arenas naturales o trituradas y por partículas minerales que pasan por tamiz 0,08 mm (N° 200).

Las fracciones que pasan por tamiz 0,08 mm (N° 200) no deberán ser mayores que los dos tercios de la fracción que pasa por tamiz 0,5 mm (N° 40). Los límites de consistencia de la fracción que pasa por tamiz 0,5 mm estarán conformes a lo indicado en la tabla 2.4.

1.3 Todo material deberá estar libre de materias orgánicas y terrones de arcillas. La graduación de los materiales deberá estar conforme con los requerimientos de la tabla 2.5.

Tabla 2.4 Límites de consistencia o de Atterberg

	Límite Líquido	Índice de Plasticidad
Subbase	Máx. 35	Máx. 8
Base Estabilizada	Máx. 25	Máx. 8
Capa de Rodadura - Regiones IV a VI	Máx. 35	4 - 9

Tabla 2.5 Bandas granulométricas para Subbase, bases y capas de rodadura.

Tamiz (mm)	TM-50a	TM-50b	TM-50c	TM-40a	TM-40b	TM-40c	TM-25
50	100	100	100				
40	-	70 - 100	-	100	100	100	
25	55 - 100	55 - 85	70 - 100	70 - 100	80 - 100	80 - 100	100
20	-	45 - 75	60 - 90	50 - 80	-	-	70 - 100
10	30 - 75	35 - 65	40 - 75	25 - 50	50 - 80	50 - 80	50 - 80
5	20 - 65	25 - 55	30 - 60	10 - 30	35 - 65	35 - 65	35 - 65
2,5	-	-	-	5 - 15	-	-	-
2	10 - 50	15 - 45	15 - 45	-	25 - 50	25 - 50	25 - 50
0,5	5 - 30	5 - 25	10 - 30	0 - 5	10 - 30	15 - 30	10 - 30
0,08	0 - 20	0 - 10	0 - 15	0 - 3	5 - 20	5 - 20	0 - 15

Los materiales granulares dependiendo de la aplicación, deberán cumplir lo siguiente:

2.3.1.2 Requerimientos para Sub-base.

Los materiales para sub-base deberán cumplir los requerimientos generales, con la graduación TM-50a de la tabla 2.5 y los requerimientos señalados en la tabla 2.6 [20].

Tabla 2.6 Requisitos de los áridos para subbase granular.

ENSAYE	EXIGENCIA	MÉTODO
Desgaste Los Ángeles	Máx. 40%	8.202.11
Capacidad de soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S.	Mín. 40%	8.102.11

2.3.1.3 Requerimientos para Base granular

Los materiales para base granular (estabilización hidráulica) cumplirán con los requerimientos generales. Las granulometrías deberán ajustarse a una de las siguientes bandas: TM-50b, TM-50c o TM-25 de la tabla 2.5 y los requisitos presentados en la tabla 2.7 [21]:

Tabla 2.7 Requisitos de los áridos para base granular.

ENSAYE	CONCRETO ASFÁLTICO	TRATAMIENTO SUPERFICIAL	TRATAMIENTO SUPERFICIAL ALTO TRANSITO	MÉTODO
Partículas chancadas	Mín. 50%	Mín. 70%	Mín. 90%	8.202.6
Desgaste Los Ángeles	Máx. 35%	Máx. 35%	Máx. 35%	8.202.11
Capacidad de soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S.	Mín. 80%	Mín. 100%	Mín. 120%	8.102.11

2.3.1.4 Requerimientos para Carpeta de rodado granular

Cuando se prevea que la capa de rodadura va a quedar expuesta por varios años, sin una protección asfáltica, el material deberá cumplir con los requerimientos generales, los presentados en la tabla 2.8 y con una de las siguientes bandas granulométricas [22]:

- Zona Norte. Desde I a VI Regiones, ambas inclusive, se empleará la banda TM-40c.
- Zona Sur. Desde VII a XII Regiones, ambas inclusive, se empleará la banda TM-40b.

Tabla 2.8 Requisitos de los áridos para carpeta de rodado granular.

ENSAYE	EXIGENCIA	MÉTODO
Partículas chancadas	Mín. 50%	8.202.6
Desgaste Los Ángeles	Máx. 30%	8.202.11
Salas Solubles	Máx. 4%	8.202.14
Capacidad de soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S.	Mín. 60%	8.102.11

(*) CBR \geq 80% en ensayos sin inmersión

(*): CBR válido para la zona sur del país.

Los áridos dentro de las alternativas de pavimentos flexibles deben cumplir los requerimientos especificados en cada una de estas, de acuerdo al Manual de Carreteras encontrándose en el volumen 5, en los siguientes puntos se presentan los requerimientos:

2.3.1.5 Requerimientos para Lechada asfáltica

Los áridos deberán ser limpios, angulares y bien graduados.

Los áridos deberán ser chancados, aceptándose la incorporación de arena natural hasta 20% del total del árido. Los áridos deberán cumplir con los requisitos de la Tabla 2.9 y alguna de las bandas de la Tabla 2.10 [23].

Tabla 2.9 Requisitos de los áridos para lechada asfáltica.

ENSAYE	EXIGENCIA	MÉTODO
Equivalente Arena	Mín 45%	8.202.9
Índice Plasticidad	NP	8.102.4
Adherencia Riedel-Weber	0 - 5	8.302.30
Índice de Trituración Total	Máx. 3.5%	8.202.8
Adherencia Método Estático	Mín 95%	8.302.29
Partículas Chancadas	Mín 90%	8.202.6

Tabla 2.10 Granulometrías de los áridos para lechada asfáltica.

Tamiz (mm)	BANDAS GRANULOMÉTRICAS PORCENTAJE EN PESO QUE PASA			
	Tipo A-1	Tipo B-1	Tipo C-1	Tipo D-1
12,5				100
10		100	100	85 - 98
5	100	85 - 95	70 - 90	62 - 80
2,5	85 - 95	62 - 80	45 - 70	41 - 61
1,25	60 - 80	45 - 65	28 - 50	28 - 46
0,63	40 - 60	30 - 50	18 - 34	18 - 34
0,315	25 - 42	18 - 35	12 - 25	11 - 23
0,16	15 - 30	10 - 24	7 - 17	6 - 15
0,08	10 - 20	5 - 15	5 - 11	4 - 9

2.3.1.6 Tratamiento superficial

En tratamientos superficiales deberán utilizarse áridos que cumplan con las propiedades y características que se señalan en la Tabla 2.11 y los requisitos granulométricos, que se indican en la Tabla 2.12 [24].

Tabla 2.11 requisitos de los áridos para tratamiento superficial.

ENSAYES	EXIGENCIA	MÉTODO
Desgaste Los Ángeles	Máx. 25%	8.202.11
Desintegración con Sulfato de Sodio	Máx. 12%	8.202.17
Adherencia Método Estático	Mín. 95%	8.302.29
Árido Chancado	Mín. 70%	8.202.6
Lajas	Máx. 10%	8.202.6
Índice de Lajas	Máx. 30%	8.202.7
Fino por Lavado	Máx. 0.5%	8.202.4

Tabla 2.12 Granulometría de materiales para tratamientos superficiales.

Tamiz (mm)	TN 25 - 12,5	TN 20 - 10	TN 12,5 - 5	TN 10 - 2,5	TN 5 - 2,5
40	100				

25	90 - 100	100			
20	20 - 55	90 - 100	100		
12,5	0 - 10	20 - 55	90 - 100	100	
10	0 - 5	0 - 15	40 - 70	85 - 100	100
6,3	-	-	-	-	-
5	-	0 - 5	0 - 15	10 - 30	85 - 100
2,5	-	-	0 - 5	0 - 10	10 - 40
1,25	-	-	-	-	-
0,08	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5	0 - 0,5

2.3.1.7 Mezcla asfáltica en caliente

En este tipo de solución los áridos se clasifican por separado entre sección gruesa, fina y polvo mineral.

Los áridos deberán clasificarse y acopiarse separadamente en canchas habilitadas especialmente para este efecto, de manera que no se produzca contaminación ni segregación de los materiales. Los áridos deberán ajustarse a los siguientes requisitos [25].

- **Fracción Gruesa**

Corresponde a la fracción retenida en tamiz 2,5 mm (ASTM N° 8), la cual deberá estar constituida por partículas chancadas, tenaces, limpias, entiéndase por limpias, partículas libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas.

La fracción gruesa se deberá ajustar a los requisitos que se indican en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Requisitos de los áridos para mezclas asfálticas en caliente.

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

- **Fracción Fina**

Corresponde a la fracción fina que pasa por tamiz 2,5 mm (ASTM N° 8), la cual deberá estar constituida por agregados o provenientes de la trituración de rocas o gravas, las que deberán cumplir con las condiciones exigidas al árido grueso en Tabla 2.13 sobre Desgaste de Los Ángeles

Sus partículas deberán ser duras, tenaces y libres de arcilla o sustancias perjudiciales. Estos áridos se emplearán en la preparación de mezclas densas, semidensas, gruesas y finas, debiendo cumplir con los requisitos indicados en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Requisitos de los finos para mezclas asfálticas en caliente.

ENSAYES	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA				MÉTODO
	RODADURA	INTERMEDI A	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	8.102.4
Adherencia Riedel-Weber	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	8.302.30

- **Polvo Mineral (Filler)**

Si se requiere adicionar *filler* de aportación, éste deberá estar constituido por polvo mineral fino tal como cemento hidráulico, cal u otro material inerte de origen calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, debiendo ajustarse a la granulometría que se señala en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15 Granulometría del *filler*.

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

- **Mezcla de áridos**

Los áridos combinados deberán cumplir con los requisitos indicados en la Tabla 2.16. Las distintas fracciones de áridos combinarse en proporciones tales que la mezcla resultante cumpla con alguna de las bandas granulométricas específicas en las Tablas 5.408.201.E a 5.408.201.H. Especificadas en el Manual de Carreteras, en concepto de este proyecto el enfoque será para granulometría semiedensa, de la Tabla 2.17, de la cual la banda a trabajar será la IV-A-12.

Tabla 2.16 Requisitos para áridos combinados.

ENSAYES	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA			MÉTODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE	

			GRUESA	ABIERTA	
Sales solubles (máx)	2%	3%	3%	3%	8.202.4
Equivalente en arena (mín)	50%	45%	40%	50%	8.202.9

Tabla 2.17 Granulometría semidensa, banda IV - A - 12.

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

2.3.1.8 Mezcla asfáltica en frío

Las especificaciones a tratar en este punto, indican los mismos requerimientos que las mezclas asfálticas en caliente. Las combinaciones de los áridos deberán ajustarse a aquellas bandas granulométricas especificadas en las Tablas 5.409.201.A o 5.409.201.B. El análisis de este trabajo, se enfocará en una granulometría semidensa para la banda IV-A-12, que sería la misma especificación de la presentada en el punto anterior [26].

2.3.1.9 Terraplenes

Adicionalmente se realiza el análisis para terraplenes una parte muy importante dentro de las obras viales, los requerimientos de esta solución indica que los materiales estén libres de materias orgánicas y material inadecuado, además su CBR deberá mayor a 10% medido de acuerdo al 95% de la D.M.C.S. y su tamaño máximo será de 150 mm, aunque se acepta un 5% del peso total, de sobre tamaño entre 150 y 200 mm [19].

3 CAPITULO III: Evaluación de propiedades de la escoria

En este capítulo se describen los procedimientos desarrollados, en los cuales se especifican los ensayos realizados, obteniéndose las características y propiedades de la escoria, determinando si es o no posible su uso de acuerdo a los requerimientos mencionados en el capítulo 2.

De acuerdo a los antecedentes presentados en el capítulo anterior la escoria a analizar, es la clasificada como escoria de botadero, de baja porosidad y alta densidad. En CODELCO Ventanas se tomaron muestras aleatorias del sector de acopio, se homogeneizaron adecuadamente, teniendo así muestras representativas para cada ensayo que permita determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Se presentan los siguientes resultados:

3.1 Granulometría

La granulometría está definida como la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen el agregado pétreo. Ésta se determina de acuerdo al análisis granulométrico, que consiste en separar una muestra de agregado en este caso escoria, en fracciones de igual tamaño. La granulometría se expresa en función de los porcentajes que pasa en cada tamiz.

Este ensayo se realizó de acuerdo a lo descrito en la sección 8.202.3 del volumen 8 del Manual de Carreteras. Los tamices utilizados para la obtención de la granulometría según ASTM: 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", #4, #8, #16, #30, #40, #50, #100, #200.

Al obtenerse la homogenización de las muestras, se realiza la granulometría del material. Es posible observar un bajo porcentaje de arena fina de estas muestras.

Tabla 3.1 Granulometría general de la escoria de cobre.

Granulometría Escoria	
TAMICES	% PASA
3/4"	100
1/2"	84
3/8"	69
1/4"	52
N° 4	42
#8	24
#10	20,7
#16	13,8
#30	8,2
#40	6,5
#50	5
#100	3
#200	2

3.2 Densidad Real, Neta y Absorción

Mediante este ensayo se logra conocer las características propias del material en relación a la humedad y la variación de pesos que pueden tener los áridos. La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida por la relación entre la masa y el volumen de una cantidad determinada de árido, lo que significa que depende directamente de las características del grano de agregado. Como generalmente las partículas de agregado tienen poros tanto saturables como no saturables, dependiendo de su permeabilidad interna pueden estar vacíos, parcialmente saturados o totalmente llenos de agua. Esto genera agua atrapada en la masa del árido o bien humedad, lo que trae como consecuencia que si el material posee mucha humedad, se producen hinchamientos que pueden modificar las condiciones de diseño estipuladas. La densidad real se relaciona con la densidad de la mezcla final, ya que esta es la relación entre la cantidad de masa contenida en determinado volumen.

El material a utilizar en la construcción de pavimentos no debe poseer grandes absorciones. El método para la determinación de este índice está descrito en la sección 8.202.20 del volumen 8 del Manual de Carreteras.

Como se mencionó inicialmente la escoria de botadero es característica por su alta densidad pero baja porosidad, en la tabla presentada se observa que la escoria en cada fracción posee una densidad sobre los 3.700 [Kg/m³], mientras que los áridos tradicionales poseen una densidad que está entre los 2.400 a 2.700 [Kg/m³], este subproducto es, en consecuencia, 1,5 a 1,4 veces más denso que un árido tradicional. Se hace referencia a una baja porosidad y se observa que la absorción es prácticamente nula con un 0,2%, esto es básicamente por su estructura cristalina que es como una esfera sin poros.

Tabla 3.2 Densidades y absorción de la escoria.

DENSIDAD	Fracción	
	Gruesa	Fina
Densidad Real Seca [Kg/m ³]	3.794	3.788
Densidad Neta [Kg/m ³]	3.821	3.802
Absorción (%)	0,2	0,1

3.3 Cubicidad

Mediante la cubicidad de partículas, se determina el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas, de la fracción de un árido retenida en el tamiz N° 4. Se considera necesario que los áridos sean chancados para otorgar trabazón a la estructura, logrando así mayor capacidad de soporte en el pavimento a construir. Los áridos rodados no generan trabazón y las partículas lajeadas por su forma se transforman en un material poco resistente en grandes cantidades. El procedimiento se describe en la sección 8.202.6 del volumen 8 del Manual de Carreteras.

Al tener un enfriamiento lento, las partículas formadas se van separando en forma irregulares entregando un material con formación de partícula chancada. En su totalidad la escoria muestreada se observa como un material de estas características y la presencia de lajas es despreciable.

Material Chancado (%)	100
------------------------------	------------

3.4 Índice de Plasticidad

El ensayo de índice de plasticidad (IP) es realizado para obtener el rango de humedades en las que el suelo tiene un comportamiento plástico. El índice de plasticidad se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. El ensayo de límite líquido (LL) determina la humedad a partir de la cual un suelo deja de tener un comportamiento plástico y pasa a tener un comportamiento viscoso y el límite plástico (LP) corresponde a la humedad en la que el suelo pasa de tener un comportamiento frágil a uno sólido, es decir, es la humedad límite entre el estado frágil y sólido.

En este caso para el material de escoria, no permite la realización correcta del límite plástico (LP), por lo que el material se determina como no plástico (NP).

El método para la determinación de este índice está descrito en la sección 8.102.4 del volumen 8 del Manual de Carreteras.

Índice de Plasticidad	NP
------------------------------	-----------

3.5 Resistencia al Desgaste

Este ensayo se basa en conocer la resistencia a la abrasión y el desgaste de los agregados que conformaran la estructura, es decir, busca medir la dureza. Se realiza en pétreos mayores a 2.5mm, mediante la máquina de Los Ángeles. Éstos deben ser capaces de ser durables y poder resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

El procedimiento de este ensayo se encuentra en la sección 8.202.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras.

La escoria posee una alta densidad, es lógico pensar que presentará un bajo porcentaje de desgaste, aunque su porcentaje es dentro de los límites permitidos, se considera mayor a los de los áridos tradicionales

Desgaste Los Ángeles (%)	25
---------------------------------	-----------

3.6 Índice de Trituración

Este ensayo se considera equivalente al de desgaste de Los Ángeles, pero aquí se mide la trituración de la fracción gruesa y fina, obteniéndose un porcentaje de ambos. Para la escoria en particular se obtuvieron valores dentro de lo aceptable. El procedimiento de este ensayo se encuentra en la sección 8.202.8 del volumen 8 del Manual de Carreteras.

Índice de Trituración (%)	2,2
----------------------------------	------------

De acuerdo a los requerimientos generales la escoria cumple con todos, no posee materia orgánica, se encuentra material grueso y fino dentro de su granulometría, y es resistente frente a ciclos de hielo y deshielo.

Se debe comprobar el cumplimiento en cada una de las alternativas de uso propuestas, de acuerdo a los ensayos pertinentes que exponen el capítulo 8, en caso de insatisfacción se propondrán diferentes soluciones alcanzando su ejecución dentro del margen de aceptación.

3.7 Sub-base y Base Granular

La escoria cumple con los requisitos generales de este tipo de material. En este punto se debe verificar además la granulometría de manera de cumplir con las bandas granulométricas de la tabla 8.101.1.B, con la TM-50a para subbases y TM-50b, TM-50c y/o TM-25 para bases.

La granulometría obtenida de las muestras tomadas no cumple con ninguna de las bandas, como solución se realizará una estabilización mecánica, de acuerdo a un método analítico, existente en curso de laboratorista vial. En este caso se realiza la estabilización con escoria y arena de duna, la cual posee una característica similar a la escoria en lo que respecta al índice de plasticidad. Ambos materiales son NP y su granulometría es la siguiente:

Tabla 3.3 Granulometrías, de la escoria a la izquierda y arena a la derecha.

ESCORIA	
TAMICES	% PASA
2"	100
1 1/2"	100
1"	99
3/4"	87

ARENA	
TAMICES	% PASA
2"	100
1 1/2"	100
1"	100
3/4"	100

3/8"	38
#4	16
#10	7
#40	2
#200	1

3/8"	100
#4	100
#10	100
#40	94
#200	1

La estabilización mecánica consiste en mejorar las propiedades de un suelo mediante un cambio en su graduación, la que se puede obtener mediante el uso de dos o más suelos, adición de alguna fracción determinada o la eliminación parcial o total de algún tamaño mediante tamizado [9].

Encontrar las proporciones en que hay que mezclar varios tipos de suelo para cumplir ciertos requisitos preestablecidos, se le denomina dosificación de suelos, las fórmulas básicas son:

$$X = A * a + B * b + \dots + N * n$$

$$a + b + \dots + n = 1$$

Donde:

X: porcentaje de la mezcla de suelos A,B,...,N que pasa por un tamiz dado.

A,B,...,N: porcentaje de material que pasa por el tamiz dado de los suelos A,B,...,N.

a,b,...,n: proporción de los suelos A,B,...,N usados en la mezcla.

Para dos materiales las formulas son las siguientes:

$$b = \frac{X-A}{B-A}$$

$$a = \frac{B-X}{B-A}$$

Ecuación 3.1

De tal manera se procede a la estabilización de estos dos materiales, para cumplir las especificaciones de la TM-25.

Tabla 3.4 Estabilización de materiales y especificación.

TAMICES	MATERIALES (% PASA)		ESPECIFICACIÓN
	ESCORIA	ARENA	N TM-25
2"	100		
1 1/2"	100		
1"	99		100
3/4"	87		70 - 100
3/8"	38		50 - 80
#4	16		35 - 65
#10	7	100	25 - 50
#40	2	94	10 - 30
#200	1	1	0 - 15

Para los tamaños a 3/8" no se presentan problemas, se debe revisar el cumplimiento de los límites superiores e inferiores, en este desarrollo se realizará el análisis directo presentado a continuación:

3/8" $E*38 + A*100 \geq 50$, no cumple con el límite inferior, por lo que $E \leq 0,81$

#4 $E*16 + A*100 \geq 35$, no cumple con el límite inferior, por lo que $E \leq 0,77$

$E*16 + A*100 \leq 65$, no cumple con el límite superior, por lo que $E \geq 0,42$

#10 $E*7 + A*100 \geq 25$, no cumple con el límite inferior, por lo que $E \leq 0,81$

$E*7 + A*100 \leq 50$, no cumple con el límite superior, por lo que $E \geq 0,54$

#40 $E*2 + A*94 \geq 10$, no cumple con el límite inferior, por lo que $E \leq 0,91$

$E*2 + A*94 \leq 30$, no cumple con el límite superior, por lo que $E \geq 0,70$

Resumiendo:

3/8" $E \leq 0,81$

#4 $0,42 \leq E \leq 0,77$

#10 $0,54 \leq E \leq 0,81$

#40 $0,70 \leq E \leq 0,91$

Por lo tanto los materiales de escoria y arena se pueden mezclar para que cumplan la especificación granulométrica de la TM-25 entre los siguientes porcentajes:

Escoria = 70% - 77%

Arena = 30% - 23%

Se logra así un estabilizado de 70% escoria y 30% de arena, el que cumple con la granulometría de la base granular para las bandas TM-50C y TM-25, también la TM-50A para subbase granular. Se muestra en la tabla 3.5 la granulometría de que posee la mezcla confeccionada.

Tabla 3.5 Estabilizado mecánico con 70% de escoria y 30% de arena.

TAMICES	% QUE PASA	
	ESTABILIZADO	TM - 25
1"	100	100
3/4"	91	70 - 100
3/8"	56	50 - 80
#4	41	35 - 65
#10	35	25 - 50
#40	30	oct-30
#200	1	0 - 15

Respecto a la parte mecánica, la escoria analizada presenta un 100% de partículas chancadas y su porcentaje de lajas es despreciable, los resultados del CBR al 95% del Proctor Modificado se observan a continuación:

D.M.C.S [Kg/m³]	2,722
CBR (%)	146

Obteniéndose que para:

Subbase granular es 3.65 veces mayor al 40% mínimo establecido.

Base Granular es 1.83 veces mayor al 80% mínimo establecido, cumpliendo además en todos los casos que expone la tabla 5.302.201.A.

3.8 Carpeta de Rodado Granular

En esta alternativa es necesario que el fino presente un índice de plasticidad comprendido entre 4 y 9, además de entrar en la banda TM-40c, al saber que la escoria es NP se recurre a una reconstitución de banda, pero esta vez se utiliza maicillo para el reemplazo del material fino, el cual posee las siguientes características:

Tabla 3.6 Granulometría de maicillo y su plasticidad

MAICILLO	
TAMICES	% PASA
#4	100
#10	81
#40	36
#200	16

Índice de Plasticidad	6	%
------------------------------	----------	----------

Logrando obtener la siguiente granulometría:

Tabla 3.7 Reconstitución con escoria de cobre y maicillo para banda granulométrica TM-40c.

TAMICES	% QUE PASA	
	RECONSTITUCIÓN N	TM - 40c
1 1/2"	100	100
1"	90	80 - 100
3/8"	65	50 - 80
#4	50	35 - 65
#10	40	25 - 50
#40	25	15 - 30
#200	10	5 - 20

Los requerimientos mínimos están en cumplimiento junto con los demás requisitos, los cuales se presentan en la siguiente tabla 3.8.

Tabla 3.8 Resultados de escoria para los requisitos de carpeta de rodado granular.

ENSAYE	RESUTADO	EXIGENCI A
Partículas chancadas	100%	Mín. 50%
Desgaste Los Ángeles	25%	Máx. 30%
Sales Solubles	0%	Máx. 4%
Capacidad de soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S.	128%	Mín. 60%

3.9 Lechada Asfáltica

La escoria presenta una granulometría con baja presencia de finos, es por este motivo que se decide trabajar una reconstitución de banda para la Tipo C-1, considerada con una granulometría gruesa, lo cual la hace adecuada al material en análisis.

Tabla 3.9 Granulometría de reconstitución banda tipo C-1.

TAMICES	% QUE PASA	
	RECONSTITUCIÓN	TIPO C-1
3/8"	100	100
#4	80	70 - 100
#8	55	45 - 70
#16	40	28 - 50
#30	25	18 - 34
#50	20	12 - 25
#100	14	7 - 17
#200	6	5 - 11

Con la banda confeccionada se realizaron los ensayos correspondientes y se determinó que cumple todos los requisitos, para ser utilizado en la solución de lechada asfáltica como muestra la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Resultados de escoria para los requisitos de lechada asfáltica.

ENSAYE	RESULTADO	EXIGENCIA
Equivalente Arena	46%	Mín 45%
Índice Plasticidad	NP	NP
Adherencia Riedel-Weber	2 - 9	0 - 5
Índice de Trituración Total	2.2%	Máx. 3.5%
Adherencia Método Estático	95%+	Mín 95%
Partículas Chancadas	100%	Mín 90%

3.10 Tratamientos Superficiales

En los tratamientos superficiales, la banda granulométrica más usada en la V Región es la TN 10-2,5, la escoria no se ajusta adecuadamente, por lo cual se realiza una reconstitución para este tipo de banda, determinando que cumple con todos los requisitos señalados en la tabla 3.12:

Tabla 3.11 Granulometría de reconstitución TN 10-2,5.

TAMICES	% QUE PASA	
	RECONSTITUCIÓN	TN 10 - 2,5
3/8"	100	100
1/4"	64	85 - 100
N° 4	21	10 - 30
N° 8	1	0 - 10
N° 200	0	0 - 0.5

Tabla 3.12 Resultados de escoria para los requisitos de tratamientos superficiales.

ENSAYES	RESULTADO	EXIGENCIA
Desgaste Los Ángeles	26%	Máx. 25%(*)
Desintegración con Sulfato de Sodio	2,5%	Máx. 12%
Adherencia Método Estático	100%	Mín. 95%
Árido Chancado	100%	Mín. 70%
Lajas	0%	Máx. 10%
Índice de Lajas	0%	Máx. 30%
Fino por Lavado	0,4%	Máx. 0.5%

(*) Se puede especificar un valor diferente, si se justifica pero no mayor a 35%.

3.11 Mezcla Asfáltica en Caliente

En esta etapa la escoria cumple los requisitos estipulados, para ambas fracciones, como lo muestran las tablas 3.14 y 3.15, para una reconstitución de banda de una granulometría semiedensa IV-A-12.

Tabla 3.13 Granulometría de reconstitución banda IV - A - 12.

TAMICES	% QUE PASA	
	RECONSTITUCIÓN	IV - A - 12
3/4"	100	100
1/2"	90	80 - 95
3/8"	80	70 - 85
N° 4	50	43 - 58
N° 8	35	28 - 42
N° 30	20	13 - 24
N° 50	12	8 - 17
N° 100	7	6 - 12
N° 200	5	4 - 8

Tabla 3.14 Resultados de escoria fracción gruesa para los requisitos de mezclas asfálticas en caliente.

ENSAYES	RESULTADO	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA			
		RODADUR A	INTERMEDI A	BASE	
				GRUESA	ABIERTA
Desgaste Los Ángeles (máx)	25%	25%	35%	35%	30%
Desintegración con Sulfato de Sodio (máx)	2.5%	12%	12%	12%	12%
Partículas Chancadas (mín)	100%	90%	70%	60%	90%
Partículas Lajeadas (máx)	0%	10%	15%	15%	10%
Adherencia Método Estático (mín)	100%	95%	95%	95%	95%
Adherencia Método Dinámico (mín)	100%	95%	95%	95%	95%

Tabla 3.15 Resultados de escoria fracción fina para los requisitos de mezclas asfálticas en caliente.

ENSAYES	RESULTADO	TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA			
		EXIGENCI A	INTERMEDI A	BASE	
				GRUESA	ABIERTA
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	NP
Adherencia Riedel-Weber	2 - 9	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5	Mín. 0 - 5

3.12 Mezcla Asfáltica en Frío

De acuerdo a lo señalado en el capítulo 2, los requisitos son los mismos presentados para las mezclas asfálticas en caliente, además si se asume la banda de trabajo IV-A-12, se estaría en cumplimiento de todo, según lo descrito en el punto anterior.

3.13 Terraplenes

Con lo señalado en el capítulo 2, la escoria cumple todos los requerimientos para esta solución posee un CBR, mucho mayor a 10% y su granulometría no posee tamaño mayor al señalado.

Las condiciones de coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura se muestran a continuación.

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad CC = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \qquad \text{Ecuación 3.2}$$

$$CU > 4 \quad \text{y} \quad 1 < CC < 3$$

En que D_{10} , D_{30} y D_{60} representan el diámetro de la apertura del tamiz por el cual pasa respectivamente 10%, 30% y 60% en peso del material considerado.

De la granulometría de la escoria y mediante interpolación lineal se obtuvieron los siguientes valores para:

D_{10} : 0,83

D_{30} : 3,33

D_{60} : 8,04

Resultando $CU = 9,69$ y $CC = 1,66$

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos para los casos presentados, se concluye que la escoria puede estar presente en cualquier aplicación de las mencionadas anteriormente.

4 CAPÍTULO IV: Análisis de alternativas propuestas

En el capítulo anterior se verificó el cumplimiento de los requisitos expuestos por el manual de carreteras, para las distintas soluciones planteadas de la escoria como árido.

Para las capas granulares llámese a estas: base granular, subbase granular y carpeta de rodado granular se analizan los resultados obtenidos y se ve la aplicación de estos.

En cuanto a las soluciones que incluyen el uso de ligante asfáltico se propondrá un diseño para cada alternativa de: lechada asfáltica, tratamiento superficial, mezcla asfáltica en caliente y mezcla asfáltica en frío, observando el comportamiento de la escoria frente a un diseño según el manual de carreteras.

Mencionando como solución extra la incorporación de escoria en hormigón y teniendo en cuenta que dentro de los antecedentes encontrados es a lo que mayor se relaciona al uso de escoria.

4.1 Base y Subbase Granular

Las capas de base y sub-base granular, son elementos constituyentes en la estructura de un pavimento. La utilización de escoria en estas soluciones se considera una opción viable, el subproducto cumplió todos los criterios de aceptación planteados en el capítulo 2, e incluso se logró observar un comportamiento mecánico mejor del esperado, al realizar una estabilización mecánica con arena y escoria, se obtuvo un CBR de 146%, además de un 3,8% óptimo de humedad de compactación, disminuyendo el consumo de agua, que comparado con un árido tradicional se encuentra entre un 6% a 12% la humedad de compactación. Se concluye que es totalmente viable la utilización de este subproducto en estas alternativas, además es un material altamente impermeable, por lo que no presentaría problemas con el agua.

4.2 Carpeta de rodado granular

Corresponde a una capa del pavimento, generalmente se utiliza para tránsitos muy bajos, principalmente en zonas rurales, aunque según datos de CODELCO Ventanas ha utilizado escoria dentro de sus áreas como un recubrimiento de camino, una aplicación que ellos llaman capa de estabilizado.

Esta solución es viable pero necesita la incorporación de un material que posea plasticidad debido a la ausencia de IP en la escoria, logrando así los objetivos deseados, concluyendo que esta mezcla provee de una excelente material para ser utilizado como carpeta de rodado granular.

4.3 Terraplenes

Los terraplenes se definen en ingeniería como un material que se ocupa de relleno para levantar el nivel de suelo y formar un plano adecuado para un fin determinado. Los requisitos para esta solución se cumplen en su totalidad, por lo tanto se podría realizar su aplicación directa en un proyecto. Se observó en las canchas de acopio de CODELCO Ventanas la estabilidad que poseen estos al ser trasladados y reacomodados debido a la angulosidad de las partículas. Se concluye que la escoria sin previa intervención puede ser utilizada directamente para la confección de terraplenes.

4.4 Lechada Asfáltica

Las Lechadas Asfálticas se definen como mezclas en frío de consistencia semi-fluida, utilizadas para mejorar y/o restaurar las características superficiales del pavimento, disminuir los riesgos de desprendimiento de áridos en pavimentos gastados y/o deteriorados.

Se propone un diseño de acuerdo a 8.302.52 Método de diseño de lechadas asfálticas y microaglomerados asfálticos en frío, determinándose las cantidades teóricas de contenido de asfalto, agua y la superficie teórica o sea la cantidad de agregado por metro cuadrado. Se exponen las fórmulas principales para la determinación de estos valores, el método en su totalidad se encuentra en el capítulo mencionado del manual de carreteras, los parámetros obtenidos se visualizan en la tabla 4.1.

$$Superficie\ Específica = \frac{0.17*a+0.33*b+2.3*c+12*d+135*e}{100} \left[\frac{m^2}{kg} \right] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

- a: % de árido mayor que 10 mm.
- b: % que pasa por tamiz 10 mm y queda retenido en 5 mm.
- c: % que pasa por tamiz 5 mm y queda retenido en 0,315 mm.
- d: % que pasa por tamiz 0,315 mm y queda retenido en 0,08 mm.
- e: % que pasa por tamiz 0,08 mm.

$$Et = \left(\frac{4,5*\sqrt{Superficie\ Específica}}{R} \right) - 1 \text{ [%]} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde:

- Et: Contenido de emulsión teórico referido al agregado seco en %
- SE: Superficie Específica del agregado seco.
- R: Residuo asfáltico de la emulsión (expresado en forma decimal)

$$W = W1 + Et * (1 - R) \%$$

Ecuación 4.3

Donde:

W: Porcentaje de agua en la mezcla

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

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

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

Tabla 4.1 Parámetros de diseño teórico de lechada asfáltica.

Superficie Específica [m²/kg]	11
Cont. Emulsión Teórico (%)	10
Agua total de la Mezcla (%)	15

Estos valores de diseño teórico se deben corregir, con el fin de determinar la cantidad de agua necesaria para tener trabajabilidad, lo que se obtiene a través del ensayo de consistencia, al realizar este ensayo se exhibe un comportamiento muy distinto al esperado, la mezcla desplaza el agua en su totalidad reaccionando el ligante con la escoria de forma inmediata, como se muestra en la figura 4.1, estableciendo un inconveniente para continuar con el diseño, se determina que la escoria no es adecuada para mezclar en frío, con emulsiones asfálticas.



4.5 Tratamiento Superficial

Estos aportan una capa de rodadura adecuada al pavimento para el tránsito vehicular e impermeabiliza la carpeta asfáltica para protegerla del agua, pero no aporta estructura. La escoria cumple con todos los requisitos indicados en el 5.407 del volumen 5, del Manual de Carreteras, es decir como árido para tratamiento superficial. Se realiza un diseño de acuerdo a 8.302.50 Método de diseño para Tratamientos Superficiales, en el cual se explica en detalle cómo se debe realizar, en este trabajo se efectúa un diseño de tratamiento superficial simple, con la banda TN 10-2,5, siendo esta la de mayor aplicación dentro la región, se crea una cancha de prueba de 1 [m²] la cual se divide en superficies iguales de 0,5 [m²] para los áridos tradicionales y la escoria como muestra la figura 4.2, a continuación se exponen las fórmulas para determinar la dosis de agregado y la dosis de ligante;

$$C = M[(1 - 0,4 * V) * H * \rho_{rs} * E]$$

Ecuación 4.4

Donde:

C: Dosis de agregado [Kg/m²]

M: Factor de corrección, valor normal 1

V: Vacíos en el agregado, ver en 8.302.50

H: Dimensión mínima promedio en (mm), ver en 8.302.50

ρ_{rs} : Densidad real seca.

E: Factor de desperdicio, ver en 8.302.50

$$B = K * \frac{0,4 * H * T * V * S * A}{R}$$

Ecuación 4.5

Donde:

B: Dosis de ligante en [Lt/m²]

K: Factor de corrección, valor normal 1

H: Dimensión mínima promedio en (mm), ver en 8.302.50

T: Factor de tránsito, ver en 8.302.50

V: Vacíos en el agregado, ver en 8.302.50

S: Factor de corrección por textura superficial, ver en 8.302.50

A: Factor de corrección por absorción de asfalto en el agregado [Lt/m²], ver en 8.30250

R: Porcentaje de asfalto residual de la emulsión, ver en 8.302.50

Se obtienen los parámetros para ambos casos en estudio, donde se distinguen diferencias claras en la dosis de agregado presentándose una diferencia de aproximadamente 3 Kg/m², esto se debe a la alta densidad que caracteriza a la escoria, la diferencia en lo que respecta a la dosis de ligante no es considerable.

Al realizar la aplicación de este tratamiento, se observa que la escoria produce un quiebre más acelerado que el árido tradicional al momento de entrar contacto con el ligante, otro punto muy relevante es que la escoria se encuentra con exudación de asfalto, esto es debido a su baja absorción, esta variable se incluye como un factor, no se encuentra como un valor directo y propio del árido, lo cual genera una mala representación para áridos alternativos como lo es en este caso la escoria de cobre. Considerándose necesario la evaluación de la absorción como un valor más, dentro de la ecuación, lo que permitirá un diseño óptimo.

Árido Escoria

Árido Tradicional

C [Kg/m ²]	19.99
B [Lt/m ²]	1.28

C [Kg/m ²]	17.23
B [Lt/m ²]	1.21



Figura 4.2 Cancha de prueba de tratamiento superficial simple, con árido de escoria a la izquierda y árido tradicional a la derecha.

4.6 Mezclas Asfálticas en Caliente

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes. Estas mezclas se fabrican con cemento asfáltico y agregados pétreos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 135° C a 165° C, según la viscosidad del asfalto.

Se cumplen los requerimientos indicados en el 5.408 del volumen 5 del manual de carreteras "Mezclas asfálticas en caliente", por lo tanto se puede concluir que la escoria puede ser utilizada en esta sección. Se realiza un diseño en cada etapa, el método de diseño Marshall será el utilizado se escoge para este una granulometría semi-densa; uniforme y homogénea, elaborada con materiales pétreos bien graduados y que contienen cierta cantidad de finos que satisfagan los requisitos de calidad establecidos, como lo son granulometría, resistencia al desgaste, solidez, limpieza, pureza y propiedades superficiales. Este tipo de mezcla no actúa principalmente como capa drenante, sino como una mejora de fricción y acabado de la superficie de rodado. Se utiliza normalmente en la

construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos con alta resistencia estructural y con capacidad drenante, sin tener un alto riesgo de oxidación.

Recurriendo a una reconstitución de banda para la tipo IV-A-12, (se presenta figura 4-3 su granulometría).

La metodología Marshall tiene propósito determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de áridos, y se basa en un ensayo mecánico que consiste en romper probetas cilíndricas de un diámetro y altura estandarizados de 4 " (101,6 mm) de diámetro por 2 ½" (63,5 mm) de altura, las cuales difieren en el porcentaje de asfalto. Suelen utilizarse al menos cinco contenidos de cemento asfáltico, variando entre uno y otro en 0.5%, tratando de estar por encima y por debajo del óptimo esperado. Para cada contenido de asfalto, se fabrican al menos tres probetas. Las probetas se preparan de acuerdo a un procedimiento específico de calentamiento, mezclado y compactación. Las temperaturas de mezclado y de compactación dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar las probetas.

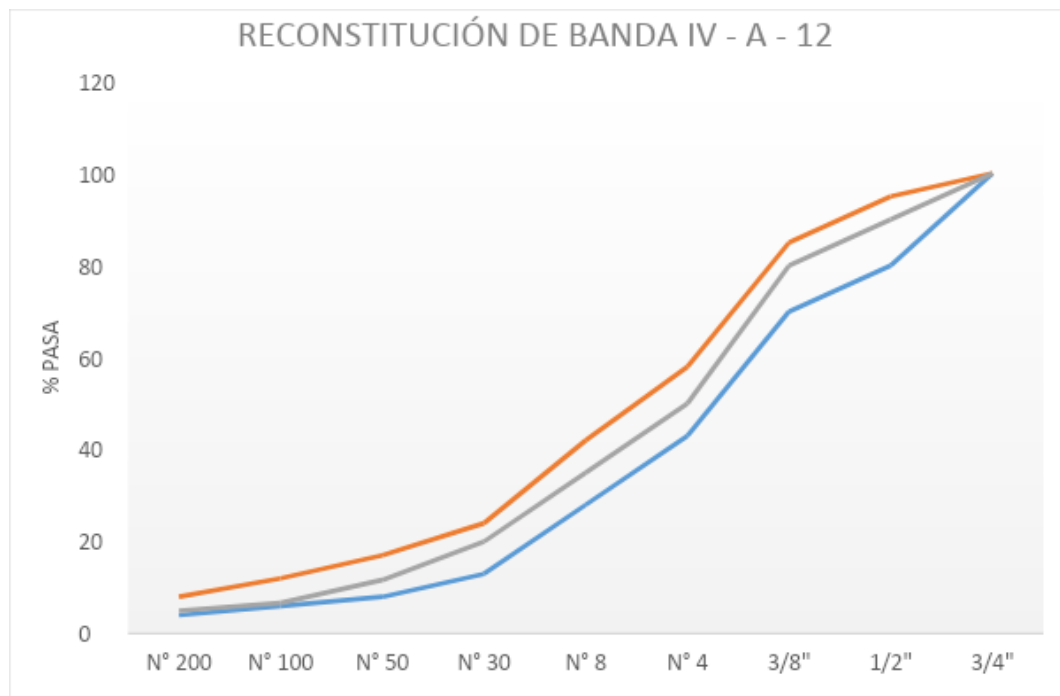


Figura 4.3 Curva de reconstitución con material de escoria de cobre para de banda IV - A - 12.

El diseño Marshall, se realiza considerando que el árido alternativo posee una alta densidad por lo cual se realizan probetas para un peso de reconstitución de 1.500 [gr], mientras que para áridos tradicionales se realizan con 1.100 [gr], estos pesos se consideran para estar lo más cercano a la altura promedio exigida.

Los ligantes asfálticos son derivados del petróleo, es la fracción más pesada resultante de la destilación de este mismo. La dureza de este depende directamente de la condiciones de destilación, como la presión, temperatura y tiempo.

Los cementos asfálticos se clasifican según su grado de viscosidad absoluta. En Chile se utilizan dos tipos; CA 14 que posee una viscosidad entre los 1400 a 2400 poises y CA 24 con una viscosidad mayor a 2400 poises. El mayor uso de estos cementos asfálticos es en las mezclas asfálticas en caliente.

Dentro de la región el de mayor uso es de tipo CA 24. Para este diseño se ocupará material proveniente de Provisa, el cual es entregado por Bitumix Con-Con, con sus respectivos resultados y especificaciones.

Tabla 4.2 Especificaciones de cemento asfáltico de PROVISA.

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

Película Delgada Rotatoria			
Pérdida por calentamiento	%	0,03	Máx. 0.8
Viscosidad 60°C	Poises	8880	Informar
Ductilidad 25°C, 5cm/min	cm	>100	Mín. 100
Índice de durabilidad		2.4	Máx. 4.0

El nomograma de Heukelum permite la caracterización del ligante asfáltico, en este caso particular se obtendrán las temperaturas de mezclado y compactación.

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

A partir de la mejor recta trazada, se obtienen las temperaturas de mezclado y compactación para el ligante analizado, estas se obtienen de la intersección en 2 Poise y 3 Poise respectivamente de la recta trazada y la temperatura se obtiene a través de una línea vertical a esta intersección.

Obteniéndose los siguientes resultados:

Temperatura de mezclado: 165 °C

Temperatura de compactación: 151°C

El asfalto no debe mantenerse a la temperatura de mezclado por más de 1 hora antes de usarlo.

El diseño es realizado de acuerdo a 8.302.47 método de diseño marshall, se determinará el contenido óptimo de asfalto, para los requisitos de densidad, huecos y estabilidad que se establecen.

Se realizan 3 probetas por cada 5 porcentajes de contenido asfáltico los cuales varían de 2,5% a 5% del peso del árido, con los siguientes porcentajes: 2,5%, 3%, 3,5%, 4%, 4,5% y 5%. Aunque para los áridos tradicionales los porcentajes para un diseño van de 4.5% a 6.5% de asfalto.

4.6.1 Preparación de la mezcla asfáltica

Se calientan los áridos en horno hasta alcanzar una temperatura 15°C mayor a la de mezclado, esto es debido al cambio térmico que tendrá al sacar esta del horno, posteriormente se incorpora el ligante asfáltico, los cuales son mezclados a la temperatura requerida, se realiza este procedimiento para 18 probetas en total.

4.6.2 Compactación de probetas

Luego de realizadas las mezclas para los distintos porcentajes, se vacían en los moldes con papel filtro los cuales se deben acomodar con la espátula y dar 15 golpes por la orilla y 10 golpes al centro, teniendo la mezcla acomodada, se calienta el martillo de compactación y se realiza esta con 75 golpes por cada cara de la probeta en un tiempo de no más de 90 segundos, el procedimiento se aplica a todas las probetas.

Una vez obtenidas las probetas se determina su densidad a una temperatura de 25°C, resultando la mayor densidad para un 4,5% con un valor de 3.336 [kg/m³].

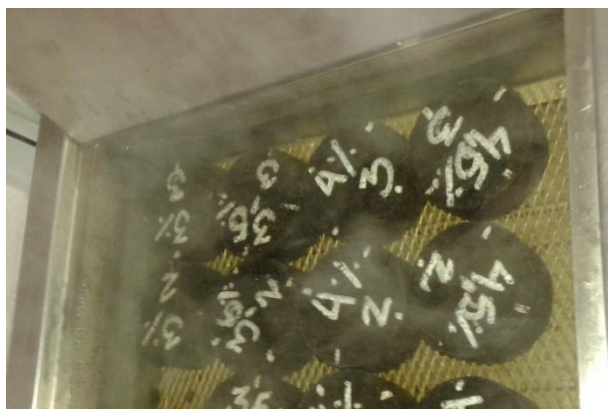


Los resultados obtenidos se presentan a continuación en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Densidades de diseño Marshall.

Determinación de la Absorción de agua y Densidad de las Briquetas							
Contenido	N°	Pesos (gr)			Absorción	Densidad	Promedio Densidad (kg./m3)
Asfalto	Probeta	Seco	Bajo agua	S.S.S	Agua (%)	(kg./m3)	
%							
2,5	1	1.523	1.060	1.527	0,8	3.260	3.258
	2	1.525	1.061	1.528	0,7	3.264	
	3	1.529	1.061	1.531	0,4	3.252	
3	1	1.536	1.068	1.538	0,3	3.273	3.287
	2	1.531	1.067	1.531	0,1	3.298	
	3	1.531	1.066	1.531	0,1	3.291	
3,5	1	1.541	1.075	1.542	0,1	3.305	3.305
	2	1.537	1.075	1.538	0,2	3.320	
	3	1.542	1.073	1.542	0,0	3.290	
4	1	1.547	1.082	1.548	0,1	3.324	3.327
	2	1.548	1.083	1.549	0,1	3.328	
	3	1.538	1.076	1.538	0,0	3.329	
4,5	1	1.551	1.086	1.551	0,1	3.333	3.336
	2	1.551	1.086	1.551	0,0	3.338	
	3	1.551	1.086	1.551	0,0	3.336	
5	1	1.557	1.084	1.557	0,1	3.290	3.296
	2	1.557	1.085	1.557	0,1	3.299	
	3	1.553	1.082	1.553	0,0	3.299	

Luego deben ensayarse para determinar la estabilidad Marshall, este ensayo se realizó simulando las peores condiciones, esto se logra dejando las probetas sumergidas en agua a una temperatura de 60°C, por un tiempo de 45 minutos.



Posteriormente se ensayan de acuerdo a 8.302.40 Método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando la prensa Marshall como muestra la figura 4.6, obteniéndose los datos de estabilidad y fluidez para los distintos porcentajes de asfalto, presentándose la mayor estabilidad para 3 % con un valor de 12.349 [N].

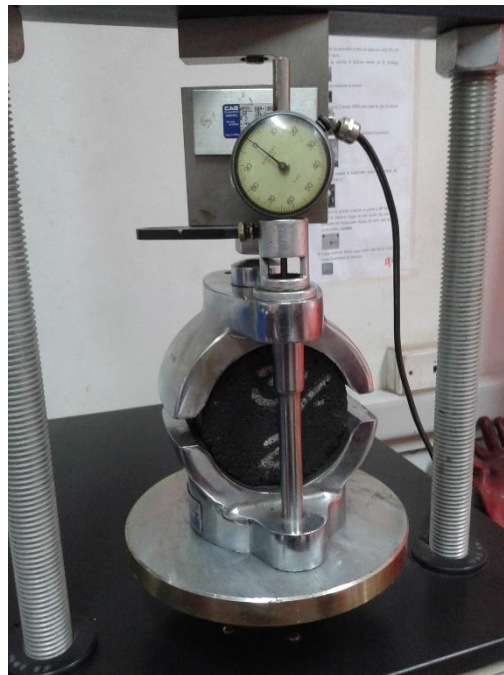


Figura 4.6 Probetas ensayadas en prensa Marshall.





Tabla 4.4 Resultados de estabilidad y fluidez, para diseño Marshall.

Determinación de Fluidez y Estabilidad de las Briquetas					
Contenido Asfalto %	Probeta	Fluidez Corregida (0,25 mm.)	Estabilidad Corregida (N)	Promedio Fluidez (0,25 mm.)	Promedio Estabilidad (N)
2,5	1	6	10.872	7	10.220
	2	7	10.347		
	3	8	9.441		
3	1	17	11.709	15	12.349
	2	13	10.929		
	3	14	14.408		
3,5	1	14	9.384	15	10.133
	2	14	11.746		
	3	18	9.270		
4	1	14	10.038	18	10.548
	2	23	10.183		
	3	17	11.423		
4,5	1	18	10.865	19	11.043
	2	17	11.724		
	3	22	10.541		
5	1	16	10.198	17	10.448
	2	16	9.921		
	3	18	11.224		

Estos datos son representados gráficamente, de los cuales se obtienen los valores máximos según la tendencia de la curva, los gráficos correspondientes para estos datos se encuentran en las figuras 4.8 a la figura 4.13 exhibidas más adelante.

Tabla 4.5 Valores relevantes del diseño Marshall.

CONTENIDO ASFALTO %	DENSIDAD [kg / m3]	ESTABILIDAD [kN]	FLUENCIA [0.25 mm]	VA [%]	VAM (%)	VLL [%]
---------------------	----------------------	--------------------	----------------------	----------	-----------	-----------

2.5	3258	10548	1.7	7.1	14.6	51
3	3287	12349	3.8	5.2	14.2	63
3.5	3305	10133	3.8	3.7	14.2	74
4	3327	10548	4.5	2	14	86
4.5	3336	11043	4.8	0.6	14.2	96
5	3296	10448	4.3	0.8	15.6	95

La determinación del contenido óptimo de asfalto de acuerdo al método marshall, como se ha mencionado se basa en un promedio de acuerdo a los valores máximos de estabilidad y densidad, además del contenido de huecos que debe estar entre un 4% a 6%, el cual está estandarizado en un 5%, al determinarse este contenido ideal existe una tolerancia de $\pm 0,3\%$.

En países europeos y lugares de norteamérica lo principal es el contenido de huecos, de acuerdo a este estándar se verifica que las demás variables cumplan los requisitos el porcentaje adoptado como óptimo, será el óptimo desde el punto de vista de % de vacíos en la mezcla que cumple además con los requisitos de estabilidad y fluidez.

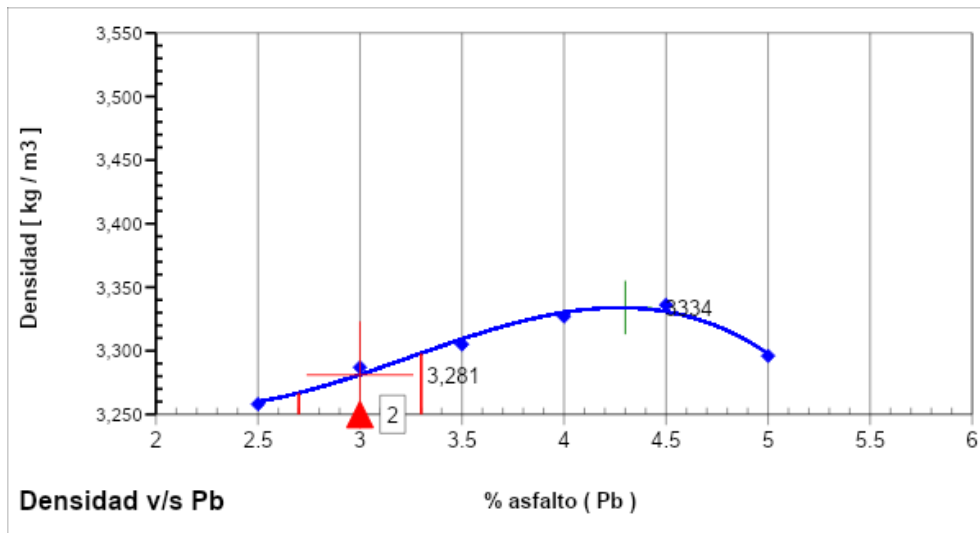


Figura 4.8 Curva densidad v/s % asfalto

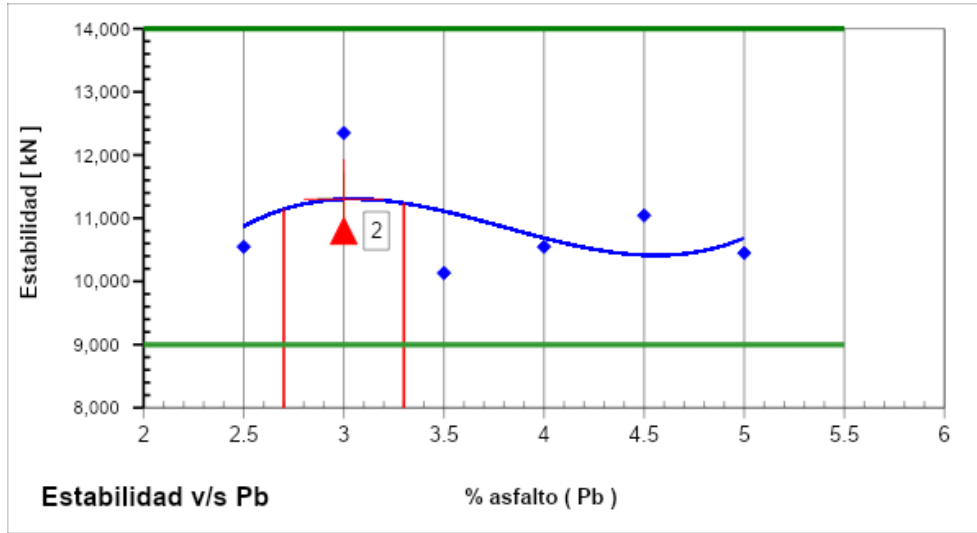


Figura 4.9 Curva estabilidad v/s % asfalto.

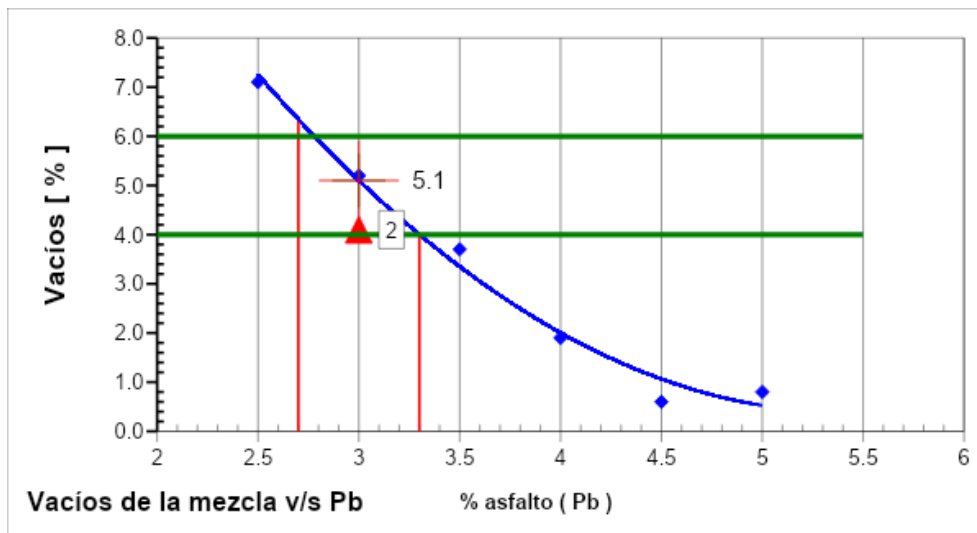


Figura 4.10 Curva huecos v/s % asfalto

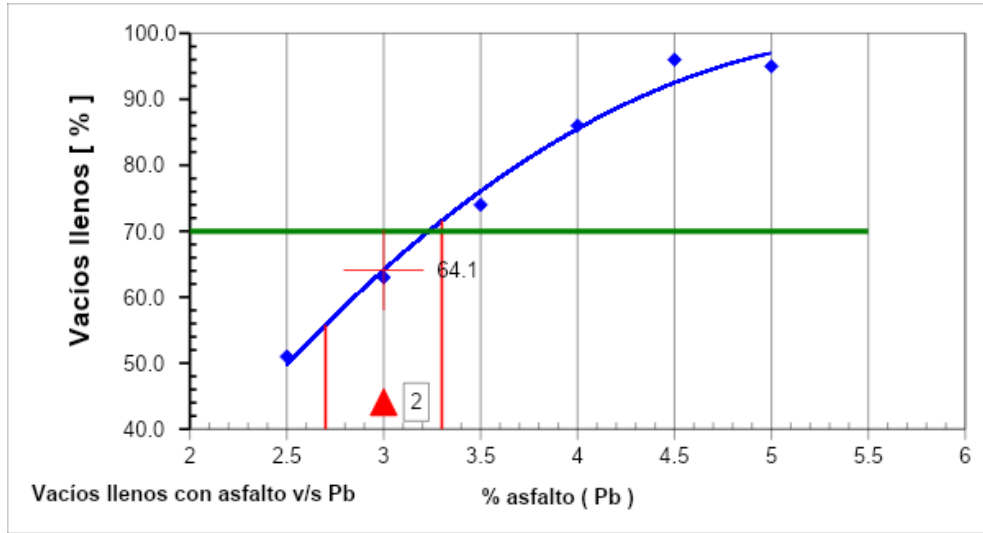


Figura 4.11 Curva Huecos llenos v/s % asfalto.

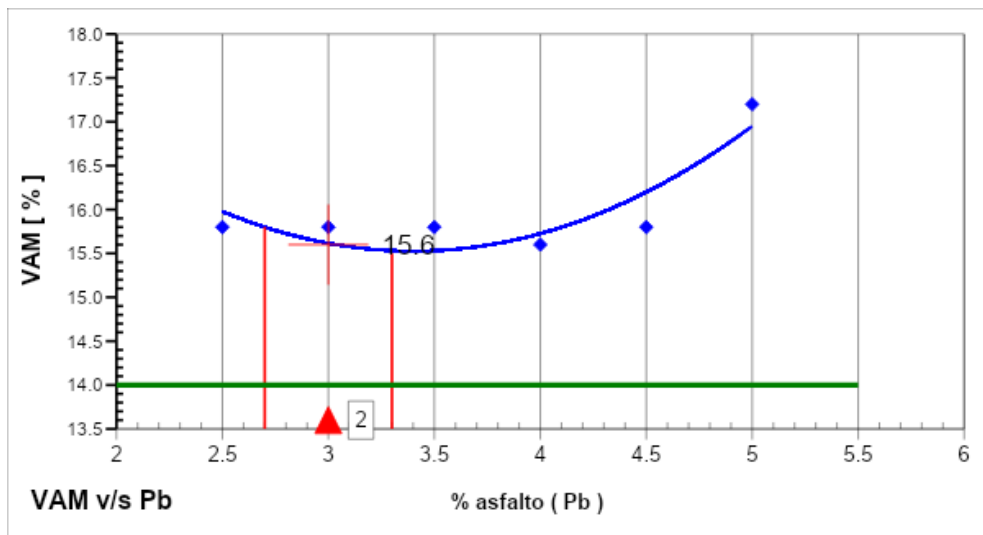


Figura 4.12 Curva VAM v/s % asfalto.

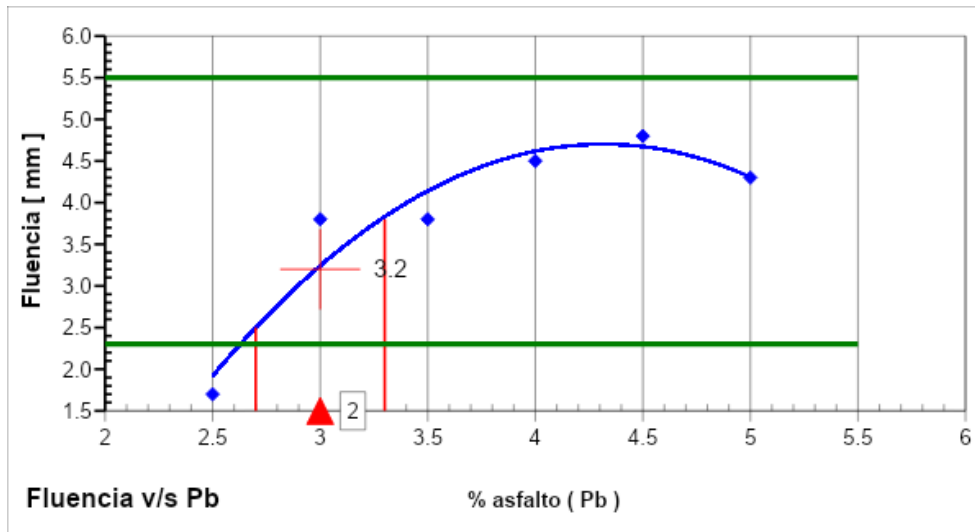


Figura 4.13 Curva Fluencia v/s % asfalto.

De la metodología del método de diseño se obtiene un 3% de contenido óptimo de asfalto, que comparado con un árido tradicional se consiguen sobre un 5% en cada diseño Marshall según lo indicado por laboratorio de asfalto del MOP, se estaría logrando un diseño más económico, disminuyendo considerablemente el porcentaje de ligante, sumado a que el árido es un desecho reciclado, se concluye que la inclusión de escoria para esta mezcla en caliente resulta mejor de lo esperado debido a la disminución del contenido óptimo de ligante, esto es explicado en parte por la bajo absorción que caracteriza este tipo de escoria utilizada.

Los porcentajes mencionados están referidos al peso de una probeta, si refleja esto de acuerdo a las probetas confeccionadas, se obtendría que para los áridos tradicionales en donde se generan las muestras con 1.100 gramos para lograr la altura promedio, y suponiendo un valor de 5,3% de contenido de asfalto, se consiguen 58.3 gramos de ligante. Aunque si se realizan los cálculos para la escoria se debe considerar que posee una mayor densidad por lo que el peso de la probeta utilizada es de 1.500 gramos y el contenido de asfalto es de 3%, se consiguen 45 gramos de cemento asfáltico reflejando un ahorro de 13.3 gramos de asfalto por probeta, si esto se interpreta a gran escala el ahorro producido es importante.

Las características de la mezcla obtenida presentan altas densidades, esto es propio de la escoria la cual está presente en el capítulo 3, además de gran estabilidad la que se logra por la gran adherencia con el ligante y tener en su totalidad de partículas chancadas, mejorando la fricción entre los agregados.

4.7 Mezclas Asfálticas en Frío

Para este tipo de solución, se presenta la problemática de las lechadas asfálticas, puesto que se debe realizar la mezcla con emulsión asfáltica y considerar la incorporar de agua, lo cual no es

posible como se analizó en ese punto mencionado, se concluye que no es viable realizar este tipo de solución.

4.8 Escoria en Hormigón

La incorporación de la escoria en el hormigón es uno de las prácticas que más destaca en estudios nacionales como internacionales, unos ejemplos son Iván Oyarzun en su trabajo sobre “La influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón”, donde destaca la utilización de la escoria como árido grueso, según Khanzadi en su reemplazo de hasta un 100% logró obtener un aumento de resistencia estándar de un 10% a los 28 días.

Dentro del contenido del presente trabajo se propuso la inclusión de la escoria en hormigón, realizando bajo el mismo escenario probetas con árido de escoria y árido tradicional, bajo las siguientes condiciones: para un H-30 y utilizando el reemplazo de árido grueso en un 100%.

Se logra determinar que al realizar el cambio por este subproducto se obtiene un aumento en la masa final de un 11%, junto a un aumento de su resistencia en un 12%. Los valores resultantes se muestran en la tabla 4-6, observando que las probetas con escoria en el plano de falla no exhiben una continuidad en comparación con los otros áridos, como muestra la figura 4-13, mejorando la adherencia entre la pasta de cemento – árido, esto se explica por la angulosidad de la escoria, además al ser una mezcla más densa, se genera un hormigón pesado que en algunas situaciones puntuales puede ser una ventaja.

Un uso complementario en obras de vialidad, sería en la construcción de veredas.

Tabla 4.6 Resultados ensayos de compresión a hormigón H-30, con árido tradicional y reemplazo de escoria.

N° Ingreso	Peso (gr)	Resistencia (Kg/cm2)	Resistencia Promedio (Kg/cm2)	Peso Promedio (gr)
H-30 Árido Normal	8.081	424,32		
H-30 Árido Normal	8.069	428,85	426,13	8.069
H-30 Árido Normal	8.056	425,23		
H-30 Árido Escoria	9.030	476,91		
H-30 Árido Escoria	8.863	479,17	478,12	8.948
H-30 Árido Escoria	8.951	478,27		



Figura 4.14 Probetas de hormigón con reemplazo de fracción gruesa por escoria de cobre, ensayadas a compresión.

El capítulo se resume en la tabla 4.7, la que presenta si es posible el uso de escoria como árido en obras viales, bajo qué condiciones con sus respectivas ventajas y desventajas.

Tabla 4.7 Resumen de aplicaciones de escoria según condiciones, ventajas y desventajas.

Materia l	Aplicacione s	S i	N o	Condiciones	Ventajas	Desventajas
Escoria	Subbase Granular 5.301	•		Se puede estabilizar con otro material que aporte fino o se puede utilizar solo	La geometría característica de partícula chancada, mejora la fricción dentro de la mezcla aumentando la resistencia mecánica reflejada en el CBR, además de la disminución del consumo de agua al	

					poseer menor porcentaje de humedad de compactación.	
	Base Granular 5.302	•		Se puede estabilizar con otro material que aporte fino o se puede utilizar solo	La geometría característica de partícula chancada, mejora la fricción dentro de la mezcla aumentando la resistencia mecánica reflejada en el CBR, además de la disminución del consumo de agua al poseer menor porcentaje de humedad de compactación.	
	Carpeta de Rodado Granular 5.303	•		Debe estabilizarse con un material que aporte plasticidad como las arcillas	La geometría característica de partícula chancada, mejora la fricción dentro de la mezcla aumentando la resistencia mecánica reflejada en el CBR, además de la disminución del consumo de agua al poseer menor porcentaje de humedad de compactación.	Se hace necesario la incorporación de otro material que entregue plasticidad.
	Terraplén 5.205	•		No posee condiciones	Se ocupa directamente, su geometría angulosa mejora la fricción entre partículas.	

Continuación:

Materia l	Aplicaciones	S i	N o	Condiciones	Ventajas	Desventajas
Escoria	Lechada Asfáltica 5.406		•	No posee condiciones		No es posible su uso por el acelerado quiebre con las emulsiones lo cual no permite trabajabilidad.
	Tratamiento Superficial 5.407	•		No posee condiciones	Acelera el proceso de quiebre de la emulsión, disminuye el contenido	

				de asfalto por su baja absorción, se logra muy buena adherencia.	
	Mezcla Asfáltica en Caliente 5.408	•	No posee condiciones	Disminuye el contenido óptimo de asfalto, la geometría angulosa del árido mejora la fricción entre estos aportando a la estabilidad.	
	Mezcla Asfáltica en Frío 5.409	•	No posee condiciones		No es posible su uso por el acelerado quiebre con las emulsiones lo cual no permite trabajabilidad.
	Hormigón	•	Se puede utilizar el reemplazo de la fracción gruesa, la fina o ambas.	Al reemplazar la fracción gruesa la resistencia aumentó en un 12%, también el peso del hormigón creció un 11%, lo que genera un uso como hormigón pesado.	

5 CAPÍTULO V: Solución adoptada; diseño estructural de pavimento flexible

El diseño estructural de un pavimento flexible se realiza mediante el método AASHTO 93 en la actualidad, el cual depende de distintas variables; del tránsito, del árido, el ambiente y otros factores que influyen los cuales se encuentran ya tabulados. En este capítulo se realizará un diseño para los áridos de escoria, el cual será comparado con un diseño de áridos tradicionales, determinándose la factibilidad y optimización que entregará el árido de escoria en contrastado con el árido tradicional.

5.1 Pavimento Flexible

Un pavimento flexible es un sistema formado por varias capas, las cuales poseen una resistencia decreciente con su profundidad, estas capas deben trabajar en conjunto y cumplir con ciertas características, a continuación se mencionan

- **Resistencia estructural:** resistir y distribuir las solicitaciones generadas por el tránsito vehicular.
- **Deformabilidad:** al ser decreciente la resistencia de las capas, la capa superior debe resistir deformaciones de las capas inferiores por posibles fallas.
- **Durabilidad:** resistir las condiciones atmosféricas, como climas extremos y precipitaciones.
- **Impermeabilidad:** la superficie debe otorgar impermeabilidad para evitar infiltración en las capas inferiores y producir el lavado del fino.

5.2 Método de diseño AASHTO 93

El método AASHTO versión 1993 es una extensión del procedimiento original derivado de la prueba AASHTO realizada durante 2 años y terminada en el año 1960, es el resultado de ensayos realizados en pistas de pruebas, construidas bajo condiciones ambientales y con suelos de características muy definidas. Las modificaciones introducidas en esta versión están únicamente orientadas a expandir las posibilidades de aplicación del método a diferentes climas, diseños, materiales y suelos [27].

En el capítulo 3 “Instrucciones y criterios de diseño”, específicamente en la sección 3.604.1 “Pavimentos flexibles”, en donde se menciona que el procedimiento que se presenta, incluye algunos cambios adicionales destinados a ajustarse mejor a la realidad nacional, es en esta

sección donde se presenta el procedimiento completo para realizar un diseño estructural de un pavimento flexible [27].

La fórmula general de diseño relaciona la cantidad de ejes equivalentes solicitantes con el número estructural y el nivel de confianza, de manera que la estructura experimente una pérdida de serviciabilidad determinada.

La ecuación general de este método es la siguiente:

$$\text{Log}_{10}(W_{18}) = Z_r * S_o + 9,36 * \text{Log}_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log}_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4,2-2,0}\right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 * \text{Log}_{10}(MR) - 8,07$$

Ecuación 5.1

Donde:

W_{18} : Número previsto de 80 kN

Z_r : Desviación normal estándar

S_o : Error estándar combinado de la predicción del tráfico y la predicción del rendimiento

SN : Número estructural (un índice que es indicativa del espesor de pavimento total requerido)

ΔPSI : Diferencia entre diseño inicial índice de capacidad de servicio, po, y el índice de capacidad de servicio terminal del diseño, pt.

MR : Módulo resiliente (en PSI)

5.3 Módulo Resiliente

Es necesario obtener el módulo resiliente de la mezcla asfáltica en caliente, este valor se puede obtener mediante la relación que existe con la resistencia a la tracción indirecta (ITS). Esto es posible gracias a que Miro R., Pérez F., Martínez A. [29] han desarrollado experimentalmente una ecuación que relaciona la resistencia a la tracción indirecta y el módulo de elasticidad de las mezclas asfálticas, siendo esta:

$$Mr = 1411,9 * Rti + 23069 \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde:

Mr : Módulo Resiliente en [kgf/cm²]

Rti : Resistencia a la tracción indirecta en [kgf/cm²]

Se obtuvo un 3% de contenido óptimo de asfalto según el diseño Marshall, para el cual se realiza el ensayo de tracción indirecta (ITS), obteniéndose el valor del módulo resiliente expresado en el siguiente resumen.

Tabla 5.1 Módulo resiliente para 3% de contenido óptimo de asfalto.

Probeta Número	Lectura Dial	Carga Kgf	Altura mm	Diámetro mm	Resistencia ITS kgf/cm ²	Módulo Resiliente kgf/cm ²	Módulo Resiliente Kgf/cm ²	Módulo Resiliente PSI
1	236	1024	5.85	10	11	38796	38245	543977
2	216	939	5.73	10	10	37804		
3	225	977	5.83	10	11	38136		



Figura 5.1 Probetas con 3% de contenido óptimo de asfalto, ensayadas a tracción indirecta (ITS).

5.4 Diseño estructural del pavimento

Para realizar un diseño estructural de una obra vial mediante el método AASHTO 93, existen variados apoyos digitales, como planillas excel, como el PAVIVIAL que es el utilizado en Chile, pero este método no considera variables propias de las capas constituyentes como son los CBR o sus respectivos módulos resilientes, con los que se puede establecer un nivel de comparación directo entre dos tipos de suelos para un diseño de las mismas características.

Se realiza el diseño de acuerdo al recurso digital elaborado por Luis Vásquez y Luis Velásquez, el que incorpora la variable del módulo resiliente, además de las variables propias del método de diseño.

El diseño comparativo a realizar se establece para las siguientes condiciones, presentadas a continuación:

1. Confiabilidad.

Nivel de confianza (%)	90%
Zr	-1,282

SN	0,44
Sw (del estudio de tránsito)	0,21
So	0,49
Zr x So	-0,62

2. Niveles de Servicio.

PSI inicial	4,20
PSI final	2,00
Delta de PSI	2,20
Función Gt	-0,089

3. Tránsito.

W_{18}	5.000.000
$\log(W_{18})$	6.699

4. Efecto del agua en las capas granulares de la estructura.

Calidad del drenaje	Excelente
Porcentaje del tiempo de exposición a humedades cercanas a la saturación	10%

5. Características no lineales de los materiales granulares

	k_1	k_2	Condición
Base granular	8.000	0,6	Seca
Subbase granular	8.000	0,5	Seca

k_1, k_2 : Constantes.

Las variables que realmente importan para este diseño las presentan los áridos en cuestión, se presentan los datos para ambos áridos. Los correspondientes a la escoria se escogen de los resultados obtenidos por los ensayos, mientras que con el árido tradicional se realizarán de acuerdo a valores entregados por el laboratorio de vialidad.

Para la escoria se consideran los siguientes valores de CBR y módulo resiliente, presentados con sus respectivas unidades:

Tabla 5.2 CBR y Módulos Resilientes para árido de escoria.

Capa	CBR %	Módulo Resiliente [psi]
Base Granular	140	60.383
Subbase Granular	120	54.710

Se presentan valores muy elevados de CBR, esto gracias a la geometría de angulosa que presenta la escoria lo que mejora la fricción del estabilizado y a la dureza de la roca constituyente.

6. Estructura

Capa	Tipo	Módulo resiliente (psi)	Coefficiente estructural de capa (a)	Coefficiente de drenaje (m)	Número estructura I (SN)	Espesor calculado (D) (plg.)	Espesor redondeado o mínimo - D* - (plg.)
1	Concreto asfáltico	606.420	0,440		2,045	4,65	5,00
2	Base granular	60.383	0,200	1,28	2,122	-0,31	6,00
3	Subbase granular	54.710	0,200	1,28	3,739	0,04	6,00
4	Subrasante	11.153					

El valor negativo para la base granular en el espesor calculado, hace mención a que esta capa no se hace necesaria, el pavimento flexible funcionará de manera adecuada sólo con la subbase y el concreto asfáltico.

Para el árido tradicional se consideran valores para base y subbase granular entregados por el laboratorio de vialidad, presentados en la siguiente tabla 5.3:

Tabla 5.3 CBRs y Módulos Resilientes para árido tradicional.

Capa	CBR %	Módulo Resiliente [psi]
Base Granular	110	51.747
Subbase Granular	60	35.108

Estos CBR son menores debido a la presencia de los áridos rodados los cuales no se deslizan al momento de ejercer presión sobre la muestra confeccionada. Para la determinación del módulo resiliente se extraen valores de ITS obtenidos en el trabajo de título de Denisse Páez [28], en donde se obtuvo que para muestras con áridos tradicionales se logra un módulo resiliente de 550.150 [psi].

7. Estructura

Capa	Tipo	Módulo resiliente (psi)	Coefficiente estructural de capa (a)	Coefficiente de drenaje (m)	Número estructural I (SN)	Espesor calculado (D) (plg.)	Espesor redondeado o mínimo - D* - (plg.)
1	Concreto asfáltico	550.150	0,440		2,167	4,92	5,00
2	Base granular	51.747	0,197	1,28	2,500	1,20	6,00
3	Subbase granular	35.108	0,193	1,28	3,739	0,14	6,00
4	Subrasante	11.153					

De acuerdo a los resultados del espesor calculado las diferencias, se observa claramente que en la utilización del árido alternativo disminuyen estos en comparación con el agregado tradicional, impactando de manera positiva como un ahorro de material para las capas granulares, se observa además de que disminuye el espesor del concreto asfáltico, debemos sumar que el contenido de ligante asfáltico es un 2% menor, influyendo directamente en los costos de la obra vial.

Tabla 5.4 Diferencia de espesores entre diseños.

Espesor calculado Escoria (plg.)	Espesor calculado Tradicional (plg.)	Diferencia de espesores (plg.)	Diferencia de espesores (cms.)
4,65	4,92	0,27	0,69
-0,31	1,2	1,51	3,84
0,04	0,14	0,1	0,25

5.5 Análisis de Costos

La construcción de obras viales determinada por el Ministerio de Obras Públicas acepta proyectos que posean un costo no mayor a \$80.000.000 por kilómetro como solución de camino básico, basados en esto se realizará un análisis comparativo para 1 kilómetro con ambos agregados pétreos. El que posee las siguientes características, es un tramo recto en un terreno totalmente horizontal, ambos tendrán las mismas alturas en cada capa constituyente, lo que permite contrastar de forma directa y bajo un mismo diseño las diferencias económicas presentes.

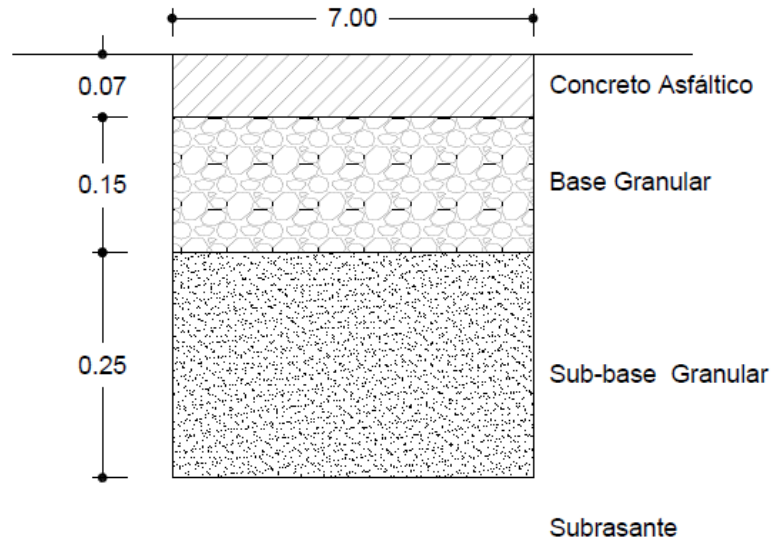


Figura 5.2 Estructura pavimento flexible a calcular.

Los costos para las capas se valoran por metro cúbico de forma unitaria, para luego generar un costo por el total que involucra el proyecto en sí. Los precios por metro cúbico presentado para el árido tradicional, son referencia del estudio que realizó el Ministerio de Obras Públicas específicamente la Dirección de Vialidad, “Valor del patrimonio vial de la red nacional - año 2009”, dentro del cual se encuentran los valores unitarios correspondientes al año 2009, estos han sido actualizados conforme al IPC hasta la fecha actual con una tasa total de 22,9 % para agregar al coste inicial, según el instituto nacional de estadísticas (INE), el resumen de estos valores se muestran en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Costos unitarios actualizados.

Capa	Año 2009	Tasa IPC %	Año 2015
Concreto Asfáltico (\$/m ³)	83.255	58	102.373
Base Granular (\$/m ³)	8.875	58	10.913
Subbase Granular (\$/m ³)	6.867	58	8.444

Para estos costos actualizados se realiza la proyección del valor por kilómetro de una obra vial idealizada, para áridos tradicionales. Obteniéndose un costo total de \$76.386.100 como se muestra en el resumen de cubicaciones de la tabla 5.6, este total estaría bajo los \$80.000.000 que se imponen como límite máximo.

Tabla 5.6 Cubicaciones y costos de obra vial para árido tradicional.

ÁRIDO TRADICIONAL					
Capa	Altura [cm]	Ancho [mt]	Volumen [m3]	Precio / m3	Precio / Km
Concreto Asfáltico	7	7	490	\$ 102,340	\$ 50,146,600
Base Granular	15	7	1,050	\$ 10,915	\$ 11,460,750
Subbase Granular	25	7	1,750	\$ 8,445	\$ 14,778,750
				Total	\$ 76,386,100

Los valores unitarios para la escoria de cobre, son calculados en constancia de que no existen costos de extracción de este producto, solo de transporte y proceso en cuanto a la confección de bandas, además el concreto asfáltico posee una disminución en el contenido óptimo de ligante asfáltico como se expone en la tabla 5.7. Con estos antecedentes se calculan los valores unitarios, que se estima según los valores anteriores, presentan una disminución en referencia al árido tradicional. Consiguiendo un valor total de \$ 66.850.000 que es \$ 9.536.100 un 13% más económico.

Tabla 5.7 Cubicaciones y costos de obra vial para árido de escoria de cobre.

ÁRIDO ESCORIA					
Capa	Altura [cm]	Ancho [mt]	Volumen [m3]	Precio / m3	Precio / Km
Concreto Asfáltico	7	7	490	\$ 95,000	\$ 46,550,000
Base Granular	15	7	1,050	\$ 8,500	\$ 8,925,000
Subbase Granular	25	7	1,750	\$ 6,500	\$ 11,375,000
				Total	\$ 66,850,000

Si se realizarán estos cálculos incorporando las diferencias de altura en las capas que genera la incorporación de escoria en el diseño estructural, sería aun mayor la diferencia de precios, esto porque se observa que se necesitan menores espesores de capas con la escoria, debido a sus propiedades.

6 CAPÍTULO VI: Conclusiones y recomendaciones.

6.1 Conclusiones

La incorporación de la escoria de cobre como árido, en las capas constituyentes de una obra vial resulta factible luego de verificar los requisitos establecidos en el Manual de Carreteras volumen 5 “Especificaciones técnicas generales de construcción”, además este subproducto posee mejores propiedades mecánicas que un árido tradicional en algunas de estas aplicaciones, como es el caso de las bases granulares, hormigones, mezclas asfálticas en caliente.

En los lugares de acopio se conoce exactamente la cantidad de material como es el caso del lugar de estudio con más de 2.000.000 de toneladas de escoria de cobre, el reciclaje de este material beneficiará directamente a la zona cercana a la planta de refinación de cobre, disminuyendo el impacto ambiental y social que genera la presencia de las canchas de acopio en este lugar, gracias a la incorporación de la escoria en soluciones y diseños de obras viales es posible generar una visión más limpia del sector evitando problemas de polución o posibles filtraciones de este al agua, que aunque se considera inocuo a la salud, el fino se puede infiltrar al agua salada y por su alta densidad cubrir la vegetación marina y generar problemas de alimentación a la fauna marina.

En la aplicación de la escoria como material de bases y subbases el porcentaje de agua, según lo obtenido por el proctor modificado, es de 3,8% para la compactación de estas capas, impulsando la disminución del uso del recurso hídrico que está en escases en este último tiempo. Esta es una gran ventaja desde el punto de vista ambiental y beneficioso económicamente.

En el diseño estructural de pavimento se logra disminuir considerablemente el porcentaje de asfalto requerido a un 3%, al determinar el óptimo según la normativa nacional siendo que los diseños tradicionales poseen sobre un 5% de asfalto, se pudo observar además la influencia en los espesores de las capas reduciendo estos lo que agrega valor en la factibilidad económica del diseño en sí. Realizando de esta manera diseños estructurales sustentables, gracias a la reutilización de un desecho convirtiéndolo en un material reciclado, y a la vez disminuyendo los niveles óptimos de ligante.

Un análisis de costos, para un mismo diseño de pavimento flexible en condiciones ideales, se observa que la utilización de escoria frente a los agregados tradicionales, genera una disminución de un 13% del valor total. Aunque se observa en el diseño estructural que la capa de base granular no es necesaria y el pavimento funcionará igual, pero se piensa que esta ventaja económica y técnica puede llegar a ser mucho mayor, porque los costos unitarios para la escoria no fueron disminuidos mayormente.

En frío, al mezclar la escoria con una emulsión asfáltica se observa que desplaza el agua de manera inmediata, no logrando su incorporación en lechadas asfálticas y mezclas asfálticas en frío, este problema se puede analizar desde un punto de vista químico, lo cual escapa de los alcances del estudio.

En el uso de hormigones, que es donde se encuentran mayores estudios dentro de la bibliografía nacional, se encontraron buenos resultados, ya que se logró un aumento de 12% de la resistencia

en comparación con áridos tradicionales, también un 11% de aumento en la densidad del hormigón, algo importante es que al poseer baja absorción el árido genera beneficios a la mezcla en lo que refiere al agua de amasado y curado posterior a su confección.

Dentro de sus ventajas, lo que llama mucho la atención, es la baja absorción que se puede pensar afectará su adherencia con los ligantes asfálticos o en las pruebas de hormigón, sin embargo se logró obtener resultados mejores de los esperados.

El presente trabajo, generó un impacto inmediato en el sistema público y privado, el MOP en el sector de vialidad y CODELCO Ventanas, en conjunto expusieron lo siguiente:

“La iniciativa contempla extraer un volumen aproximado de 525.000 [m³], lo que significa un ahorro total de \$ 525 millones de pesos en materiales. De esta forma se incorporará su uso a los estudios de ingeniería, que ya se encuentran en ejecución, como el mejoramiento de la Ruta F-216, la ampliación de la Ruta F-30-E, y por licitar la ampliación Ruta F-210 Acceso a Quintero. Asimismo con respecto a obras viales se incorporará su uso al mejoramiento de la Ruta F-190, Ruta 65D228 Cruce F-220 Chilicaquén y Ruta 65E134 Cruce F-126 – El Leoncito. CODELCO Ventanas”.

6.2 Recomendaciones

Para los tratamientos superficiales se observa que el considerar la absorción solo como un factor no es recomendable, como en el caso de este trabajo se recomienda incluir la absorción como una variable propia del árido a utilizar, situación que no considera el método de diseño de la dimensión mínima promedio.

Estudiar desde otro ámbito el problema que se produce con las mezclas en frío como es el caso de la lechada, debido al quiebre acelerado de la mezcla.

Realizar aplicaciones de prueba para cada solución obtenida, teniendo en cuenta las consideraciones para cada uso al momento de su implementación.

Pensar en brindar soluciones de un determinado tema con las mismas características del anterior y si es posible mejorarlas, con la incorporación de materiales reciclados o disminuyendo el consumo de recursos que se creen inagotables, es realizar ingeniería civil sustentable.

Bibliografía

- [1] IVÁN ALEJANDRO OYARZUN KNEER 2013. Influencia de las escorias de cobre en la fabricación de hormigón. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Austral de Chile.
- [2] SEBASTIÁN ANDRÉS ORIZOLA GÓMEZ 2006. Uso de escorias de cobre en cementos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [3] ALEJANDRO PADILLA RODRIGUEZ 2007. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech.
- [4] DEPARTAMENTO DE GESTIÓN VIAL 2010. Valor del patrimonio vial de la red vial nacional – año 2009. Estudio.
- [5] PEDRO REYES et al. 2010. Opciones para el manejo y comercialización de escoria. Presentación.
- [6] DANIEL LOVERA DÁVILA, VLADIMIR ARIAS, ROSA CORONADO FALCÓN 2004. La valoración de las escorias metalúrgicas como recursos industriales. Paper, Revista del Instituto de Investigación FIGMMG.
- [7] A. NAZER, O. PAVEZ, F. ROJAS, C. AGUILAR 2010. Una revisión sobre los usos de las escorias de cobre. Paper, Congreso IBEROMET XIX CONAMET/SAM.
- [8] MAILE BOZA REGUEIRA 2011. Utilización de escorias de acería como material de construcción. Memoria de título, Universidad de Holguín (Cuba)
- [9] LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD, MOP. Curso Laboratorista Vial. 5ª edición, Vol. II. Santiago, Chile, 2000. Libro de curso de laboratorio.
- [10] www.codelcoeduca.cl.
- [11] LÓPEZ, J. 2008. Determinación de la actividad del cobre en el sistema (SiO₂-Cu₂-FeO). Tesis Ingeniero Metalúrgico y Matemático, Instituto Politécnico Nacional.
- [12] ELIAS, X. 2009. Reciclaje de residuos Industriales; Residuos Sólidos urbanos y fangos depurados. Segunda Edición. Madrid. Díaz de Santos.
- [13] PUERTAS, F. 1993. Escorias de Alto Horno: Composición y comportamiento hidráulico. Materiales y Construcción. Paper, CSIC - Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- [14] AMARAL, L. 1999. Hormigones con escoria de horno eléctrico como árido: Propiedades, durabilidad y comportamiento Ambiental. Tesis Doctoral. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech.
- [15] ALMEIDA, W; J. PEREIRA; M. BATISTA. 2007. *Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete*. Artículo, Diario de Ciencia de Materiales; Apr2007, vol. 42.

- [16] ROJAS F. 2004. Estudio de prefactibilidad técnica del uso de la escoria de cobre en materiales de construcción. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Atacama, Universidad de Atacama.
- [17] ANGIOLANI, A.1960. Introducción a la química industrial; Fundamentos químicos y tecnológicos con 150 figuras. Santiago, Editorial Andres Bello.
- [18] MANUAL DE CARRETERAS. 8.101.1 Suelos: Especificaciones para Sub-bases, Bases y Carpetas de Rodado Granular.
- [19] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.205 Formación y Compactación de Terraplenes.
- [20] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.301 Subbases Granulares.
- [21] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.302 Bases Granulares.
- [22] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.303 Bases Granulares de Rodadura.
- [23] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.406 Lechada Asfáltica.
- [24] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.407 Tratamientos Superficiales.
- [25] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.408 Mezclas Asfálticas en Caliente.
- [26] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 5, Sección 5.409 Mezclas Asfálticas en Frío.
- [27] MANUAL DE CARRETERAS. Volumen 3, Sección 3.604 Diseño de Pavimentos Nuevos.
- [28] DENISSE PÁEZ GÓMEZ 2013. Determinación de variables influyentes en estabilidad de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente mediante método Marshall. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Valparaíso.
- [29] MARTÍNEZ A. (2000), Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución, Universidad Politécnica de Cataluña.

ANEXOS

A.- ENSAYOS

A.1.- Proctor Modificado

DATOS DE LA COMPACTACIÓN					
Determinación	1	2	3	4	5
Humedad aparente	2%	3%	4%	5%	6%
Agua agregada	140	210	280	350	420
Humedad real	2.1	2.9	3.8	4.7	5.3
Peso Molde + Material	8630	8706	8769	8775	8809
Peso Molde solo	2760	2760	2761	2762	2763
Peso Material solo	5870	5946	6008	6013	6046
Volumen del Molde	2126	2126	2127	2128	2129
Densidad Comp. Húmeda	2.761	2.797	2.825	2.826	2.840
Densidad Comp. Seca	2.705	2.718	2.722	2.698	2.696

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD										
Cápsula	X8	X6	X7	X5	U	107	E	P	113	4
Peso Cápsula	111.4	110	109.9	111.9	90.3	92	94.1	88.5	96	78.6
Peso Cáps. + Suelo húmedo	1319.2	1340.2	1201	1364.3	1264	1270.6	1474.6	1552.7	1445.3	1389.5
Peso Cáps. + Suelo seco	1295.1	1314.9	1169.5	1330.2	1220.5	1228.7	1409.9	1488.8	1375.1	1325
Agua	24.1	25.3	31.5	34.1	43.5	41.9	64.7	63.9	70.2	64.5
Peso Suelo seco	1183.7	1204.9	1059.6	1218.3	1130.2	1136.7	1315.8	1400.3	1279.1	1246.4
Humedad real	2.04	2.10	2.97	2.80	3.85	3.69	4.92	4.56	5.49	5.17
Promedio	2.1		2.9		3.8		4.7		5.3	
Humedad de Saturación	9.8		9.7		9.6		9.9		10.0	



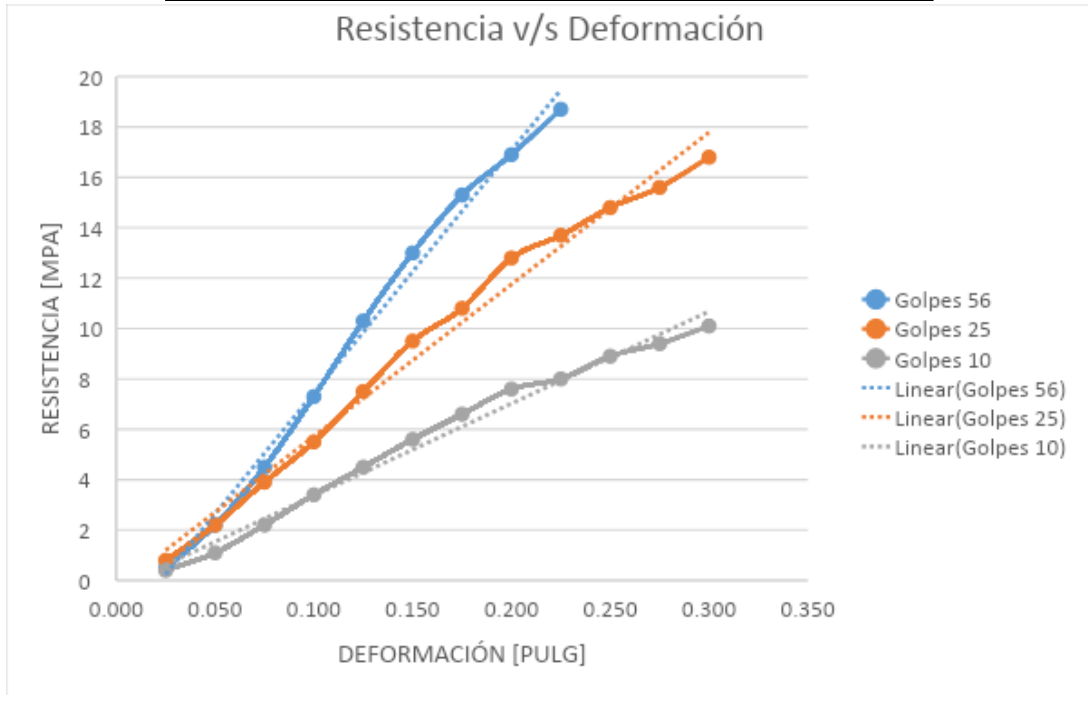
A.2.- CBR

DETERMINACIÓN DE LA COMPACTACIÓN			
Determinación	1	2	3
Molde	Ñ	F	C
Golpes	56	25	10
Humedad Aparente	3.8	3.8	3.8
Agua Agregada	266	266	266
Humedad Real	3.9	4.0	3.8
Peso Molde + Material	9790	9743	9692
Peso Molde solo	4181	4113	4164
Peso Material solo	5609	5630	5528
Volumen del Molde	2131	2122	2131
D.C.H.	2.820	2.653	2.594
D.C.S.	2.714	2.550	2.500
% CBR	182	130	82

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD						
Cápsula	E	F	107	113	X5	X7
Peso Cápsula	94.1	90.7	92	96	111.86	109.83
Peso Cáp. + Suelo húmedo	961.8	921.1	822.8	965.4	903	739.4
Peso Cáp. + Suelo seco	927.6	891.3	789.5	937.6	875.1	715.9
Agua	34.2	29.8	33.3	27.8	27.9	23.5
Peso Suelo seco	833.5	800.6	697.5	841.6	763.24	606.07
Humedad real	4.1	3.7	4.8	3.3	3.7	3.9
Promedio	3.9		4.0		3.8	

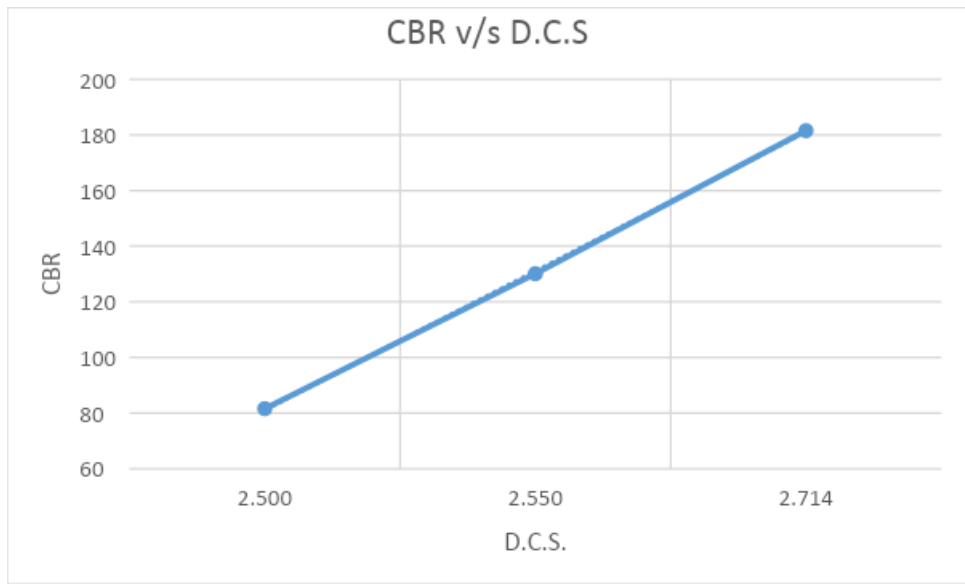
		PENETRACIÓN					
		Golpes 56 Molde Ñ		Golpes 25 Molde F		Golpes 10 Molde C	
Tiempo [Seg]	[Pulg]	Lectura	Carga	Lectura	Carga	Lectura	Carga
		Dial	[Mpa]	Dial	[Mpa]	Dial	[Mpa]
30	0.025	18	0.5	29	0.8	14	0.4
60	0.050	80	2.2	81	2.2	39	1.1
90	0.075	169	4.5	144	3.9	82	2.2
120	0.100	275	7.3	206	5.5	127	3.4
150	0.125	388	10.3	280	7.5	168	4.5
180	0.150	490	13	357	9.5	210	5.6
210	0.175	577	15.3	408	10.8	248	6.6
240	0.200	640	16.9	484	12.8	285	7.6
270	0.225	708	18.7	517	13.7	301	8

300	0.250			558	14.8	333	8.9
330	0.275			588	15.6	355	9.4
360	0.300			636	16.8	381	10.1



D.C.S.	2.500	2.550	2.714
% CBR	82	130	182

D.M.C.S	2,722
CBR	146 %



A.3.- Trituración del fino

GRANULOMETRIA						
	RETENIDO		PASA			
TAMICES	PESO (GR)	%	%			
3/4"	0	0	100			
1/2"	2161	16	84			
3/8"	2017	15	69			
1/4"	2413	18	52			
N° 4	1383	10	42			
N° 8	2467.6	18	24			
N° 10	395.1	3	21	% Retenido	Total Ret.	% Grado
N° 16	948.9	7	14	9.8	15.4	64
N° 30	763.7	6	8	5.6		36
N° 40	236.7	2	6		Total	100
N° 50	197.1	1	5			
N° 100	274.9	2	3			
N° 200	154.4	1	2			
R	13.6	0				

Método de Ensaye	Material		Tamices en mm para	
	Tipo	Grado	Corte	Finos Producidos
Impacto	Fino	2.5	10 - 5	0.315
		1.25	5 - 2.5	0.16

Grado	Grado 2.5		Grado 1.25	
Determinación	1	2	1	2
Muestra + Molde	2315	2318	2306	2301
Mu. + Mo. Ensayado	2313	2315	2301	2298
Molde	1522	1522	1522	1522
Muestra	791	793	779	776
Retenido 0.315 mm	771.7	771.2	766.6	757.9
Pasa 0.315 mm	17.86	21.08	11.8	15.55
IT parcial individual	2.3	2.7	1.5	2.0
IT parcial	2.5		1.8	
% Retenido	64		36	
IT total	1.6		0.6	

IT total	2.2
----------	-----

A.4.- Desgaste en máquina de Los Angeles

DESGASTE MEDIANTE MÁQUINA DE LOS ANGELES									
TAMICES	GRANULOMETRÍA		Asignación de % P.R. de la granulometría original para cada grado de ensaye						
			1	2	3	4	5	6	7
mm	% que pasa	% parcial ret.	80 - 40	50 - 25	40 - 20	40 - 10	20 - 10	10 - 5	5 - 2.5
80 - 63	100	0	0						
63 - 50	100	0	0						
50 - 40	97	3	3	3					
40 - 25	91	6		6	6	6			
25 - 20	85	6			6	6			
20 - 12.5	71	14				14	14		
12.5 - 10	57	14				14	14		
10 - 6.3	35	22						22	
6.3 - 5	24	11						11	
5 - 2.5	9	15							15
Sumatoria % parcial retenido			3	9	12	40	28	33	15

Masa Inicial (gr.)	5010
Masa Final (gr.)	3723
Diferencia (gr.)	1287
Desgaste L.A. (%)	26

B.- ANEXO FOTOGRÁFICO

B.1.- Fotografías generales



B.2.-



Tratamiento Superficial



B.3.- Mezclas asfálticas en caliente



Figura B- STYLEREF 1 's 0. SEQ Figura 1' ARABIC 's 1 12 Compactación marshall.



C.- NOMOGRAMA DE HEUKELOM

