UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERIDO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO-CHILE

UTILIZACIÓN DE ESCORIA DE COBRE DE CODELCO VENTANAS COMO AGREGADO PETREO PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES ASFÁLTICOS SIMPLES EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO

Memoria de titulación presentada por
YAICHI ESTEBAN ANDRÉS PÉREZ MEJÍAS

Como requisito para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
GUILLERMO BRANTE LARA

Profesor Correferente
RODRIGO DELGADILLO STURLA

ENERO 2017

Por pasar hambre, por mí
Emigrar a otro país, con cultura e idioma desconocido, por mi
Volver abandonante a ti misma, por mí
Por luchar contra tu familia, por mí
Por sufrir muchas veces en soledad, por mí
Hoy este triunfo no es mío, es tuyo
Te amo Mamá

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos primero que todo a Dios por darme la fuerza para mantenerme firme en las adversidades. A mis padres por apoyarme en todo momento y a Johana por ser mi cable a tierra.

Agradezco a los profesores que formaron parte de esta investigación. En primer lugar al profesor Guillermo Brante, quien me recibió y acompañó a lo largo de esta investigación como profesor guía, manifestándome siempre su confianza y apoyo. En segundo lugar agradezco al profesor Rodrigo Delgadillo, quien siempre presentó una buena disposición y cercanía ante mis constantes consultas.

Agradezco también a los miembros del Laboratorio Regional de Vialidad de Valparaíso, quienes estuvieron conmigo acompañándome, enseñándome y corrigiéndome a lo largo de toda esta investigación. En especial quiero agradecer a Victor Pablo, don Carlos Pérez, Daniel y don José, quienes con su experiencia y creatividad, me ayudaron en los momentos en que se requerían soluciones eficaces. También agradezco al Ingeniero Civil Jorge Boock, por el constante aporte de ideas.

Doy gracias también a los laboratoristas pertenecientes al LEMCO, quienes desde que realicé mi primera práctica fueron parte de mi formación universitaria. Agradezco a don Rodrigo Verdugo, a Maximiliano, a Rolando, y de manera especial a don René Martínez, quien siempre me recibió de manera cercana ante cualquier duda o complicación que tuve, tanto en mis años de estudio como en la realización de esta investigación.

Quiero agradecer también a las personas que sin conocerme me ayudaron en esta investigación: Al profesor Jorge Valdés, Mónica Becerra, María Elena Ortíz, y Raquel Arroyo.

Muchos momentos complicados (que no fueron pocos), hubiesen sido muy difíciles de superar sin la compañía de mis amigos. Siempre recordaré con cariño esas noches de no estudio con Pablo Mella, esas interrupciones y ladridos de Jaime Musso, la histeria y frases raras de Eduardo Alemany, las canciones de estadio de Juan Pablo Delgadillo, la tranquilidad y bondad de Juanito San Martín y lo práctico y poco ecológico de Jairo Garín. Gracias por todo amigos.

El paso por esta Universidad ha sido una etapa de gran crecimiento personal, emocional y profesional. Quiero agradecer a todas las personas que fueron parte de ella.

RESUMEN

La escoria de cobre es uno de los principales residuos obtenidos del proceso pirometalúrgico aplicado a los concentrados de cobre que ingresan a fundición. Este desecho industrial es considerado un pasivo ambiental, por lo que si bien existe experiencia internacional que avala el manejo y la comercialización de este material, generalmente permanece acopiado ocupando grandes extensiones de superficie de terreno y no brindando un uso práctico.

En esta investigación se estudió la factibilidad del uso de la escoria de cobre de CODELCO Ventanas como reemplazo total del agregado pétreo utilizado en tratamientos superficiales asfálticos simples.

En una primera instancia se evaluó los factores ambientales que permiten asegurar que el uso de este material corresponde efectivamente a una alternativa sustentable en la construcción de caminos, realizando estudios de fluorescencia de rayos X y análisis de lixiviación que permitieran concluir que este residuo no es peligroso.

Para estudiar las propiedades de la escoria como agregado para tratamientos superficiales, y debido a que estos representan la solución vial básica más utilizada en la Región de Valparaíso, se trabajó con áridos extraídos del Río Aconcagua y del Estero La Patagua, de manera de realizar así la evaluación del comportamiento de la escoria de manera comparativa según las especificaciones dispuestas por el Manual de Carreteras. Para verificar el cumplimiento de estas especificaciones, se realizó en laboratorio evaluaciones de densidad del árido, resistencia a abrasión, resistencia a desintegración por sulfatos de sodio, cubicidad de partículas y adherencia agregado ligante.

Sumado a esto, se evaluó el comportamiento de la fórmula de dosificación de la dimensión mínima promedio, la cual corresponde a la fórmula para dosificación en tratamientos superficiales empleada en el país. Para realizar esta evaluación se utilizaron los áridos tradicionales ya mencionados, replicando su granulometría con escoria de cobre, con el objetivo de independizar los resultados de efectos provocados por la dimensión de las partículas. La evaluación de la dosificación de agregado se realizó mediante colocación manual del árido en un área delimitada, mientras que la evaluación de la dosificación de agregado se realizó a través de simulaciones de tránsito en laboratorio.

Finalizada la investigación, se pudo concluir que la escoria de cobre cumple con todos los requisitos establecidos por el Manual de Carreteras para ser utilizado como árido en Tratamientos Superficiales asfálticos. Este residuo presenta alta cubicidad, densidad e incluso mejor adherencia con el ligante que los áridos tradicionales, lo que permitiría obtener una mejor trabazón con la base granular. La fórmula de dosificación utilizada presenta buen funcionamiento, tanto para la dosis de árido como para la de ligante, por lo que no requiere factores de corrección.

En términos ambientales, se comprobó el impacto positivo ambiental que generará la utilización de este residuo en la Región de Valparaíso. Se pudo comprobar mediante fluorescencia por rayos X que la escoria depositada en distintos sectores del botadero de CODELCO Ventanas posee la misma composición. Mediante lixiviación, según lo establecido en el "Reglamento Sanitario Sobre Manejo De Residuos Peligrosos", se pudo demostrar que los posibles contaminantes no evidenciaron concentraciones que superaran la norma establecida, por lo que se reafirma la condición de pasivo ambiental.

Considerando los resultados obtenidos, se recomienda el uso de la escoria de cobre, afirmando que representa una alternativa sustentable en la construcción de caminos básicos para la Región de Valparaíso.

ABSTRACT

The copper slag is one of the main residues obtained from the pyrometallurgical process applied to the copper concentrates that enter the smelter. This industrial waste is considered an environmental liability, so although there is international experience that guarantees the management and commercialization of this material, it usually remains occupied by large tracts of land and does not provide practical use.

In this research the feasibility of using the CODELCO Ventanas copper slag as a total replacement of the stone aggregate used in simple asphalt surface treatments was studied.

In the first instance, environmental factors were evaluated to ensure that the use of this material effectively corresponds to a sustainable alternative in the construction of roads, carrying out studies of X-ray fluorescence and leaching analysis to conclude that this residue is not dangerous.

In order to study the properties of slag as an aggregate for surface treatments, and because these represent the most used basic road solution in the Valparaíso Region, we worked with aggregates extracted from the Aconcagua River and the La Patagua Estuary, The evaluation of the performance of the slag in a comparative manner according to the specifications provided by the Road Manual. To verify compliance with these specifications, measurements of aggregate density, abrasion resistance, disintegration resistance by sodium sulfates, particle cubicity and aggregate bonding adhesion were performed in the laboratory.

In addition to this, the behavior of the dosage formula of the mean minimum dimension was evaluated, which corresponds to the formula for dosage in superficial treatments used in the country. In order to carry out this evaluation, the aforementioned traditional aggregates were used, replicating their granulometry with copper slag, in order to make the results of effects caused by the particle size independent. The evaluation of the aggregate dosage was performed by manual placement of the aggregate in a delimited area, while the evaluation of the aggregate dosage was performed through laboratory simulations.

After the investigation, it was possible to conclude that the copper slag fulfills all the requirements established by the Road Manual to be used as aggregate in Asphaltic Surface Treatments. This residue presents high cubicity, density and even better adhesion with the binder than the traditional aggregates, which would allow a better bonding with the granular base. The dosage formula used shows good performance for both the arid and binder doses and therefore does not require correction factors.

In environmental terms, we verified the positive environmental impact that will generate the use of this waste in the Region of Valparaiso. It was possible to verify by fluorescence by X-rays that the slag deposited in different sectors of the dump of CODELCO Ventanas has the same composition. By means of leaching, as established in the "Sanitary Regulation on the Management of Hazardous Waste", it was possible to demonstrate that the possible contaminants did not show concentrations that exceed the established norm, for which reaffirms the condition of environmental liability.

Considering the results obtained, the use of the copper slag is recommended, affirming that it represents a sustainable alternative in the construction of basic roads for the Region of Valparaiso.

Índice

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN 1
2. CAPÍTULO II: OBJETIVOS 2
2.1. Objetivo general 2
2.2. Objetivos Específicos 2
2.3. Alcances 2
3. CAPÍTULO III: ANTECEDENTES GENERALES 3
3.1. CODELCO, División Ventanas 3
3.2. Escoria de cobre 4
3.2.1. El cobre y la generación de escoria 4
3.2.2. Composición de la escoria de cobre 5
3.2.3. Tipos de escoria de cobre 8
3.2.4. Usos alternativos para la escoria de fundición. 11
3.3. Evaluación Ambiental a realizar 12
3.3.1. Elementos a analizar y sus efectos en la salud 12
3.3.2. Análisis mediante Fluorescencia de Rayos X 14
3.3.3. Test de Toxicidad por Lixiviación (Test TCLP) 16
3.4. Tratamientos Superficiales Asfálticos 17
3.4.1. Funciones 17
3.4.2. Factores de desempeño 17
3.4.3. Áridos en Tratamientos Superficiales 18
3.4.4. Ligante asfáltico en Tratamientos Superficiales 19
3.5. Método de dosificación utilizado en Chile 21
3.6. Principales tipos de fallas 24
3.7. Secuencia constructiva 25
4. CAPÍTULO IV: TRATAMIENTOS SUPERFICIALES SIMPLES EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO 27
4.1. El Programa de Caminos Básicos en Chile 28
4.2. Técnicas de conservación básicas utilizadas en Chile 30
4.2.1. Caminos con estabilizador 30
4.2.2. Caminos con capa de protección asfáltica 31
4.3. Uso de Tratamientos Superficiales Simples en la Región de Valparaíso 32
5. CAPÍTULO V: EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA ESCORIA DE COBRE 34
5.1. Utilización de escoria, una mejora ambiental para Ventanas y la Región 35

5.2. Escoria de cobre como alternativa medioambiental a áridos tradicionales 37
5.3. Evaluación de riesgos ambientales en el uso de escoria de cobre 39
5.3.1. Composición de la escoria de cobre de CODELCO Ventanas 40
5.3.2. Evaluación de ingreso SEIA (2013) 41
5.3.3. Análisis de la escoria según fluorescencia de rayos X 43
5.3.4. Evaluación del Residuo según Decreto Supremo N°148 51
6. CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE COBRE COMO ÁRIDO PARA T.S.S 54
6.1. Diagnóstico de la situación actual de la Región de Valparaíso 55
6.2. Granulometría y Bandas de trabajo 57
6.3. Densidad Real, Neta y Absorción de agua en pétreos gruesos. 59
6.4. Cubicidad de partículas 61
6.5. Densidad aparente suelta 62
6.6. Índice de Lajas (NLT-354/91) 63
6.7. Adherencia Árido-Ligante 64
6.7.1. Adherencia por el Método Estático (MC 8.302.29) 64
6.7.2. Adherencia por el Método Dinámico (MC 8.302.31) 65
6.7.3. Adherencia mediante el Método del Hervido (MC 8.302.31) 66
6.8. Ensaye de adherencia para emulsiones mediante Placa Vialit 67
6.8.1. Ensaye en condición seca 69
6.8.2. Ensaye en condición de árido húmedo 69
6.8.3. Ensaye en condición de placa sumergida 70
6.8.4. Ensaye en condición de árido sucio 70
6.8.5. Ensaye con muestra sometida a variaciones de Temperatura 71
6.9. Desintegración con sulfato de sodio 73
6.10. Desgaste 74
6.10.1. Desgaste de Los Ángeles 74
6.10.2. Índice de Trituración 76
7. CAPÍTULO VII: EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE COBRE PARA DOSIFICACIONES SEGÚN LA DIMENSIÓN MÍNIMA PROMEDIO 79
7.1. Factores de diseño utilizados 79
7.2. Comparación de dosificaciones realizadas 80
7.3. Evaluación de dosificación de árido 82
7.4. Evaluación de dosificación de emulsión 83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 88

BIBLIOGRAFÍA 92
ANEXOS 94
A. Cálculo de dosificaciones 94
1. Dosificación para árido tradicional según granulometría del Estero La Patagua 94
2. Dosificación para escoria de cobre según granulometría del Estero La Patagua 96
3. Dosificación para árido tradicional según granulometría del Río Aconcagua 98
4. Dosificación para escoria de cobre según granulometría del Río Aconcagua 100
B. Resultados de ensayes 102
1. Adherencia por método Estático 102
2. Adherencia por método Dinámico 103
3. Adherencia por método del Hervido 104
4. Desintegración por sulfatos 105
5. Ensaye de desgaste de Los Ángeles 106
6. Índice de trituración 107
7. Placa Vialit: Cantidad de ligante residual [kg/m2] 108
8. Placa Vialit: Ensaye a variaciones de temperatura 108
C. Requerimientos para emulsiones asfálticas. 109
1. Requerimientos para emulsiones asfálticas Aniónicas. 109
2. Requerimientos para emulsiones asfálticas catiónicas. 111
D. Certificado emulsión CRS-2 utilizada en ensayes. 112
E. Evaluación Ambiental de la Escoria de Cobre 113
1. Contenido escoria año 2015 113
2. Contenido escoria año 2016 114
3. Resultados de Fluorescencia de Rayos X 115
4. Energía liberada según tipo de elemento 118
5. Resultados Toxicidad por Lixiviación 120
6. Concentraciones máximas permisibles según Test de Lixiviación. 121
F. Registro fotográfico 123
1. Zona de acopio CODELCO Ventanas 123
2. Resultado de exudación para granulometría Río Aconcagua 124
3. Resultado de exudación para granulometría Estero La Patagua 125
4. Zonas de muestreo para Fluorescencia de Rayos X 126

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: CODELCO División Ventanas 3
Ilustración 2: Escoria de cobre 4
Ilustración 3: Proceso pirometalúrgico del cobre 5
Ilustración 4: Microscopía electrónica de la escoria de cobre. 6
Ilustración 5: Tipos de escoria de cobre 8
Ilustración 6: Proceso de vertido 10
Ilustración 7: Tipos de escoria de cobre según modo de enfriamiento 10
Ilustración 8: Maxi-saco de 2000 kg de granalla de escoria de cobre 11
Ilustración 9: Representación esquemática de estructura atómica sometida a rayos X 14
Ilustración 10: Espectro de intensidad v/s energía dispersa 14
Ilustración 11: Limitación de detección en elementos al usar fluorescencia de rayos X 15
Ilustración 12: Esquema de emulsión catiónica y aniónica 20
Ilustración 13: Proceso de llenado de huecos en tratamientos superficiales 21
Ilustración 14: Pérdida de agregado en un tratamiento superficial 24
Ilustración 15: Secuencia constructiva de un TSS 26
Ilustración 16: Efecto de la emisión de polvo en la seguridad vial 28
Ilustración 17: Crecimiento de superficie del botadero de Ventanas (2004-2016) 36
Ilustración 18: Potencial contaminante v/s lixiviación 39
Ilustración 19: Puntos de muestreo para análisis de ingreso al SEIA 41
Ilustración 20: Puntos de muestreo para análisis de fluorescencia por rayos X 43
Ilustración 21: Punto M3 de muestreo para Fluorescencia 43
Ilustración 22: Proceso de medición para método semi-cuantitativo de fluorescencia 44
Ilustración 23: Intensidad de emisión de muestra 1 45
Ilustración 24: Intensidad de emisión de muestra 2 46
Ilustración 25: Intensidad de emisión de muestra 3 47
Ilustración 26: Intensidad de emisión de muestra 4 48
Ilustración 27: Intensidad de emisión de muestra 5 49
Ilustración 28: Diferencias de tamaños en muestra extraída 58
Ilustración 29: Escoria de cobre en patio de acopio de Ventanas. 59
Ilustración 30: Adherencia por método estático 64
Ilustración 31: Proceso de ensaye por Método del Hervido 66
Ilustración 32: Dispositivo de ensaye Placa Vialit 67
Ilustración 33: Placa Vialit para ensaye 68
Ilustración 34: Máquina para impacto para áridos finos 77
Ilustración 36: Dosificación de árido según granulometría del Estero La Patagua 82
Ilustración 37: Dosificación de árido según granulometría del Río Aconcagua 82
Ilustración 38: Procedimiento de ensaye de Exudación. 86
Ilustración 39: Resultados Adherencia por método estático 102
Ilustración 40: Resultados Adherencia por método dinámico 103
Ilustración 41: Resultados Adherencia por método del hervido 104

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Difractograma de la escoria de cobre minera 7
Gráfico 2: Distribución porcentual de la Red Vial según tipo de Carpeta de Rodadura. 27
Gráfico 3: Evolución de las capas de protección en la Red Nacional Vial 29
Gráfico 4: Desarrollo de Caminos Básicos en Chile 30
Gráfico 5: Producción de escorias de cobre por CODELCO 35
Gráfico 6: Distribución granulométrica del Agregado 58
Gráfico 7: Adherencia Vialit v/s Temperatura 71

Gráfico 8: Comparación de Desgaste de Los Ángeles según procedencia del material 74
Gráfico 9: Comparación de Desgaste según Grado de ensaye 75
Gráfico 10: Comparación de Índice de trituración según procedencia del material 77
Gráfico 11: Comparación de Índice de Trituración según Grado de ensaye 78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Óxidos Fundamentales presentes en la escoria. 5
Tabla 2: Principales características físicas de la escoria de cobre 6
Tabla 3: Análisis de Fluorescencia de Rayos X en escoria de CODELCO Ventanas 7
Tabla 4: Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante florescencia, Fuente: Ortizola (2006); Moura (1999); Al-Jabri (2011). 8
Tabla 5: Composiciones y estructuras de las escorias de silicatos 9
Tabla 6: Ciudades Chilenas y nivel de contaminación por arsénico en el aire. 12
Tabla 7: Especificaciones granulométricas para Tratamientos Superficiales 18
Tabla 8: Requisitos de calidad en áridos para Tratamientos Superficiales 19
Tabla 9: Factor de Desperdicio E 22
Tabla 10: Factor de Tránsito T 23
Tabla 11: Corrección por Textura Superficial S 23
Tabla 12: Estabilizadores 31
Tabla 13: Soluciones básicas predominantes en cada Región 32
Tabla 14: Cobertura de Soluciones Superficiales en Caminos Básicos por Región (año 2011) 33
Tabla 15: Promedio de composición anual de CODELCO Ventanas año 2015 40
Tabla 16: Promedio de composición anual de CODELCO Ventanas año 2016 40
Tabla 17: Concentración de metales en suelo de sector de botadero 42
Tabla 18: Resultados de análisis semi-cuantitativo de Fluorescencia de Rayos X 50
Tabla 19: Resultados obtenidos por Test de Lixiviación según decreto 148 52
Tabla 20: Valores límite de referencia para Antimonio y Níquel según Decreto 90 y guía OMS 52
Tabla 21: Registro de Densidad Real Seca [kg/m3] 55
Tabla 22: Registro de Densidad Neta [kg/m3] 55
Tabla 23: Registro de Absorción [%] 55
Tabla 24: Registro de Partículas Chancadas [%] 55
Tabla 25: Registro de Partículas Lajeadas [%] 55
Tabla 26: Registro de Índice de Lajas [%] 56
Tabla 27: Registro de dosificación de Agregado [kg/$\mathbf{m2}$] 56
Tabla 28: Registro de dosificación de Emulsión CRS-2 [l/$\mathbf{m2}$]] 56
Tabla 29: Granulometría para árido de Estero La Patagua 57
Tabla 30: Granulometría para árido del Río Aconcagua 57
Tabla 31: Densidad Real, Neta y Absorción de agua en pétreos gruesos 60
Tabla 32: Cubicidad de partículas 61
Tabla 33: Densidad aparente para granulometría del Río Aconcagua 62
Tabla 34: Densidad aparente para granulometría de Estero La Patagua 62
Tabla 35: Índice de lajas en muestras analizadas 63
Tabla 36: Adherencia por Método Estático 64
Tabla 37: Adherencia por Método Dinámico 65
Tabla 38: Adherencia por Método del Hervido 66
Tabla 39: Ensaye de Placa Vialit para condición seca 69
Tabla 40: Ensaye de Placa Vialit para condición húmeda 69
Tabla 41 : Ensaye de Placa Vialit para condición de placa sumergida 70
Tabla 42: Ensaye de Placa Vialit para condición sucia 70
Tabla 43: Adherencia Vialit v/s Temperatura 71
Tabla 44: Desintegración según granulometría del Estero La Patagua 73

Tabla 45: Desintegración según granulometría del Río Aconcagua *73*
Tabla 46: Clasificación de triturabilidad según ensaye Los Ángeles *76*
Tabla 47: Especificaciones de índice de trituración según tipo de uso *76*
Tabla 48: Factores de diseño propuestos por Laboratorio Regional de Vialidad *79*
Tabla 49: Dosificación según granulometría del Estero La Patagua *80*
Tabla 50: Dosificación según granulometría del Río Aconcagua *80*
Tabla 51: Diferencia porcentual en factores de dosificación entre la escoria de cobre y áridos tradicionales *80*
Tabla 52: Verificación exudación para granulometría del Estero La Patagua *87*
Tabla 53: Verificación exudación para granulometría del Río Aconcagua *87*
Tabla 54: Asignación de Grado de Ensaye para Estero La Patagua *106*
Tabla 55: Asignación de Grado de Ensaye para Río Aconcagua *106*
Tabla 56: Índice de trituración grado 10 según tipo de árido *107*
Tabla 57: Índice de trituración de la escoria de cobre según grado de ensaye *107*
Tabla 58: Cantidad de ligante residual *108*
Tabla 59: Concentraciones máximas de sustancias permisibles *121*

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La red vial en Chile está conformada por un total de 80.583,10 km, de los cuales tan solo 19.850,32 km han sido pavimentados[1], producto principalmente de los elevados costos y procedimientos que esta actividad implica. En la actualidad, el 60,16% de los caminos nacionales no poseen ningún tipo de capa de protección, presentando tan solo una superficie de tierra o ripio, por lo que dada esta situación, aquellos caminos rurales de menor tránsito deben atenderse a través de obras menores de repefilados, recebos de material granulares o ripiaduras. Si bien estas obras pueden solucionar el problema de conectividad, suelen presentar problemas de contaminación, debido a la presencia de polvo excesivo liberado por el tránsito, bajos niveles de desempeño, baja seguridad vial y elevados costos de mantención y conservación.

Con el objetivo de aumentar y mejorar la calidad de la red vial chilena, el Ministerio de Obras Públicas, a través de las Direcciones Regionales de Vialidad, han implementado el uso de soluciones económicas en la superficie de rodadura, mediante el programa de Caminos Básicos. El concepto fundamental detrás de este programa es el de conservar el camino, manteniendo trazado y características actuales, principalmente para tramos que presenten bajos niveles de tránsito. En el caso de la Región de Valparaíso, debido principalmente al tipo de clima existente, se presentan comúnmente soluciones de tipo granular estabilizada y tratamientos superficiales simples (TTS), siendo estos últimos la solución básica predominante en la región.

La presente investigación está dentro del convenio suscrito entre CODELCO Ventanas y el Ministerio de Obras Públicas y consiste en verificar el correcto funcionamiento de la escoria de cobre, residuo ambiental no peligroso que se obtiene del proceso final de la fundición de concentrado de cobre, como árido para tratamientos superficiales simples. Se busca comprobar que el uso de escoria de cobre en tratamientos superficiales simples en la Región de Valparaíso, representa una alternativa sustentable en el diseño de caminos para la región.

Debido a que la escoria de cobre se encuentra en el acopio de Ventanas, se espera que en caso de resultar factible el uso de este material, su utilización sea destinada principalmente a las comunas de la Región de Valparaíso. Considerando que el programa de caminos básicos posee distintas soluciones viales y estados de avance por región, es que en primera instancia se revisará la cobertura actual del programa para la Región de Valparaíso, de manera de poder detectar la real oportunidad del uso de esta solución para esta zona.

Posterior a esto se realizará una evaluación ambiental sobre los impactos que generará este tipo de construcción en la región. Se revisará tanto el incremento de la cantidad de material de manera histórica, como evaluaciones anteriores realizadas por la Superintendencia de Medio Ambiente. Sumado a esto, se estudiarán los efectos de las concentraciones de diversos elementos que existentes en la escoria de cobre, con el objetivo de comprobar que este material cumple con las condiciones para ser caracterizado dentro de la categoría de residuo no peligroso.

Para estudiar este residuo se trabajará principalmente en base a los requisitos definidos por el Manual de Carreteras para este tipo de capa de protección, verificando cada uno de los ensayos solicitados por dicho manual de manera comparativa. Para realizar esta comparación se utilizarán áridos extraídos de las fuentes más comúnmente utilizadas en la zona, el Río Aconcagua y el Estero La Patagua. Sumado a esto, se verificará de manera visual y mediante simulaciones de tránsito a escala de laboratorio el correcto funcionamiento de la dosificación escoria de cobre según método de dosificación de la dimensión mínima promedio.

[1] Se considera Red Vial Pavimentada a los caminos con solución de Asfalto, Hormigón, Mixta y los Caminos Básicos Intermedios.

2. CAPÍTULO II: OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Comprobar la utilidad de la escoria de cobre de CODELCO Ventanas como agregado pétreo de tratamientos superficiales simples, por medio de estudios de laboratorio comparativos con áridos tradicionales de la Región de Valparaíso, y mediante análisis físicos y químicos de su composición respecto de la normativa ambiental, con el fin de ofrecer una alternativa sustentable en el diseño de caminos básicos.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar las propiedades de la escoria de cobre como árido para tratamientos superficiales según los requisitos establecidos por el Volumen 5 del Manual de Carreteras 2015.

- Profundizar los resultados obtenidos en el análisis de adherencia del agregado mediante ensayes alternativos del Manual de Carreteras y normas extranjeras.

- Evaluar el comportamiento de la escoria de cobre en el método de dosificación de la dimensión mínima promedio mediante simulación de tránsito a baja escala.

- Analizar según el Reglamento Sanitario de Residuos Peligrosos (Decreto Supremo N°148), los posibles efectos de los componentes de la escoria de cobre en el medio ambiente.

2.3. Alcances

- Debido a que en la Región de Valparaíso la solución básica predominante corresponde a los tratamientos superficiales simples, no se consideró en esta investigación la evaluación de tratamientos superficiales múltiples.

- Los áridos de escoria de cobre utilizados se obtendrán de centros de acopio de CODELCO División Ventanas.

- El ligante a utilizar corresponderá a una emulsión catiónica CRS-2, mientras que los áridos del Río Aconcagua y del Estero La Patagua usados corresponden a gravilla de 3/8’, ajustada a la banda granulométrica TN 10-2,5.

- Para la evaluación de las propiedades y características de la escoria como árido se trabajará en base a los requisitos para tratamientos superficiales indicados en el Volumen 5 del Manual de Carreteras. La fórmula de dosificación evaluada corresponde a la fórmula de la dimensión mínima promedio.

- Esta investigación no contempló la evaluación de dosificaciones mediante canchas de prueba ni la evaluación de factibilidad económica de la utilización de este residuo.

3. CAPÍTULO III: ANTECEDENTES GENERALES

3.1. CODELCO, División Ventanas

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

Su construcción comenzó a fines del 1959, para ser posteriormente inaugurada en 1964 por la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), hasta que el año 2005 pasó a formar parte de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO). Se escogió este lugar para instalar esta División principalmente por la disponibilidad de agua existente, así como por la cercanía con los puertos de Valparaíso y Quintero, lo que permitiría hacer más eficiente el embarque de los productos.

La División Ventanas está encargada de tratar los concentrados provenientes de las Divisiones Andina, Teniente y una gran cantidad de pequeñas y medianas mineras agrupadas en ENAMI y existentes entre la IV y VI región, como parte del trato del traspaso de la división [1].

Sumado a esto, en División Ventanas se produce ácido sulfúrico, granalla de plata y lingotes de oro en menor cantidad.

Como las instalaciones de esta división se encuentran en el borde costero, la zona de Ventanas posee un área importante en cuanto a biodiversidad. El principal impacto producido en esta zona corresponde al depósito de escoria de cobre, desecho proveniente de la actividad de fundición [2].

CODELCO Ventanas posee una capacidad anual de producción de 400000 toneladas en su refinería, 420.000 toneladas en su fundición y 360.000 toneladas de ácido sulfúrico.

En la Ilustración 1 se puede ver la ubicación actual CODELCO Ventanas.

Ilustración 1: CODELCO División Ventanas

3.2. Escoria de cobre

La escoria de cobre es uno de los residuos industriales finales del proceso pirometalúrgico aplicado a los concentrados de minerales de cobre que ingresan a la fundición. Este residuo habitualmente es depositado y acopiado directamente en vertederos autorizados. En ocasiones, si posee una rentabilidad comercial y previa al vertido final, estas escorias pasarán por un proceso de flotación que permite recuperar los metales contenidos en ella. Finalmente, la escoria resultante se vierte en lugares aptos para ello.

La escoria de cobre se considera un pasivo ambiental y puede permanecer en los lugares de acopio por décadas, lo que involucra la ocupación de grandes extensiones de superficies de terreno. Es por ello que en los últimos años, ha habido un creciente interés en buscar alternativas de uso para éstas, llegando a ser utilizada a nivel mundial en diversos sectores productivos, como un sustituto parcial del cemento hidráulico, como gravilla para líneas de ferrocarriles, como árido en mezclas asfálticas de obras viales, como árido constituyente de los morteros y hormigones de cemento, como abrasivo en la limpieza por chorro de arena de estructuras metálicas y en ocasiones en albañilerías de bloques de escoria moldeados [3].

Ilustración 2: Escoria de cobre

3.2.1. El cobre y la generación de escoria

Uno de los productos obtenidos de la extracción de cobre son los cátodos. Para obtener una pureza del 99,99% en estos elementos, tal como lo requiere el mercado, existen 2 tipos de procesos posibles a aplicar. Estos procesos dependen principalmente del estado en que se encuentre el cobre en la naturaleza, pudiendo estar de forma oxidada o sulfurada.

Los minerales sulfurados son extraídos de la mina, pasan a una etapa de reducción de tamaño que permite liberar las especies valiosas contenidas en ellos, posteriormente a una concentración y fundición de minerales hasta llegar a la etapa de electro refinación, lo que permite obtener los cátodos deseados [4]

La etapa de fundición, también conocida como piro-metalurgia, trabaja con hornos a muy elevadas temperaturas. Dentro de este proceso y producto de las elevadas temperaturas se producen fases líquidas inmiscibles entre sí: la mata rica en cobre, también denominada sulfuro y la escoria de cobre, también llamada óxido. La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria, fundida por las altas temperaturas, pasa a procesos de recuperación de cobre, con el objetivo de presentar finalmente porcentajes inferiores al 1% de este material antes de ser descartadas.

Parte de este proceso se puede observar con más claridad en la Ilustración 3.

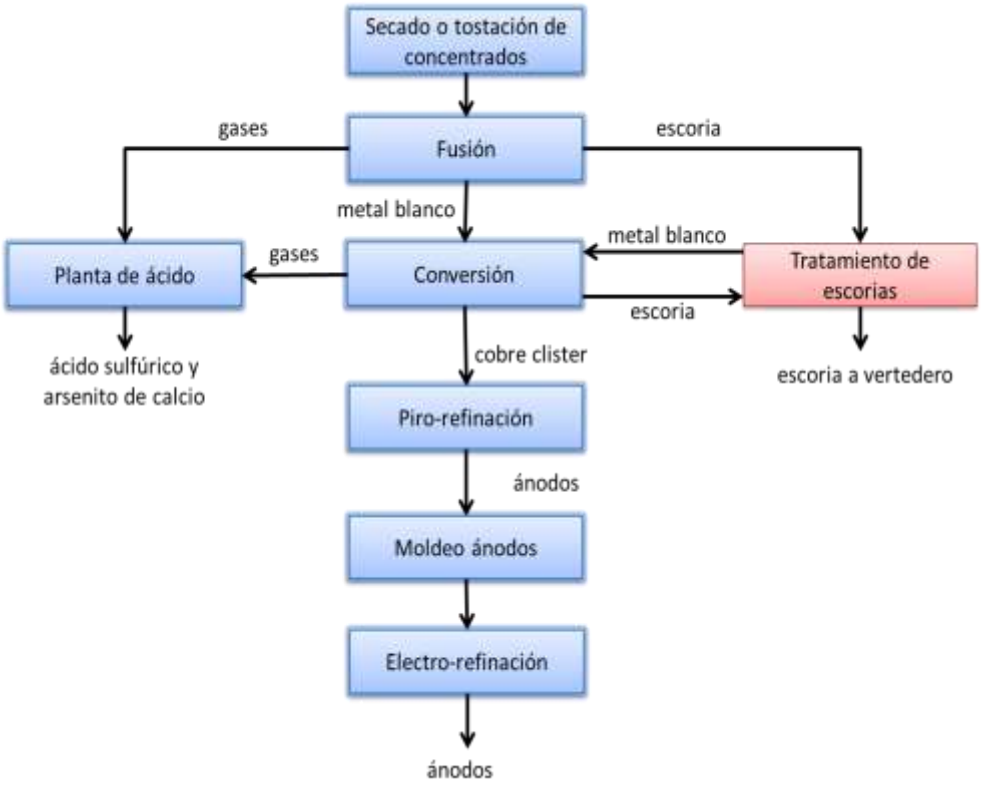


Ilustración 3: Proceso pirometalúrgico del cobre

3.2.2. Composición de la escoria de cobre

La escoria de cobre es formada a partir de los óxidos contenidos tanto en la carga del horno como los producidos durante el proceso piro-metalúrgico. Los óxidos más comúnmente contenidos en la escoria se presentan en la Tabla 1, los cuales varían su presencia en la escoria según la naturaleza de los minerales, de los fundentes, de los concentrados, condiciones de operación, así como otros diversos factores relacionados al proceso de producción [4].

Tabla 1: Óxidos Fundamentales presentes en la escoria.

Tipo de óxido	Presencia en la escoria (%)
Óxidos de hierro (FeO, Fe_3O_4)	30 - 40
Óxidos de silicio (SiO_2)	35 – 40
Óxidos de aluminio (Al_2O_3)	0 – 10
Óxido de calcio (CaO)	0 - 10

La composición química y física de las escorias dependen tanto de la materia prima utilizada y de la tecnología empleada, como del proceso de producción utilizado. Debido a que las escorias se producen a partir de los 1600 °C, se encontrarán en estado líquido, por lo que su posterior estructura dependerá considerablemente del método de enfriamiento. En el caso de existir enfriamiento rápido, la estructura quedará colapsada y presentará una estructura amorfa, siendo sus propiedades las de un material altamente reactivo [5].

Un punto importante a considerar son las fases cristalinas y vítreas, debido a que en la fase vítrea reside el componente hidráulicamente activo de la escoria, pudiendo considerar la fase cristalina como inerte, mientras que la fase vítrea supera el 69 % en el caso de la escoria de alto horno. El porcentaje de la fase vítrea presente puede variar desde un 45 % para las enfriadas lentamente, hasta un 95 % para las enfriadas de manera brusca [6]. Se presenta en la Tabla 2 las principales características físicas de la escoria de cobre.

Tabla 2: Principales características físicas de la escoria de cobre

Característica	Detalle
Apariencia	Color negro, textura lisa o porosa
Forma de las partículas	Irregular con bordes agudos
Densidad [kg/m^3]	3160 - 3870
Absorción de agua (%)	0,15 – 0,55
Dureza	4 – 6
Granulometría	Variada según su formación.

Debido en parte al sistema de producción, la escoria suele tener una matriz vítrea que mantiene los metales pesados atrapados, eliminando la posibilidad de lixiviar. Es por esto que este material se cataloga como inerte, lo que permite un gran uso en sistemas de aplicación directo. Se ha mencionado que el sistema de enfriamiento empleado es clave a la hora de elaborar distintos tipos de escoria. Por una parte, al existir un enfriamiento brusco al aire suele generar una escoria porosa y ligera, muy apta para fabricar con ella hormigones ligeros. Por el contrario, el enfriamiento lento provoca una recristalización de la escoria, aumentando la dureza y reduciendo considerablemente la porosidad y la capacidad de absorción de agua, por lo que resulta un material muy conveniente para la formulación de morteros, bases para carreteras, balasto para ferrocarril y agregados para hormigones.

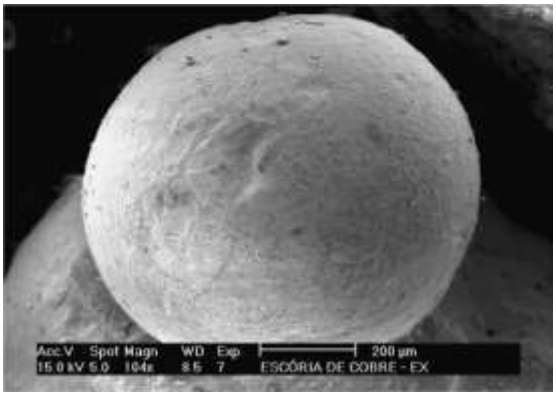


Ilustración 4: Microscopía electrónica de la escoria de cobre.

Los resultados obtenidos de la micrografía de escoria de cobre, mostrados en la Ilustración 4, demuestran que los granos del material son originalmente esféricos, con una superficie lisa y no porosa. Los resultados de difracción de rayos X, presentados en el Gráfico 1, indicaron la presencia de fayalita y magnetita. Se obtuvieron algunas frecuencias altas, lo que sugiere una estructura básicamente cristalina [7].

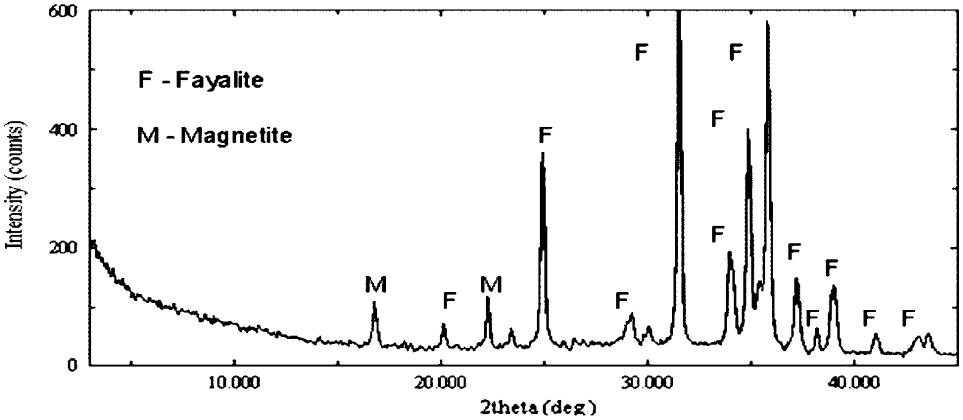


Gráfico 1: Difractograma de la escoria de cobre minera

Para el caso particular de la escoria de cobre de CODELCO Ventanas, mediante el análisis de fluorescencia de rayos x, se puede observar en la Tabla 3 los principales componentes, así como las concentraciones de los elementos que posee [22].

Tabla 3: Análisis de Fluorescencia de Rayos X en escoria de CODELCO Ventanas

Elemento	Concentración (%)	Óxido	Concentración (%)
Fe	**48,16**	**Fe_2O_3**	**68,85**
O	34,76	–	–
Si	**8,92**	**SiO_2**	**19,08**
Zn	1,82	ZnO	2,26
Ca	1,48	CaO	2,07
Al	**1,37**	**Al_2O_3**	**2,59**
Cu	0,86	CuO	1,08
Mg	0,57	MgO	0,95
Na	0,55	Na_2O	0,75
K	0,46	K_2O	0,55
S	0,29	SO_3	0,73
Ti	0,18	TiO_2	0,31
Pb	0,1	PbO_2	0,12
Co	0,09	CoO	0,12
Ba	0,07	BaO	0,07
Mn	0,07	MnO_2	0,11
Mo	0,06	MoO_3	0,09
Cr	0,03	Cr_2O_3	0,05
Sb	0,03	Sb_2O_5	0,04
Ni	0,02	NiO	0,03
P	0,02	P_2O_5	0,06
Sn	0,01	SnO_2	0,02
Zr	0,01	ZrO_2	0,02
Sr	0,01	SrO	0,01

Diversos estudios elaborados sobre este material indican que independiente del lugar de elaboración, la escoria de cobre presenta composiciones muy similares. En la Tabla 4 se muestran los valores obtenidos por los autores Ortizola (2006), Almeida (2007), Al-Jabri (2011), en donde se puede apreciar la similitud en las concentraciones de elementos tanto para la escoria perteneciente al botadero de Ventanas, como a la elaborada fuera del país.

Tabla 4: Óxidos elementales de escorias de cobre, análisis mediante florescencia, Fuente: Ortizola (2006); Moura (1999); Al-Jabri (2011).

Origen/Concentración (%)	Fe_2O_3	SiO_2	ZnO	CaO	Al_2O_3	CuO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2	PbO_2	CoO	MnO_2	MoO_3
Botadero Ventanas, Chile	68,85	19,08	2,26	2,07	2,59	1,08	0,95	0,75	0,55	0,76	0,31	0,12	0,12	0,11	0,09
Caletones (Orizola 2006)	66,76	22,76	0,29	1,23	3,44	1,43	0,76	0,68	0,68	0,61	0,52	0,04	–	0,04	0,36
Brasil (Moura 1999)	55	26	0,9	2	–	1,4	2,7	1,1	0,6	–	–	–	–	–	–
(Al-Jabri 2011)	53,42	33,05	–	6,06	2,79	0,46	1,56	0,28	0,61	1,89	–	–	–	0,06	–

3.2.3. Tipos de escoria de cobre

Como se puede observar en la Ilustración 5, los tipos de escoria de cobre se clasifican principalmente según los elementos que la componen como por el proceso de enfriamiento que sufre al momento de ser vertida.

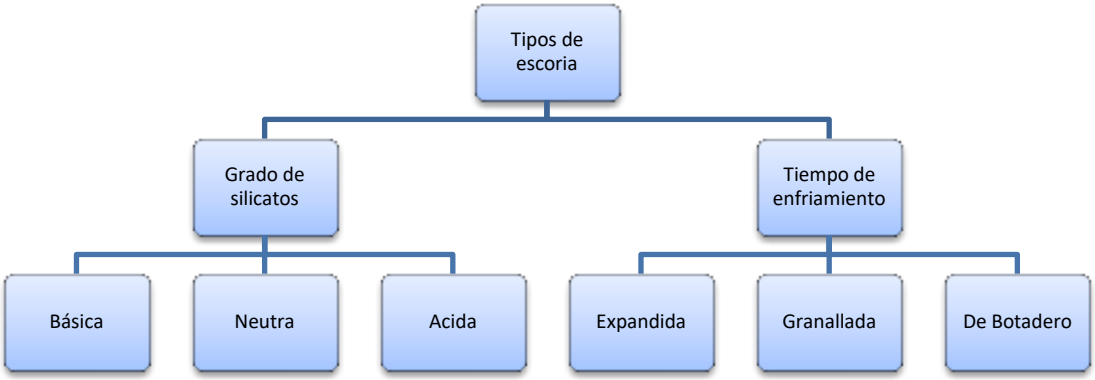


Ilustración 5: Tipos de escoria de cobre

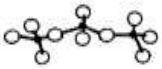
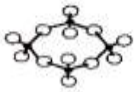
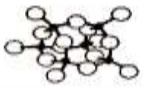
Debido a que principalmente la escoria de cobre está compuesta en base a óxido de Fierro, óxido de Sílice, de Aluminio y de Calcio entre otros, varía su grado de silicatos en función a la combinación que estos óxidos presenten. Para evaluar si la escoria posee carácter químico neutro, ácido o básico,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

El Índice de Silicatación (i), es la razón entre el contenido de oxígeno de la proporción sílice que forma la escoria, y el contenido en oxígeno de la proporción de todos los óxidos que la forman (incluyendo Al_2O_3), como sigue en la siguiente expresión.

$$i = \frac{O\ de\ SiO_2}{O\ de\ las\ Bases}$$

Cuando este índice es igual a uno, la escoria es catalogada como neutra. En caso de ser mayor que uno es ácida, mientras que cuando es menor a uno se considera básica. Esto se puede observar con claridad en la Tabla 5.

Tabla 5: Composiciones y estructuras de las escorias de silicatos

Tipo de Escoria	Grado de Silicato*	Ejemplos de Composiciones	Aniones Principales	Estructuras Moleculares	
Básica	< 1	$3FeO*SiO_2$ $2FeO*CaO*SiO_2$	O^{2-}, SiO_4^{4-}		SiO_4^{4-}
Neutra	1	$2CaO*SiO_2$ $CaO*FeO*SiO_2$	SiO_4^{4-}		
		$4CaO*3SiO_2$ $2CaO*2FeO*3SiO_2$	Cadena de aniones de silicato		$Si_3O_{10}^{8-}$
Acida	> 1	$4(CaO*SiO_2)$	Anillo de aniones de silicatos		$Si_4O_{12}^{8-}$
		$3(CaO*2SiO_2)$	Anillos de aniones de silicato conectados		$Si_6O_{15}^{6-}$

Con respecto al Grado de Saturación (r), este representa razón entre el número total de gr/mol de los componentes básicos (CaO-MgO-MnO-FeO) y el número de gr/mol de los componentes ácidos (incluso Al_2O_3). Para fines prácticos, es suficiente calcular la razón entre las proporciones de las dos clases de componentes, como indica la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{r} = \frac{\%\boldsymbol{CaO} + \%\boldsymbol{MgO} + \%\boldsymbol{MnO} + \%\boldsymbol{FeO}}{\%\mathbf{SiO} + \%\mathbf{Al_2O_3}}$$

Al contrario del Índice de Silicatación, si el Grado de Saturación es mayor a uno, se considera básica, si es menor a uno se considera ácida, y si es igual a uno se considera neutra.

El material, luego del proceso pirometalúrgico, es removido en estado líquido para ser colocado en los centros de acopio donde se depositan los residuos. Desde el proceso de vertido en fase líquida, como se observa en la Ilustración 6, hasta alcanzar la condición sólida, el material pasa por un tiempo relativo de enfriado. Este tiempo es fundamental para definir la formación en fases cristalinas o vítreas.

Ilustración 6: Proceso de vertido

Los tipos de escoria expandida son los obtenidos por enfriamiento rápido, luego de ser expandida debido a la aplicación de una cantidad controlada de aire, agua y vapor. La solidificación acelerada aumenta la naturaleza vesicular, produciendo un material ligero que posteriormente es triturado y clasificado por fracciones para darle un respectivo uso tecnológico a las escorias.

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

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

Se puede observar a continuación una imagen del tipo de escoria expandida, granallada y de botadero respectivamente.

Ilustración 7: Tipos de escoria de cobre según modo de enfriamiento

3.2.4. Usos alternativos para la escoria de fundición.

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

- Árido en Hormigón:
  Los resultados de los hormigones con escoria de cobre analizados, presentan una resistencia y una densidad mayor que los hormigones convencionales debido a la alta densidad de la escoria de cobre. Los hormigones con escoria de cobre pueden ser clasificados como hormigones pesados. En ingeniería se necesita en ocasiones, disponer de estructuras de la mayor densidad posible, para lo cual los hormigones pesados de escoria proveen una solución económica. Si la empresa de fundición estimara conveniente recuperar la ley residual de mineral de la escoria, siempre retornará a las canchas de acopio, por lo que tendremos una cantidad importante de pasivo metalúrgico disponible para la construcción [3]
- Rellenos estructurales:
  Existe en Chile la utilización de este elemento como árido para la construcción de bases para caminos, así como material para terraplén.
- Arena abrasiva (Sand Blasting):
  Permite remover pintura, corrosión de estructuras industriales, así como remoción de capas externas. Esto se realiza por medio de una fuerza mecánica que impulsa las partículas abrasivas contra la superficie a tratar. La cubicidad existente en la escoria permite una mejor abrasión, destacando también la baja generación de polvo, lo que disminuye los riesgos para la salud de las personas. En Chile, empresas como "GRANALLA" prefieren el uso de la escoria de cobre granallada por sobre el arenado, por considerar que este último provoca altísimos índices de silicosis y cáncer al pulmón en sus trabajadores. Según esta empresa[2]: "*También aumenta el uso de granalla la aplicación estricta de las normas ambientales y de salud que rigen en los países desarrollados y que actualmente en nuestro país se han regulado a través del Ministerio de Salud en el "Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos - Decreto supremo N° 148/ Artículo N° 23" que señalan que la escoria de cobre no es considerada un residuo minero peligroso y el "Reglamento sobre condiciones sanitarios y ambientales básicas en lugares de trabajo - Decreto N° 594/ Artículo N° 66 la consideran dentro de los límites permisibles.*

Ilustración 8: Maxi-saco de 2000 kg de granalla de escoria de cobre

[2] Información disponible en: http://www.granalla.cl/mineria.html

3.3. Evaluación Ambiental a realizar

Dentro de los procesos requeridos para caracterizar los posibles efectos de la escoria de cobre en el medio ambiente destaca el análisis mediante fluorescencia de rayos X y el Test de Toxicidad por Lixiviación. Se presenta a continuación la descripción de estos estudios, el objetivo de estos, los elementos a analizar y los efectos en el medio ambiente de los mismos.

3.3.1. Elementos a analizar y sus efectos en la salud

- **Arsénico**
  Elemento químico natural perteneciente a la corteza terrestre, metaloide, de color gris y brillo metálico, que combinado con el oxígeno constituye un veneno violento. Su símbolo es As y su número atómico 33. La contaminación por este elemento es un problema que afecta principalmente a la zona norte de nuestro país desde hace décadas principalmente debido a que es una zona naturalmente elevada en niveles de arsénico, encontrándose de forma natural en aire, agua y suelos. Esto se intensifica debido a la alta actividad minera, sobretodo asociada a los grandes proyectos de extracción de cobre (Escondida, Chuquicamata y La Negra). Se presenta a continuación las ciudades con mayor exposición al Arsénico [8].

Tabla 6: Ciudades Chilenas y nivel de contaminación por arsénico en el aire.

Ciudad	Nivel de As (normal 20 µg/m3)
Antofagasta	55 µg/m3
Chillán	52 µg/m3
Calama	50 µg/m3
Alto Hospicio	50 µg/m3
Temuco	49µg/m3
Talca	40 µg/m3

Este elemento ataca casi todos los órganos del cuerpo humano, bloqueando las reacciones enzimáticas de amplia distribución y generando por sobretodo lesiones permanentes al tener contacto con la piel. Entre los efectos más preocupantes destacan los efectos cardio-vasculares como la hipertensión y taquicardias, efectos renales como necrosis tubular aguda, insuficiencia renal y necrosis cortical, efectos neurológicos como adormecimientos cerebrales, calambres musculares y sensibilidad muscular, efectos dérmicos como queratosis maligna, hipermentación y cáncer de piel, efectos respiratorios como perforaciones en el tabique nasal y cancel al pulmón y efectos reproductivos como malformaciones cognitivas y físicas.

- **Cadmio**
  Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, número atómico 48. Tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. En la población general la comida y los cigarrillos son las principales fuentes de exposición al cadmio, la cual suele ser de carácter crónico.
  Los efectos tóxicos del cadmio se manifiestan especialmente en los huesos y riñones y las personas que tienen bajas reservas de hierro son particularmente vulnerables a estos efectos adversos [9].

- **Plomo**
  El plomo es un elemento químico de la tabla periódica, cuyo símbolo es Pb y su número atómico es 82 según la tabla actual.
  Los efectos nocivos del plomo han sido conocidos desde tiempos antiguos por su amplia gama, sin embargo sólo desde hace unas décadas se han podido detectar los daños que genera en bajas concentraciones. El plomo tiene efectos tóxicos en muchos órganos, sistemas y procesos fisiológicos, incluyendo el desarrollo de la línea roja hemática, los riñones, el sistema cardiovascular, el aparato reproductor y, probablemente el aspecto de mayor gravedad, el desarrollo del sistema nervioso central. La naturaleza de las manifestaciones de toxicidad depende no sólo de la magnitud de la exposición sino también de las características de la persona expuesta; la neurotoxicidad del plomo es más crítica para el feto en desarrollo y el niño en crecimiento que para los adultos [11].

- **Selenio**
  El selenio es un elemento químico existente de manera natural en el medio ambiente, símbolo Se, número atómico 34 con propiedades semejantes a las del telurio. A pesar de que se considera un elemento nutritivo esencial para los seres humanos y animales, puede producir daños al ser ingerido en cantidades más altas que las que se requieren para mantener una buena salud. Los efectos del selenio sobre la salud pueden variar desde producir salpullidos, deformaciones en uñas, hinchamientos de la piel y dolores agudos, hasta llegar a generar neumonía, asma bronquítica, agrandamiento del hígado y conjuntivitis. El envenenamiento por selenio puede llegar a un grado tan agudo que en algunos casos podría incluso causar la muerte [11].

- **Antimonio**
  El antimonio es un elemento químico semimetálico con símbolo Sb y número atómico 51. No corresponde a un elemento abundante en la naturaleza, registrándose raras veces en forma natural. La exposición a cantidades relativamente altas durante un largo periodo puede provocar irritación de ojos, piel y pulmones, llegando a producir efectos más graves tales como problemas al corazón, diarreas, enfermedades pulmonares, vómitos severos y úlceras estomacales [9].

- **Níquel**
  El níquel es un elemento natural muy abundante en el ecosistema. El níquel puro es un metal duro, blanco-plateado, que se usa para fabricar acero inoxidable y otras aleaciones de metales debido a su facilidad para combinarse con otros metales. El efecto negativo más común de exposición al níquel en seres humanos es una reacción alérgica, llegando incluso a afectar al 15% de la población. Trabajadores expuestos en refinerías de níquel o plantas que procesan níquel han experimentado bronquitis y alteraciones del pulmón [11].

3.3.2. Análisis mediante Fluorescencia de Rayos X

Cuando una muestra es irradiada con rayos X, puede que la radiación sea dispersada con pérdida de energía (Compton), o sin pérdida de energía (Rayleigh), o bien pueda generarse un espacio en una capa atómica (efecto fotoeléctrico). En este último caso se puede liberar una cantidad de energía mediante un fotón de rayos X o transfiriéndose a otro electrón de una capa más externa.

La fluorescencia de rayos X se dedica al estudio del primer proceso, identificando y caracterizando las líneas fluorescentes [13], consistiendo en analizar la radiación X característica generada por una muestra al ser irradiada por rayos X. Para que se dé el proceso de fluorescencia de rayos X, lo primero que tiene que ocurrir es la absorción fotoeléctrica por el elemento. Esta absorción fotoeléctrica ocurre cuando un fotón altamente energético proveniente de una radiación de rayos X interactúa con la materia, provocando ionización en los átomos que constituyen el material. Los rayos X y gamma son suficientemente energéticos para desprender electrones fuertemente contenidos en los orbitales internos del átomo, dejando así debido a esta remoción una condición inestable de la estructura electrónica del átomo y provocando que los electrones de los orbitales más elevados caigan hacia los más bajos, como se puede observar en la Ilustración 9.

Ilustración 9: Representación esquemática de estructura atómica sometida a rayos X

Esta transición genera energía mediante la emisión de un fotón, el cual está dotado de una energía característica, la cual es igual a la diferencia de energía entre los orbitales inicial y final. El espectro de emisión de rayos X característicos es relativamente sencillo y la emisión de rayos X es gobernada por las reglas básicas de la teoría de la mecánica cuántica, en donde la energía de rayos X emitida se convierte a longitud de onda específica, la cual es única para cada elemento, lo que permite hacer una clara e inequívoca identificación de los elementos pertenecientes en la muestra analizada. La intensidad emitida de cada radiación característica se puede relacionar de manera directa con la cantidad de cada elemento químico presente en el material analizado.

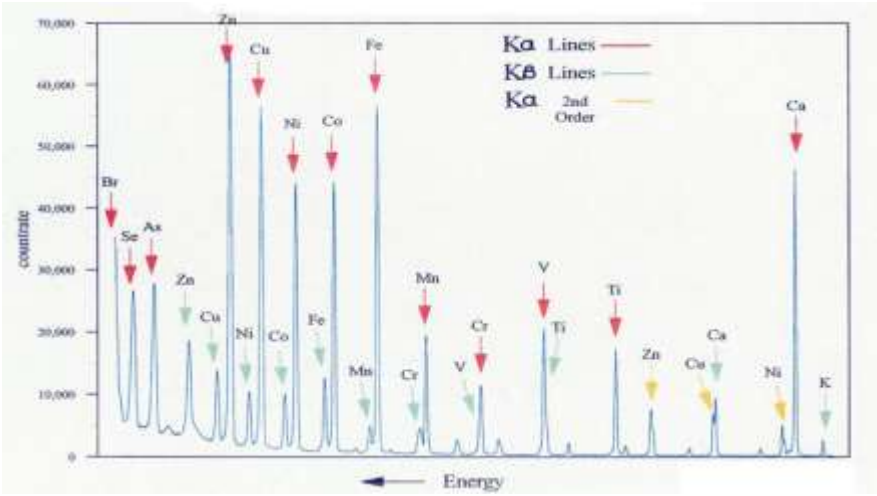


Ilustración 10: Espectro de intensidad v/s energía dispersa

Se puede observar en la Ilustración 10 un espectro de energía disperso, el cual permite identificar a que elemento se relaciona cada valor de energía característica. Es posible realizar también un análisis de tipo cuantitativo, debido a que mientras más intensa sea la emisión, en mayor cantidad se encontrará el elemento analizado.

Dentro de las áreas en las que ha tenido más aplicación la fluorescencia de rayos X tenemos: arqueología, ciencias forenses, medicina, geología, recubrimientos, materiales, electrónica, farmacéutica y medio ambiente, entre otros.

Entre las principales ventajas que presenta este método de análisis es que es un método no destructivo (la muestra no sufre daños al analizarla) que no requiere tratamiento previo de la muestra. Permite el análisis de elementos desde el nitrógeno hasta el uranio, de muestras que se presenten en estado sólido, líquido o gaseoso. Permite mediciones de las muestras en vacío o bajo condiciones atmosféricas. Es un análisis de bajo costo que permite determinaciones de varios elementos de manera simultánea.

Entre las principales limitaciones destaca el que no se puede utilizar para elementos muy ligeros, ya que no los logra detectar. Se logra apreciar con claridad esto en la Ilustración 11, en donde se observan en color naranjo los elementos que no se miden con este método, en rojo los elementos que se pueden medir, pero se necesitan herramientas especiales, mientras que en blanco los elementos fáciles de identificar.

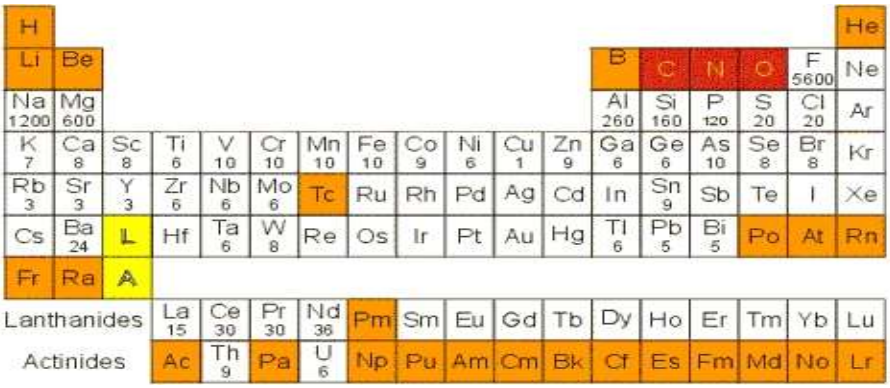


Ilustración 11: Limitación de detección en elementos al usar fluorescencia de rayos X

3.3.3. Test de Toxicidad por Lixiviación (Test TCLP)

El Test de Toxicidad por Lixiviación, también conocido como Test TCLP[3] ha sido diseñado para determinar la característica de toxicidad extrínseca de un residuo, ya se encuentre en estado líquido, sólido o una mezcla de estas fases. El proceso consiste en determinar la movilidad de determinados constituyentes del residuo mediante ataques de reactivos, para finalmente determinar si las concentraciones del mismo en el elemento reúnen las características para determinarlo como residuo peligroso.

Para identificar cuáles son los elementos a analizar se requiere un análisis de la fuente de generación del residuo, con el fin de determinar los eventuales elementos tóxicos que este pudiera contener. En caso de no contar con información sobre la composición de elementos del residuo se tendrá que recurrir a análisis de laboratorio que permita determinar de manera cualitativa lo anterior. Para este propósito se pueden utilizar técnicas como cromatografía, absorción atómica o fluorescencia de rayos X. El test TCLP se debe realizar solo en caso que el análisis antes descrito demuestre la posibilidad que alguno de los constituyentes tóxicos puedan pasar la normativa de residuos peligrosos [15].

El procedimiento será distinto para los residuos definidos como líquidos, es decir los que poseen un contenido de material sólido inferior al 0,5 % en peso, y a los residuos sólidos [14].

Para los residuos líquidos se entenderá por lixiviado a la fase líquida que resulte de la filtración del residuo a través de un filtro de fibra de vidrio de tamaño de poros de 0,6 a 0,8 micrones. Los sólidos resultantes de la filtración serán descartados, no considerándose para evaluar la peligrosidad del residuo.

Para el caso de residuos considerados como sólidos, se deberá realizar una separación de las fases líquida y sólida si correspondiese. La fase líquida será almacenada para un análisis posterior, mientras que la fase sólida será reducida de tamaño, en caso de ser necesario, para posteriormente ser sometida a un proceso de extracción. La fase sólida, dependiendo de su alcalinidad, es puesta en contacto con una solución básica o ácida, la cual será denominada como solución lixiviante, mediante agitación y por un tiempo determinado. La cantidad de solución lixiviante equivale a 20 veces el peso de la muestra de la fase sólida analizada. Posterior a esta extracción, la solución es filtrada en el mismo filtro descrito para la solución líquida. Esta última solución constituye el lixiviado del test TCLP, siendo descartados los sólidos filtrados.

Un residuo será considerado como peligroso si el lixiviado del test TCLP contiene algún componente de los considerados como tóxicos por sobre la norma de residuos peligrosos. Para el caso nacional esta norma corresponde al Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos (Decreto Supremo N°148) [16].

Entre los laboratorios autorizados y certificados por la SEREMI de Salud destaca el Cenma, Cesmec, SGS Chile, ALS Patagonia S.A ANAM, entre otros.

[3] "TCLP", por su nombre en inglés, Toxicity Characterístic Leaching Procedure de la EPA-1311

3.4. Tratamientos Superficiales Asfálticos

El concepto de tratamiento Superficial Asfáltico corresponde a la aplicación de uno o más riegos de ligante asfáltico y agregado sobre diversas clases de superficie de calzada. De acuerdo al número de riegos alternados de asfalto y árido, estos tratamientos reciben el nombre de tratamiento superficial simple (una aplicación), o múltiples (más de una aplicación) [20].

Este tipo de camino básico se utiliza principalmente en caminos de tránsito media a bajo, recomendándose que las solicitaciones no excedan los 750.000 ejes equivalentes, por lo que más que un tipo de pavimentación un tratamiento superficial corresponde a un cambio de estándar de un camino no pavimentado [28].

3.4.1. Funciones

Las funciones del asfalto son de ligar a las partículas de agregado de la superficie subyacente y proporcionar un sello a prueba de agua. Las funciones del agregado son para resistir la abrasión de tráfico, para transmitir la carga de las ruedas y para proporcionar resistencia al deslizamiento y la textura de la superficie deseada. Si bien los tratamientos superficiales no generan un aporte estructural, permiten una capa de protección a la base granular o pavimento existente.

Los principales beneficios que presentan estos tipos de solución son los siguientes:

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

3.4.2. Factores de desempeño

Entre los principales factores que influyen en el buen rendimiento de las capas de sellado y tratamientos superficiales destacan:

- Propiedades físicas y químicas del ligante y del agregado.
- Técnicas de construcción utilizadas.
- Una correcta dosificación del ligante y del agregado.
- Desarrollo de una buena adherencia entre el árido y el ligante utilizado.
- Estado de la base o pavimento subyacente.
- Cantidad y tipo de tráfico al que estará sometido el tratamiento.
- Condiciones ambientales y de drenaje.

3.4.3. Áridos en Tratamientos Superficiales

En los tratamientos superficiales asfálticos, las partículas de agregado se encuentran en contacto directo con las solicitaciones ejercidas por el tránsito vehicular, así como con los efectos directos del medio ambiente. Debido a esto, los áridos a utilizar en este tipo de solución básica deberán cumplir requisitos de forma, tamaño, limpieza, granulometría y propiedades superficiales que le permitan resistir la abrasión del tránsito, así como mantener una buena adherencia con el ligante. El agregado de un tratamiento superficial tiene como requisitos principales:

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

Se presentan a continuación en la Tabla 7 las especificaciones granulométricas para los agregados utilizados en tratamientos superficiales según lo descrito en el Volumen 5 del Manual de Carreteras. Las banda tradicionalmente utilizada para los tratamientos superficiales simples corresponde a la TN 10-2,5, mientras que las comúnmente utilizadas en TSD corresponden a la TN 20-10 y TN 10-2,5, para la primera y segunda aplicación respectivamente [23]. Es deseable que los agregados utilizados para las capas de sellado y tratamientos superficiales consistan esencialmente en un tamaño de agregado, ya que si todas las partículas de agregado son aproximadamente del mismo tamaño, la profundidad de hundimiento en el ligante asfáltico será la misma para cada partícula, contribuyendo a un desempeño exitoso del tratamiento. Partículas de agregado muy finas pueden llegar a ser sumergidas en el asfalto, lo que a ciclos de tránsito podría manifestarse como exudación [26].

Tabla 7: Especificaciones granulométricas para Tratamientos Superficiales

TAMIZ [mm]	TAMIZ ASTM	TN 25-12,5	TN 20-10	TN 12,5-5	TN 10-2,5	TN 5-2,5	TN 20-12,5a	TN 20-12,5	TN 10-6,3a	TN 10-6,3b
40	1 1/2 "	100								
25	1 "	90-100	100				100	100		
20	3/4 "	20-55	90-100	100			85-100	85-100		
12.5	1/2 "	0-10	20-55	90-100	100		0-20	0-20	100	100
10	3/8 "	0-5	0-15	40-70	85-100	100	0-7	0-5	90-100	85-100
6.3	1/4 "	-	-	-	-	-	-	-	0-40	0-25
5	N°4	-	0-5	0-15	10-30	85-100	-	-	0-5	0-10
2.5	N°8	-	-	0-5	0-10	10-40	0-1	-	-	0-1
1.25	N°16	-	-	-	-	-	-	0-1	0-1	-
0.08	N°200	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5	0-0.5

Existirán otros requisitos de calidad que tendrán que cumplir los agregados. Estos requisitos se encuentran definidos en el volumen 5 del Manual de Carreteras, los cuales se señalan a continuación.

Tabla 8: Requisitos de calidad en áridos para Tratamientos Superficiales

Ensayes	Exigencia	Método
Desgaste de Los Ángeles	Máximo 25 %	8.202.11
Desintegración con Sulfato de Sodio	Máximo 12 %	8.202.17
Adherencia por Método Estático	Mínimo 95 %	8.302.29
Árido Chancado	Mínimo 70 %	8.202.6
Lajas	Máximo 10 %	8.202.6
Índice de Lajas	Máximo 30 %	8.202.7
Fino por Lavado	Máximo 0.5 %	8.202.4

Sumado a los ensayos especificados anteriormente, se requiere la obtención mediante ensaye de densidad aparente suelta, densidad real seca y porcentaje de absorción. Estos valores de densidad permiten obtener el porcentaje de huecos que posee el agregado, mientras que el valor de absorción se utiliza para el control de la humedad del agregado pétreo previo a su distribución.

3.4.4. Ligante asfáltico en Tratamientos Superficiales

La selección del tipo de ligante es muy importante para el caso de los tratamientos superficiales asfálticos, ya que será el encargado de mantener adheridas las partículas de agregado con la superficie soportante. Para un buen comportamiento del tratamiento superficial, el asfalto a utilizar deberá cumplir al menos con los siguientes requisitos básicos:

- Ser lo suficientemente fluido al momento del riego, para lograr una aplicación uniforme sin obstruir los aspersores del equipo distribuidor.
- Tener la viscosidad adecuada, con el fin de desarrollar un embebido y adhesión rápida entre el agregado y el ligante, así como también con la superficie ya existente.
- Ser capaz de retener el agregado en su sitio al momento de permitir el tránsito, evitando así el desprendimiento de partículas pétreas con el paso de los vehículos.
- No presentar, para una correcta dosificación, exudación ni problemas de adherencia ante cambios de clima.

Entre los tipos de asfaltos que por sus características más se acomodan a esta condición destacan las emulsiones asfálticas. Las emulsiones asfálticas son mezclas de asfalto con agua a las cuales se les agrega una pequeña cantidad de algún agente emulsificador. El objetivo de este agente es otorgar una capa protectora en la superficie de los glóbulos de asfalto a través de una carga eléctrica que permite que los glóbulos permanezcan aislados al repelerse entre sí [23].

Las emulsiones asfálticas se clasifican según el tipo de carga del agente emulsificante y del tipo de quiebre de la emulsión en presencia del árido de carga opuesta, por lo que existirá emulsiones aniónicas (de carga negativa) y emulsiones catiónicas (de carga positiva). Esto se puede observar gráficamente en la Ilustración 12.

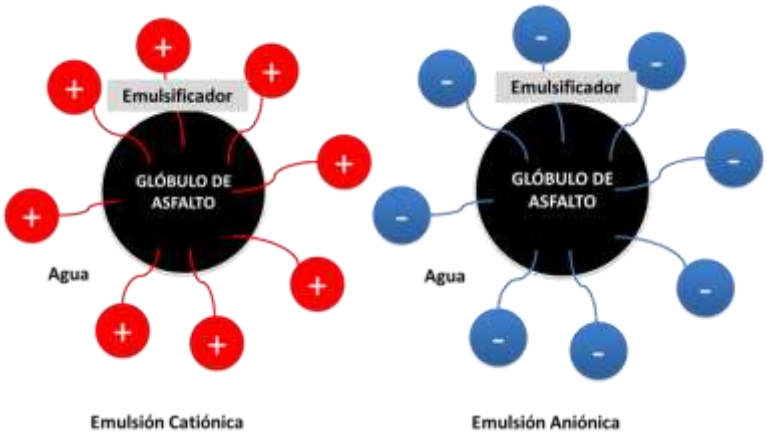


Ilustración 12: Esquema de emulsión catiónica y aniónica

Cuando la emulsión entra en contacto con el agregado, y este posee carga contraria a la superficie de los glóbulos, se produce un desequilibrio eléctrico que hace que las partículas de asfalto se unan a la superficie de agregado y el agua fluya o se evapore. A este fenómeno se le denomina "quiebre de la emulsión". Este quiebre consiste en la separación del agua del asfalto en presencia de los áridos, por lo que es común ver en el caso de las emulsiones un color café previo a su colocación, y un color negro posterior a ésta. Debido a que los áridos que se encuentran frecuentemente en Chile poseen cargas negativas, las emulsiones más utilizadas corresponden a las de tipo catiónicas. Los agentes emulsificantes utilizados en la elaboración de emulsiones catiónicas corresponden normalmente a las sales de amonio o amina grasa (diamina, amidoamina, imidazolina). En este caso, el agente emulsionante cubre completamente el glóbulo de asfalto, quedando este cubierto de radicales positivos, lo que explica la afinidad por superficies de áridos negativos como son los áridos silíceos [26]. Dependiendo de la rapidez del quiebre, las emulsiones se califican en:

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

Donde la letra "C" especifica la presencia de una emulsión de tipo catiónica. En caso de no aparecer especificada se asume que corresponde a una emulsión de tipo aniónica. Posterior a esta identificación se agrega el grado de la emulsión, el cual está relacionado directamente con el nivel de viscosidad que posee, siendo así una emulsión de grado 1 menos viscosa que una emulsión de grado 2. Los asfaltos a emplear en los sellos bituminosos serán emulsiones de tipo CRS-1 o CRS-2 y RS-1 o RS-2, que se ajusten a las especificaciones descritas en el 8.301.4 y 8.3.01.5 del Manual de Carreteras Volumen 5 según corresponda (Especificaciones en Anexo C). El tipo de asfalto a emplear será el establecido en las ETE del proyecto y será función de las condiciones climáticas locales, el trazado del camino, las características del tránsito y del tipo de árido a utilizar [17]. Se ha tenido una buena experiencia a nivel nacional con las emulsionas catiónicas de quiebre rápido, también denominadas CRS-2, las cuales suelen cumplir a cabalidad los requisitos mencionados [26]. Para lograr una correcta aplicación y cumplir los requisitos de viscosidad, para emulsiones CRS-2 se trabajará a un rango de temperatura que fluctúe entre los 65 y 75 °C, ya que corresponde al que entrega generalmente la viscosidad adecuada.

3.5. Método de dosificación utilizado en Chile

El procedimiento de dosificación empleado por el Laboratorio Nacional de Vialidad corresponde al método de la Dimensión Mínima Promedio. Este método corresponde al que se utiliza oficialmente en el país y está basado en los principios de Hanson, aceptados y mejorados por la Country Roads Board de Victoria [23].

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de la dosis de asfalto y agregado corresponden a las siguientes:

$$\boldsymbol{C = MHE(1 - 0,4V)Drs}$$

$$\boldsymbol{B = \frac{K(0,4HTV + S + A)}{R}}$$

Donde:

- **C = Cantidad de agregado a aplicar [kg/m^2]**
  El agregado una vez compactado, debe cubrir uniformemente la superficie de pavimento. Por ello, el cálculo de esta dosis se basa solamente en las condiciones físicas y geométricas del mismo.

- **M = Factor de evaluación del agregado**
  Es un factor de corrección que debe ser evaluado por la experiencia del diseñador y que está en función del clima, tránsito y tipo de agregado existente en la zona de trabajo. Si bien el valor 0,9 ha dado buena experiencia en el país, valores entre 0,9 y 1 podrán ser utilizados.

- **V = Porcentaje de huecos en el agregado**
  Se expresa en forma decimal y se calcula con la expresión:

$$\boldsymbol{V = 1 - \frac{Das}{Drs}}$$

En donde Das corresponde a la Densidad Aparente Suelta y Drs a la Densidad Real Seca, ambas en [kg/dm^3]. El porcentaje de huecos corresponde a vacíos existentes entre los agregados que cumplen el objetivo de absorber la consolidación del ligante por amasado tanto del proceso de compactación como el tránsito mismo.

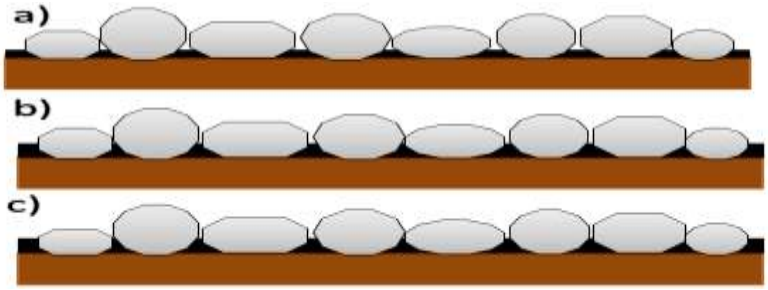


Ilustración 13: Proceso de llenado de huecos en tratamientos superficiales

- **H = Dimensión mínima promedio del agregado [mm].**
  La dimensión mínima promedio corresponde a la dimensión mínima, o dimensión perpendicular a la cara de apoyo que presentarán los agregados luego de compactación por rodillado.
  Se determina con la siguiente expresión.

$$\boldsymbol{H = \frac{TM}{1,09 + 0,0118 * IL}}$$

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

- **E = Factor de desperdicio.**
  Este factor permite estimar y cubrir así las pérdidas de agregado por manipulación, descarga o insuficiente uniformidad en la distribución. Depende de la dimensión mínima promedio del agregado (H) y se recomienda utilizar los valores entregados a continuación.

Tabla 9: Factor de Desperdicio E

H [mm]	% Desperdicio	E
< 6,5	5	1,05
6,5 - 8,0	4	1,04
8,1 - 9,5	3	1,03
> 9,5	2	1,02

- **B = Dosis de ligante [l/m^2].**
  Su cálculo e basa en parámetros físicos y geométricos del agregado, así como parámetros referidos a la emulsión misma.

- **A= Corrección por absorción del agregado.**
  Este factor cubre las pérdidas de ligante debido a la absorción del agregado. En la práctica, los materiales pétreos utilizados a nivel local tienen porcentajes de absorción muy bajos, por lo que la magnitud de esta pérdida se puede despreciar dentro de los factores que intervienen en la fórmula de diseño (Considerar A = 0). En caso de utilizar agregados absorbentes se considerará este factor con valores hasta los 0,15 [l/m^2].

- **K = Factor de evaluación de condiciones de clima.**
  Corresponde a un factor de corrección que debe ser evaluado en base al clima por la experiencia del diseñador. Su valor normal es 1,0, pero puede ser mayor o menor según el diseñador. En climas tropicales se ha aplicado 0,9 mientras que en climas muy fríos se usa

1,2. Se podrá utilizar valores intermedios a los anteriores dependiendo el clima de la región donde se ejecute la obra.

- **T = Factor de Tránsito.**
  Mientras mayor es el volumen de tránsito del camino a tratar, menor será la cantidad de asfalto requerida, debido a que los huecos existentes tienden a reducirse en condiciones de alto tránsito. En la Tabla 10 se entregan los factores recomendados para distintos volúmenes de tránsito expresados en función de Tránsito Medio Diario Anual.

Tabla 10: Factor de Tránsito T

Volumen de Tránsito TMDA (Veh / día)	Factor T
< 100	0,85
100-500	0,75
500-1000	0,7
1000-2000	0,65
> 2000	0,6

Los valores indicados en la tabla corresponden a los estimados para el año de puesta en servicio del tratamiento. En caso de diseñar tratamiento superficial destinado a bermas, se considera un factor T = 0,85.

- **S = Corrección por textura superficial de la Base.**
  Dependiendo la textura de la superficie a tratar, se requiere realizar una corrección de ligante a aplicar [lt / m^2]. Esta se realiza según lo estipulado en la Tabla 11. Para el caso de pavimentos asfálticos de textura abierta, la corrección dependerá de la magnitud de la macrotextura observada (medida en milímetros).

Tabla 11: Corrección por Textura Superficial S

Textura Superficial Existente	Corrección S [l/m^2]
Base granular imprimada	0,0 – 0,2
Pavimento asfáltico con exceso de asfalto superficial	Hasta -0,3
Pavimento asfáltico de textura cerrada	0,0
Pavimento asfáltico de textura abierta :	
1	0,1
2	0,2
3	0,3
4	0,4
5	0,5

- **R= Residuo asfáltico del ligante, expresado en forma decimal.**
  Este valor de residuo se determina mediante ensaye. Para emulsiones catiónicas de quiebre rápido (CRS-2) es común utilizar R = 0,65.

Cuando se diseñan tratamientos múltiples, las cantidades de agregado y de asfalto requeridas para el tratamiento se calculan para cada capa como si se tratara de tratamientos simples independientes entre sí. Una vez calculada la dosis de cada aplicación, el resultado obtenido para la dosificación del agregado corresponderá a la misma que se utilizará en la construcción de cada una de las capas. La dosis de ligante asfáltico se distribuirá privilegiando un mayor contenido para las capas superiores. Para un tratamiento doble se sumarán ambas dosificaciones de ligante, y se aplicará entre un 40 y 45 % del total en la capa inferior, mientras que se aplicará entre un 60 y 55 % en la superior. Para el caso de un tratamiento triple la dosificación por capa corresponderá a un 30, 40 y 30% del total, para la primera, segunda y tercera aplicación respectivamente.

3.6. Principales tipos de fallas

En casi todos los países del mundo, muchos tratamientos de superficie de asfalto y capas de sellos están funcionando muy mal. En general, esto se debe a los procedimientos de diseño y construcción inadecuados e incluso descuidados empleados comúnmente [19].

- **Pérdida o desprendimiento del agregado:**
  Este tipo de falla se presenta cuando el agregado no se acomoda correctamente en el asfalto, cuando se presenta un problema de adherencia agregado-asfalto o cuando existen fallas en las dosificaciones elaboradas. Las principales causas de este tipo de falla recaen en la suciedad del agregado pétreo, dosis insuficientes de riego de asfalto. Rodillado a destiempo del agregado, compactación sólo con rodillo liso, clima demasiado frío o húmedo, camino abierto a tránsito demasiado pronto sin restricción de velocidad o incorrecta elección de los parámetros a la hora de elaborar el diseño en la dosificación.
  La pérdida de agregado no solo afecta a la pérdida de uniformidad en la superficie, sino que el agregado suelto en el camino puede resultar peligroso para los vehículos o personas que se encuentren en las cercanías al generar el movimiento de partículas por el paso del tránsito [23].

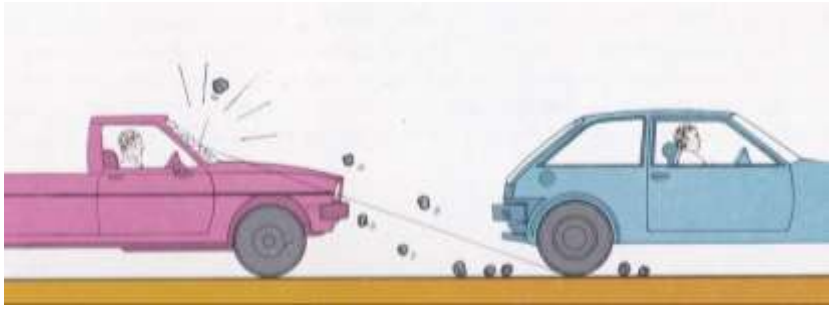


Ilustración 14: Pérdida de agregado en un tratamiento superficial

- **Exudación:**
  Consiste en el afloramiento hacia la superficie del exceso de asfalto aplicado. En el caso de los tratamientos superficiales puede deberse a la presencia de una dosis excesiva de asfalto, dosis elevada de imprimante, base demasiado húmeda al momento de ser imprimada, variaciones importantes en la granulometría del agregado, presión de bombeo muy alta, tránsito de vehículos pesados o una incorrecta elección de los parámetros de diseño en la dosificación.

3.7. Secuencia constructiva

Para la ejecución de un tratamiento superficial simple (TSS), se debe ejecutar la siguiente secuencia de operaciones mostrada en la Ilustración 15.

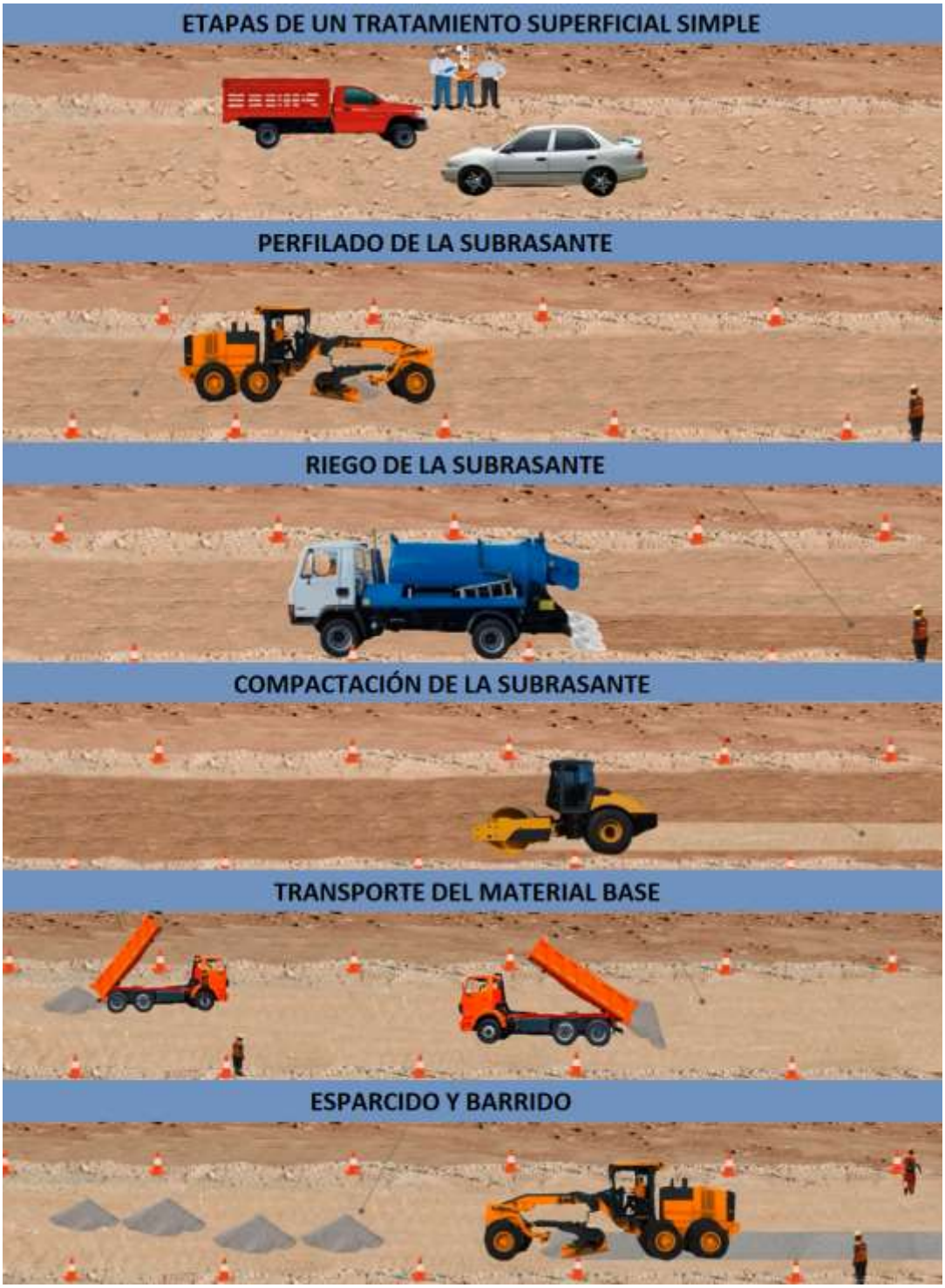


Ilustración 15: Secuencia constructiva de un TSS

Previo al inicio de la construcción, es recomendable evaluar la dosificación realizada mediante canchas de prueba, que permitan ajustar los coeficientes de diseño en caso de ser necesario. Para reducir los desprendimientos prematuros es recomendable, posterior a la compactación de los agregados, realizar un barrido de los excedentes de agregado que se puedan encontrar en la superficie, así como es recomendable la aplicación de riego de neblina y polvo roca.

4. CAPÍTULO IV: TRATAMIENTOS SUPERFICIALES SIMPLES EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO

En este capítulo se introducirá la situación actual que presenta el país en el desarrollo de la infraestructura vial rural. El estudio de la realidad nacional se hace en base a la información pública descrita en la Red Vial Nacional (Actualizada hasta Agosto 2015) y a las Políticas de Conservación Vial implementadas en el programa (Establecidas en Noviembre 2011).

Se presentará el objetivo y los beneficios presentes en el programa de Caminos Básicos, realizado por el Ministerio de Obras Públicas, a través de la Dirección de Vialidad.

El enfoque de lo que se presenta busca identificar la oportunidad existente en el país, debido a que en la actualidad existe un elevado porcentaje de caminos sin pavimentar ni presentar una solución básica. Como se puede observar en el Gráfico 2, existe un 20,194% de caminos de tierra y 39,961% soluciones de Ripio. Como segundo enfoque se presentará la importancia que presentan en la actualidad los caminos básicos como solución al problema anterior, para finalizar destacando la importancia que poseen los tratamientos superficiales como solución básica preferida para los caminos en la Región de Valparaíso. El definir la importancia de esta solución permitirá resaltar las oportunidades presentes en la utilización de la escoria de cobre producida por CODELCO Ventanas como árido para tratamientos superficiales en la Región de Valparaíso.

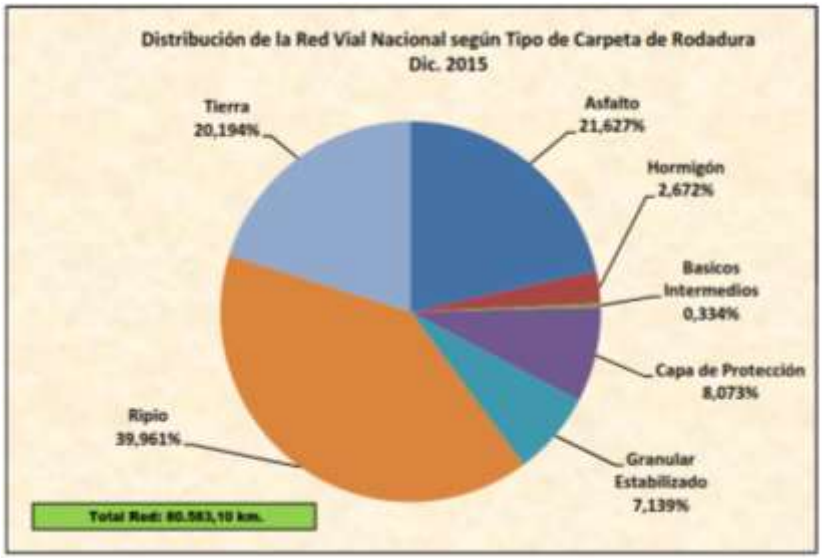


Gráfico 2: Distribución porcentual de la Red Vial según tipo de Carpeta de Rodadura.

4.1. El Programa de Caminos Básicos en Chile

La realidad de la infraestructura vial nacional presenta en la actualidad una gran cantidad de caminos sin algún tipo de pavimentación. A mediados de los años 90, el Ministerio de Obras Públicas, a través de la Dirección de Vialidad, observó que la solución aplicada en ese entonces, consistente principalmente en reponer el material granular desgastado cada 3 a 5 años no era la mejor. Para los usuarios, si bien consideraban que era más conveniente que el transitar por caminos de tierra, evidenciaban problemas como dificultades de tránsito en épocas lluviosas y una alta cantidad de polvo en suspensión en épocas secas. El polvo en suspensión no solo disminuye o anula la visibilidad implicando con esto un problema de seguridad vial, como se puede observar en la Ilustración 16, sino que también provoca problemas en la salud, disminuyendo así la calidad de vida.

Ilustración 16: Efecto de la emisión de polvo en la seguridad vial

Para generar una mejor calidad en estos caminos se requería un cambio de estándar del mismo a través de una pavimentación tradicional. Esta pavimentación tradicional implicaba además en el mejoramiento del trazado, expropiaciones, saneamiento, construcción de la estructura del pavimento, etc. Obtener esto resultaba de alta complejidad, pues debido a que proyectos con bajo flujo vehicular generalmente entregaban una baja rentabilidad social, por lo que esta opción resultaba poco favorable. Producto de esto, se comenzó a innovar en algunas soluciones no tradicionales para solucionar el problema. Estas soluciones tenían que ser de bajo costo sobre la carpeta de rodadura y no generar gran variación de la geometría existente. Debido a que Chile es un país que presenta una alta variación climática a lo largo de su territorio, se trabajó por implementar soluciones que consideraran la realidad que presentaba cada región. Es así como en el norte del país, donde se presenta una condición climática de poca humedad y altas temperaturas, se implementan soluciones superficiales a base de sales, con el objetivo de disminuir considerablemente las emisiones de polvo. Por otro lado, regiones como la de Valparaíso comenzaron con aplicaciones de capas de protección asfáltica delgadas con el mismo objetivo.

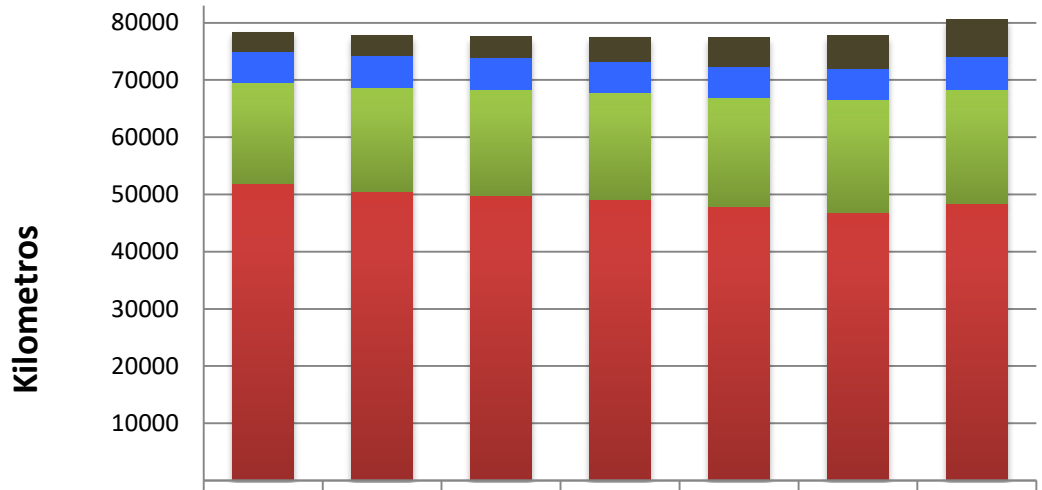
Durante el año 2003, la Dirección de Vialidad se auto impuso como meta mejorar la superficie a 5000 Km de caminos de bajo tránsito mediante este tipo de soluciones económicas, dando lugar así al Programa de Caminos Básicos 5000. Posteriormente, una vez cumplida la meta en Octubre del 2005, y con 5 meses de anticipación, se propuso la meta de completar los 10000 Km a Marzo del 2009, lo que se cumplió durante el primer trimestre de ese mismo año.

Paralelamente a esto, en la Región de la Araucanía se comenzó a ejecutar el Programa de Desarrollo Indígena, el cual consistió en intervenir caminos en localidades de comunidades indígenas.

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

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

El programa se plantea intervenir 15000 Km de caminos, los cuales corresponderán a 8500 de soluciones de capa asfáltica, 3500 de estabilizadores y otros 3500 de caminos indígenas con carpeta granular compactada. Se puede observar en mayor detalle los efectos del programa en el Gráfico 3, donde se puede evidenciar el incremento anual de caminos con capa de protección superficial.



	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Capa de Protección	3461,36	3595,32	3824,12	4362,39	5159,82	5812,81	6505,16
Granular Estabilizado	5429,18	5465,41	5455,17	5474,52	5325,91	5515,72	5752,88
Red Vial Pavimentada	17609,02	18147,42	18436,74	18642,20	19064,88	19555,65	19850,32
Red Vial No Pavimentada	51925,33	50555,59	49887,14	49092,17	47900,66	46916,83	48474,74

Gráfico 3: Evolución de las capas de protección en la Red Nacional Vial

4.2. Técnicas de conservación básicas utilizadas en Chile

Como se mencionó anteriormente, la tendencia en construcción de caminos básicos corresponde a mejorar el estándar de calidad de superficies no tratadas o estabilizadas, mediante carpetas granulares a través de capas de protección. Se puede observar con claridad este efecto en el Gráfico 4, donde se evidencia el importante crecimiento porcentual de soluciones superficiales en comparación a la utilización de soluciones granulares estabilizadas.

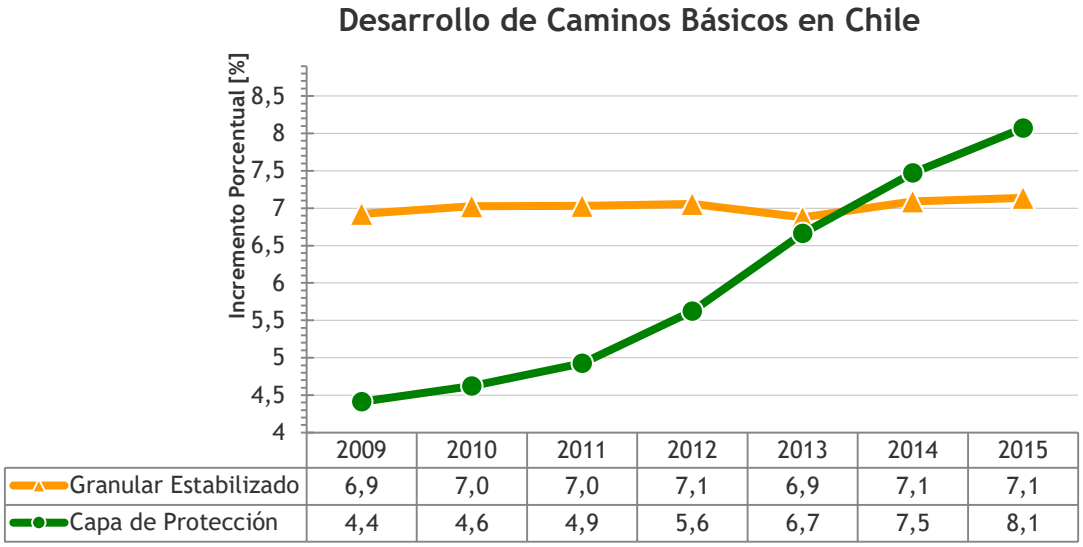


Gráfico 4: Desarrollo de Caminos Básicos en Chile

Las soluciones básicas utilizadas en Chile se pueden clasificar en 2 grandes grupos: con estabilizador y con capa de protección asfáltica. Estas soluciones dependen principalmente del factor ambiental presente en la Región, sumado a la experiencia que se ha tenido a lo largo del país. Por ejemplo, los primeros años del Programa de Caminos Básicos se aplicaron masivamente soluciones de tipo estabilizador en algunas regiones del sur del país (especialmente la aplicación de cloruro de sodio en regiones del Maule y La Araucanía). Si bien en un comienzo soluciones tuvieron un buen comportamiento, no brindaron el servicio esperado por un tiempo prolongado, por lo que luego fueron descontadas del programa.

4.2.1. Caminos con estabilizador

Consiste en soluciones en las cuales se aplica mediante riego superficial o incorporación al espesor completo de la capa de rodadura, distintos tipos de sales o cloruros con el objetivo de estabilizar la superficie. Entre los productos tradicionalmente aplicados destacan el cloruro de sodio, cloruro de magnesio hexahidratado (Bischofita) y el cloruro de calcio. Para el caso de la aplicación en todo el espesor de la carpeta de rodadura se realiza el proceso de homogenización empleando motoniveladora o una recicladora. El detalle de los métodos se observa en la Tabla 12.

Tabla 12: Estabilizadores

Tipo de Estabilizador	Modo de Aplicación	Forma de ejecutar
Cloruro de sodio (sal común)	En todo el espesor	Con motoniveladora
Cloruro de magnesio (Bischofita)	En todo el espesor	Con motoniveladora
Cloruro de calcio	Por riego superficial	Con camión aljibe

Estos tipos de solución mediante estabilizadores pueden ser utilizados en los siguientes procedimientos:

- **Bacheo granular**
  Utilizado cuando la carpeta de rodadura presenta baches aislados. Consiste básicamente en extraer material necesario, rellenar con material granular mezclado con la sal escogida y compactar (Según lo especificado por MC-7.306.3b).
- **Riego Superficial**
  Conservación preventiva que consiste en una restitución del cloruro superficial perdido por tránsito. Se aplica con camión aljibe y requiere que se presente una buena regularidad superficial (sin baches). Lo más tradicional para este caso es el uso de la Bischofita, debido a que es el cloruro que mejor se disuelve en agua formando una salmuera. Este procedimiento no aparece especificado en el Manual de Carreteras.
- **Reperfilado con compactación**
  Consiste en una restitución de la geometría y una mejora en la cohesión del material existente en la superficie mediante escarificación con motoniveladora hasta una profundidad de entre 3 y 5 cm del espesor de la carpeta de rodadura (Según lo especificado por MC-7.306.1d).
- **Recebo granular con adición de cloruro**
  Consiste en una reposición del material perdido de la carpeta de rodadura. El material repuesto debe incluir la sal (a granel o disuelta) para posteriormente compactar (Según lo especificado por MC-7.306.4f).
- **Eliminación de polvo con cloruro de calcio**
  Se emplea este material como solución no asfáltica principalmente en la Región del Bío Bío, con el objetivo de eliminar las emisiones de polvo principalmente en temporada estival.

4.2.2. Caminos con capa de protección asfáltica

Tiene como objetivo principal adicionar una capa de recubrimiento que permita generar textura superficial y asegurar impermeabilidad. Existe una amplia cantidad de soluciones asfálticas simples, las que se pueden clasificar dentro de 3 grupos principales:

- **Riego de neblina**
  Consiste en un riego de emulsión asfáltica de quiebre lento utilizado para rejuveneces superficies y sellar grietas pequeñas.
- **Lechada asfáltica**
  Una lechada es una mezcla de emulsión asfáltica de quiebre lento, agua, arena y eventualmente un relleno fino. Tiene como objetivo rejuvenecer la carpeta asfáltica, así como detener el desgaste superficial y mejorar la fricción entre pavimento y neumático.

- **Sello de agregados**
  Posee los mismos objetivos que las lechadas asfálticas. Consiste en un tratamiento superficial simple, el cual puede ser utilizado tanto como solución superficial definitiva o como método para reparar baches. En el caso de requerir una mejor estabilidad de la solución se realiza un tratamiento superficial múltiple.
- **Cape Seal**
  Este método corresponde a una combinación de un tratamiento superficial simple, pero con la diferencia de que en su superficie posee un sello tipo Slurry o lechada asfáltica, los cuales tienen como objetivo rellenar la textura rugosa y abierta del tratamiento superficial. El sello Slurry consiste en una mezcla de agregados chancados de tamaño pequeño y bien graduados con un bitumen emulsificado y con aditivos.
- **Otta Seal**
  Es un sello similar a la lechada asfáltica, pero posee mayor costo de ejecución debido a la calidad de asfalto emplead y a las temperaturas de trabajo. Es una solución empleada comúnmente para condición de baja temperatura.

4.3. Uso de Tratamientos Superficiales Simples en la Región de Valparaíso

Según el clima, suelos y materiales disponibles, cada región se ha ido especializando en algunos tipos de solución básica. Haciendo un recuento desde el año 2008 se obtienen los porcentajes de las soluciones preferidas por región. Estos valores se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Soluciones básicas predominantes en cada Región

Región	Solución Predominante	% Solución c/r al total de CCBB en la Región
Arica y Parinacota	Sal	73
Tarapacá	Sal	87
Antofagasta	Bischofita	100
Atacama	Bischofita	100
Coquimbo	Sal + Bischofita	88
Valparaíso	**TSS**	**100**
Metropolitana	TSS + DTS + CMA	96
O'Higgins	DTS + Lechada	89
Maule	TSS + DTS + CS	58
Bío Bío	DTS	87
Araucanía	DTS	100
Los Ríos	CS	100
Los Lagos	DTS	74
Aysén	Estabilizador	100
Magallanes	OS	100

Donde:
TSS: *Tratamiento Superficial Simple.*
DTS: *Doble Tratamiento Superficial.*
CMA: *Carpeta de Mezcla Asfáltica.*
CS; OS: *Cape Seal y Otta Seal.*

Se observa que especialmente en la Región de Valparaíso, y en menor grado en las Regiones del Maule y Metropolitana se prefieren los tratamientos superficiales simples. Esto se debe a que la Región de Valparaíso presenta un clima variable, presentando épocas del año en donde destaca la gran sequedad atmosférica hasta llegar a otros momentos donde existe la presencia de un clima templado cálido con lluvias invernales. Esto implica la necesidad de una solución que permita, para algunas épocas del año, un escurrimiento de aguas superficiales que no dañe al pavimento. El periodo de vida útil para un tratamiento superficial simple, según lo observado en la Región de Valparaíso, bordea los 3 años.

Por otro lado, se observa en la Tabla 14, que al año 2011 la necesidad de tratamientos superficiales en caminos básicos en la Región de Valparaíso está cubierta entre un 60 a 70 %, por lo que si bien está muy por sobre la realidad nacional, aun permite la existencia de más proyectos de pavimentación.

Tabla 14: Cobertura de Soluciones Superficiales en Caminos Básicos por Región (año 2011)

Región	% de Cobertura Estimada
Arica y Parinacota	30
Tarapacá	35
Antofagasta	70
Atacama	100
Coquimbo	50
Valparaíso	**60 a 70**
Metropolitana	60
O'Higgins	30
Maule	25
Bío Bío	Menor a 10
Araucanía	10
Los Ríos	10
Los Lagos	20
Aysén	90 a 100
Magallanes	30

5. CAPÍTULO V: EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA ESCORIA DE COBRE

En los últimos años el progreso tecnológico, el crecimiento de la población, el desarrollo industrial y el aumento del consumo de los recursos naturales han generado un uso desordenado de los recursos no renovables. Sumado a esto toda acción que implique esta explotación termina generando grandes volúmenes de residuos tanto urbanos como industriales. En particular en Chile, el principal mineral extraído corresponde al cobre, el cual genera un impacto negativo no sólo en su proceso de fundición, sino que con los desechos que genera.

Por otro lado, la actividad de la construcción causa grandes daños al medio ambiente, debido al consumo de grandes volúmenes de recursos naturales, de energía y también por los grandes volúmenes de desechos que genera. Entre los recursos más utilizados en la construcción destacan los agregados pétreos, los cuales al ser extraídos de las riberas de los ríos, generan cambios en el ecosistema que muchas veces resultan negativos para el mismo.

En el presente capítulo se mostrará que el uso de la escoria de cobre contribuye a solucionar ambos problemas ambientales, ya que al utilizar este material se elimina el impacto ambiental negativo que implica el extraer áridos de ríos y esteros, y se disminuye el impacto que genera tener este residuo acumulado.

En una primera instancia se revisará la situación actual del botadero de Ventanas, evidenciando las grandes cantidades existentes de escoria de cobre en aquel lugar. Se entregarán fundamentos que indican por qué el reducir el consumo de áridos extraídos de ríos y esteros resulta beneficioso para el medioambiente.

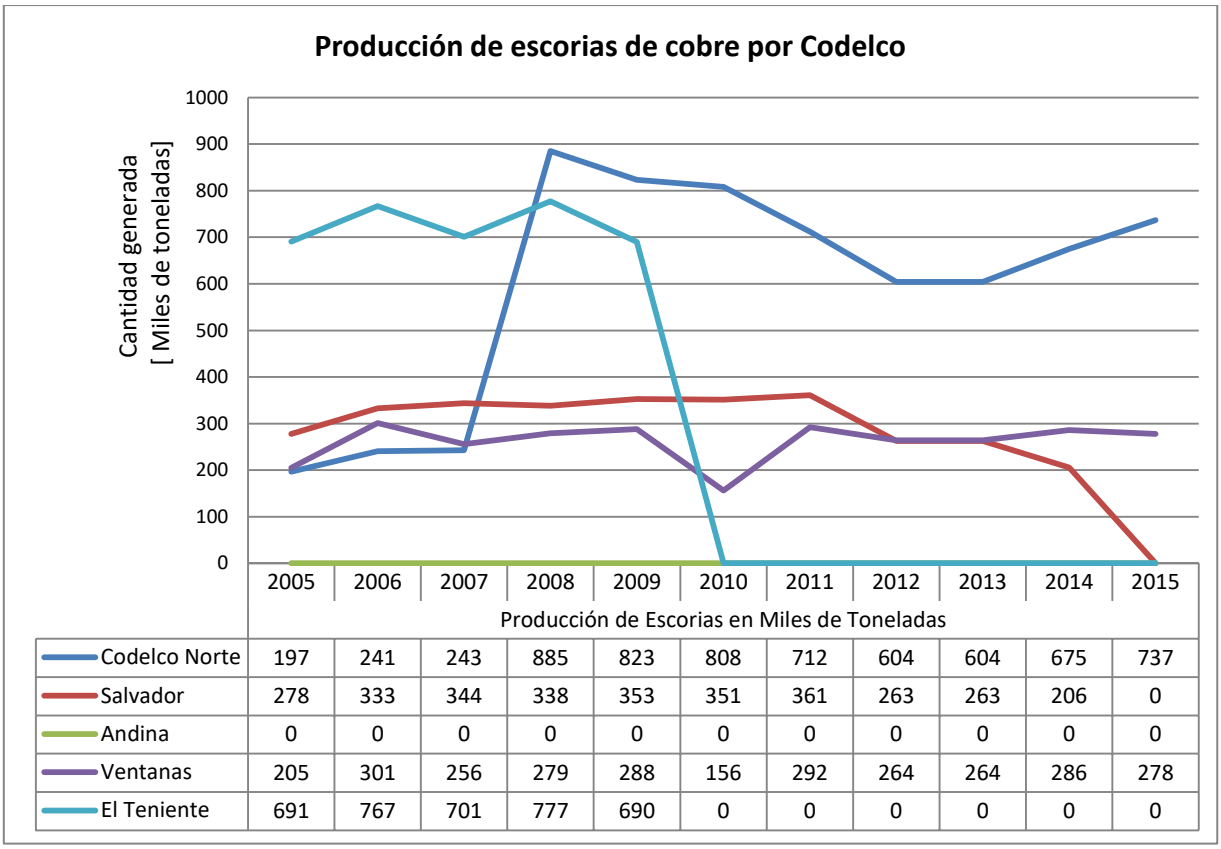
Posterior a esto se revisará si la escoria de cobre cae dentro de los denominados “residuos peligrosos”. Un residuo o desecho, corresponde a una sustancia, elemento u objeto que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar[4]. Se evaluarán los componentes existentes en la escoria según información proporcionada por CODELCO Ventanas, así como por información obtenida mediante la realización de fluorescencia de rayos x. Se evaluará tanto sus componentes como sus efectos, para determinar si este desecho minero cumple con las características para ser declarado como desecho inerte, o es definido como residuo peligroso. Para esto se realizará un análisis químico y ambiental del material, según ensayes establecidos en el Decreto Supremo N° 148, así como otra serie de ensayes propuestos para determinar posibles efectos dañinos.

[4] Definición de Residuo según Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos.

5.1. Utilización de escoria, una mejora ambiental para Ventanas y la Región

La gestión de los residuos mineros masivos generada por CODELCO, tiene como principio prevenir y controlar los impactos a las personas, medio ambiente y territorio, fortaleciendo la gestión de riesgos en materia de Relaves, Escorias, Estériles, Minerales de baja ley y Ripios de lixiviación en cada etapa de desarrollo de la faenas minera, aplicando criterios de control en el diseño de los botaderos, en operaciones y proyectos [2] . Para controlar y eliminar el impacto producido en alguna de sus divisiones, CODELCO ha trabajado en reprocesar las escorias de cobre, llegando incluso en algunos casos a detener su acumulación.

Durante el 2010, las Divisiones Salvador y El Teniente comenzaron a reprocesar gran parte de sus escorias. Durante el año 2011 se sumó a esta iniciativa la División Chuquicamata (parte de CODELCO Norte). Como se puede observar en el Gráfico 5, divisiones como Andina, el Teniente Salvador han logrado el año 2015 eliminar la producción de este residuo, mientras que las divisiones CODELCO Norte y CODELCO Ventanas continúan la producción y almacenamiento de las mismas.



	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	Producción de Escorias en Miles de Toneladas										
Codelco Norte	197	241	243	885	823	808	712	604	604	675	737
Salvador	278	333	344	338	353	351	361	263	263	206	0
Andina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ventanas	205	301	256	279	288	156	292	264	264	286	278
El Teniente	691	767	701	777	690	0	0	0	0	0	0

Gráfico 5: Producción de escorias de cobre por CODELCO

La situación de la división Ventanas se puede observar con mayor claridad en la Ilustración 17, donde se aprecia el incremento del material para los últimos 12 años, en donde el contorno rojo representa la situación actual.

Ilustración 17: Crecimiento de superficie del botadero de Ventanas (2004-2016)

La utilización de este material forma parte de Anteproyecto del Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Quintero-Puchuncaví (PRAS) [33]. Este programa evalúa la reutilización de los pasivos ambientales (escorias, cenizas y otros), con el objetivo de darles un valor agregado mediante el uso en la región. Dentro de las iniciativas medioambientales destaca el convenio con CODELCO Ventanas para la utilización de la escoria en construcción de caminos dentro de la comuna de Puchuncaví.

Dentro de la evaluación preliminar de la factibilidad técnica, económica, ambiental, social y legal de reutilizar acopios de residuos que constituyen pasivos ambientales, se observaron los siguientes obstáculos técnicos, asociados a la carencia de información:

- Se desconoce la composición físico-química general de los pasivos ambientales generados.
- Se requiere una caracterización específica (análisis mineralógicos).
- No existe un dimensionamiento de los pasivos existentes (volumen de material acumulado).

Dentro de los obstáculos administrativos y culturales, destaca la falta de confianza de la comunidad y autoridad sobre la existencia y control de los peligros asociados al uso de estos pasivos reutilizados. El uso de las escorias para la pavimentación de caminos no se considera pertinente por parte de la comunidad, considerando ya el actual impacto en la zona.

5.2. Escoria de cobre como alternativa medioambiental a áridos tradicionales

Si bien los áridos convencionales (extraídos de riberas de ríos y esteros para el caso de la Región de Valparaíso) mueven una industria fundamental y necesaria para el desarrollo, ya que proveen recursos naturales primordiales para la industria de la construcción, no deja de ser una actividad que provoca desgaste al medio ambiente. El aspecto más destacado está relacionado con la alteración o modificación del hábitat en la fase de explotación, debido al impacto visual, la pérdida de la capa vegetal e impacto directo sobre la fauna [30].

Entre los principales problemas medioambientales producidos por las industrias de áridos destacan:

- **Ruido**
  El ruido corresponde a cualquier sonido que genere efectos negativos y desagradables en el medio ambiente. La naturaleza del proceso de extracción y producción de áridos, relacionada a procesos de trituración y clasificación de rocas, hace difícil una reducción considerable de los niveles de ruido generados. Entre los principales daños producidos por las emisiones de ruido destacan las molestias provocadas a personas en sectores cercanos a la zona de trabajo, generando una disminución de la calidad de vida y del entorno natural.

- **Vibraciones**
  Las vibraciones que pueden tener influencia sobre el medio ambiente suelen producirse por explosivos utilizados en las canteras de roca. Otros equipos y procesos que generan vibraciones son la utilización de martillos hidráulicos móviles, utilizados para la rotura de grandes bloques, o las instalaciones de trituración, molienda, clasificación y cintas transportadoras.
  Estas vibraciones pueden ser molestas para los habitantes de la zona, aunque más desde un punto de vista psicológico que físico, debido a que raramente se producen daños estructurales.

- **Emisiones a la atmósfera**
  Los diferentes procesos que tienen lugar en las explotaciones de áridos suelen producir emisión de polvo a la atmósfera. Se considera polvo a todas las partículas sólidas no solubles en agua que se originan por la disgregación de materiales rocosos o de suelos. La emisión excesiva puede generar riesgos a la salud de los trabajadores, generando enfermedades pulmonares. Sumado a esto afecta negativamente a la calidad del paisaje, ralentiza el crecimiento de plantas, reduce la visibilidad de carreteras y ensucia las vías públicas.

- **Biodiversidad**
  La industria de áridos puede llegar a generar una actividad altamente dañina a los ecosistemas existentes en el lugar de extracción. Una incorrecta gestión del agua en la zona de extracción ofrece grandes peligros a la flora y fauna del lugar, debido principalmente a que genera un aumento de la turbidez del agua producto de los sólidos en suspensión.

- **Modificaciones en cauces [31]**
  Entre las modificaciones posibles en los causes destacan alteraciones del curso y la dinámica fluvial. Variaciones producto de la extracción o dragado del cauce provoca modificaciones en la dinámica del río, creando zonas en las que el curso se amplía, modifica su dirección, varía su velocidad, generando así una alteración en las zonas de erosión y sedimentación del cauce [31]. Estas alteraciones podrán presentar un riesgo potencial en especial en los casos de erosión de los márgenes o las que pudieran afectar a la cimentación de obras civiles. Para el caso particular de la Región de Valparaíso, especial relevancia tiene la extracción de áridos en los cuerpos o cursos de agua. Su explotación ha generado importantes alteraciones de algunos cursos naturales de agua, provocando procesos erosivos laterales por la exposición de nuevas tierras al caudal y, además, inundando terrenos históricamente fuera del área de crecida natural de los ríos. A pesar de que esta actividad está regulada por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, la gran mayoría de estos proyectos no ingresa al sistema, ya sea por los volúmenes a explotar o porque fueron proyectos iniciados previo a la entrada en vigencia del Sistema en el año 1997 [32].

El uso de escoria de cobre como alternativa a los áridos tradicionales, reduce el impacto ambiental asociado al tradicional tratamiento de áridos. La escoria de cobre, para ser utilizada en obras viales, requiere cumplir con la banda granulométrica definida por la especificación del proyecto al que vaya a ser utilizada. Por esto es que si bien al estar ya acumulada en la zona de acopio, elimina todos los impactos relacionados con el proceso de extracción de áridos (ya sea de ríos o canteras), sin embargo no elimina el impacto relacionado a los procesos de chancado y acopio.

5.3. Evaluación de riesgos ambientales en el uso de escoria de cobre

Si un agua superficial o subterránea se pone en contacto con un material, producirá que los componentes del mismo se disuelvan a una velocidad finita. Incluso los residuos solidificados que presentan características de permeabilidad elevadas, como las arcillas, cementos o vidrio, podrán ser penetradas por el agua y ser disueltas, por lo que no se puede hablar de materiales completamente insolubles. Este proceso es conocido como lixiviación, donde el agua que inicia el proceso es conocido como agente lixiviante y el agua contaminada se la denomina lixiviado. La lixiviación mide la capacidad de liberación de una sustancia tóxica, pudiendo deducir mediante este análisis si un residuo que posee sustancias tóxicas resulta inmune a la acción del agua. Un caso típico es un vidrio de plomo, cuyo contenido de plomo puede superar el 30% en peso pero soporta cualquier test de lixiviación, no así el polvo de acería, que contiene poco plomo, per que posee una capacidad de lixiviar enorme [5]. Otro aspecto importante a considerar es el potencial contaminante del residuo. En el ejemplo anterior, se comentó que en el vidrio de plomo posee un elevado contenido del mismo elemento. El plomo es un metal pesado que se encuentra regulado por su alta peligrosidad. En el ejemplo entonces ser puede afirmar que el vidrio de plomo posee un potencial contamiante elevado, pero baja posibilidad de lixiviar.

La Ilustración 18 expone para algunos residuos industriales corrientes esta correlación, registrando los residuos más peligrosos en las coordenadas máximas, mientras que los menos peligrosos quedan localizados en el origen de coordenadas. Se puede observar que el eje de las abscisas corresponde a la posibilidad de que el material pueda ser lixiviado, mientras que en el eje de las ordenadas se evalúa el potencial de lixiviación.

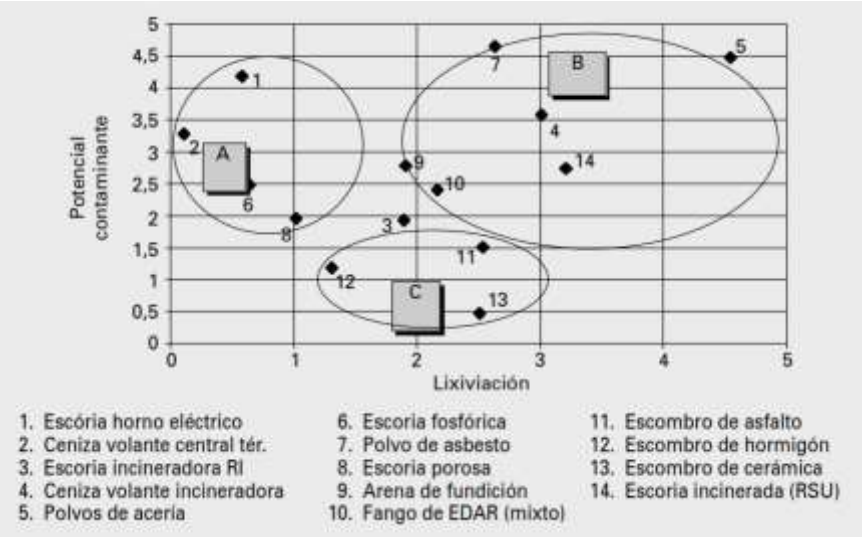


Ilustración 18: Potencial contaminante v/s lixiviación

En el caso particular de la escoria de cobre se observa la pertenencia del nivel A (escoria de horno eléctrico), donde se encuentran las estructuras bien ligadas. Si bien se observa un alto potencial contaminante, el valor correspondiente a la lixiviación es muy bajo. Este nivel indica que un residuo es apto para usos a granel, ya que se encuentran total o parcialmente vitrificados, por lo que los diversos contaminantes que componen el residuo difícilmente saldrán al entorno. El indicar que los residuos puedan depositarse a granel significa que son aptos para la construcción de terraplenes, rellenos, subbases de carreteras, etc., sin que se presenten problemas significativos. El nivel B corresponde a residuos que se le deben aplicar un tratamiento severo de inmovilización, mientras que el nivel C corresponde a estructuras poco ligadas que requieren tratamientos físicos y/o químicos.

5.3.1. Composición de la escoria de cobre de CODELCO Ventanas

Se realiza una evaluación de los componentes según información entregada por personal de Control de Calidad de CODELCO Ventanas. El objetivo de esto es ver si la composición de la escoria corresponde a la habitualmente señalada como inerte y descrita entre los óxidos fundamentales presentes en la escoria.

Para esto se trabaja con información examinada de las escorias de horno eléctrico (escoria final de descarte). El muestreo realizado por personal de Control de Calidad se realiza de manera semanal, por lo que se observan en la Tabla 15 y Tabla 16 los resultados promedio obtenidos para el año 2015 y hasta el 31 de Mayo del 2016 respectivamente (Detalle del muestreo se encuentra disponible en el Anexo E.1 y E.2).

Tabla 15: Promedio de composición anual de CODELCO Ventanas año 2015

	Cu %	Ag g/T	Au g/T	As %	SiO2 %	Al2O3 %	S %	Fe %	Fe3O4 %
Promedio	1,08	3,50	0,60	0,07	25,6	4,0	0,45	39,1	6,2
Desviación Estándar	0,27	3,10	0,30	0,18	8,6	1,4	0,23	3,7	2,4

Tabla 16: Promedio de composición anual de CODELCO Ventanas año 2016

	Cu %	Ag g/T	Au g/T	As %	SiO2 %	Al2O3 %	S %	Fe %	Fe3O4 %
Promedio	1,05	3,05	0,60	0,04	29,5	4,6	0,38	39,2	8,1
Desviación Estándar	0,11	0,22	0,30	0,01	5,4	0,9	0,09	4,9	2,0

Se puede observar que la presencia de hierro en el caso de la escoria de CODELCO Ventanas es cercana al 39%, lo que se encuentra dentro de los valores tradicionales para este elemento (entre un 30 y 40%). Para el caso del óxido de silicio, los valores observados bordean entre el 25 y 29%, por debajo del umbral menor observado en casos tradicionales (35%). Por otro lado, el óxido de aluminio para ambos años supera levemente el 4%, estando entre el rango tradicional (0 a 10%), y no se entregan valores relacionados a la presencia de óxido de calcio.

Se puede comentar que la escoria de cobre de CODELCO Ventanas tiene una composición tradicional a la escoria de cobre catalogada internacionalmente como inerte. Si bien se observa la presencia de arsénico en bajas cantidades (promedio inferior al 0,07%), existe evidencia de material con contenido de 1,25% de arsénico (muestreado entre el 8 y 14 de Diciembre del 2015).

El evidenciar la existencia de arsénico en la escoria de cobre, el cual es un elemento no registrado en los resultados de fluorescencia de rayos X tradicionales para el material, genera la necesidad de realizar un estudio ambiental que permita no sólo obtener la presencia del arsénico en la escoria de cobre, sino que también señale si el material podrá ser catalogado como residuo no peligroso. En caso de ser catalogado como residuo peligroso, se concluirá inmediatamente que en ese estado, la escoria de cobre no cumpliría con los requisitos para ser utilizado como árido en obras viales.

5.3.2. Evaluación de ingreso SEIA (2013)

En Septiembre del año 2013, la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) remitió al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) una solicitud de informe previo respecto de las obras y actividades referidas a la operación del proyecto Refinería y Fundición Ventanas, para los sectores correspondientes al botadero de escorias y al sector de depósito de seguridad, indicando la existencia de actividades que pueden constituir una elusión al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). En Octubre del mismo año, el SEA solicita antecedentes complementarios a la SMA, requiriendo las autorizaciones para el funcionamiento del depósito del sector botadero y depósito de seguridad.

Dentro de los hechos constatados durante la fiscalización del sector botadero destacan:

- Se constató que el sitio destinado a la disposición de Residuos Industriales Sólidos (RISes), "Sector Botadero", se encuentra fuera de las instalaciones de proyecto Fundición y Refinería Ventanas.
- Se constató que actualmente se depositan entre 800 y 2500 toneladas de material al día.
- Según lo señalado, el Sector Botadero no cuenta con una superficie impermeabilizada, o bien con geomembranas que impidan el paso de lixiviados a la napa subterránea.
- Adicionalmente, se indica que los desechos son transportados hacia el "Sector Botadero" por vía terrestre, en un tren habilitado para ello, el cual cruza la ruta F-30
- Con el fin de determinar la presencia de elementos químicos en la superficie del suelo del sector, personal de la SEREMI de Salud Región de Valparaíso, utilizó el equipo de fluorescencia de rayos X, para realizar mediciones en distintos sectores del sitio (Ilustración 19). Cabe señalar que se realizaron mediciones tanto en el sector denominado "Sector Botadero", como en el sector aledaño, denominado "Humedal" (Figura 5).

Ilustración 19: Puntos de muestreo para análisis de ingreso al SEIA

- En consideración a las concentraciones evidenciadas, se realizó un contraste con criterios internacionales para la gestión de riesgos, utilizando en este caso, y según lo establecido en el Artículo 7° del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, el "Risk Management Criteria for Metals at BLM Mining Sites" de la Confederación de Canadá, obteniendo lo señalado en la Tabla 17.

Tabla 17: Concentración de metales en suelo de sector de botadero

	Punto	1 (Botadero 1)	2 (Botadero 2-1)	3 (Botadero 2-2)	4 (Botadero 2-3)	5 (Humedal 1)	6 (Humedal 2)
Coordenadas WGS 84 195		N 6.372.287 E 267.808	N 6.372.485 E 267.863	N 6.372.485 E 267.863	N 6.372.502 E 267.882	N 6.372.269 E 267.810.	N 6.372.229. E 267.826.
Elemento	CRI* ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Mn	28.000	825 +/- 17	1.113 +/- 111	1.719 +/- 484	1.103 +/- 105	1.718 +/- 26	545 +/- 19
Ni	4.000	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado
Cu	7.400	6.457 +/- 65	70.639 +/- 1575	12.391 +/- 643	11.068 +/- 284	16.082 +/- 124	5.717 +/- 65
Zn	60.000	440 +/- 15	6.990 +/- 214	7.784 +/- 412	9.243 +/- 232	18.46 +/- 28	488 +/- 16
As	12	149 +/- 7	925 +/- 53	344 +/- 76	356 +/- 51	652 +/- 13	533 +/- 13
Se	1.000	10,7 +/- 1,7	No Detectado	No Detectado	No Detectado	55 +/- 3	44 +/- 3
Ag	1.000	No Detectado	164 +/- 27	No Detectado	198 +/- 27	22 +/- 7	37 +/- 9
Cd	100	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado	35 +/- 10	No Detectado
Sb	100	No Detectado	370 +/- 69	358 +/- 75	303 +/- 67	61 +/- 17	No Detectado
Hg	60	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado	No Detectado
Pb	2.000	201 +/- 7	1.297 +/- 57	1.608 +/- 109	2.198 +/- 75	848 +/- 13	556 +/- 12

Se presentan a continuación las conclusiones entregadas

- Del análisis de los resultados, se constata que los niveles de Arsénico (As) superan los rangos de la norma internacional utilizada (Risk Management Criteria for Metals at BLM Mining Sites) en todos los sitios muestreados, por otra parte, los niveles de Cobre (Cu) superan la norma en cuatro de los seis sitios muestreados, tal como se muestra en la (Tabla 17). Cabe destacar que el elemento químico Arsénico (As), se encuentra listado en la Clase 6.1 Sustancias venenosas (tóxicas), de la NCh 382. Of 89.
- Del análisis realizado a las imágenes obtenidas de Google Earth 2013, se puede indicar que ha existido un aumento en la superficie utilizada para la disposición de residuos del Proyecto Fundición y Refinería Ventanas, pasando desde 7,9 a 15,1 hectáreas aproximadamente, en el periodo comprendido entre los años 2004 y 2013.
- Según el artículo 3, Los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualesquiera de sus fases, que deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, son los siguientes:
  Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de agua o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos. Se entenderá por proyectos de saneamiento ambiental al conjunto de obras, servicios, técnicas, dispositivos o piezas comprendidas en soluciones sanitarias, y que correspondan a: Sistema de tratamiento y/o disposición de residuos industriales sólidos.
- Por último, se informa que el Sector Botadero se encuentra sujeto a la obligación de ingresar al SEIA, por constituir actividades que se encuentran enmarcadas en la tipología de proyecto contenidas en el artículo 3° del Reglamento del SEIA.

5.3.3. Análisis de la escoria según fluorescencia de rayos X

Para obtener información de la composición de la escoria de cobre depositada en el sector de botadero mismo, se elabora análisis elemental mediante equipo no cuantitativo de fluorescencia de rayos X.

Se realiza recolección de material de 5 zonas distintas del sector de botadero. Este muestreo consiste en la recolección de al menos 10 unidades de escoria de cobre que cumplan con las condiciones necesarias para ser ensayadas. Se requiere que estas muestras sean prismáticas, con al menos 2 caras planas opuestas, de dimensiones pequeñas (no superiores a los 5 [cm] por lado) y sin grandes discontinuidades. Se recolectan 10 para posteriormente determinar en laboratorio cuál de ellas cumple mejor las condiciones anteriormente señaladas, El muestreo fue realizado el día 20 de Diciembre del año 2016.

Como se puede observar en la Ilustración 20, se procura que los puntos de extracción se encuentren distanciados entre sí, de modo que así logren cubrir la mayor parte del sector.

Ilustración 20: Puntos de muestreo para análisis de fluorescencia por rayos X

Se observa en la Ilustración 21, una de las zonas de recolección de material. Para escoger el punto de muestreo se considera la facilidad de acceso para vehículos motorizados, la existencia de una pendiente baja en el camino y la presencia de altura y volumen de material acopiado considerable. Esto permite suponer que estos sectores corresponderán a una zona preferencial de extracción de material al momento de ser utilizado. Se pueden observar imágenes de cada uno de los puntos de muestreo en la sección Anexo F.

Ilustración 21: Punto M3 de muestreo para Fluorescencia

El equipo de Rayos X utilizado en esta investigación está compuesto por un tubo de rayos X modelo Mini-X y el espectrómetro X-123 de la fábrica AMPTEK. .Debido a que el éste equipo de Fluorescencia por rayos entrega sólo un espectro de intensidad de emisión v/s energía dispersada, se puede identificar la existencia de un elemento en particular, pero no así de manera directa la concentración existente del mismo en la muestra. Para obtener la concentración se realiza una evaluación de manera semi-cuantitativa.

Utilizando el software ADMCA Amptek DP4, se obtiene un espectro característico de la muestra, como se observa en la Ilustración 22 (A). El reconocer en una zona del espectro un tramo con distribución de tipo gaussiana permite identificar la existencia de un elemento dominante. Para determinar a qué elemento corresponde, es necesario registrar el valor de energía (eje horizontal) correspondiente al punto de máxima intensidad (eje vertical). En el caso ejemplificado en la Ilustración 22, el valor máximo de intensidad ocurre a una energía de 6.41 electro volts, el cual indica que corresponde al elemento Fe (Valores de energía de fotones liberados según cada elemento se encuentra en Anexo E.4).

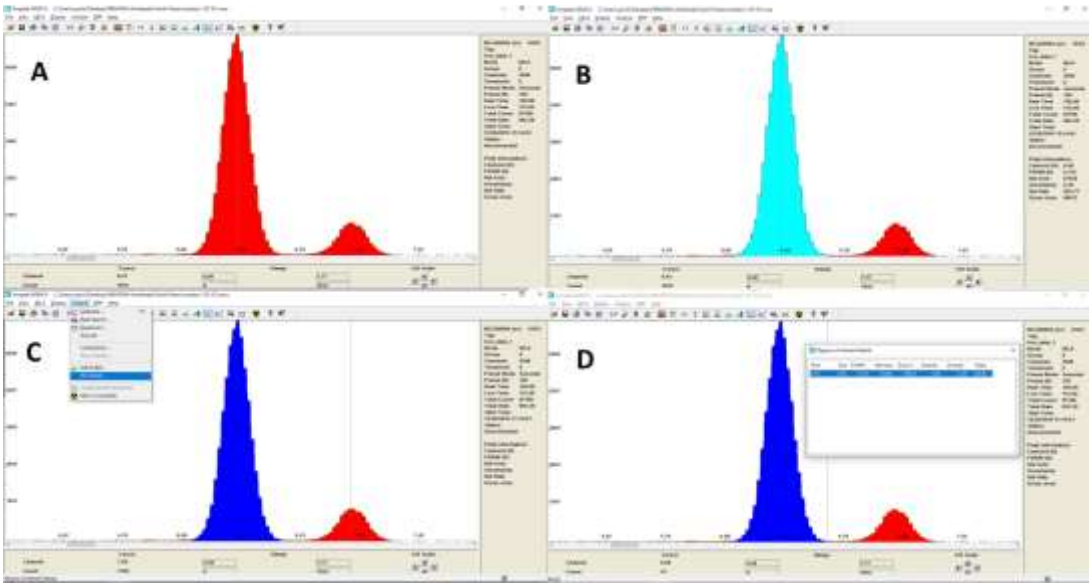


Ilustración 22: Proceso de medición para método semi-cuantitativo de fluorescencia

Lo anterior corresponde al análisis de determinación de tipo de elemento constituyente de la muestra. Para realizar el método semi-cuantitativo se selecciona el tramo correspondiente a la distribución gaussiana, y mediante el software ADMCA se calcula el total de energía liberada por ese elemento. Este valor corresponde a la integración del área bajo la curva seleccionada, y en el caso del software utilizado, corresponderá al área bajo la curva menos la línea base de emisión (valor de intensidad de energía común para toda la muestra), por lo que no se trabajará con el área total, sino que con el área neta (Área total menos línea base). Se repite el procedimiento para cada distribución de tipo gaussiana identificable. Finalmente, una vez definidos la mayor cantidad de elementos posible, se suman los valores de área neta obtenidos de cada elemento y se define aquel valor como área neta total. Para el caso del método semi-cuantitativo, este valor de energía acumulado representará sólo a los elementos utilizados, no al espectro en general. Para obtener la presencia en porcentaje de cada elemento en la muestra, se divide el área neta de cada elemento por el área neta total y se multiplica por 100.

Se realiza este procedimiento para todas las muestras, considerando los elementos que presenten este tipo de distribución con un valor máximo superior a los cercanos dentro del espectro mismo. Se presentan a continuación los espectros obtenidos, así como las áreas limitadas por cada muestra.

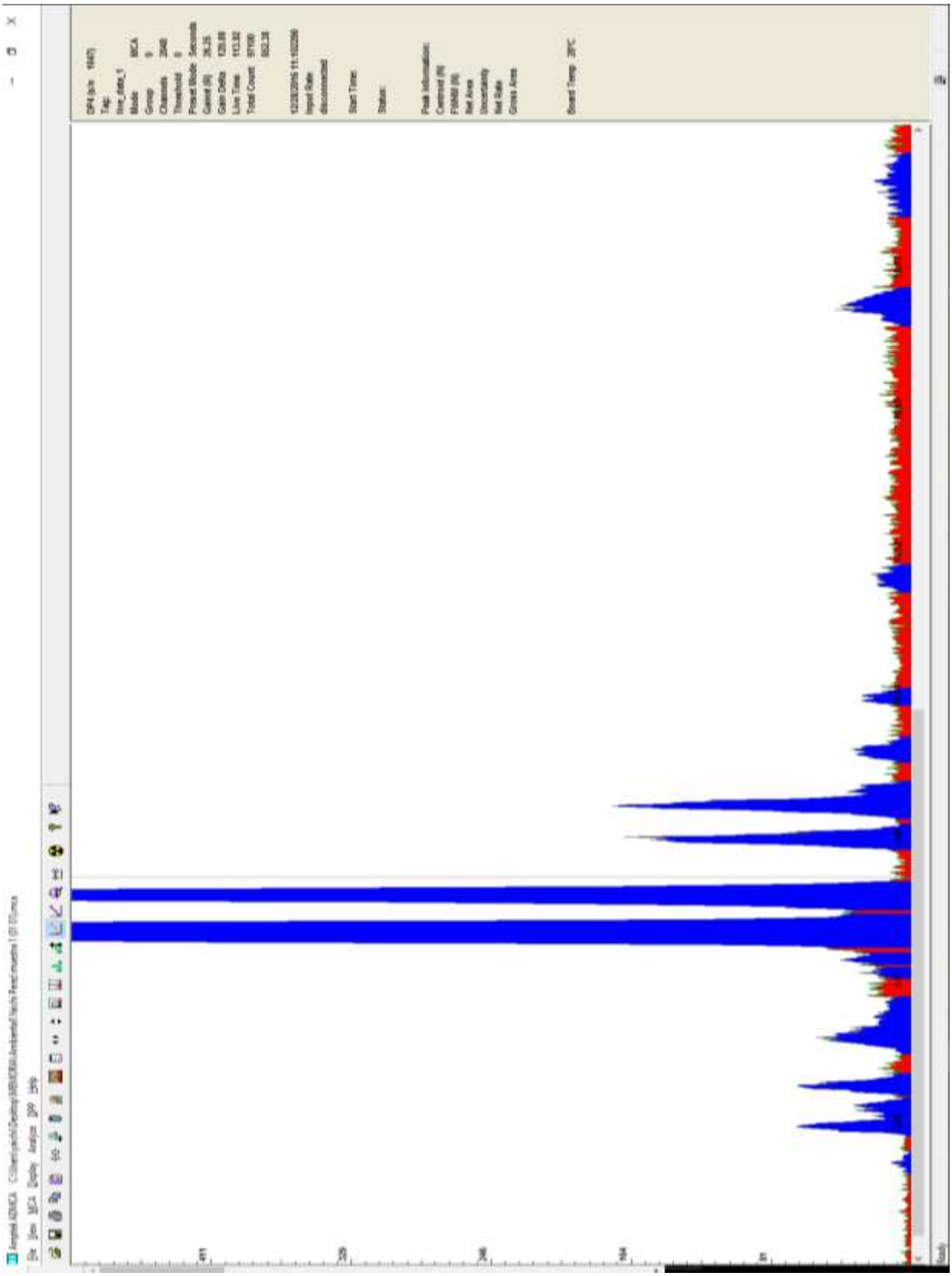


Ilustración 23: Intensidad de emisión de muestra 1

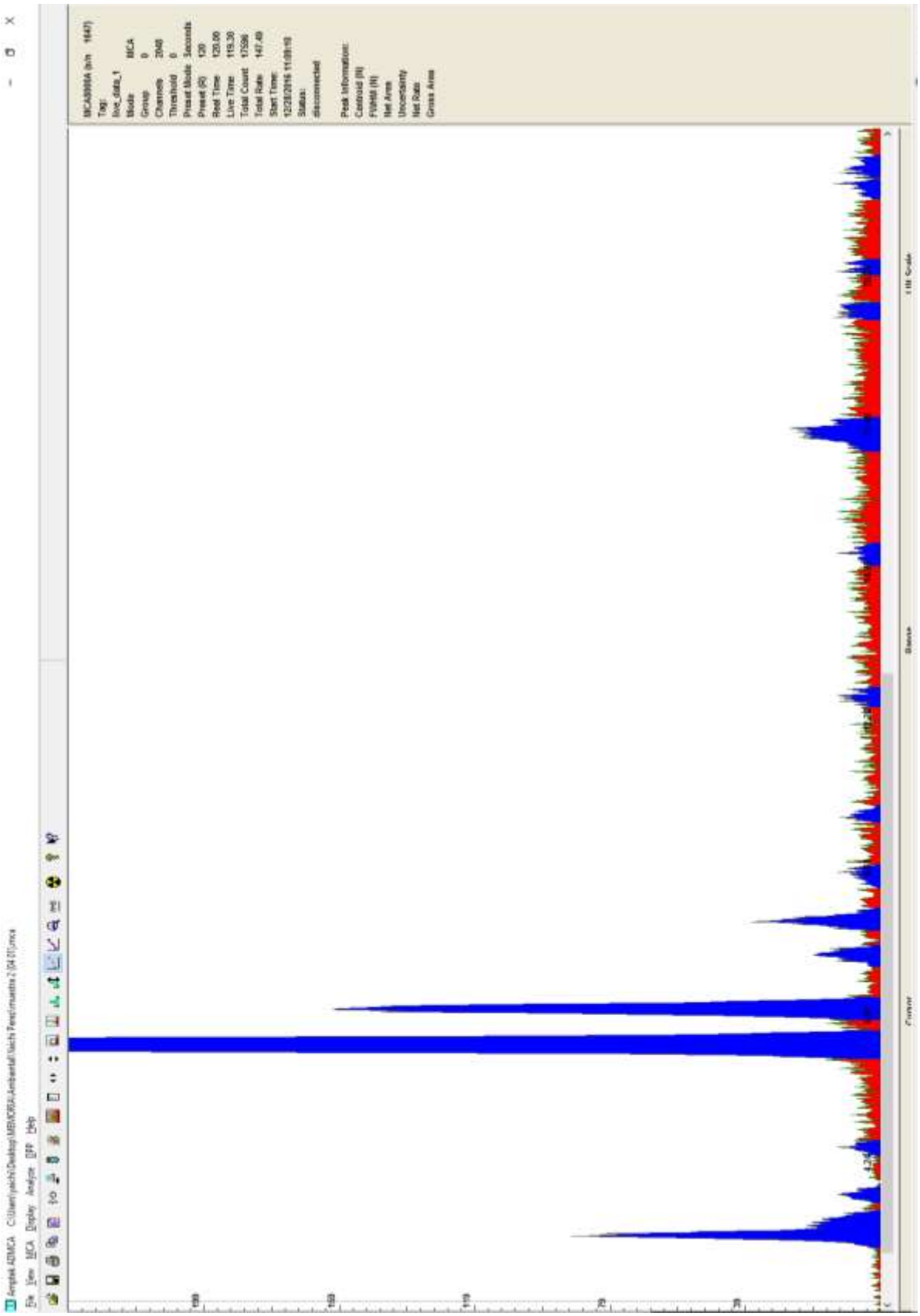


Ilustración 24: Intensidad de emisión de muestra 2

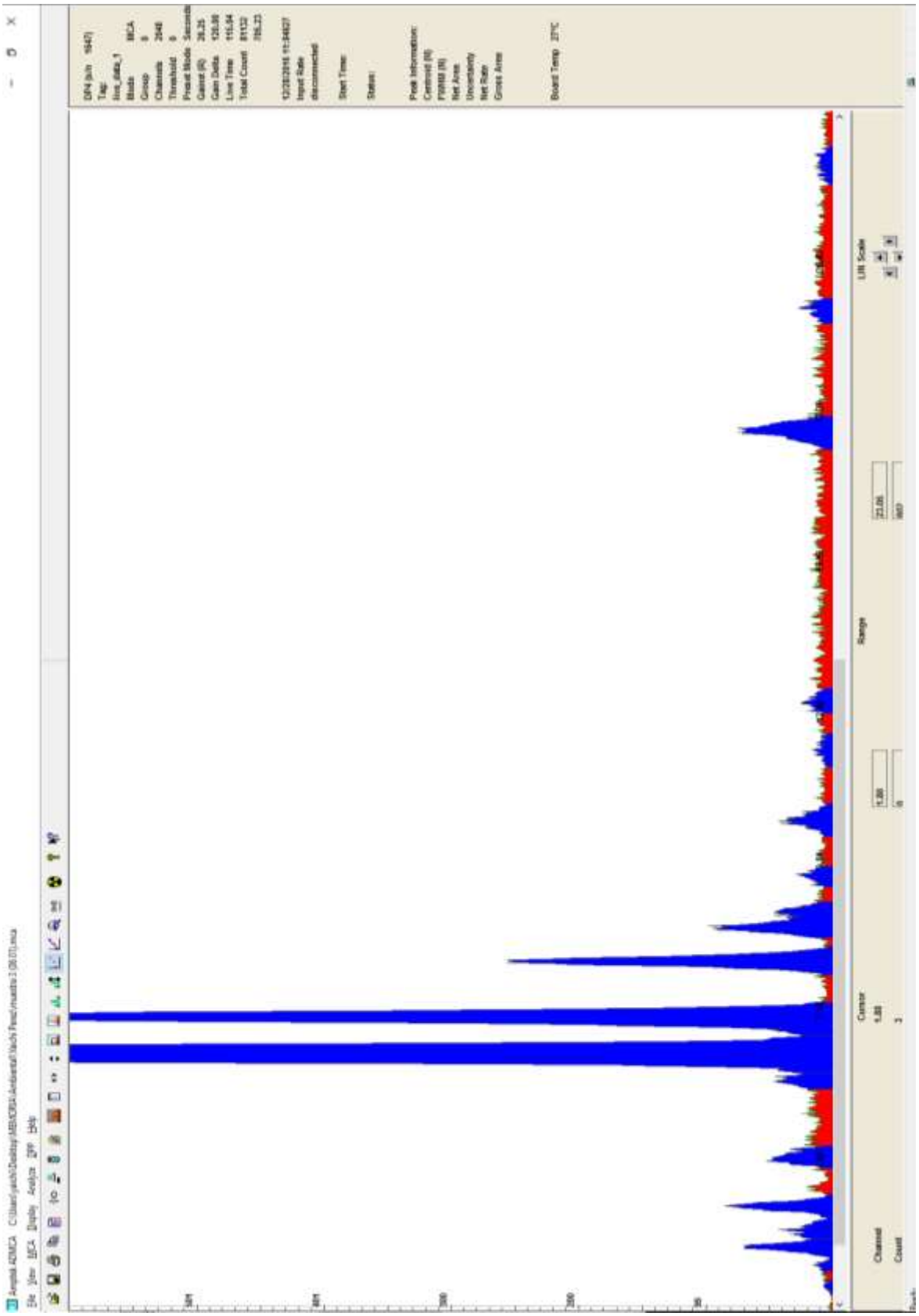


Ilustración 25: Intensidad de emisión de muestra 3

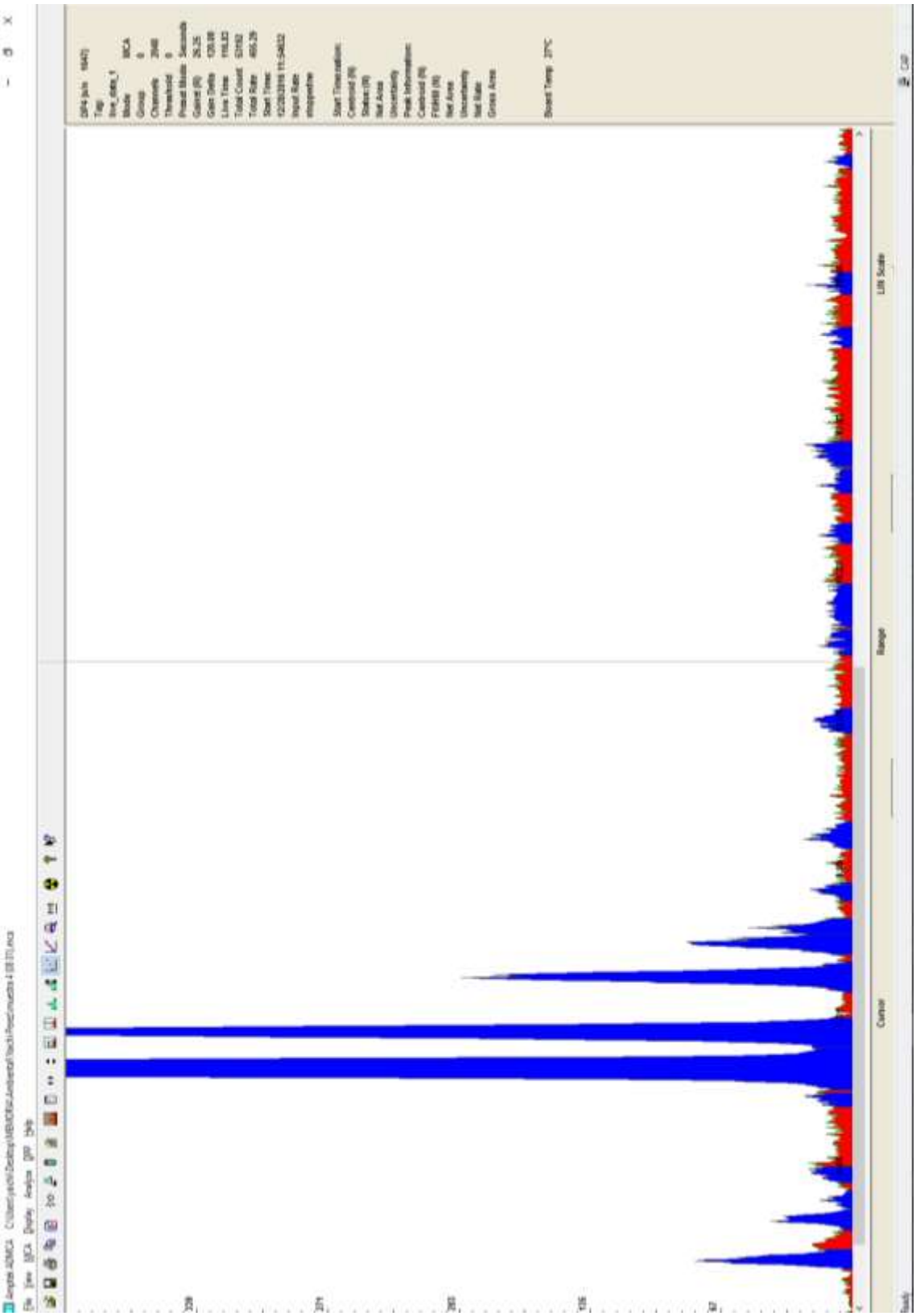


Ilustración 26: Intensidad de emisión de muestra 4

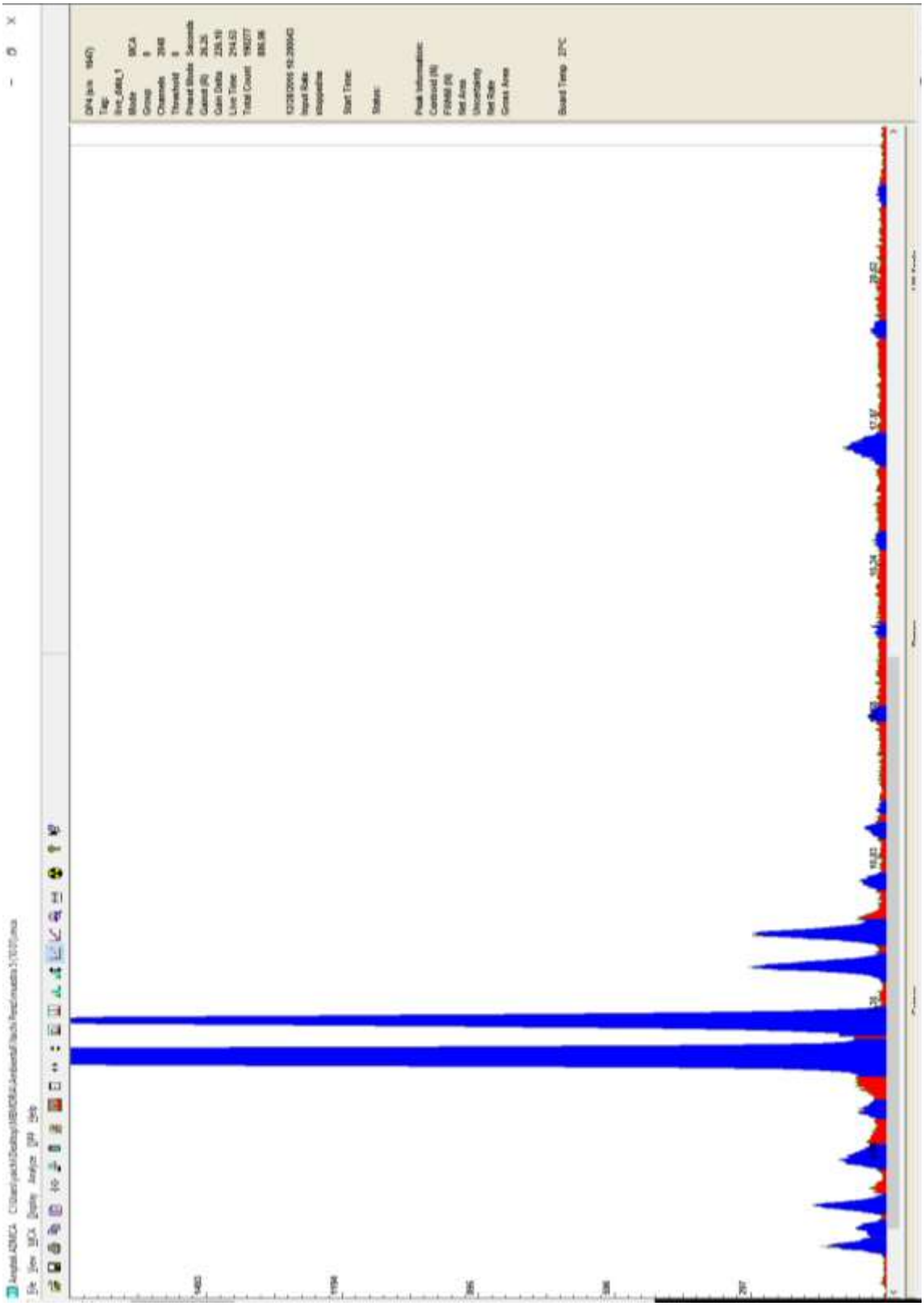


Ilustración 27: Intensidad de emisión de muestra 5

Este método semi-cuantitativo no entrega información real de concentración de elementos en la muestra por 2 motivos: Se trabaja con el supuesto de proporcionalidad entre el valor de energía total dispersado por el elemento (área bajo de la curva por elemento) y la concentración del mismo, y no considera la energía de todo el espectro para realizar la proporción. El considerar proporcionalidad en la comparación energía dispersada-concentración no siempre es válido, debido a que un elemento excitado que emite una intensidad elevada de energía alterará a los elementos cercanos que emiten una intensidad menor. Para eliminar estos inconvenientes y así obtener resultados más precisos es necesario trabajar con un equipo de Rayos X de tipo cuantitativo.

Tabla 18: Resultados de análisis semi-cuantitativo de Fluorescencia de Rayos X

Elemento	M1	M2	M3	M4	M5	Promedio	Desviación Estándar
Fe	79,73	74,23	77,12	77,73	81,08	77,98	2,62
Cu	1,59	1,15	3,40	4,43	1,61	2,44	1,41
Zn	2,10	2,18	1,29	1,08	1,47	1,62	0,49
Ca	0,58	0,54	0,82	0,59	0,66	0,64	0,11
Mo	0,64	2,65	1,25	0,25	0,64	1,08	0,94
Ti	0,91	0,46	0,63	0,14	0,50	0,53	0,28
Ar	0,50	3,11	0,68	1,17	0,44	1,18	1,11
K	0,21	0,62	0,21	0,12	0,19	0,27	0,20
Cr	0,06	-	0,08	0,15	0,18	0,12	0,06
As	0,20	0,45	0,54	0,35	0,15	0,34	0,17
Kr	0,24	0,54	0,25	0,38	0,08	0,30	0,17
Sr	-	-	0,16	0,20	0,07	0,14	0,07
Zr	-	0,49	0,09	0,22	0,06	0,21	0,19
Mn	0,08	-	0,25	0,15	0,03	0,13	0,09

Se puede observar en la Tabla 18 los resultados obtenidos del análisis semi-cuantitativo realizado a las 5 muestras de escoria. Del espectro elaborado se logró identificar 14 elementos con claridad, de los cuales destaca por sobre los demás el Fierro, Cobre, Zinc, Argón y Molibdeno. Se observan valores de desviación bajo el promedio para los 14 elementos analizados, por lo que si bien no se obtienen valores reales de concentración para estos, se puede asumir que las 5 muestras poseen una composición similar. Para la evaluación de toxicidad se trabaja con material extraído del punto M3. La elección de este punto de muestreo se debe a que posee los valores de concentración más cercanos al promedio para prácticamente todos los elementos detectados. Sumado a lo anterior, se determina que el punto M3 posee una ubicación favorable dentro del sector de botadero, por encontrarse en una zona central y de fácil acceso a vehículos.

5.3.4. Evaluación del Residuo según Decreto Supremo N°148

Según lo establecido en el artículo N° 10 del Decreto Supremo N°148, un residuo o una mezcla de residuos es peligrosa si presenta riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto. Para los efectos del reglamento, las características de peligrosidad corresponden a las siguientes:

- Toxicidad aguda, crónica y extrínseca.
- Inflamabilidad
- Reactividad

El reglamento dice que basta la presencia de una de estas características en un residuo para que éste sea calificado como peligroso. En la investigación se evalúa principalmente las características de peligrosidad referidas a la toxicidad extrínseca, inflamabilidad y reactividad.

- **Inflamabilidad**

Un residuo sólido tiene la característica de inflamable si es capaz de provocar fuego por fricción, por absorción de humedad o cambios químicos bajo condiciones estándares de presión y temperatura (1 atm y 25°C), y cuando se inflama lo hace en forma tan vigorosa y persistente que ocasiona una situación de peligro. También se caracteriza como inflamable cuando es una sustancia oxidante que genera oxígeno lo suficientemente rápido como para estimula la combustión de materia orgánica. Para evaluar esta condición se somete la escoria de cobre a fuego directo a través de un mechero (situación mayor a la normada), logrando establecer que el elemento no presenta características inflamables.

- **Reactividad**

Un residuo tiene la característica de reactividad si es normalmente inestable y sufre cambios violentos sin detonar, reacciona violentamente o forma mezclas explosivas con el contacto del agua. También se considera reactivo cuando es capaz de detonar, descomponerse explosivamente o reaccionar con facilidad bajo condiciones estándares de temperatura y presión.

La escoria de cobre no presenta problemas al estar sumergida por un día bajo agua destilada, por lo que se determina que el residuo no presenta características de reactividad.

- **Toxicidad extrínseca:**

Un residuo tiene la condición de toxicidad extrínseca cuando su eliminación pueda dar origen a una o más sustancias tóxicas agudas o tóxicas crónicas en concentraciones que pongan en riesgo la salud de la población. Cuando algún residuo posee concentraciones superiores a las establecidas en la normativa (señalada en la Tabla 59), se considera que posee la característica de toxicidad extrínseca.

La evaluación de esto se realiza mediante el Test de Toxicidad por Lixiviación, también llamado TCLP[5]. El objetivo del Test consiste en determinar la movilidad de especies tóxicas inorgánicas presentes en un desecho sólido, líquido o mezcla de estas fases. Este procedimiento es aplicable a muestras de residuos tales como residuos industriales, lodos provenientes de planta de tratamiento de agua servida, suelos contaminados, etc. que requieren ser evaluados para determinar si son peligrosos considerando elementos de origen inorgánico.

[5] Abreviación del método original *" Toxicity Characteristic Leaching Procedure"*

Para la evaluación de la escoria, se analizan 6 de los elementos estudiados anteriormente en la investigación realizada por la Superintendencia del Medio Ambiente el año 2013. En aquella oportunidad se evidenció un exceso de Arsénico, según la normativa Canadiense de suelos, por lo que se verifica el cumplimiento de las concentraciones observadas (C.O) en comparación con las concentraciones máximas permisibles (C.M.P). Sumado a esto se revisa el cumplimiento de la norma en las C.M.P para los elementos Plomo, Cadmio, Selenio, Antimonio y Níquel. Este estudio es realizado por LabQI, Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental de la Universidad Técnica Federico Santa María. El equipo de medición de metales correspondió a un equipo de absorción atómica, utilizando equipo con generación de hidruros y sin generador de hidruros dependiendo del metal a medir. La solución para lixiviar corresponde a una solución débilmente ácida de pH 4,2 según las condiciones de extracción descritas en la norma. El informe de análisis con el detalle de lo anteriormente mencionado se encuentra en el Anexo E.5.

Tabla 19: Resultados obtenidos por Test de Lixiviación según decreto 148

Sustancia	C.M.P [mg/l]	C.O [mg/l]	Estado
Arsénico	5	< 0,0013	Bajo norma
Plomo	5	< 0,1	Bajo norma
Cadmio	1	< 0,04	Bajo norma
Selenio	1	< 0,02	Bajo norma
Níquel	-	< 0,2	(*)
Antimonio	-	< 0,0013	(*)

Se puede observar en la Tabla 19 que todos los elementos se encuentran bajo los límites establecidos por la norma. En el caso particular del arsénico, la norma establece una concentración lixiviada máxima de 5 [mg/l], mientras que el TCLP arroja 0,0013 [mg/l] prácticamente un valor 4000 veces menor que lo especificado. Si bien este elemento fue detectado por estudios de la Superintendencia de Medio Ambiente, se puede concluir mediante la lixiviación que su presencia no establece un riesgo para la salud humana. Para el caso del antimonio y níquel no existen valores límite en el DS.148. Para la evaluación del Níquel se utiliza información proporcionada por el Decreto 90, "Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales".

Para la evaluación del Antimonio no se encontraron valores de referencia relacionados a residuos, por lo que se compara con información proporcionada por la Organización Mundial de la Salud [34], en la guía para la calidad del agua potable. Se fija internacionalmente un valor de referencia provisional correspondiente a un límite práctico de cuantificación, basándose en los datos toxicológicos disponibles. Es importante destacar que los valores entregados por esta norma poseen mayor exigencia, por tratarse de agua destinada para el consumo humano.

Tabla 20: Valores límite de referencia para Antimonio y Níquel según Decreto 90 y guía OMS

Sustancia	Valor de referencia [mg/l]	C.O [mg/l]
Níquel	0,1	< 0,2
Antimonio	0,005	< 0,0013

Se observa en la Tabla 20, que según la comparación de concentración de Níquel referida al DS-90 de residuos líquidos, este elemento se encuentra en una cantidad de 0,2 [mg/l], superior al valor de 0,1[mg/l] especificado. Para el caso del Antimonio, la comparación con documentación de la OMS indicó que la concentración de este elemento es inferior a la norma.

Aunque ambas comparaciones resultaron cercanas e incluso superiores al valor normado, es importante considerar que por ser normas relacionadas tanto al método de desecho de residuos líquidos como al consumo de agua potable, se considera elevada la exigencia de las fuentes utilizadas para elaborar la comparación.

6. CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE COBRE COMO ÁRIDO PARA T.S.S

En la Región de Valparaíso, el Río Aconcagua corresponde a la principal fuente de extracción de áridos destinados a capas de protección como tratamientos superficiales, presentándose en un 62 % de los proyectos controlados por el Laboratorio Regional de Vialidad de Viña del Mar entre los años 2014 y 2016 a la fecha.[6] Estos áridos generalmente provienen de plantas como Pétreos Concón, Tres Esquinas y Planta Maggi. El Estero La Patagua, ubicado en la comuna de La Ligua, se presenta como la segunda fuente principal de extracción de áridos de la región, observándose en un 22 % de los casos controlados, siendo Tricam la principal planta de extracción.

En esta sección se desarrollará una evaluación de las propiedades de la escoria de cobre, según los requisitos establecidos para los áridos destinados al uso en tratamientos superficiales, existentes en la sección 5.407.202 del Volumen 5 del Manual de Carreteras.

Debido a que en la actualidad la escoria de cobre no se ha especificado para el uso como agregado pétreo en tratamientos superficiales, y para tener una mejor apreciación del tema, es que esta evaluación se realizará de manera comparativa. Para lograr esto se trabajará con 2 agregados tradicionales de la zona, los que son obtenidos tanto del Río Aconcagua (Planta de áridos Córdova, sector Tres Esquinas, comuna de San Felipe), como del Estero La Patagua (Planta de áridos Tricam, comuna de La Ligua).

Se verificará que las muestras de áridos tradicionales cumplen con los requisitos establecidos para áridos utilizados en Tratamientos Superficiales, para después poder compararlos con los resultados obtenidos con escoria de cobre. Sumado a lo anterior, se profundizará en el estudio del fenómeno de la adherencia mediante ensayos existentes en el Manual de Carreteras no comúnmente empleados en Tratamientos Superficiales, así como con variaciones de ensayos propuestos por normas extranjeras.

[6] Información obtenida de los registros de ensayes realizados por el Laboratorio Regional de Vialidad.

6.1. Diagnóstico de la situación actual de la Región de Valparaíso

La información recopilada de dosificaciones de tratamientos superficiales simples utilizadas en las diferentes comunas de la Región de Valparaíso, permite determinar los valores promedio a nivel regional para gran parte de los términos que intervienen en ella, así como los valores máximos y mínimos para los factores que influyen en ella y así determinar si la escoria de cobre posee comportamiento físico similar al tradicional.

Para esto se realiza un levantamiento de información según dosificaciones registrada en el Laboratorio Regional de Valparaíso, obteniendo un total de 76 dosificaciones realizadas entre los años 2014 y 2016, siendo 58 de ellas elaboradas en base a áridos extraídos del Río Aconcagua y 18 de ellas en base a áridos del Estero La Patagua.

Se presenta a continuación, los valores promedio correspondientes a Densidad Real Seca y Neta, absorción, partículas chancadas, partículas lajeadas y el índice de lajas.

Tabla 21: Registro de Densidad Real Seca [kg/m3]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	2633,9	2679,0	2552,0	22,92
Estero La Patagua	18	2652,2	2663,0	2635,0	9,57

Tabla 22: Registro de Densidad Neta [kg/m3]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	2746,6	2794,0	2662,0	24,47
Estero La Patagua	18	2760,3	2793,0	2716,0	24,54

Tabla 23: Registro de Absorción [%]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	1,6	2,6	1,1	0,34
Estero La Patagua	18	1,5	1,8	1,0	0,25

Tabla 24: Registro de Partículas Chancadas [%]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	95,3	100,0	83,0	4,13
Estero La Patagua	18	97,9	100,0	89,0	2,55

Tabla 25: Registro de Partículas Lajeadas [%]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	1,7	7,0	0,0	1,74
Estero La Patagua	18	1,2	5,0	0,0	1,17

Tabla 26: Registro de Índice de Lajas [%]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	18,9	40,0	9,0	6,93
Estero La Patagua	18	17,6	22,0	13,0	2,64

Sumado a lo anterior se presentan los resultados obtenidos de dosis de agregado y de emulsión.

Tabla 27: Registro de dosificación de Agregado [kg/m^2]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	10,1	12,0	8,5	0,90
Estero La Patagua	18	10,8	11,4	9,9	0,47

Tabla 28: Registro de dosificación de Emulsión CRS-2 [l/m^2]]

Procedencia	N° Datos	Valor Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación Estándar
Río Aconcagua	58	1,04	1,55	0,86	0,12
Estero La Patagua	18	1,06	1,15	0,94	0,07

6.2. Granulometría y Bandas de trabajo

La granulometría se define como la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un agregado pétreo. Para determinar esto se requiere realizar el análisis mediante tamices definidos según la banda de trabajo a evaluar. Se registran los datos de la granulometría en función de los pesos retenidos, porcentajes retenidos, porcentajes acumulados retenidos y porcentajes acumulados que pasan por cada tamiz.

Las bandas tradicionalmente utilizadas para la primera y segunda aplicación son la TN 20-10 y TN 10-2,5 respectivamente. Las bandas TN 20-12,5 "a" y "b" se utilizan normalmente cuando se diseñan tratamientos superficiales de tamaño único. Para el caso del presente estudio se trabaja con la banda TN 10-2,5 utilizada en tratamientos superficiales simples.

Tabla 29: Granulometría para árido de Estero La Patagua

Nch [mm]	ASTM	Peso retenido [gr]	Retenido Acumulado [%]	Que pasa Acumulado [%]	Banda utilizada [TN 10-2,5]		ESTADO
12,5	1/2	0	0	100	100	100	Cumple
10	3/8	612	12	88	85	100	Cumple
6,3	1/4	2578	50	38			
5	# 4	908	18	20	10	30	Cumple
2,5	# 8	797	16	4	0	10	Cumple
0,08	# 200	220	4	0,02	0	0,5	Cumple

Tabla 30: Granulometría para árido del Río Aconcagua

Nch [mm]	ASTM	Peso retenido [gr]	Retenido Acumulado [%]	Que pasa Acumulado [%]	Banda utilizada [TN 10-2,5]		ESTADO
12,5	1/2			100	100	100	Cumple
10	3/8	0	0	100	85	100	Cumple
6,3	1/4	3253	65	35			
5	# 4	1163	23	12	10	30	Cumple
2,5	# 8	552	11	1	0	10	Cumple
0,08	# 200	25	0	0,26	0	0,5	Cumple

Para el caso de los áridos tradicionales, se observa según lo señalado en la Tabla 29 y Tabla 30, que los áridos seleccionados cumplen con los requisitos de tamaño y granulometría requerida, por lo que estarían en condiciones de ser aplicado en un tratamiento superficial como árido para tratamiento simple. Se puede observar que el árido proveniente del Estero La Patagua, posee una granulometría un poco más gruesa que el obtenido en el Río Aconcagua, registrando un 12 % del peso retenido en el tamiz 3/8. Si bien esto depende en gran manera del proceso de chancado realizado por la planta de extracción de áridos, se logra evidenciar en el Gráfico 6, que ambas granulometrías cumplen con los requisitos indicados en el 5.407.202 del Manual de Carreteras.

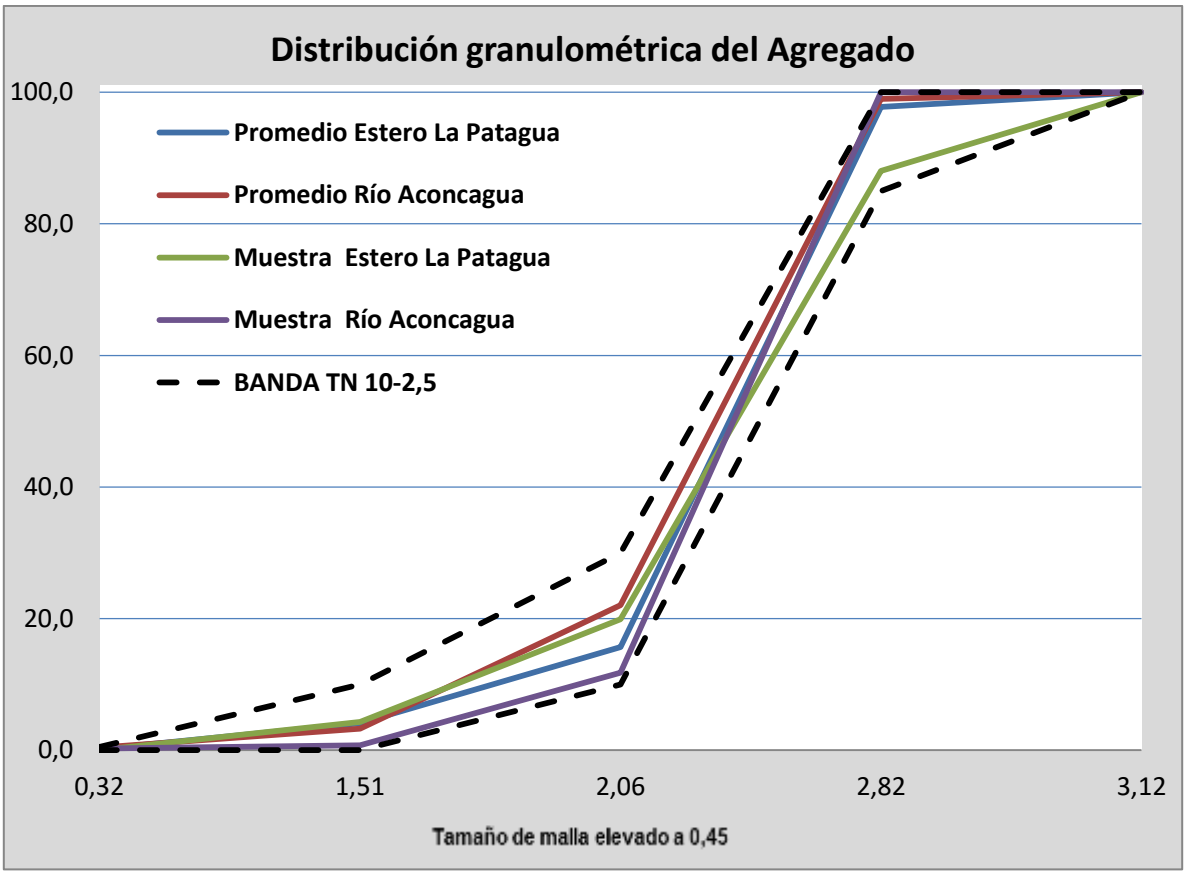


Gráfico 6: Distribución granulométrica del Agregado

Para el caso de la escoria de cobre, como se puede observar en la Ilustración 28, existe una clara presencia de diversos tamaños en la muestra.

Ilustración 28: Diferencias de tamaños en muestra extraída

Si bien se observa una alta presencia de material grueso como de material fino, no se pueden elaborar conclusiones al respecto debido a que el material presentado corresponde a uno muestreado en sólo una zona puntual del acopio de CODELCO Ventanas. En terreno se observa

diversos tamaños de material, por lo que realizar una granulometría no resultaría del todo representativo para este caso.

Ilustración 29: Escoria de cobre en patio de acopio de Ventanas.

Debido a que en la fórmula de diseño de la dimensión mínima promedio, los factores de dosificación relacionados con los áridos dependen en gran parte de la granulometría del agregado, es que en esta evaluación se eliminan los efectos producidos por posibles diferencias granulométricas. Para lograr esto, cada granulometría obtenida de los áridos tradicionales es replicada en escoria de cobre, logrando así una comparación más representativa respecto a las propiedades del árido.

6.3. Densidad Real, Neta y Absorción de agua en pétreos gruesos.

Se determina la densidad real, neta y el porcentaje de absorción para agregados pétreos gruesos, parámetros importantes para conocer las variaciones de pesos y humedad que pueden poseer los agregados. Se definen como agregados pétreos gruesos los agregados que quedan retenidos en el tamiz de 2,5 mm (ASTM N°8) para el caso de los asfaltos.

La densidad corresponde al cuociente entre la masa y el volumen del material, y corresponde a una propiedad física del agregado. Esta propiedad es considerada como real cuando considera el volumen macizo de las partículas, más el volumen de poros accesibles como inaccesibles. Se considera densidad real del pétreo seco, cuando considera al agregado en estado seco, mientras que se considera densidad real del pétreo saturado superficialmente seco, cuando se considera la masa del pétreo seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.

La densidad neta, por otro lado, es la densidad que considera el volumen macizo del material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles. Como generalmente las partículas de agregado poseen poros saturables como no saturables, conocer estos parámetros permitirá conocer mejor las propiedades de absorción del material estudiado.

La escoria de cobre posee valores muy altos de densidades y muy bajos de absorción. Se observa en la Tabla 31, que los valores de densidad real seca de la escoria de cobre están por sobre los 3800 [kg/m^3], mientras que los valores de densidad del árido tradicional están por sobre los 2600 [kg/m^3], esto equivale a un valor 1,4 veces más denso que el árido tradicional. Por otro lado la absorción del agregado tradicional bordea el 1,8 y 1,03%, mientras que la escoria posee valores por debajo el 0,3 %.

Tabla 31: Densidad Real, Neta y Absorción de agua en pétreos gruesos

		Primera Comparación			
		Estero La Patagua		**Escoria de cobre**	
Peso SSS	g	2184	2158	3521	3506
Peso Bajo Agua	g	1373	1358	2593	2584
Peso Seco	g	2144	2120	3513	3499
D.R.S	kg/m3	2643,6	2650,0	3785,6	3795,0
D.NETA	kg/m3	2780,8	2782,2	3818,5	3824,0
Absorción	%	1,87	1,79	0,23	0,20
D.R.S	**kg/m3**	**2646,8**		**3790,3**	
D.N	**kg/m3**	**2781,5**		**3821,3**	
ABSORCIÓN	**%**	**1,83**		**0,21**	

		Segunda Comparación			
		Río Aconcagua		**Escoria de cobre**	
Peso SSS	g	2413	2478	2502	2504
Peso Bajo Agua	g	1508	1547	1851	1852
Peso Seco	g	2388	2453	2496	2497
D.R.S	kg/m3	2638,7	2634,8	3834,1	3829,7
D.NETA	kg/m3	2713,6	2707,5	3869,8	3871,2
Absorción	%	1,05	1,02	0,24	0,28
D.R.S	**kg/m3**	**2636,7**		**3831,9**	
D.N	**kg/m3**	**2710,6**		**3870,5**	
ABSORCIÓN	**%**	**1,03**		**0,26**	

Los resultados obtenidos muestran que la escoria de cobre presenta muy buena respuesta para el uso como agregado.

Si bien la baja absorción podría permitir menores dosificaciones de emulsión asfáltica, el factor A de corrección por absorción del agregado, utilizado en el método de dosificación de la dimensión mínima promedio, considera que los áridos tradicionales ya poseen absorción baja, por lo que los considera con valor cero, salvo que corresponda a un agregado absorbente. Debido a que la escoria de cobre posee un valor menor, es recomendable que se utilice valor de corrección por absorción del agregado igual a cero.

6.4. Cubicidad de partículas

Mediante la cubicidad de partículas, se puede determinar el porcentaje de las partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de peso de un árido retenido en el tamiz de abertura 5 mm (tamiz # 4 ASTM).

Un árido que se define como chancado es aquel que tiene 2 o más caras fracturadas, generando al menos una arista. Los áridos chancados generan una mejor trabazón de agregados, lo que se traduce en un aumento en la capacidad de soporte de la estructura. No es común encontrar áridos chancados de manera natural en las canteras ubicadas en las riberas de los ríos, por lo que se hace necesario un proceso de chancado artificial. Otro de los beneficios que presentan los áridos chancados, que se ve bastante en los áridos para tratamientos superficiales, es un aumento considerable en la microtextura y por lo mismo un aumento considerable de fricción entre el pavimento y la rueda del vehículo. Sumado a lo anterior, una partícula que presente alta cubicidad presentará un mejor efecto de empotramiento con la base (se incrusta y traba mejor en ella), lo que implica una superficie con menos riesgo de desprendimiento de árido.

Los áridos rodados, corresponden a las partículas pétreas que no poseen aristas, por lo que no presentan una trabazón importante. Si bien los áridos rodados generan una menor capacidad estructural, el principal inconveniente que presentan es una disminución considerable de microtextura y de fricción, pudiendo ser considerados incluso en condiciones de humedad como áridos resbalosos.

Las partículas lajeadas en este ensayo son las que presentan una razón entre las dimensiones máximas y mínimas mayor a 5. En la práctica, el principal inconveniente que generan estas partículas es que tienden a quebrarse y a ser poco resistentes.

Tabla 32: Cubicidad de partículas

		Primera Comparación		**Segunda Comparación**	
		Estero La Patagua	**Escoria de cobre**	**Río Aconcagua**	**Escoria de cobre**
Peso muestra total	**g**	300	436,8	579,8	440
Peso material chancado	**g**	282,7	428,8	517,9	432,7
Peso material rodado	**g**	7,8	0	39,8	0
Peso laja chancada	**g**	9,6	8	22,1	7,3
Peso laja rodada	**g**	0	0	0	0
Chancado total	**%**	**97,4**	**100,0**	**93**	**100**
Rodado	**%**	**2,6**	**0**	**7**	**0**
Lajas	**%**	**3,2**	**1,8**	**4**	**1,7**

Como se puede observar en la Tabla 32, si bien el agregado tradicional proporcionado por Tricam posee un porcentaje de material chancado muy elevado, la escoria de cobre presenta un porcentaje óptimo al no presentar ninguna partícula rodada.

En la evaluación de cubicidad de partículas la escoria de cobre está muy por encima de los agregados tradicionales, presentándose principalmente como una muy buena solución para los casos en que se quiera aumentar la seguridad de un pavimento aumentando la fricción existente.

6.5. Densidad aparente suelta

La densidad aparente suelta, corresponde a un parámetro especialmente utilizado en labores en terreno, el cual permite cubicar las cantidades de áridos para transporte de camiones o acopio. En particular, este valor permitirá la obtención del parámetro de porcentaje de huecos, el que será necesario para el método de dosificación de la dimensión mínima promedio.

Tabla 33: Densidad aparente para granulometría del Río Aconcagua

		Río Aconcagua	Escoria de cobre
Volumen medida	**lt**	3001	3001
Masa medida (con recipiente)	**g**	3535	3535
Masa material + masa medida 1	**g**	8066	9930
Masa material + masa medida 2	**g**	8067	9922
Masa promedio	**g**	8067	9926
Masa muestra suelta	**g**	4532	6391
Densidad aparente suelta	**kg/m3**	**1510**	**2129**

Tabla 34: Densidad aparente para granulometría de Estero La Patagua

		Estero La Patagua	Escoria de cobre
Volumen medida	**lt**	3001	3001
Masa medida (con recipiente)	**g**	3535	3535
Masa material + masa medida 1	**g**	7802	9814
Masa material + masa medida 2	**g**	7790	9830
Masa promedio	**g**	7796	9822
Masa muestra suelta	**g**	4261	6287
Densidad aparente suelta	**kg/m3**	**1420**	**2095**

Como se puede observar en la Tabla 33 y en la Tabla 34, los valores de densidad aparente suelta obtenidos con la escoria de cobre resultan superiores para ambos casos, llegando a valores 1,45 veces superiores.

Se observa que existen valores mayores de densidad aparente suelta para las muestras analizadas en el Río Aconcagua. Esto se debe principalmente a que al poseer una granulometría menor, permite un mejor acomodo de las partículas en el molde a la hora de realizar el ensaye y por ende se observan pesos mayores.

6.6. Índice de Lajas (NLT-354/91)

El índice de Lajas corresponde al porcentaje en peso de partículas que tienen un espesor inferior a 0,6 veces la dimensión media de la fracción de agregado considerada. Es un índice empleado principalmente en agregados para tratamientos superficiales y es aplicable a áridos de tamaño máximo absoluto igual o superior a 6,3 [mm]. El valor obtenido es parte de la fórmula para la dosificación según el método de la dimensión mínima promedio. Se presenta en la Tabla 35 los resultados obtenidos para los 3 tipos de materiales analizados.

Tabla 35: Índice de lajas en muestras analizadas

Río Aconcagua				
Ab pie de metro	**Masa retenida**	**M que pasa**	**M total**	**IL fracción**
mm	**g**	**g**	**g**	**%**
4,89	97,7	29,9	128	23,4
3,39	58,1	13,2	71,3	18,5
Índice de Lajas Río Aconcagua			**22**	
Estero La Patagua				
Ab pie de metro	**M retenida**	**M que pasa**	**M total**	**IL fracción**
mm	**g**	**g**	**g**	**%**
6,75	255	31	286	10,8
4,89	100	26	126	20,6
3,39	47	12	59	20,3
Índice de Lajas Estero La Patagua			**19**	
Escoria de Cobre				
Ab pie de metro	**M retenida**	**M que pasa**	**M total**	**IL fracción**
mm	**g**	**g**	**g**	**%**
6,75	236,2	16,6	253	6,6
4,89	101,4	20,1	122	16,5
3,39	56,8	5,7	62,5	9,1
Índice de Lajas Escoria de Cobre			**13**	

Se puede observar que la escoria de cobre contiene un Índice de Lajas menor que los áridos tradicionales, por lo que se podría asumir que este árido presentará una rotura menor que los demás, mostrando variaciones menos considerable en su granulometría luego de la acción de cargas pesadas. Otro beneficio que otorga el contar con un valor menor de Índice de Lajas, es que resultan dosificaciones menores tanto de árido como de ligante, ya que un menor contenido de material lajeado disminuye el valor de la Dimensión Mínima Promedio del agregado.

6.7. Adherencia Árido-Ligante

La evaluación de la adherencia entre el árido y el ligante es parte fundamental en el estudio de las propiedades de la escoria de cobre. El Manual de Carreteras establece como requisitos para los áridos en tratamientos superficiales, la existencia de un mínimo de adherencia de un 95 %, evaluado según el ensaye de Adherencia por el Método Estático (M.C 8.302.29). En este caso, se evalúan los 2 áridos de la zona junto a la escoria de cobre, y se propone la realización de evaluación de adherencia por 3 métodos no establecidos para este tipo de tratamiento superficial, con el fin de revisar más a fondo esta propiedad fundamental. El asfalto utilizado en todos los ensayes corresponde a una emulsión catiónica CRS-2 (Especificaciones de la misma se encuentran en el Anexo D)

6.7.1. Adherencia por el Método Estático (MC 8.302.29)

El método realizado describe la adherencia para el caso del árido sumergido en agua destilada, evaluando de manera visual el porcentaje de ligante desprendido 16 horas después de su inmersión.

Ilustración 30: Adherencia por método estático

Para la correcta revisión del ensaye, se analizan 2 muestras por cada procedencia del árido. Se observa en la Tabla 36, que para todas las muestras analizadas hay una adherencia mayor al 95 %, por lo que se puede concluir que la escoria presentaría propiedades similares de adherencia que los áridos tradicionales.

Tabla 36: Adherencia por Método Estático

N° de Muestra	Procedencia	Evaluación
1	Estero La Patagua	Mayor a 95 %
2	Estero La Patagua	Mayor a 95 %
3	Río Aconcagua	Mayor a 95 %
4	Río Aconcagua	Mayor a 95 %
5	Escoria de cobre	Mayor a 95 %
6	Escoria de cobre	Mayor a 95 %

Se obtienen buenos resultados de adherencia tanto para la escoria de cobre como para los agregados tradicionales, debido a que todas las muestras superaron el 95 % de adherencia, cumpliendo con el requisito de adherencia establecido por el Manual de Carreteras. Para estudiar más a fondo esta propiedad se trabaja a continuación con más ensayos no definidos como requisitos para tratamientos superficiales, pero en los que se espera poder evidenciar con mayor claridad diferencias en este fenómeno que permitan catalogar de mejor forma a este residuo. Se observa en el Anexo B.1 evidencia fotográfica de los resultados obtenidos.

6.7.2. Adherencia por el Método Dinámico (MC 8.302.31)

El ensaye de adherencia por el método dinámico es utilizado para apreciar capacidad adhesiva del ligante asfáltico en los agregados minerales. Este ensaye se aplica a los fragmentos de agregado que pasan el tamiz de 10 [mm] y quedan retenidos en el tamiz 2,5 [mm]. En este ensaye, a diferencia del método estático, la muestra mezclada y ya curada es sometida a agitación por un tiempo de 15 minutos. Si bien este ensaye no está especificado en los requisitos de los tratamientos superficiales, al ser aplicado en fragmentos pétreos que pasan por el tamiz de 10 [mm] y quedan retenidos en el tamiz de 2,5 [mm], permitirá obtener una buena apreciación de adherencia por ser tamaños comúnmente utilizados en los tratamientos, especialmente en el caso de los tratamientos superficiales simples o dobles que trabajen en base a la banda TM 10-2,5.

El método, en comparación al método estático, entrega la posibilidad de definir el grado de adherencia como buena (más del 95 % del área está cubierta), regular (entre el 95% y +75% del área está cubierta) y mala (75% o menos del área está cubierta). De todos modos ambos tienen en común que dependen en gran parte de la experiencia que posea el encargado de realizar el ensaye.

Para este ensaye se utilizan 2 muestras por cada procedencia, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 37: Adherencia por Método Dinámico

N° de Muestra	Procedencia	Evaluación
1	Estero La Patagua	Mayor a 95 %
2	Estero La Patagua	Mayor a 95 %
3	Río Aconcagua	Mayor a 95 %
4	Río Aconcagua	Mayor a 95 %
5	Escoria de cobre	Mayor a 95 %
6	Escoria de cobre	Mayor a 95 %

Los resultados obtenidos, indican buena adherencia para los 3 agregados analizados, al registrar para todos los casos una adherencia mayor al 95%, tal como lo indica la Tabla 37. Se observa una ligera pérdida de ligante en los bordes de en algunos áridos de las 6 muestras analizadas, pero en cantidades bastante reducidas como para influir negativamente en el resultado.

Debido a que hasta el momento la escoria de cobre no presenta diferencia en el desempeño ante condiciones de adherencia en comparación a los áridos tradicionales, es que se someterán estos mismos a una condición de ensaye de adherencia más exigente. Se observa en el Anexo B.2 evidencia fotográfica de los resultados obtenidos.

6.7.3. Adherencia mediante el Método del Hervido (MC 8.302.31)

El método del hervido describe el procedimiento para determinar la adherencia del agregado con el ligante para las mezclas asfálticas en frío, predosificadas para bacheo. El método evalúa visualmente el desprendimiento del ligante luego de su hervido en agua destilada. El procedimiento es válido para la evaluación de la efectividad de aditivos mejoradores de adherencia incorporados a mezclas susceptibles a la acción de agua.

Ilustración 31: Proceso de ensaye por Método del Hervido

Para el caso de las mezclas en frío, se evalúa la adherencia en comparación a una muestra patrón, la cual corresponde a una muestra que se somete a inmersión en agua destilada solo a temperatura ambiente y se retira al mismo instante que la muestra hervida.

Como los tratamientos superficiales no corresponden a mezclas asfálticas, se utiliza la metodología existente en este método de medición de adherencia, pero considerando muestras similares a las elaboradas en el método estático, por lo que se mezcla el árido con el ligante de manera manual. Si bien esto no corresponde a lo establecido por la especificación del Manual de Carreteras, se considera un método válido para realizar una evaluación comparativa.

Tabla 38: Adherencia por Método del Hervido

N° de Muestra	Procedencia	Evaluación
1	Estero La Patagua	Muestra Patrón
2	Estero La Patagua	85 %
3	Río Aconcagua	Muestra Patrón
4	Río Aconcagua	90 %
5	Escoria de cobre	Muestra Patrón
6	Escoria de cobre	95 %

Luego de realizar los ensayes, si bien se considera que los 3 áridos obtienen buenos resultados, se puede observar que existe una menor pérdida de ligante al utilizar escoria de cobre, registrando una adherencia superior a los áridos tradicionales. Como se puede observar en la Tabla 38, la escoria de cobre obtiene una adherencia mayor al 95 %, superior al Río Aconcagua y al Estero La Patagua, el cual obtiene el peor resultado. En la evaluación, no sólo se logra ver una menor pérdida de ligante en la superficie del árido, sino que también se evidencia menor cantidad de asfalto flotando libre en el vaso de vidrio luego del hervido. Se observa en el Anexo B.3 evidencia fotográfica de los resultados obtenidos.

6.8. Ensaye de adherencia para emulsiones mediante Placa Vialit

Este método evalúa la adhesividad, así como la resistencia al desprendimiento existente entre los áridos y el residuo asfáltico mediante la placa Vialit. El procedimiento, descrito en el Volumen 8 del Manual de carreteras (8.302.19) es aplicado principalmente a los materiales empleados en tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla y utilización de emulsiones poliméricas.

El ensayo consiste en incrustar cien gravillas calibradas sobre una película de ligante extendida en una placa metálica. Una vez curado el ligante se coloca la placa invertida sobre tres apoyos horizontales y se la somete al impacto producido por la caída de una bola de acero, valorando el estado de las gravillas desprendida y de las que han permanecido adheridas a la placa metálica.

Ilustración 32: Dispositivo de ensaye Placa Vialit

El método especifica el uso de una muestra representativa de áridos, los cuales tendrán que ser secados en horno y ser utilizados en el mismo estado de limpieza que tengan en la obra (Los tratamientos superficiales admiten un máximo de 0,5% de material bajo el tamiz #200, lo cual se cumple en las muestras utilizadas).

Se trabaja con material que pasa la malla 3/8 y queda retenido en la malla 1/4, por corresponder al material representativo de las muestras según la granulometría.

El ensayo, según las especificaciones establecidas en el Manual de Carreteras, está propuesto para áridos en vía seca, áridos en vía húmeda y para áridos en condición sumergida. Sin embargo, se amplía el área de investigación al someter a los áridos a variaciones de temperatura, así como a evaluación en condición de árido sucio.

La cantidad de ligante a utilizar en el ensaye está en función del tamaño de la gravilla utilizada. En este caso se utiliza una dosis de 1,0 [kg/m2] para una superficie de placa de 200 x 200 [mm], lo que corresponde a una cantidad total de 40 gramos de emulsión por placa utilizada. Es muy importante no sólo respetar la cantidad de dosis, sino que lograr una distribución uniforme en la superficie de la placa.

Para asegurar un quiebre de la emulsión adecuado, una vez colocados los áridos se espera un total de 16 horas para realizar el ensaye, con el objetivo de asegurar el tiempo de curado. Este curado se realiza a temperatura ambiente.

Al momento de realizar el ensayo es importante ubicar cuidadosamente la placa invertida en los apoyos, evitando que las puntas de acero queden presionando tanto axial como tangencialmente a los áridos. Si no se cumple lo anterior, el árido podrá ser expulsado no por el efecto del golpe trasferido de la bola a la placa, sino que por el movimiento y acción de los apoyos de acero, influyendo así en los resultados obtenidos. La bola de acero se deja caer 3 veces desde la altura establecida. Terminado el ensaye, se recogen las gravillas desprendidas tanto por el impacto de la bola en la placa, como las que se pueden extraer fácilmente con la mano. El conjunto de gravillas así recogidas se clasifican en 2 grupos:

- a: Número de gravillas no manchadas por el ligante.
- b: Número de gravillas manchadas por el ligante.

Se define la adhesividad mediante la placa Vialit como:

$$\boldsymbol{A\,Vialit = 100 - a}$$

Para aumentar la comparación entre áridos, se evaluarán también las partículas liberadas de manera sucia, definiendo la adherencia manchada como:

$$\boldsymbol{A\,Man = 100 - b}$$

El resultado expresado en ambos casos corresponde al valor medio de tres placas ensayadas en la misma condición.

Debido a que las especificaciones no establecen una evaluación final, se utilizarán los criterios de evaluación utilizados por el método dinámico. En este caso se define el grado de adherencia como buena (más del 95 %), regular (entre el 95% y +75%) y mala (75% o menos) para los resultados obtenidos de adhesividad mediante la Placa Vialit.

Ilustración 33: Placa Vialit para ensaye

6.8.1. Ensaye en condición seca

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para el ensayo de Placa Vialit con áridos en condición inicial seca.

Tabla 39: Ensaye de Placa Vialit para condición seca

Árido	a1	b1	a2	b2	a3	b3	Prom a	Prom b	Desv a	A VIALIT	A MAN
Escoria de cobre	0	2	0	1	0	1	0,0	1,3	0,0	100,0	98,7
Río Aconcagua	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Estero la Patagua	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0

Como se observa en la Tabla 39, todas las muestras analizadas presentan una buena adhesividad Vialit, no registrando pérdida de árido en condición limpia.

Para la condición de partículas manchadas con asfalto, los áridos tradicionales volvieron a presentar un desempeño ideal, no registrando pérdida de partículas, mientras que en la escoria de cobre se observó una leve pérdida de árido en condición manchada.

6.8.2. Ensaye en condición de árido húmedo

Los áridos utilizados en tratamientos superficiales deben poseer humedad previa a su colocación, por lo que este método representa esa situación.

Para este caso, el procedimiento empleado es el mismo que para la condición seca, con la diferencia que el árido se mantiene por 24 horas bajo agua para que al momento de acomodarlo en la placa, se presente en condición saturada. Se presentan los resultados obtenidos a continuación:

Tabla 40: Ensaye de Placa Vialit para condición húmeda

Árido	a1	b1	a2	b2	a3	b3	Prom a	Prom b	Desv a	A VIALIT	A MAN
Estero la Patagua	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Rio Aconcagua	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Escoria de cobre	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0

Se observa en la Tabla 40, que el desempeño para las muestras tradicionales es similar al obtenido en el ensaye de condición seca, mientras que para el caso de la escoria de cobre la adherencia subió levemente, registrando un 100% de partículas adheridas. Este ensayo permite observar que la práctica de entregar humedad al árido, previo a su colocación, es recomendable también en el caso del uso de escoria de cobre.

6.8.3. Ensaye en condición de placa sumergida

Esta variación establecida por el Manual de Carreteras permite estudiar los efectos del agua en la adherencia entre árido y ligante utilizando una condición de inmersión que simula los efectos de una lluvia de larga duración sobre la carpeta de rodadura. Para lograr, esto se realiza el mismo procedimiento que el aplicado en el ensaye para la condición seca, sólo que una vez curado el ligante el tiempo definido, se sumerge la placa a temperatura ambiente por 24 horas continuas.

Una vez terminada esta condición de inmersión se procede a ensayar de manera tradicional.

Tabla 41 : Ensaye de Placa Vialit para condición de placa sumergida

Árido	a1	b1	a2	b2	a3	b3	Prom a	Prom b	Desv a	A VIALIT	A MAN
Estero la Patagua	1	2	0	0	1	0	0,7	0,7	0,6	99,3	99,3
Escoria de cobre	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Rio Aconcagua	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0

Se observa en la Tabla 41, que todas las muestras ensayadas registraron una buena adherencia para la condición de placa sumergida.

6.8.4. Ensaye en condición de árido sucio

Como se comentó en capítulos anteriores, los áridos utilizados en tratamientos superficiales tienen como requerimiento no presentar un porcentaje de suciedad superior al 0,5% del peso, debido a que la presencia de condición de suciedad en el árido afectará directamente a la adherencia con el ligante.

Para revisar los efectos de trabajar con un árido considerado sucio, se realiza el ensaye de Placa Vialit utilizando áridos mezclados con un 5% de material bajo la malla 200. Para esto se seleccionaron 100 partículas, a las cuales se adicionó un 5% en peso de material considerado como fino, para posteriormente mezclarlos. Es importante aclarar que se agrega una cantidad correspondiente a 10 veces el valor establecido como máximo, con el objetivo de asegurar que gran parte de la superficie de cada partícula presente fino en alguna de sus caras. Este procedimiento se repitió 3 veces para cada muestra analizada, registrando los siguientes resultados.

Tabla 42: Ensaye de Placa Vialit para condición sucia

Árido	a1	b1	a2	b2	a3	b3	Prom a	Prom b	Desv a	A VIALIT	A MAN
Escoria de cobre	0	1	0	0	1	0	0,3	0,3	0,6	99,7	99,7
Estero la Patagua	1	0	0	0	0	1	0,3	0,3	0,6	99,7	99,7
Rio Aconcagua	1	0	1	1	0	1	0,7	0,7	0,6	99,3	99,3

Se observa en la Tabla 42, que ninguna de las muestras presentó problemas con la incorporación de material fino, obteniendo tanto para la escoria como para los áridos tradicionales resultados de adherencia Vialit superiores al 95%. Con esto se comprueba que la escoria de cobre se comporta de un modo similar al que se comporta el árido tradicional ante la presencia de material fino, por lo que se puede regir por la misma exigencia de suciedad del 0,5% del peso.

6.8.5. Ensaye con muestra sometida a variaciones de Temperatura

Posterior al tradicional ensaye en condición seca, se sometió la placa a ensayes a 2 temperaturas decrecientes, registrando la pérdida de adherencia acumulada. Esta evaluación se ha desarrollado en investigaciones de tratamientos superficiales internacionales [18], permitiendo evaluar tanto para distintos áridos como para distintos tipos de emulsiones, los efectos producidos por una disminución de temperatura.

Para este caso, se realizó el ensaye a temperatura ambiente (19°C), a una temperatura baja (6°C), y a una temperatura que represente condición bajo los cero grados (-3°C). Según lo observado en reportes meteorológicos de la Dirección General de Aguas, estas temperaturas son observadas en la cuenca del Río Aconcagua (Extraído de Temperaturas diarias extremas).

Los resultados obtenidos se presentan de una manera más clara en la Tabla 43, así como en el Gráfico 7.

Tabla 43: Adherencia Vialit v/s Temperatura

Árido	T°	a1	b1	a2	b2	a3	b3	Prom a	Prom b	Desv a	A VIALIT	A MAN
Escoria de cobre	19°	0	2	0	1	0	1	0,0	1,3	0,0	100,0	98,7
Escoria de cobre	6°	6	26	4	7	9	27	6,3	20,0	2,5	93,7	78,7
Escoria de cobre	-3°	9	40	18	42	12	49	13,0	43,7	4,6	80,7	35,0
Río Aconcagua	19°	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Río Aconcagua	6°	4	32	2	21	6	43	4,0	32,0	2,0	96,0	68,0
Río Aconcagua	-3°	1	60	1	73	4	47	2,0	60,0	1,7	94,0	8,0
Estero la Patagua	19°	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Estero la Patagua	6°	11	34	4	62	7	39	7,3	45,0	3,5	92,7	55,0
Estero la Patagua	-3°	1	54	0	32	3	51	1,3	45,7	1,5	91,3	9,3

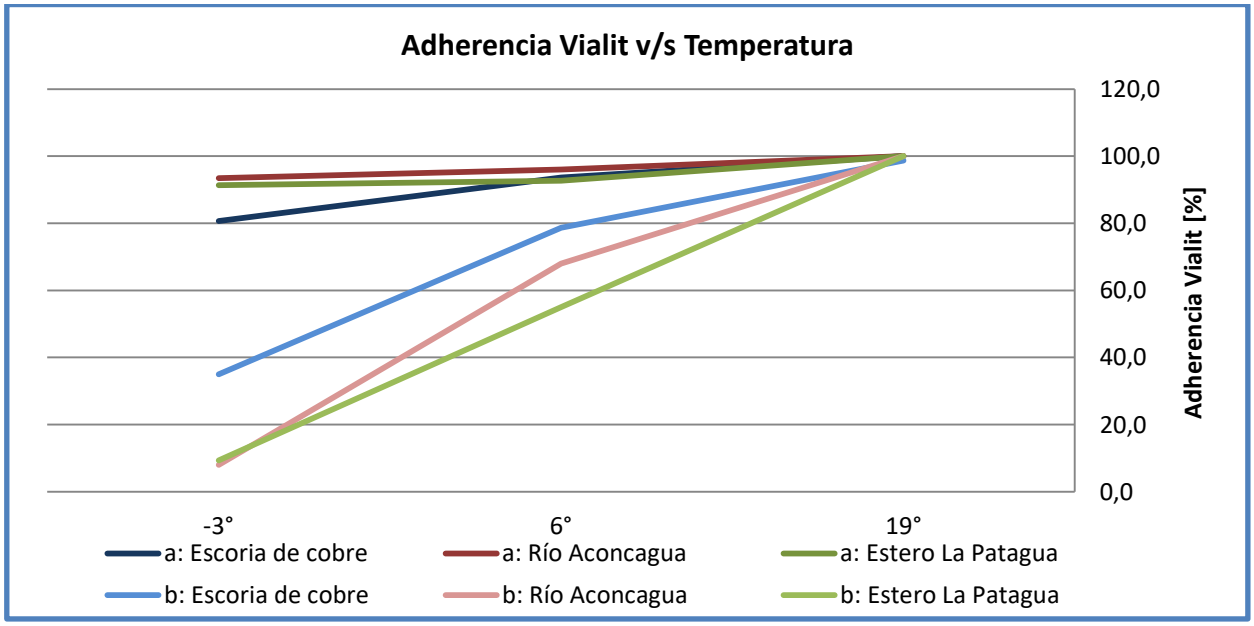


Gráfico 7: Adherencia Vialit v/s Temperatura

Los resultados obtenidos indican que si bien la escoria de cobre a bajas temperaturas presenta una peor adhesividad Vialit (a), presenta una menor cantidad de partículas perdidas en condición manchada (b).

En la zona superior se observan los resultados obtenidos para la condición limpia. Se puede observar que a medida que desciende la temperatura los áridos tradicionales registran una mejor adherencia que la escoria de cobre, registrando una menor cantidad de desprendimiento de partículas limpias. Esto indicaría que si bien en todos los casos estudiados a bajas temperaturas, la adherencia entre árido y ligante es baja, es mejor en áridos tradicionales.

Por el contrario, en la zona inferior, se puede observar que a medida que disminuye la temperatura, es mayor la cantidad de material manchado perdido en los áridos tradicionales. Se asume que la razón de esta diferencia es principalmente por la alta cubicidad existente en la escoria de cobre, lo que generaría una mejor trabazón con el ligante, ya rígido a esta temperatura.

6.9. Desintegración con sulfato de sodio

El método consiste en acondicionar cada muestra de áridos a ensayar y someterlas a ciclos sucesivos de inmersión en una solución de sulfato de sodio o magnesio secada en horno, de manera de emular los cambios drásticos de temperatura (hielo y deshielo) de los áridos utilizados en la confección de mezclas asfálticas. La desintegración es calculada como la pérdida de masa debido a los fenómenos físico-químicos resultantes de la cristalización del sulfato.

Para el caso de los tratamientos superficiales, se establece un máximo de 12% de desintegración

Tabla 44: Desintegración según granulometría del Estero La Patagua

Fracción	Procedencia	Desintegración
4	Estero La Patagua	0,20 %
4	Escoria de cobre	0,02 %

Tabla 45: Desintegración según granulometría del Río Aconcagua

Fracción	Procedencia	Desintegración
4	Río Aconcagua	0,22 %
4	Escoria de cobre	0,03 %

Los resultados obtenidos en la Tabla 44 y Tabla 45 muestran que la escoria de cobre presenta muy poca pérdida de masa al ser sometida a ciclos sucesivos de inmersión en solución de sulfatos. Estos valores no sólo se encuentran muy por debajo del establecido en los requisitos de desintegración para áridos de tratamientos superficiales, en donde se señala una desintegración máxima por sulfatos de un 12%, sino que se encuentran muy por debajo de los obtenidos para los áridos tradicionales integrados en este estudio, registrando valores 10 veces menores a los mismos.

Se puede concluir con esto, que ante cambios drásticos de temperatura como lo son las épocas de hielo y deshielo, la escoria de cobre presenta un mejor desempeño que los áridos tradicionales. Si bien esta situación climática no es muy común en la mayor parte de la Región de Valparaíso, abre la posibilidad de utilizar este material como árido en zonas elevadas de la provincia de Los Andes, donde si es común la presencia de bajas temperaturas.

6.10. Desgaste

En los agregados, una de las propiedades físicas de mayor importancia es la resistencia a la abrasión o desgaste. Si bien en nuestro país los áridos presentan una buena tenacidad, es importante conocer la durabilidad y la resistencia que aportará el árido al elemento diseñado. A continuación se evaluará en la escoria de cobre esta propiedad, mediante el ensaye desgaste de Los Ángeles y el índice de trituración.

6.10.1. Desgaste de Los Ángeles

El método de Desgaste de Los Ángeles consiste en colocar una cantidad específica de agregado dentro de un tambor cilíndrico de acero, junto con una cantidad de esferas abrasivas de masa definida, para posteriormente aplicar un número determinado de revoluciones por minuto. El choque entre el agregado y las bolas dan por resultado la abrasión. Es importante considerar que el ensaye está definido para agregados que posean densidad neta entre 2000 y 3000 kg/m^3, condición que en la escoria de cobre, al presentar densidad neta superior a 3700 kg/m^3 no se cumple. Se procederá a realizar la evaluación comparativa utilizando este método de ensaye, según lo establecido en las especificaciones del Manual de Carreteras, para luego realizar una comparación con otro método de ensaye que mida desgaste y elimine el efecto causado por esta diferencia de densidad.

Los requisitos establecidos por la norma especifican un máximo de 25% de desgaste, pudiendo llegar incluso hasta un 35% de desgaste, en el caso de ser indicado en especificaciones del proyecto. Según ambas granulometrías analizadas (Río Aconcagua y Estero La Patagua), el grado de ensaye que mejor representa las muestras corresponde al grado 6. Este grado se obtiene sumando los porcentajes parciales retenidos en los tamices correspondientes a cada uno de los grados, escogiendo el que entregue una mayor sumatoria.

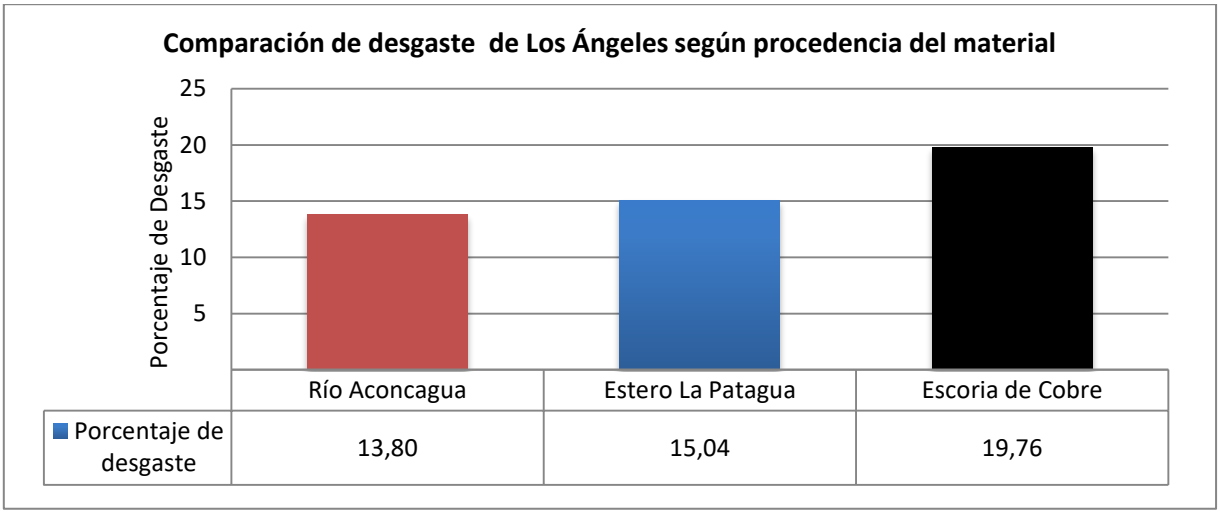


Gráfico 8: Comparación de Desgaste de Los Ángeles según procedencia del material

Se observa en el Gráfico 8 que la escoria de cobre posee porcentaje de degaste superior a los áridos tradicionales, registrando un 20 % de desgaste. Este valor se encuentra por debajo del 25% de desgaste máximo que exige la normativa, por lo que no debiese presentar una mala respuesta ante acciones abrasivas.

Aunque en el ensaye de Los Ángeles gran parte del desgaste se genera por la colisión de las partículas ensayadas con las bolas de acero calibradas, otra parte del desgaste es generado tanto por el impacto entre partículas del mismo árido y con el tambor de acero que lo contiene. En estos

últimos 2 casos, el factor de densidad juega un rol importante, ya que materiales con mayor densidad pesarán más, lo que significará una mayor fuerza de impacto, por lo que no es de extrañar que la escoria presente un valor mayor de desgaste de Los Ángeles que el árido tradicional. El detalle de la elección de los grados, así como el cálculo del porcentaje de desgaste se encuentra en la sección Anexo B.5.

Si bien resultados muy elevados de desgaste obtenidos mediante este ensayo podrían reflejar un árido que no responderá de buena manera ante abrasión, valores muy bajos de desgaste podrían evidenciar la presencia de un árido demasiado duro, lo que a la larga produciría problemas en el proceso de chancado de material.

La escoria de cobre, como ya se observó, es un material que posee 100% de partículas chancadas. Esto se debe principalmente a que equipos mecánicos trituran el material hasta conseguir partículas que permitan ser acopiadas. Estas partículas poseen dimensiones inutilizables de manera directa, por lo que el material tiene que ser chancado mediante equipos apropiados.

Para estudiar más a fondo este problema, se verifica el desgaste para todo material que presente en su granulometría tamaños de partículas inferiores a 20 [mm]. Por tanto, se realiza el ensayo de desgaste de los ángeles en la escoria de cobre, pero ahora considerando los grados de ensaye 4, 5, 6 y 7. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

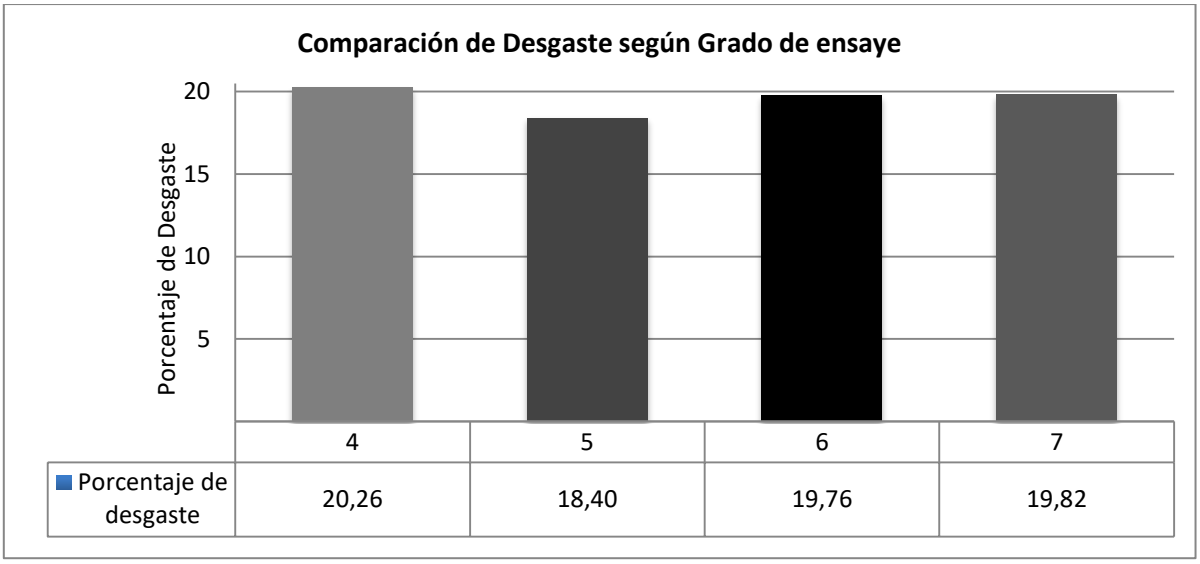


Gráfico 9: Comparación de Desgaste según Grado de ensaye

Se puede observar en el Gráfico 9, que la escoria de cobre presenta desgaste entre el 18 y 20 % para las condiciones ensayadas, valores siempre por debajo de los límites establecidos y superiores a los registrados en los áridos tradicionales.

Los resultados de desgaste mediante la máquina de Los Ángeles son utilizados por algunas empresas proveedoras de equipos y piezas chancadoras. Entre los mecanismos principales de desgaste involucrados en el proceso de reducción de tamaños de los áridos se encuentra el desaste por abrasión y el desgaste por fatiga.

Al momento de evaluar que factores afectan al desgaste de las piezas de un equipo chancador, destaca la triturabilidad y abrasividad del material a chancar. La triturabilidad de las rocas indica la facilidad de romperse, en donde un valor de triturabilidad alto indica que el árido posee mayor facilidad de ser triturado. Uno de los índices utilizados por el proveedor de equipos y

piezas de chancado METSO[7], el cual clasifica el grado de triturabilidad según el resultado obtenido del ensaye de desgaste de Los Ángeles.

Tabla 46: Clasificación de triturabilidad según ensaye Los Ángeles

Clasificación	Los Ángeles	Árido
Muy fácil	27 -	
Fácil	22 – 27	
Medio	17 – 22	Escoria de cobre
Difícil	12 – 17	Árido tradicional
Muy difícil	- 12	

Según la clasificación de triturabilidad según el ensaye de Los ángeles, presentada en la Tabla 46, se podría concluir inicialmente que la escoria de cobre debiese resultar más facil de triturar por un equipo chancador que el árido tradicional. Esta conclusión no es definitiva, debido a que la escoria posee una densidad considerablemente mayor al árido tradicional, no estando en el rango permitido según las especificaciones del ensaye de Los Ángeles contenidas en el Manual de Carreteras. La escoria de cobre podría presentar valores de desgaste superiores debido a que este material posee mayor peso, lo que significaría una mayor energía de impacto y con esto un mayor desgaste. Para reducir el efecto de la densidad del material, se compararán los resultados obtenidos con un método de ensaye que no involucre la gravedad del material y en el cual el impacto sea producto de un equipo externo.

6.10.2. Índice de Trituración

El método del Índice de trituración, pretende medir la resistencia a la desintegración física de los áridos gruesos y finos de acuerdo a los cortes granulométricos y métodos establecidos. Para áridos gruesos (40–10 mm), el procedimiento de trituración se realiza mediante compresión mediante carga gradual al árido confinado, mientras que para el caso de los áridos finos (10–0,630 mm), el método consiste en la determinar el valor de trituración al árido sometido a impactos repetidos. Este método de ensaye se utiliza tanto como complemento del ensaye de Desgaste de Los Ángeles o para sustituirlo cuando no se disponga de éste. Se presenta en la Tabla 47 valores de índice de trituración especificados según el tipo de uso del árido.

Tabla 47: Especificaciones de índice de trituración según tipo de uso

Uso	Exigencia [%]	Fuente
Lechada asfáltica	Max 3,5	M-C 5.406.201.A
Arena para pavimentos de hormigón	Max 4	M-C 5.410.201(2)
Áridos gruesos para pavimentos de hormigón	Max 20	M-C 5.410.201(2)
Microaglomerado en frío	Max 3,5	M-C 5.419.201.B

Debido a que los tratamientos superficiales no poseen exigencia especificada para el ensaye de índice de trituración, se realizará la comparación para el material definido como fino de grado 10

[7] http://www.metso.com. “Guía de aplicación de piezas de desgaste”

(Material entre los tamices de 10 y 5 mm), debido a que en este corte es retenido la mayor parte del material. El método utilizado, según el corte utilizado, corresponde al método de impacto.

Para la realización del ensaye por impacto, se llena un molde con el material (registrando el peso del árido contenido) y se golpea 15 veces con el martinete de la máquina de impacto. El llenado del molde se realiza por terceras partes, compactando cada una de ellas con 25 golpes de una varilla compactadora. Como se puede observar en la Ilustración 34, la altura de caída se encuentra controlada durante todo el ensaye, por lo que la energía por cada golpe es la misma.

Ilustración 34: Máquina para impacto para áridos finos

Luego de realizar los golpes se pesa nuevamente la muestra, para luego separar los finos según el tamiz correspondiente al grado desarrollado. En el caso del grado 10, el tamiz separador de finos corresponde al tamiz de 1,25 [mm]. Para obtener el valor del índice de trituración parcial se determina el porcentaje del material que pasó por el tamiz de fino según el peso de la muestra posterior a los golpes del partillo. Por cada corte de material se efectúan 2 ensayes, promediando finalmente los resultados obtenidos.

Se presenta en el Gráfico 10 los resultados obtenidos según la procedencia del material ensayado. Se observa en el Anexo B.6 el detalle del ensaye.

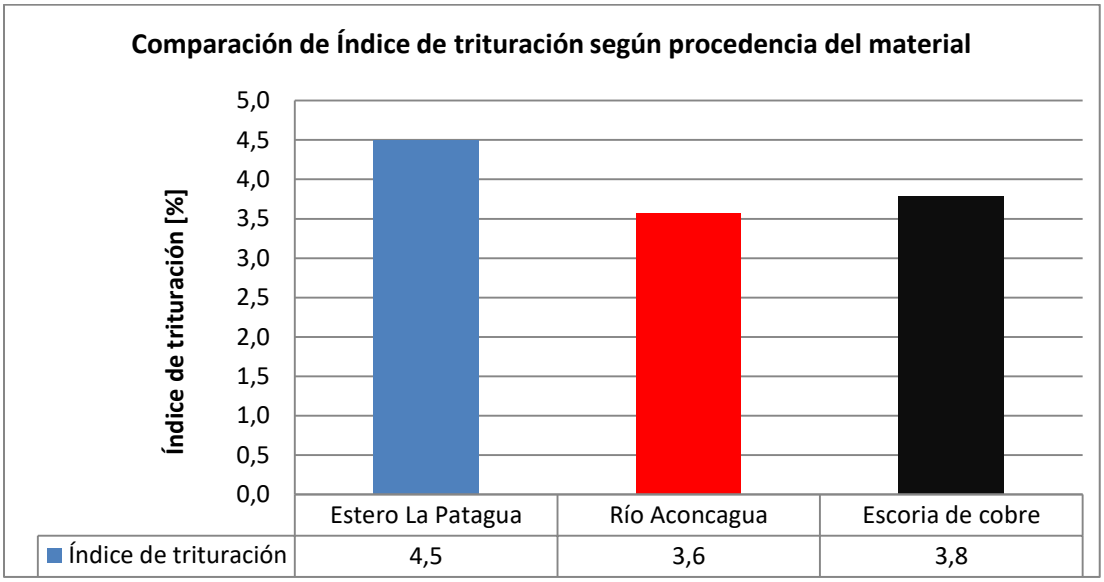


Gráfico 10: Comparación de Índice de trituración según procedencia del material

Como se puede observar, al igual que en el ensaye de desgaste de Los Ángeles, el árido extraído del Estero La Patagua presentó valores mayores de desintegración que el procedente del Río Aconcagua. En el caso de la escoria de cobre, este material presentó valores de trituración inferiores al del Estero La Patagua, pero similares al del Río Aconcagua. Estos valores, indican que la escoria de cobre presenta una respuesta similar a la trituración que los áridos tradicionales.

Para estudiar más a fondo esta propiedad en la escoria de cobre, se verifica el índice de trituración para todos los grados de material fino. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

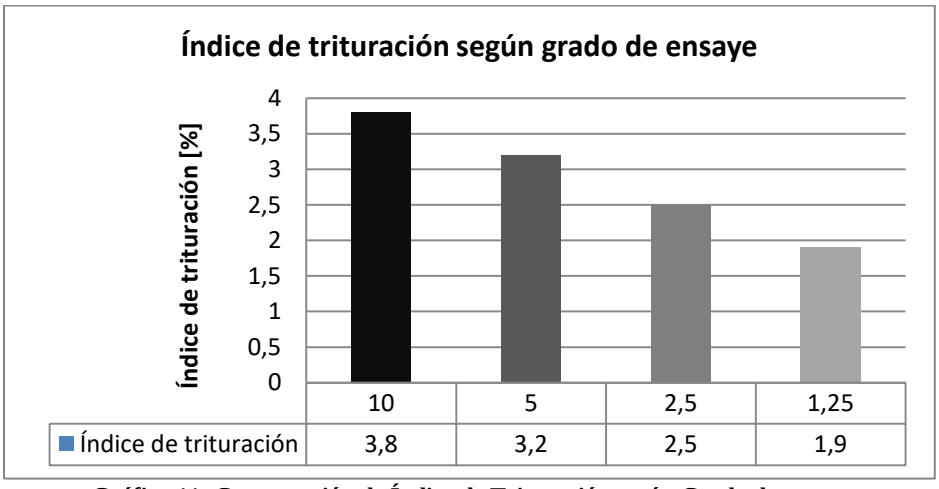


Gráfico 11: Comparación de Índice de Trituración según Grado de ensaye

El método de obtención del índice de trituración, al utilizar un elemento de impacto externo al material, permite eliminar los efectos de desgaste ocasionados por la densidad del material analizado. Se puede concluir con este modo que la escoria de cobre presenta una resistencia a desgastarse y/o triturarse similar al árido tradicional, por lo que se espera que este material se comporte de manera similar al ser chancado como al momento de resistir las cargas producidas por el tráfico.

7. CAPÍTULO VII: EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE COBRE PARA DOSIFICACIONES SEGÚN LA DIMENSIÓN MÍNIMA PROMEDIO

Debido a que gran parte de los ensayes están diseñados para áridos tradicionales, en este capítulo se evaluará el funcionamiento de fórmula de la dosificación de la dimensión mínima promedio para el caso del uso de escoria de cobre como árido.

Para observar esto de manera más clara, se trabajará con las 2 granulometrías señaladas en capítulos previos, correspondientes a los áridos tradicionales extraídos del Río Aconcagua y del Estero La Patagua

Posteriormente se replicará cada una de estas granulometrías de manera manual, pero ahora utilizando escoria de cobre como árido. El objetivo de esto, es observar los resultados existentes en 2 dosificaciones que poseen una granulometría idéntica, pero propiedades de materiales muy distintas.

Debido a que no se puede asumir que la fórmula de la dimensión mínima promedio funcione de manera correcta para la escoria de cobre, por no ser un árido tradicional, se realizó una evaluación del funcionamiento de la misma a través de una simulación de tránsito a baja escala.

Esta simulación se realizó en laboratorio utilizando el equipo de rueda cargada, especificado para el ensaye de lechadas asfálticas.

Se espera que finalizado los estudios, se pueda observar si el uso de escoria de cobre en la fórmula de dosificación por la dimensión mínima promedio, requiere de factores de corrección que solucionen problemas relacionados a una dosis mayor o menor de agregado o ligante asfáltico.

7.1. Factores de diseño utilizados

Dentro de los factores que intervienen en la fórmula de diseño se encuentran los factores de evaluación del material como de condiciones existentes de tráfico, pavimento y medio ambientales.

Los factores utilizados para todas las dosificaciones realizadas se encuentran en la Tabla 48 y corresponden a los factores propuestos por el Laboratorio Regional de Vialidad para este estudio comparativo, debido a ser los factores comúnmente utilizados en la Región de Valparaíso a la hora de realizar dosificaciones para tratamientos superficiales simples.

Tabla 48: Factores de diseño propuestos por Laboratorio Regional de Vialidad

Factores de diseño		valor
Factor de Evaluación de Agregado	(M)	0,9
Factor de Evaluación de Asfalto	(K)	1
Factor de Desperdicio	(E)	1,05
Factor de Tránsito	(T)	0,75
Corrección Absorción de Agregado	(A)	0
Corrección Textura Superficial	(S)	0
Residuo Asfáltico	(R)	0,65

7.2. Comparación de dosificaciones realizadas

Para comparar el funcionamiento del uso de la escoria de cobre en la fórmula de la dimensión mínima promedio, se calcularon dosificaciones para cada árido tradicional, con su respectiva reconstitución granulométrica en escoria de cobre. Los resultados obtenidos en las dosificaciones elaboradas, así como sus factores de cálculo, se observan a continuación en la Tabla 49 y Tabla 50 (El desarrollo de cada dosificación se encuentra disponible en el Anexo A).

Tabla 49: Dosificación según granulometría del Estero La Patagua

		Escoria de cobre	Estero La Patagua
(DAS)	Densidad aparente suelta	2095,0	1419,9
(DRS)	Densidad real seca	3840,8	2646,8
(V)	Porcentaje de huecos	0,45	0,46
(IL)	Índice de lajas	13	19
(H)	Dimensión mínima promedio	5,67	5,37
(TM)	Tamaño medio	7,06	7,06
C [kg/m2)	**Dosificación de árido**	**16,85**	**10,94**
B [l/m2]	**Dosificación de ligante**	**1,19**	**1,15**

Tabla 50: Dosificación según granulometría del Río Aconcagua

		Escoria de cobre	Río Aconcagua
(DAS)	Densidad aparente suelta	2129,6	1510,0
(DRS)	Densidad real seca	3831,9	2637,1
(V)	Porcentaje de huecos	0,44	0,43
(IL)	Índice de lajas	14	22
(H)	Dimensión mínima promedio	5,58	5,19
(TM)	Tamaño medio	7,01	7,01
C [kg/m2)	**Dosificación de árido**	**16,63**	**10,73**
B [l/m2]	**Dosificación de ligante**	**1,14**	**1,02**

Para ilustrar de una manera más clara, se presenta en la Tabla 51 la diferencia porcentual existente en los factores de dosificación obtenidos entre la escoria de cobre y cada uno de los áridos tradicionales analizados.

Tabla 51: Diferencia porcentual en factores de dosificación entre la escoria de cobre y áridos tradicionales

	Diferencia porcentual de escoria de cobre según:	
	Estero La Patagua	**Río Aconcagua**
(DA)	32,2	29,1
(DRS)	31,1	31,2
(V)	-2,0	3,8
(IL)	-46,2	-57,1
(H)	5,4	7,0
C [kg/m2)	35,1	35,5
B [l/m2]	3,5	10,5

- **Porcentaje de huecos en el agregado (V).**
  Este factor cumple un papel importante en la fórmula de la dosificación, pues un incremento del mismo se expresa como un aumento de la dosis de ligante, y a su vez una disminución de la dosis de agregado.
  En general se puede observar que si bien la escoria de cobre presenta tanto valores de densidad aparente suelta, como valores de densidad real seca muy por sobre los registrados en el caso de los áridos tradicionales, el valor obtenido de huecos en el agregado (V) para ambos casos se comporta de manera muy similar, no registrando variaciones importantes. Esto indicaría que de realizar una dosificación, ya sea con agregado tradicional o con escoria de cobre, debiese tener un comportamiento similar al momento de recibir tránsito, no evidenciando exudación producto de un exceso de ligante.

- **Dimensión mínima promedio (H).**
  Se puede observar de la fórmula de dosificación, que para incrementos del valor de la dimensión mínima promedio, se obtendrán dosificaciones mayores tanto de ligante como de agregado. Este valor (H) depende directamente del valor del tamaño medio del agregado (TM) como del índice de lajas (IL).
  Para el estudio realizado, debido a que se replicaron granulometrías para ambos casos, se obtiene un valor de TM idéntico para ambas mediciones, por lo que el valor de la dimensión mínima promedio se ve solo afectado a variaciones del índice de lajas. A mayor valor de IL se obtendrá un menor valor de la dimensión mínima promedio. Si bien el poseer partículas lajeadas significará dosis menores de ligante, estas partículas tienden a fracturarse con el paso del tránsito, generando partículas de menor dimensión y caras no cubiertas con asfalto.
  En ambas comparaciones de los áridos tradicionales con la escoria de cobre, se observó un valor de IL considerablemente menor, lo que genera un valor mayor de la dimensión mínima promedio, generando así dosificaciones mayores de áridos y ligante.

- **Dosificación de árido (C).**
  Luego de realizada la dosificación, se obtuvieron valores de dosis de escoria de cobre muy superiores a las obtenidas en los áridos tradicionales, evidenciando un aumento de 35%.
  Es importante considerar que la escoria de cobre posee densidades un 30% superior al árido tradicional, por lo que este incremento de dosificación no se percibirá como un mayor volumen, sino como un mayor peso. Otro importante factor que generó una dosis de agregado mayor de escoria de cobre, fue el incremento evidenciado en el valor de la dimensión mínima promedio.
  Es importante considerar como se podrá ver afectado este aumento en la dosificación, principalmente a la hora del transporte del material.

- **Dosificación de ligante (B).**
  Se puede observar que en ambas dosificaciones elaboradas con escoria de cobre, no existe una alta variación de dosis de ligante en comparación con los resultados de los áridos tradicionales.

7.3. Evaluación de dosificación de árido

Como se comentó anteriormente, debido a las altas densidades de la escoria de cobre, resultó una dosificación de árido mucho mayor a la esperada utilizando árido tradicional. Para comprobar el correcto funcionamiento de la fórmula de dosificación de árido, se depositó este material en una superficie de área controlada (30x30 cm) de manera manual. Para esta evaluación, se extiende el agregado sobre la superficie sin capa de asfalto, debido a que esta posee un quiebre tan rápido que impediría una ubicación manual.

Como se puede observar en la Ilustración 35 y en la Ilustración 36, la cantidad de material alcanza en todos los casos a cubrir el área especificada de manera precisa, comprobando así el correcto funcionamiento de la fórmula para el caso de la dosificación de áridos. Se observa en ambas imágenes la dosificación de áridos tradicionales a la izquierda y la dosificación con escoria de cobre a la derecha.

Ilustración 35: Dosificación de árido según granulometría del Estero La Patagua

Ilustración 36: Dosificación de árido según granulometría del Río Aconcagua

7.4. Evaluación de dosificación de emulsión

La fórmula de la dimensión mínima promedio está especificada para áridos tradicionales, presentando un muy buen desempeño en los mismos. Si bien, se ha demostrado hasta el momento que la escoria de cobre presenta comportamiento similar, e incluso mejor a los observados en los áridos tradicionales, es necesario verificar si este método de dosificación se comporta de igual manera para el uso de la escoria de cobre. Una de las maneras de verificar esto, corresponde a establecer algún método que verifique si la dosis de asfalto proporcionada por la dosificación presenta el mismo comportamiento que la obtenida en un árido tradicional. En la actualidad, la Dirección de Vialidad mediante el Manual de Carreteras, establece como método de verificación de dosificación la realización de tramos de pruebas de al menos 100 metros de longitud por una pista de ancho. Debido a que en la actualidad no existe método de ensaye especificado para la medición de la exudación en tratamientos superficiales, se realizó un procedimiento similar al elaborado por el ensaye de rueda cargada, especificado para lechadas asfálticas (MC 8.302.53).

- **Detalle del ensaye Tradicional**

El ensaye de rueda cargada estudia el comportamiento de la solución superficial en servicio, verificando su uso al determinar dosis excesivas de asfalto en las lechadas, lo que provoca una tendencia a la exudación de estas. El objetivo de la rueda es sobre-compactar la lechada, forzando así al ligante a fluir a la superficie.

En el ensaye de rueda cargada tradicional, se utilizan probetas rectangulares previamente moldeadas y curadas, las que reciben la presión de una rueda neumática cargada que pasa en forma cíclica sobre la superficie, ejerciendo una carga puntual de 56 kg. Una vez que realiza 1000 ciclos (ida y vuelta), se depositan 300 grs de arena caliente (previamente normalizada) sobre la superficie de la probeta y se proceden a repetir 100 ciclos adicionales. La arena se pegará a la superficie de acuerdo al nivel de exudación presentado por la probeta, debido a que a mayor exudación existente, mayor cantidad de arena quedará adherida a la superficie.

Las especificaciones existentes en el Manual de Carreteras indican que para condiciones extremas de carga, tales como tráfico pesado, cargas lentas, curvas cerradas (radios de curvatura inferiores a 100 metros) o en pendientes superiores a 10%, se deberá verificar el diseño con este ensaye.

- **Objetivo del ensaye modificado para Tratamientos Superficiales**

Debido a que no se cuenta con antecedentes de evaluaciones de exudación en laboratorio para tratamientos superficiales, ni existen métodos o equipos normados que permitan simular el tráfico pesado en tratamientos superficiales, se utilizó el equipo del ensaye de la rueda cargada, así como la carga especificada y el número de ciclos definidos por la normativa. Se trabajó con los resultados obtenidos en ambas comparaciones de dosificación elaboradas anteriormente. Se espera que finalizado el ensaye, para el árido tradicional y su equivalente en escoria de cobre, se pueda realizar una inspección visual que permita establecer la existencia de exudación. Conociendo las propiedades de los áridos, se espera que las dosificaciones realizadas con material tradicional se comporten de manera adecuada, sin presentar exudación ni desprendimiento de material. El observar este comportamiento mediante la simulación de tránsito realizada en laboratorio, permitirá tener una verificación adicional del comportamiento de la fórmula de dosificación de ligante.

- **Aparatos y Materiales utilizados.**

  - ✓ Emulsión catiónica CRS-2.
  - ✓ Emulsión imprimante.
  - ✓ Molde de madera (Dimensiones interiores de 230 x 430 x 130 [mm]).
  - ✓ Dispensador de emulsión.
  - ✓ Dispensador de áridos.
  - ✓ Mecheros.

- **Procedimientos**

a) Preparación de molde de madera:

Se diseñaron 6 moldes de madera, los que poseen las dimensiones necesarias para contener el material de ensaye y permitir su colocación en la máquina de ensaye. Debido a que el molde posee 7 perforaciones en su base, destinadas al paso de tornillos de ajuste de la máquina rueda de carga, se colocó un filtro elaborado con una malla de plástico. El molde posee una de sus caras laterales internas graduadas numéricamente en milímetros.

b) Preparación y colocación de la Base estabilizada.

Para simular el apoyo del tratamiento superficial, se simularán los 5 [cm] superiores de una base estabilizada. Según lo establecido en el Manual de Carreteras, se establece como requisito para bases granulares destinadas a tratamientos superficiales, el contar con un 70% de Material Chancado y contar con un CBR de 100% al 95% de la D.M.C.S. Debido a que la base está destinada a ser recubierta con un tratamiento superficial, el tamaño máximo absoluto será 40 [mm].

La base granular se ajusta a la banda granulométrica TM-25, de manera de asegurar la colocación de 2 capas en el interior del molde.

Se realizaron los ensayos necesarios para determinar la humedad óptima, densidad óptima y densidad aparente suelta. Se preparó en una fuente el material, colocándole el porcentaje de humedad óptima. Se obtiene que al colocar 10286 [g] de material, este ocupará un alto de 65 [mm], refiriéndose a la densidad suelta del material. Para llegar a la compactación mínima necesaria el material tendrá que descender 14 [mm], manteniendo su masa pero variando así el volumen.

c) Colocación del molde en prensa de carga.

Ya ubicado correctamente el material es cubierto con la placa de carga. Esta placa será de un material rígido que permita una transferencia uniforme de cargas en la superficie del material. Se debe verificar en la cara graduada del molde, que la placa de carga alcance la altura de material suelto calculada. Para realizar una distribución correcta de carga se colocan pesos en la placa superior del molde.

d) Compactación de la Base estabilizada.

Se procede a realizar la compresión hasta alcanzar la altura que asegure la densidad requerida.

e) Barrido de fino sobrante.

Una vez retirado el molde con la base compactada, se procede a eliminar el material suelto, polvo, suciedad o cualquier material extraño.

f) Imprimación.

Se utiliza una emulsión imprimante, la cual se aplica a una tasa promedio[8] de 1 l/m^2. Se debe obtener una imprimación mínima de 3[mm], por lo que se deja un tiempo de 24 horas para asegurar una correcta absorción. Las emulsiones imprimantes no necesitan calentarse, por lo que se aplicaron a temperatura ambiente. Esta condición se debe cumplir siempre que la temperatura ambiente sea superior a los 10ºC.

Para realizar el riego de imprimación, se utilizó un dosificador de spray, el cual asegura una distribución uniforme en la superficie. La verificación de la dosis se realizó por diferencias de pesos del molde antes y después de imprimar.

g) Riego asfáltico.

La cantidad de asfalto se establece proporcional al área definida. Para alcanzar la temperatura de aplicación el asfalto fue calentado mediante mechero. La aplicación se realizó mediante riego del ligante, utilizando recipiente de plástico con perforaciones para esto. Para controlar la aplicación de asfalto, se midió el peso del ligante aplicado hasta lograr el correspondiente a la dosificación definida.

h) Esparcido y compactación del árido.

Para aplicar el árido se utilizó un esparcidor pequeño, de ancho correspondiente a un tercio del molde principal. Se ejecutó el rodillado con rueda de carretilla, con el objetivo de orientar las partículas a su posición mínima.

i) Simulación de tránsito.

Pasado 1 día de la compactación de los áridos, se colocó el molde en la máquina de ensaye y se sometió a 1000 ciclos de la rueda cargada. Para evitar desgaste de la rueda, se colocó un papel protector sobre el molde.

Finalizados los ciclos, se retiró el molde de la máquina de ensaye y se procedió a realizar inspección visual, informando como molde exudado si se presenta exceso de ligante en la superficie de carga, o ligante adherido al papel de protección.

j) Verificación de imprimación

Una vez finalizado el ensaye, se desarmó la capa de gravilla adherida a la superficie con la ayuda de una espátula. Se verificó el cumplimiento de imprimación de 3 [mm] con la ayuda de una regla.

[8] Dosis promedio de 1 L/m^2 propuesta por el Laboratorio Regional de Vialidad de Región de Valparaíso.

- **Detalle fotográfico del procedimiento.**

(a) (b) (c) (d)

(e) (f) (g) (h)

(i) (j) (k)

Ilustración 37: Procedimiento de ensaye de Exudación.

- **Resultados**

Finalizados los ensayes para cada una de las muestras, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 52: Verificación exudación para granulometría del Estero La Patagua

Comparación según granulometría del Estero La Patagua			
MOLDE	Procedencia	Desprendimiento	Exudación
A	Estero La Patagua	NO	NO
D	Estero La Patagua	NO	NO
E	Estero La Patagua	NO	NO
B	Escoria de Cobre	NO	NO
C	Escoria de Cobre	NO	NO
F	Escoria de Cobre	NO	NO

Tabla 53: Verificación exudación para granulometría del Río Aconcagua

Comparación según granulometría del Río Aconcagua			
MOLDE	Procedencia	Desprendimiento	Exudación
B	Río Aconcagua	NO	NO
D	Río Aconcagua	NO	NO
F	Río Aconcagua	NO	NO
A	Escoria de Cobre	NO	NO
C	Escoria de Cobre	NO	NO
E	Escoria de Cobre	NO	NO

Con una correcta aplicación de la fórmula de dosificación de la dimensión mínima promedio, no se debería presentar ni exudación ni falta de ligante en el tratamiento superficial. Se observa, tanto en la Tabla 52 como en la Tabla 53, que no se generó ni exudación ni desprendimiento de agregado en la realización del ensayo para los áridos tradicionales, validando así este método para el estudio comparativo con nuevos materiales.

No se observó, para ninguna de las dosificaciones elaboradas con escoria de cobre, exudación ni desprendimiento de agregado, permitiendo así concluir que la fórmula de dosificación por la dimensión mínima promedio tiene buen funcionamiento para el uso de escoria de cobre, no requiriendo ningún tipo de factor de corrección para su uso.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

Los tratamientos superficiales corresponden a la solución básica más utilizada en la Región de Valparaíso. Si bien esta región presenta una cobertura de caminos básicos mayor a la existente a la mayoría de las regiones del país, aún existe prácticamente un tercio de caminos que no poseen una capa de protección, por lo que se aprecia la existencia de una oportunidad para dotar a su totalidad de esta solución.

La escoria de cobre, como árido para tratamientos superficiales, cumplió con todos los requisitos establecidos por el Volumen 5 del Manual de Carreteras, convirtiéndose así en una alternativa viable para este tipo de solución básica.

Este material posee mejor cubicidad que los áridos tradicionales, presentando un porcentaje óptimo de partículas chancadas, lo cual es muy importante para los tratamientos superficiales, debido a que muchas veces esta solución es aplicada sólo para mejorar la adherencia superficial.

Se observó una menor cantidad de lajas, junto con un menor índice de lajas. Si bien estas propiedades dependen más del proceso de chancado que del árido mismo, resultan favorables estos resultados ya que indican que la escoria tiene menos posibilidades de registrar variaciones granulométricas debido al quiebre de partículas ocasionadas por el paso de vehículos que el árido tradicional.

La escoria de cobre, en comparación con los áridos del Río Aconcagua y del Estero La Patagua, presentó una resistencia a la desintegración causada por los ciclos de hielo y deshielo 10 veces mejor que los áridos tradicionales. Este resultado toma una mayor importancia para el caso de los tratamientos superficiales, ya que en caso de no estar protegido por algún riego superior, gran parte del árido está sometido de manera directa a los efectos del clima.

La escoria de cobre presentó una mejor adherencia con el asfalto que los agregados tradicionales. Para poder observar esta diferencia fue necesaria la realización del ensaye de adherencia por el método del hervido, debido a que el método estático y el método dinámico no fueron capaces de registrar pérdidas de material, resultando ambos muy pocos exigentes para las muestras. Se observó una menor adherencia para temperaturas bajo cero, lo cual no resultó influyente para este estudio, debido a que los tratamientos superficiales simples, no suelen ser utilizados en lugares donde es recurrente esta condición. Se concluye también que la escoria de cobre puede adaptarse a las especificaciones de limpieza del árido tradicional, ya que presenta el mismo desempeño ante condición de suciedad. Sumado a esto, los resultados de adherencia utilizando árido húmedo previo a su colocación, manifiestan que la escoria mejora su adherencia al presentar humedad, por lo que también puede adaptarse a la condición de los áridos tradicionales, en donde se especifica aplicar una humedad previa en los mismos.

Se observó un buen funcionamiento de la fórmula de dosificación de la dimensión mínima promedio para el uso de escoria de cobre, no evidenciando problemas en las dosis de árido ni de ligante, por lo que no se requieren factores de corrección asociados al uso de este material. Si bien la escoria de cobre, en comparación con los áridos del Río Aconcagua y del Estero La Patagua, posee valores muy bajos de absorción, para el uso de la fórmula de dosificación se recomienda la utilización del factor de absorción del agregado con valor igual a cero, al igual que en los áridos tradicionales.

Es importante considerar que aunque la escoria de cobre posee una densidad muy elevada, lo que produce dosificaciones en peso de árido mayores que los áridos tradicionales, se espera que esto no genere grandes inconvenientes en relación a costos de traslado de material, debido a que la capacidad de los camiones se mide según el volumen de material que puedan llevar. De todos

modos, será necesario considerar este factor al momento de realizar la carga de material, de manera de revisar en la práctica posibles incrementos en el gasto de combustible debido al aumento del peso de carga.

Mediante el ensaye de desgaste de Los Ángeles se pudo observar que la escoria posee un desgaste de 20%, mientras que los áridos tradicionales se acercan al 15%. Si bien la escoria no cumplía con los requisitos para ser ensayada mediante el equipo de Los Ángeles, ambos valores se encuentran por debajo de lo establecido por el Manual de Carreteras, por lo que cumplen con esta especificación. Al poseer una densidad superior a la normada fue necesaria la realización del método de obtención del índice de trituración, el cual entregó valores similares de trituración entre la escoria y los áridos tradicionales. Este ensaye permite constatar que el mayor resultado de desgaste obtenido en la escoria, según el ensaye de Los Ángeles, se debe al peso de la misma. Al ser la escoria un árido más pesado, se golpea con una energía mayor que los áridos tradicionales, por lo que presentaría por este motivo un mayor desgaste.

Los ensayes de desgaste permitieron también anticipar parte del comportamiento de proceso de chancado del material. Al poseer una trituración similar al árido tradicional, se concluye que la escoria no presentará inconvenientes para ser chancada. Si bien esta información asegura que el proceso de chancado de la escoria no será difícil, no entrega información relacionada al desgaste que recibirá el equipo en este proceso, más aun considerando que la escoria es actualmente utilizada para granallado por sus propiedades de material abrasivo.

La escoria, al ser un árido más pesado, podría presentar un mayor riesgo al desprenderse de la superficie. Una partícula que salte viajando a la misma velocidad llevará mucha más energía (por su masa) y tendrá un potencial de destrucción mayor (parabrisas y otros). De todos modos se espera que la escoria de cobre, debido a su buena adherencia con el ligante y alta cubicidad, presente un mejor efecto de empotramiento con la base, lo que sumado a una buena dosificación y compactación de la capa superficial, permitirá una capa de protección con menor pérdida de agregado al largo plazo que al utilizar un árido tradicional, obteniendo así una superficie más duradera y segura.

Si bien esta investigación abarcó sólo el estudio de tratamientos superficiales simples, es esperable un correcto funcionamiento de la escoria de cobre en obras que impliquen la utilización de este material como reemplazo total del árido tradicional en tratamientos superficiales múltiples, debido a que en el diseño de estos se dosifica utilizando el mismo procedimiento que en el caso de los tratamientos simples.

Dentro de la evaluación ambiental de la escoria de cobre, y según lo comentado en el Anteproyecto del Programa para la Recuperación Ambiental y Social de Quintero-Puchuncaví, entre los principales obstáculos técnicos, sociales y ambientales de la utilización de la escoria, destaca el desconocimiento de la composición del pasivo ambiental, la poca claridad en su caracterización física y el bajo dimensionamiento de su producción. El uso de las escorias para la pavimentación de caminos no es considerado pertinente por parte de la comunidad, debido a la poca información existente y considerando el actual impacto en la zona.

Se considera que la utilización de escoria de cobre, al encontrarse acumulada en el sector de botadero y no ser extraída de los ríos ni canteras como los áridos tradicionales, elimina todo tipo de contaminación existente en el proceso de extracción (Modificaciones en cauces y Biodiversidad). La extracción de áridos en ríos está muy controlada principalmente por los efectos negativos en el medioambiente que conlleva, por lo que la utilización de escoria produce un impacto positivo en el medioambiente al reducir daños a los ríos.

Dentro de las Divisiones de CODELCO, Ventanas es una de las que presenta mayor acumulación de escorias de cobre en el tiempo. Considerando que a diario se continúan produciendo grandes cantidades de material, se hace necesario desarrollar alternativas que permitan su pronta utilización y con esto asegurar la reutilización de este pasivo ambiental. Disponer este material para la construcción en obras viales se considera una buena solución, debido principalmente a los altos volúmenes de material que cada obra vial conlleva.

De la información entregada por CODELCO Ventanas, sobre los muestreos semanales realizados para saber la composición de la escoria de desecho, se puede observar que salvo el muestreo realizado entre el 8 y 14 de Diciembre del 2015, la escoria de cobre posee cantidades estables y niveles bajos de arsénico. Esto significa que si bien la concentración de cada elemento que compone de la escoria de cobre puede variar, prácticamente en todos los muestreos registró bajo nivel de arsénico.

El estudio semi-cuantitativo de Fluorescencia de Rayos X, si bien no permitió obtener valores reales de concentración por cada elemento, y así obtener un análisis elemental completo, permitió obtener una aproximación de lo anterior. Las 5 muestras analizadas, al presentar concentraciones similares pese a ser extraídas de 5 posiciones diferentes del botadero, indica que la composición de la escoria de cobre en Codelco Ventanas no varía según la ubicación.

Los resultados obtenidos en el análisis de Toxicidad por Lixiviación (TCLP), arrojaron que los elementos; Arsénico, Selenio, Antimonio, Plomo, Cadmio y Níquel, se encuentran en concentraciones menores a la concentración máxima permisible (CMP) establecida en el Reglamento Sanitario sobre el manejo de Residuos Sólidos (Decreto N° 148), lo cual indicaría que este residuo no presenta un riesgo en la salud de las personas. Resulta importante considerar que si bien el uso de la escoria de cobre en tratamientos superficiales, gran parte del árido estará en contacto directo permanente con el tráfico y el medio ambiente, las condiciones a las que este será sometido son similares a las que busca replicar el TCLP, ya que este estudio no somete a la muestra a variaciones de PH muy agresivas, tratando de replicar las condiciones de una muestra sometida a agua y estudiar así la capacidad de lixiviar el suelo.

Considerando esto, se puede concluir que los elementos analizados de la escoria de cobre no presentan riesgos de lixiviar en el medio ambiente. Si bien este resultado corresponde al de una muestra pequeña, la información entregada por CODELCO junto al muestreo y análisis de fluorescencia de rayos X, entregan información que indica que el material presente en todo el sector del botadero de escoria es el mismo, por lo que es esperable que al realizar este estudio a una mayor escala se observen resultados similares.

.

Recomendaciones.

Debido a que el uso de las escorias para la pavimentación de caminos no es considerado pertinente por parte de la comunidad, se propone a la División de CODELCO Ventanas resolver el conflicto existente, haciendo parte a la comunidad de una investigación que tenga como objetivo transparentar la pasividad del residuo dispuesto en sus instalaciones e informar mediante charlas y reuniones de la experiencia internacional y nacional que refleja los beneficios sobre el uso de la escoria de cobre en proyectos viales, estructurales e industriales, de manera de reducir el rechazo existente en la actualidad.

Debido a las dimensiones del sector de Botadero y considerando la existencia en este lugar del material acopiado, se recomienda la instalación en este sector de una planta chancadora de escoria. La instalación de esta planta permitiría mantener las emisiones del material particulado en la misma zona de botadero, afectando en menor cantidad a las personas debido a la lejanía de los lugares residenciales.

Debido a que el análisis TCLP se elaboró en un laboratorio que no cuenta con la certificación necesaria para asumir la información otorgada como concluyente, y considerando la baja dimensión y representatividad del muestreo realizado, se recomienda la elaboración de un estudio similar al realizado por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), pero que considere los elementos definidos por el Decreto Supremo N°148 no abarcados en esta investigación (toxicidad aguda , toxicidad crónica y corrosividad) y que se realice en alguna institución certificada. Una caracterización de este tipo, que mediante muestreo en el sector botadero permita asegurar la existencia de un pasivo ambiental, otorgaría más confianza en la utilización de este material tanto a la comunidad de Puchuncaví, como a los trabajadores de las obras viales y los beneficiarios de los proyectos.

Debido a que en la actualidad la escoria de cobre no se encuentra valorizada, en esta investigación no se abordó la conveniencia económica de la construcción de tratamientos superficiales utilizando este material. Se recomienda el estudio de esto en profundidad, considerando también los posibles incrementos de costos relacionados tanto al chancado como al traslado del material.

Dado el potencial buen desempeño de la escoria de cobre como árido para tratamientos superficiales, es que se recomienda profundizar el estudio de las propiedades de este residuo como árido para soluciones asfálticas superficiales como son las lechadas asfálticas y las mezclas en frío.

Según lo dispuesto en el Manual de Carreteras, se recomienda la revisión de las conclusiones obtenidas mediante la construcción de tramos de prueba.

Finalizada esta investigación, se considera que la utilización de la escoria de cobre como árido para tratamientos superficiales simples tiene un potencial claro, el que además incorpora aspectos de sustentabilidad para el desarrollo del proyecto Caminos Básicos en la Región de Valparaíso. La entrega de 2 millones de toneladas de escoria de cobre por parte de CODELCO Ventanas al Ministerio de Obras Públicas, destinada a la elaboración de estudios y construcción de una serie de caminos en las comunas de Puchuncaví y Quintero, puede redundar finalmente en un importante ahorro económico para el Estado y además abre la oportunidad de otorgar una mejora a la ciudadanía dándole un uso efectivo a este pasivo ambiental

BIBLIOGRAFÍA

[1]. Kohnenkamp, E. (2016). "*Estudio del efecto de la adición de aluminio metálico a las escorias oxídicas en División Ventanas de CODELCO"*. Memoria Universidad Técnica Federico Santa María, Dpto. de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales.

[2]. CODELCO. 2015. "*Reporte de sustentabilidad año 2015"*.

[3]. 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.

[4]. Sepúlveda, C. (2006). "Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro". Tesis Universidad de Chile, Dpto. de Ingeniería Química y Biotecnología.

[5]. Elias, X. (2009). "*Reciclaje de residuos Industriales; Residuos Sólidos urbanos y fangos de depuradora"*. Segunda Edición. Madrid. Díaz de Santos.

[6]. López, J. (2008). "*Determinación de la actividad del cobre en el sistema"*. Tesis Instituto Politécnico nacional de México, Dpto. de Ingeniería en Metalurgia y Materiales.

[7]. Almeida, W. Pereira, J. Batista, M. (2007). *"Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete".* J Mater Sci.

[8]. Castillo, H. Venegas, G. (2010). *"Impacto y consecuencias del Arsénico en la salud y el medio ambiente en el Norte de Chile"*. Revista Interamericana de Ambiente y Turismo. Volumen 6, Número 1, pag 53-60.

[9]. Pérez, P. Azcona, M. (2012). *"Los efectos del cadmio en la salud"*. Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas, vol. 17, núm. 3, julio-septiembre, 2012, pp. 199-205. Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado México, México.

[10]. Anderson, R. (1987). "*Trace elements in human and animal nutrition"*. Academic Press, San Diego, CA.

[11]. Gough, L. Shacklette, H. (1979). *"Element concentrations toxic to plants, animals and man".* U.S Department of interior, Gelogical Survey, Geological Survey Bulletin. Washington DC.

[12]. Sanín, L. González-Cossio, T, Romieu, I. Hernández, M. (1999). "*Acumulación de plomo en huesos y sus efectos en la salud*". Centro de Investigación en Salud Poblacional, Instituto Nacional de Salud Pública, México.

[13]. Valentinuzzi, M. (2008). "*Análisis por fluorescencia de rayos X: Implementación de guías de haces en reflexión total"*. Tesis Universidad Nacional de Cordoba, Facultad de Matemática, Astronomía y Física.

[14]. Instituto de Salud Pública. (2015). "Caracterización de Residuos Peligrosos según método T.C.L.P Inorgánico". Ministerio de Salud. Santiago

[15]. Departamento de Salud Ambiental – Ministerio de Salud. (2004). *"Reglamento Sanitario sobre manejo de Residuos Peligrosos"*. Decreto Supremo N° 148.

[16]. DIPRES - Gobierno de Chile. (2009). "*Evaluación Programas Gubernamentales - Programa de Caminos Básicos "* D.V. MOP. Santiago.

[17]. Dirección de Vialidad. (2015). *Manual de Carreteras, Volumen N°3, N°5, N° 8 y N°9*. Santiago.

[18]. Lee, J. Shields, T. Jun Ahn, JH. (2011). *Performance Evaluation of Seal Coat Materials and Designs*. INDOT Office of Research & Development West Lafayette, IN 47906

[19]. McLeod N. (1959). "*Asphalt Surface Treatments and Seal Coats".* Asphalt Consultant, Imperial Oil Ltd., Toronto, Ontario.

[20]. Queirolo, A. (2009). "*Seguimiento de un doble tratamiento superficial para un camino de alto tránsito".* Tesis Universidad de Chile, Dpto. de Ingeniería Civil.

[21]. Villavicencio, C. (2015). *"Impacto de la aplicación de nuevas tecnologías de sellado con capa de protección asfáltica, en los plazos, costos y calidad de construcción de caminos secundarios en Chile".* Tesis Universidad de Chile, Dpto. de Ingeniería Civil.

[22]. Herrera, S. (2016). "*Evaluación de la Utilización de Escoria, Producto de la Extracción de Cobre, como Árido para Pavimentos Flexibles.*". Tesis Universidad de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Civil.

[23]. Quinteros, R. (2007). *"Tratamientos superficiales asfálticos: Perfeccionamiento del método de dosificación de la dimensión mínima promedio"*. Tesis Universidad de Chile, Dpto. de Ingeniería Civil.

[24]. Dirección de Vialidad, MOP. (2016). *"Red vial nacional dimensionamiento y características"* .Santiago.

[25]. Dirección de Vialidad, MOP. (2015). *"Balance de Gestión Integral".* Santiago.

[26]. Laboratorio Nacional de Vialidad, MOP. (2000). *"Curso Laboratorista Vial. 5ª edición, Vol. II"*. Libro de curso de Laboratorista. Santiago.

[27]. USEPA. Method 1311. (1991). *"Toxicity Characteristic Leaching Procedure".* Code of Federal Regulations, 40 CFR Part 261, Appendix II.

[28]. Leiva, F. *"Estudio comparativo de metodologías de diseño de tratamientos superficiales bituminosos"*. Universidad Nacional de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME).

[29]. www.CODELCOeduca.cl

[30]. Sotomayor, L. (2009). "*Guía de condiciones medioambientales a considerar para el diseño de una planta de extracción y procesamiento de áridos"*. Tesis Universidad Austral de Chile, Escuela de Construcción Civil.

[31]. García-Anquela J, Tena J, Mandado J (1985). "*Las explotaciones de áridos como factor modificador de los cauces fluviales naturales"*. Universidad de Zaragoza, Departamento de Petrología.

[32]. Cordova, L. (2004). *"Política ambiental Región de Valparaíso".* Sistema Nacional de Información Ambiental.

[33]. FDF *"Evaluación de riesgos para la salud de las personas y biota terrestre por la presencia de contaminantes, en el área de influencia industrial y energética de las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví"*

[34]. Guías para la calidaddel agua potablePRIMER APÉNDICE A LA TERCERA EDICIÓNVolumen 1Recomendaciones Organización Mundial de la Salud

ANEXOS

A. Cálculo de dosificaciones

1. Dosificación para árido tradicional según granulometría del Estero La Patagua

1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS

1.1Granulometría

Nch	ASTM	PASA	BANDA	BANDA
mm	inch	%	E.T.E	E.T.E
25	1	100		
20	3/4	100		
12,5	1/2	100	100	100
10	3/8	88	85	100
6,3	1/4	38		
5	# 4	20	10	30
2,5	# 8	4		10
0,08	# 200	0,02	0	0,5

1.2 Características

1.2.1 Obtenidas de ensayos directos de laboratorio

Densidad Aparente	(DA)	1419,9	
Densidad Real Seca	(DRS)	2646,8	
Índice de Lajas	(IL)	19	Max 30 %
Desgaste de Los Ángeles	(%)	15	Max 25 5
Desintegración con sulfato de sodio	(%)		Max 12 %
Partículas Chancadas	(%)	97	Min 70 %
Partículas Lajeadas	(%)	3	Ma 10 %
Adherencia método estático	(%)	100	Min 95%
Finos por Lavado	(%)	0,3	Max 0,5 %

1.2 Características

1.2.2 Obtenidas de ecuaciones

1.2.2.1 Huecos en el agregado

V = 1-Da/Drs

(V)	0,46

1.2.2.2 Tamaño medio del agregado

TM= 10^[log (a1)-[log(a1)-log(a2)]*(b1-50)/(b1-b2)

a1	10
a2	6,3
b1	88
b2	38
log (a1)	1,000
log (a2)	0,799
(TM)	7,056

1.2.2.3 Dimensión mínima promedio

H = TM / (1.09 + (0,0118*IL))

(H)	5,369

3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADO

C= M*H*Drs*E*(1-0,4V)

C [kg/m2)	10,9

4. DOSIFICACIÓN DE ASFALTO

B = K*(0,4*H*T*V+S+A)/R

B [l/m2]	1,15

2. Dosificación para escoria de cobre según granulometría del Estero La Patagua

1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS

1.1Granulometría

Nch	ASTM	PASA	BANDA	BANDA
mm	inch	%	E.T.E	E.T.E
25	1	100		
20	3/4	100		
12,5	1/2	100	100	100
10	3/8	88	85	100
6,3	1/4	38		
5	# 4	20	10	30
2,5	# 8	4		10
0,08	# 200	0,02	0	0,5

1.2 Características

1.2.1 Obtenidas de ensayos directos de laboratorio

Densidad Aparente	(DA)	2095	
Densidad Real Seca	(DRS)	3840,8	
Índice de Lajas	(IL)	13	Max 30 %
Desgaste de Los Ángeles	(%)	20	Max 25 5
Desintegración con sulfato de sodio	(%)		Max 12 %
Partículas Chancadas	(%)	100	Min 70 %
Partículas Lajeadas	(%)	2	Ma 10 %
Adherencia método estático	(%)	100	Min 95%
Finos por Lavado	(%)	0,3	Max 0,5 %

1.2 Características

1.2.2 Obtenidas de ecuaciones

1.2.2.1 Huecos en el agregado

V = 1-Da/Drs

(V)	0,45

1.2.2.2 Tamaño medio del agregado

TM= 10^[log (a1)-[log(a1)-log(a2)]*(b1-50)/(b1-b2)

a1	10
a2	6,3
b1	88
b2	38
log (a1)	1,000
log (a2)	0,799
(TM)	7,056

1.2.2.3 Dimensión mínima promedio

H = TM / (1.09 + (0,0118*IL))

(H)	5,674

3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADO

C= M*H*Drs*E*(1-0,4V)

C [kg/m2)	16,9

4. DOSIFICACIÓN DE ASFALTO

B = K*(0,4*H*T*V+S+A)/R

B [l/m2]	1,19

3. Dosificación para árido tradicional según granulometría del Río Aconcagua

1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS

1.1Granulometría

Nch	ASTM	PASA	BANDA	BANDA
mm	inch	%	E.T.E	E.T.E
25	1	100		
20	3/4	100		
12,5	1/2	100	100	100
10	3/8	100	85	100
6,3	1/4	35		
5	# 4	12	10	30
2,5	# 8	1		10
0,08	# 200	0,30	0	0,5

1.2 Características

1.2.1 Obtenidas de ensayos directos de laboratorio

Densidad Aparente	(DA)	1510	
Densidad Real Seca	(DRS)	2637,1	
Índice de Lajas	(IL)	22	Max 30 %
Desgaste de Los Ángeles	(%)	14	Max 25 5
Desintegración con sulfato de sodio	(%)		Max 12 %
Partículas Chancadas	(%)	93	Min 70 %
Partículas Lajeadas	(%)	4	Ma 10 %
Adherencia método estático	(%)	100	Min 95%
Finos por Lavado	(%)	0,2	Max 0,5 %

1.2 Características

1.2.2 Obtenidas de ecuaciones

1.2.2.1 Huecos en el agregado

V = 1-Da/Drs

(V)	0,43

1.2.2.2 Tamaño medio del agregado

TM= 10^[log (a1)-[log(a1)-log(a2)]*(b1-50)/(b1-b2)

a1	10
a2	6,3
b1	100
b2	35
log (a1)	1,000
log (a2)	0,799
(TM)	7,008

1.2.2.3 Dimensión mínima promedio

H = TM / (1.09 + (0,0118*IL))

(H)	5,193

3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADO

C= M*H*Drs*E*(1-0,4V)

C [kg/m2)	10,7

4. DOSIFICACIÓN DE ASFALTO

B = K*(0,4*H*T*V+S+A)/R

B [l/m2]	1,02

4. Dosificación para escoria de cobre según granulometría del Río Aconcagua

1. CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS

1.1Granulometría

Nch	ASTM	PASA	BANDA	BANDA
mm	inch	%	E.T.E	E.T.E
25	1	100		
20	3/4	100		
12,5	1/2	100	100	100
10	3/8	100	85	100
6,3	1/4	35		
5	# 4	12	10	30
2,5	# 8	1		10
0,08	# 200	0,30	0	0,5

1.2 Características

1.2.1 Obtenidas de ensayos directos de laboratorio

Densidad Aparente	(DA)	2129,6	
Densidad Real Seca	(DRS)	3831,9	
Índice de Lajas	(IL)	14	Max 30 %
Desgaste de Los Ángeles	(%)	20	Max 25 5
Desintegración con sulfato de sodio	(%)		Max 12 %
Partículas Chancadas	(%)	100	Min 70 %
Partículas Lajeadas	(%)	2	Ma 10 %
Adherencia método estático	(%)	100	Min 95%
Finos por Lavado	(%)	0,2	Max 0,5 %

1.2 Características

1.2.2 Obtenidas de ecuaciones

1.2.2.1 Huecos en el agregado

V = 1-Da/Drs

(V)	0,44

1.2.2.2 Tamaño medio del agregado

TM= 10^[log (a1)-[log(a1)-log(a2)]*(b1-50)/(b1-b2)

a1	10
a2	6,3
b1	100
b2	35
log (a1)	1,000
log (a2)	0,799
(TM)	7,008

1.2.2.3 Dimensión mínima promedio

H = TM / (1.09 + (0,0118*IL))

(H)	5,583

3. DOSIFICACIÓN DE AGREGADO

C = M*H*Drs*E*(1-0,4V)

C [kg/m2)	16,6

4. DOSIFICACIÓN DE ASFALTO

B = K*(0,4*H*T*V+S+A)/R

B [l/m2]	1,14

B. Resultados de ensayes

1. Adherencia por método Estático

Ilustración 38: Resultados Adherencia por método estático

2. Adherencia por método Dinámico

Ilustración 39: Resultados Adherencia por método dinámico

3. Adherencia por método del Hervido

Ilustración 40: Resultados Adherencia por método del hervido

4. Desintegración por sulfatos

ASFALTOS CHILENOS S.A.	Informe de Laboratorio	Página 1 de 1

ASUNTO	Desintegración por Sulfato de Sodio
N°DE REFERENCIA	2016077
SOLICITADO POR	Memorista UTFSM
FECHA	02 de noviembre de 2016
REALIZADO POR	Mª Raquel Arroyo C.

Descripción:

Se solicita realizar ensayo de Desintegración por Sulfato de Sodio, de acuerdo a MC 8.202.17, a tres muestras de agregados:

Agregado	Peso inicial	Peso final
Fracción 4, Estero La Patagua	301,4	298,1
Fracción 4, Río Aconcagua	301,2	298,3
Fracción 4, Escoria de Cobre	302,3	301,9

De acuerdo a las granulometrías informadas, el valor de Desintegración sería:

Agregado	Desintegración por Sulfato de Sodio
Fracción 4, Estero La Patagua	**0,20%**
Fracción 4, Río Aconcagua	**0,22%**
Fracción 4, Escoria de Cobre	**0,02%** (replicando granulometría Estero La Patagua) **0,03%** (replicando granulometría Río Aconcagua)

5. Ensaye de desgaste de Los Ángeles

Tabla 54: Asignación de Grado de Ensaye para Estero La Patagua

Asignación de Grado de Ensaye para Estero La Patagua						
Nch [mm]	**ASTM**	**Retenido [%]**	**Grado 4**	**Grado 5**	**Grado 6**	**Grado 7**
12,5	1/2	0				
10	3/8	12	12	12		
6,3	1/4	50			50	
5	# 4	18			18	
2,5	# 8	16				16
Sumatoria % Parcial Retenido			12	12	**68**	16

Tabla 55: Asignación de Grado de Ensaye para Río Aconcagua

Asignación de Grado de Ensaye para Río Aconcagua						
Nch [mm]	**ASTM**	**Retenido [%]**	**Grado 4**	**Grado 5**	**Grado 6**	**Grado 7**
12,5	1/2	0				
10	3/8	0	0	0		
6,3	1/4	65			65	
5	# 4	23			23	
2,5	# 8	11				11
Sumatoria % Parcial Retenido			0	0	**88**	11

	Mi [g]	**Mf [g]**	**P [%]**
Río Aconcagua	5000	4310	13,80
Estero La Patagua	5000	4248	15,04
Escoria de cobre	5000	4012	19,76
Grado 4	5010	3995	20,26
Grado 5	5000	4080	18,40
Grado 6	5000	4012	19,76
Grado 7	5000	4009	19,82

6. Índice de trituración

Tabla 56: Índice de trituración grado 10 según tipo de árido

Procedencia	Estero La Patagua		Río Aconcagua		Escoria de cobre	
Grado	10		10		10	
Determinación	1	2	1	2	1	2
Muestra + Molde antes	2158,1	2153,3	2140,5	2154,2	2399,2	2425,6
Muestra + Molde después	2154,2	2150,3	2136	2144	2397,5	2422,1
Molde	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6
Muestra	631,6	627,7	613,4	621,4	874,9	899,5
Retenido #16	600,8	601,8	591,3	599,4	841,9	865,3
pasa #16	30,8	25,9	22,1	22	33	34,2
I.T parcial	4,88	4,13	3,60	3,54	3,77	3,80
I.T Total	4,5		3,6		3,8	

Tabla 57: Índice de trituración de la escoria de cobre según grado de ensaye

Procedencia	Escoria de cobre							
Grado	10		5		2,5		1,25	
Determinación	1	2	1	2	1	2	1	2
Muestra + Molde antes	2399,2	2425,6	2342,9	2362,3	2315	2318	2306	2301
Muestra + Molde después	2397,5	2422,1	2342,4	2361	2313	2315	2301	2298
Molde	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6	1522,6
Muestra	874,9	899,5	819,8	838,4	790,4	792,4	778,4	775,4
Retenido #16	841,9	865,3	792,8	812,9	771,7	771,2	766,6	757,9
pasa #16	33	34,2	27	25,5	18,7	21,2	11,8	17,5
I.T parcial	3,77	3,80	3,29	3,04	2,37	2,68	1,52	2,26
I.T Total	3,8		3,2		2,5		1,9	

7. Placa Vialit: Cantidad de ligante residual [kg/m2]

Tabla 58: Cantidad de ligante residual

Tipo de ligante	Gravilla o Tamaño [mm]		
	4 / 6	6 / 10	10 / 14
Cemento Asfáltico	1,0	1,1	1,3
Alquitranes	1,0	1,2	1,6
Asfaltos Líquidos	1,0	1,1	1,3
Asfaltos Fluxados	1,0	1,1	1,2
Emulsiones Asfálticas	0,8	1,0	1,2

8. Placa Vialit: Ensaye a variaciones de temperatura

Árido	T°	a1	b1	a2	b2	a3	b3	Prom a	Prom b	Desv a	A VIALIT	A MAN
Escoria de cobre	19°	0	2	0	1	0	1	0,0	1,3	0,0	100,0	98,7
Escoria de cobre	6°	6	26	4	7	9	27	6,3	20,0	2,5	93,7	78,7
Escoria de cobre	-3°	9	40	18	42	12	49	13,0	43,7	4,6	80,7	35,0
Río Aconcagua	19°	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Río Aconcagua	6°	4	32	2	21	6	43	4,0	32,0	2,0	96,0	68,0
Río Aconcagua	-3°	1	60	1	73	4	47	2,0	60,0	1,7	94,0	8,0
Estero la Patagua	19°	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0
Estero la Patagua	6°	11	34	4	62	7	39	7,3	45,0	3,5	92,7	55,0
Estero la Patagua	-3°	1	54	0	32	3	51	1,3	45,7	1,5	91,3	9,3

C. Requerimientos para emulsiones asfálticas.

1. Requerimientos para emulsiones asfálticas Aniónicas.

Tipo	Quiebre Rápido				Quiebre Rápido Alta Flotación		Quiebre Medio					
Grado	RS-1		RS-2		HFRS-2		MS-1		MS-2		MS-2h	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Ensayes a la emulsión:												
Viscosidad, Saybolt Furol a 25°C , SFs	20	100	-	-	-	-	20	100	100	-	100	-
Viscosidad, Saybolt Furol a 50°C , SFs	-	-	75	400	75	400	-	-	-	-	-	-
Ensaye de estabilidad en almacenamiento, 24 h,% (1)	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Demulsibilidad, 35 ml. 0,02N $CaCl_2$, %	60	-	60	-	60	-	-	-	-	-	-	-
Capacidad de cubrimiento y resistencia al agua:												
- Cubrimiento agregado seco	-	-	-	-	-		Bueno		Bueno		Bueno	
- Cubrimiento después de esparcido	-	-	-	-	-		Regular		Regular		Regular	
- Cubrimiento agregado húmedo	-	-	-	-	-		Regular		Regular		Regular	
- Cubrimiento después de esparcido	-	-	-	-	-		Regular		Regular		Regular	
Ensaye de Carga Partícula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ensaye de tamizado, % (1)	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10
Ensaye de mezcla cemento, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Destilación:												
Residuo por destilación, %	55	-	63	-	63	-	55	-	65	-	65	-
Aceite destilado por volumen de emulsión, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensayes al residuo de la destilación:												
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200	40	90
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en Tricloroetileno %	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-
Ensaye de Flotación a 60°C, s	-	-	-	-	1.200	-	-	-	-	-	-	-
Ensaye de la Mancha:												
Heptano/Xilol ,% Xilol	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30

(1) El requerimiento de estos ensayes sobre muestras representativas puede omitirse si el material se está aplicando con buenos resultados en la obra.

TABLA 8.301.4.A (Continuación)
REQUERIMIENTOS PARA EMULSIONES ASFALTICAS ANIONICAS

Tipo	Quiebre Medio Alta Flotación						Quiebre Lento					
Grado	HFMS-1		HFMS-2		HFMS-2h		HFMS-2s		SS-1		SS-1h	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Ensayes a la emulsión:												
Viscosidad, Saybolt Furol a 25°C , SFs	20	100	100	-	100	-	50	-	20	100	20	100
Viscosidad, Saybolt Furol a 50°C , SFs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ensaye de estabilidad en almacenamiento,24 h,% (1)	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Demulsibilidad, 35 ml. 0,02N $CaCl_2$, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Capacidad de cubrimiento y resistencia al agua:												
- Cubrimiento agregado seco	Bueno		Bueno		Bueno		Bueno		-		-	
- Cubrimiento después de esparcido	Regular		Regular		Regular		Regular		-		-	
- Cubrimiento agregado húmedo	Regular		Regular		Regular		Regular		-		-	
- Cubrimiento después de esparcido	Regular		Regular		Regular		Regular		-		-	
Ensaye Carga de Partícula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ensaye de tamizado, % (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-	2,0
Ensaye de mezcla cemento, %	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10
Destilación:												
Residuo por Destilación,%	55	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
Aceite destilado por volumen de emulsión, %	-	-	-	-	-	-	1	7	-	-	-	-
Ensayes al residuo de la destilación:												
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	100	200	100	200	40	90	200	-	100	200	40	90
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min , cm	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en Tricloroetileno, %	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-
Ensaye de Flotación a 60°C, s	1.200	-	1.200	-	1.200	-	1.200	-	-	-	-	-
Ensaye de la Mancha:												
Heptano/Xilol, % Xilol	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30	-	30

(1) El requerimiento de estos ensayes sobre muestras representativas puede omitirse si el material se está aplicando con buenos resultados en la obra.

2. Requerimientos para emulsiones asfálticas catiónicas.

Tipo Grado	Quiebre Rápido				Quiebre Medio				Quiebre Lento			
	CRS-1		CRS-2		CMS-2		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Ensayes a la emulsión:												
Viscosidad, Saybolt Furol a 25°C, SFs.									20	100	20	100
Viscosidad, Saybolt Furol a 50°C, SFs.	20	100	100	400	50	450	50	450				
Ensaye de estabilidad en almacenamiento 24 h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Demulsibilidad, 35 ml, 0,8% dioctylsulfosuccinato de sodio, %	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Capacidad de cubrimiento y resistencia al agua:												
-Cubrimiento, agregado seco					Bueno		Bueno					
-Cubrimiento, después de esparcido					Regular		Regular					
-Cubrimiento, agregado húmedo					Regular		Regular					
-Cubrimiento, después de esparcido					Regular		Regular					
Ensaye de carga de partícula	Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva		Positiva	
Ensaye de tamizado, % (1)	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10	-	0,10
Ensaye de mezcla con Cemento , %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-	2,0
Destilación:												
- Aceite destilado por volumen de emulsión , %	-	3	-	3	-	12	-	12	-	-	-	-
- Residuo , %	60	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
Ensayes al residuo de la destilación:												
- Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
- Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Solubilidad en Tricloroetileno, %	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-	97,5	-
Ensaye de la Mancha:												
Heptano/Xilol , % Xilol		30		30		30		30		30		30

(1) El requerimiento de estos ensayes sobre muestras representativas puede omitirse si el material se está aplicando con buenos resultados en la obra.

D. Certificado emulsión CRS-2 utilizada en ensayes.

QUIMICA LATINOAMERICANA

CERTIFICADOS ISO 9001 : 2008

DOC. Nº	
GUIA Nº	

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

Fecha	22-sep-2016
Cliente	-
Destino	-
Toneladas / Nº Tambores	-
Estanque	E-2
Fecha V°B°	-
Hora Vº Bº	-
Chofer	-
Patente	-

ANALISIS	RESULTADO	ESPECIFICACION		METODO
		Mín.	Máx.	Manual de Carreteras (MC)
Viscosidad SFs a 50°C, (s)	210	100	400	MC 8.302.12
Estabilidad en Almacenamiento, 24 hrs, (%)	0,20		1	MC 8.302.5
Demulsibilidad, (%)	95,6	40		MC 8.302.5
Carga de Partícula	Positiva	POSITIVA		MC 8.302.5
Tamizado, (%)	0,01		0,1	MC 8.302.5
DESTILACION				
Residuo, (%)	65,4	65		MC 8.302.5
Aceite, (%)	0,25		3	MC 8.302.5
EN EL RESIDUO				
Penetración a 25°C, 100g, 5s., (1/10 mm.)	108	100	250	MC 8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min., (cm.)	73,0	40		MC 8.302.8
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	+97,5	97,5		MC 8.302.11
Ensaye de la Mancha, (% Xilol)	-30		30	MC 8.302.7

ANA MARIA CORTES G.
QUIMICO LABORATORISTA

www.quimicalatinoamericana.cl
Gerencia: Magdalena Nº 265, Las Condes - Santiago, Fono/Fax: (56)(2)2335588- E-mail: ventas@qlsa.cl
Planta Viña del Mar: Limache esq. Calle 5 Nº15 - El Salto, Fono/Fax: (56)(32)2672695
Planta Talcahuano: Camino Lenga Nº3341- Talcahuano, Fono/Fax: (56)(41)2414049

E. Evaluación Ambiental de la Escoria de Cobre

1. Contenido escoria año 2015

Id.Muestra	Cu	Ag	Au	As	SiO2	Al2O3	S	Fe	Fe3O4
01 al 07 EHE Enero	1,18	24	0,6	0,05	26,6	3,91	0,3	33,7	4,64
08 al 14 Enero EHE	1,08	3	ND	0,05	26,3	4,56	0,3	32,9	6,02
15 al 21 Enero EHE	1	3	ND	0,08			0,3	39,3	5,62
22 al 31 Enero EHE	1,11	3	ND	0,04			0,4	40,2	6,01
01 al 07 Febrero EHE	1,27	3	ND	0,05	0	0	0,3	38,5	5,57
08 AL 14 EHE 2015	1,1	3	ND	0,05	0	0	0,3	38,6	4,38
15 al 21 Feb EHE	1	3	ND	0,05	0	0	0,3	38,9	3,79
22 al 28 Febrero EHE	1,1	3	ND	0,05	0	0	0,4	38,2	4,02
01 al 07 Marzo EHE	0,98	3	ND	0,06	28,7	4,35	0,3	33,5	4,14
08 al 14 Marzo EHE	1,42	3	ND	0,05	30,7	3,64	0,3	39,5	4,51
15 al 21 Marzo EHE	0,92	3	ND	0,06	26,5	4,07	0,3	32,9	4,31
22 al 31 Marzo E HE	1,22	3	ND	0,07	29,8	4,49	0,3	37,4	4,46
01 al 07 Abril E HE	1,15	3	ND	0,08	28,8	4,12	0,3	37,1	5,51
08 al 14 Abril E HE	1,02	3	ND	0,07	28,8	3,86	0,4	33,3	4,32
15 al 21 Abril EHE	1,11	3	ND	0,05	32,4	4,27	0,3	41,7	5,42
22 al 30 Abril EHE	1,3	3	ND	0,08	28,8	3,32	0,2	39,7	5,15
01 al 07 Mayo EHE	1,25	3	ND	0,07	32	4,69	0,3	38,6	4,61
08 al 14 Mayo EHE	1,48	3	ND	0,06	28,2	3,69	0,2	37,5	4,58
15 al 21 Mayo EHE	1,29	3	ND	0,06	29,5	4,06	0,3	36,8	4,72
22 al 31 Mayo EHE	1,02	3	ND	0,04	29	3,88	0,4	39,5	4,97
01 al 07 Junio EHE	0,84	3	ND	0,05	27,7	4,08	0,5	37,3	4,95
08 al 14 Junio EHE	0,86	3	ND	0,04	27,8	4,36	0,4	37,1	4,35
15 al 21 Junio EHE	0,88	3	ND	0,06	31,3	5,01	0,4	41,3	4,27
22 al 30 Junio EHE	1,01	3	ND	0,04	30,7	5,12	0,3	40,3	6,83
01 al 07 Julio EHE	0,8	3	ND	0,03	28	3,85	0,6	39,5	6,29
08 al 14 Julio EHE	0,82	3	ND	0,03	27,5	4,98	0,7	44,9	6,88
15 al 21 Julio EHE	0,78	3	ND	0,03	31,4	5,93	0,8	52,3	7,17
22 al 31 Julio EHE	0,8	3	ND	0,04	24,4	4,87	1	43,2	8,33
01 AL 07 EHE AGOSTO	0,8	3	ND	0,04	27,6	4,33	0,7	40,6	8,22
08 al 14 Agosto EHE	0,75	3	ND	0,03	20,1	3,84	0,7	33,8	7,85
15 AL 21 AGOSTO EHE	0,88	3	ND	0,04	23,9	4,39	0,7	38,4	9,93
22 al 31 Agosto EHE	0,84	2	ND	0,03	27,5	4,58	0,7	41,4	0,87
01 AL 07 SEPT EHE	0,82	3	ND	0,03	26,2	5,09	0,7	45	8,78
08 al 14 Sept EHE	0,76	4	ND	0,03	24,9	4,24	1	37	6,08
15 al 21 Sep EHE	0,89	3	ND	0,04	25,5	4,37	0,9	40,2	7,73
22 al 30 Sep EHE	0,8	4	ND	0,04	27	4,21	0,8	40	6,42
01 AL 07 EHE OCT2015	0,92	3	ND	0,05	25,5	4,36	0,8	42,7	9,87

22 AL 31 OCT EHE	2,3	3	ND	0,06	31,6	4,27	0,8	42,4	16,9
01 al 07 Nov EHE	1,24	3	ND	0,05	31,3	5,09	0,3	42,1	8,49
08 al 14 Nov EHE	1,21	3	ND	0,03	24,4	4,35	0,3	37	8,97
15 al 21 Nov EHE	1,5	3	ND	0,04	31,2	4,82	0,3	39,4	8,34
22 al 30 Nov EHE	1,19	3	ND	0,04	30,7	4,86	0,3	42,1	7,42
01 al 07 Dic EHE	1,13	3	ND	0,03	24,6	3,97	0,3	32,2	6,22
08 al 14 Dic EHE	1,25	4	ND	1,25	30,5	4,79	0,3	41,8	6,44
15 al 21 Dic EHE	1,3	3	ND	0,03	28	4,19	0,3	35,7	5,3
22 al 31 Dic EHE	1,08	3	ND	0,03	30,5	4,72	0,3	40,9	6,49

2. Contenido escoria año 2016

Id.Muestra	Cu	Ag	Au	As	SiO2	Al2O3	S	Fe	Fe3O4
01 al 07 Enero EHE	1,16	4	ND	0,04	31,5	4,38	0,3	40	7,12
08 al 14 Enero EHE	1	3	ND	0,03	18,2	3,1	0,4	29,9	6,11
15 al 21 EHE Enero	1,07	3	ND	0,05	37,8	5,5	0,3	48	6,64
22 al 31 Enero EHE	1,02	3	ND	0,06	26,5	3,83	0,3	36,4	8,03
01 al 07 Febre EHE	1,26	3	ND	0,06	29,5	3,92	0,3	39,8	9,64
08 al 14 Febrero EHE	1,16	3	ND	0,03	24	3,5	0,3	30	6,72
15 al 21 Febrer EHE	1,08	3	ND	0,03	25,6	3,7	0,4	37,3	10,9
22 al 29 Febrero EHE	1,12	3	ND	0,05	41	5,82	0,4	42	7,71
01 al 07 Marzo EHE	0,86	3	ND	0,04	31,9	4,1	0,4	41,2	6,74
08 al 14 Marzo EHE	0,95	3	ND	0,05	32,3	4,43	0,4	44,8	6,8
15 al 21 Marzo EHE	1	3	ND	0,03	33,1	5,2	0,5	44,5	9,71
22 al 31 Marzo EHE	1,05	3	ND	0,04	30,9	4,98	0,4	41,6	7,44
01 al 07 Abril EHE	0,97	3	ND	0,03	38,2	6,98	0,6	44	10,4
08 AL 14 ABRIL EHE	0,88	3	ND	0,02	28,5	5,03	0,5	43,2	7,9
15 al 21 Abril EHE	1,05	3	ND	0,03	27,5	4,78	0,4	37,2	9,43
22 AL 30 Abril EHE	1,04	3	ND	0,03	23,6	3,63	0,4	31,2	13,82
01 AL 07 MAYO EHE	1,08	3	ND	0,04	28,5	4,79	0,3	37,4	6,76
08 al 14 Mayo EHE	1,02	3	ND	0,04	29,2	4,78	0,3	37	7,24
15 al 21 Mayo EHE	1,24	3	ND	0,03	24,2	4,2	0,3	38	6,3
22 al 31 Mayo EHE	0,9	3	ND	0,02	28,5	4,73	0,5	40,1	6,69

3. Resultados de Fluorescencia de Rayos X

Muestra	INICIO	FINAL	Max	Área Neta	Área Total	Centroide (N)	Incertidumbre
1	2.10	2.47	0.000	**77**	94	**2.29**	13.68
	2.79	3.09	0.169	**430**	553	**2.94**	6.06
Neta Total	3.11	3.44	0.104	**179**	336	**3.29**	12.45
85379	3.51	3.86	0.159	**498**	610	**3.66**	5.40
	4.24	5.23	0.199	**781**	1080	**4.65**	4.75
	5.59	5.76	0.000	**50**	148	**5.67**	31.37
	5.84	6.01	0.000	**71**	232	**5.91**	27.92
	6.13	6.70	0.174	**68069**	69239	**6.40**	0.39
	6.80	7.27	0.183	**10446**	11275	**7.05**	1.05
	7.87	8.29	0.170	**1361**	1570	**8.05**	3.10
	8.42	9.05	0.190	**1793**	2010	**8.68**	2.63
	9.42	9.84	0.228	**263**	415	**9.59**	9.05
	10.43	10.70	0.000	**169**	265	**10.54**	11.24
	12.43	12.89	0.163	**207**	333	**12.66**	10.35
	17.10	17.75	0.277	**543**	723	**17.43**	5.53
	19.01	20.10	0.124	**442**	624	**19.58**	6.42

Muestra	INICIO	FINAL	Max	Área Neta	Área Total	Centroide (N)	Incertidumbre
2	2.81	3.04	0.104	**371**	561	**2.93**	7.39
	3.06	3.36	0.000	**74**	197	**3.21**	24.36
Neta Total	3.55	3.80	0.000	**64**	91	**3.67**	17.14
11943	4.39	4.64	0.000	**55**	77	**4.53**	18.09
	6.15	6.64	0.175	**8865**	9085	**6.40**	1.09
	6.87	7.24	0.185	**1404**	1557	**7.05**	2.95
	7.83	8.19	0.133	**137**	185	**8.04**	11.14
	8.48	8.86	0.147	**260**	302	**8.65**	7.15
	9.25	9.65	0.000	**94**	112	**9.48**	12.13
	10.45	10.72	0.000	**54**	78	**10.56**	18.70
	12.53	12.84	0.000	**65**	107	**12.69**	18.78
	15.07	15.44	0.000	**58**	109	**15.27**	21.81
	17.12	17.70	0.250	**316**	424	**17.45**	7.30
	19.48	19.75	0.000	**74**	128	**19.62**	18.23
	20.29	20.54	0.000	**52**	90	**20.40**	22.01

Muestra	INICIO	FINAL	Max	Área Neta	Área Total	Centroide (N)	Incertidumbre
3	2.50	2.69	0.000	**67**	91	**2.60**	16.01
	2.75	3.09	0.145	**476**	588	**2.94**	5.57
	3.11	3.44	0.040	**149**	359	**3.27**	16.01
	5.31	5.55	0.000	**54**	169	**5.41**	31.21
Neta Total	3.49	3.86	0.163	**576**	703	**3.68**	5.01
69995	4.37	4.73	0.222	**444**	580	**4.55**	6.03
	5.78	6.05	0.150	**177**	423	**5.92**	14.61
	6.07	6.70	0.176	**53981**	54836	**6.40**	0.44
	6.74	7.29	0.179	**8523**	9160	**7.05**	1.16
	7.81	8.29	0.172	**2380**	2501	**8.05**	2.15
	8.48	9.09	0.159	**901**	1349	**8.73**	4.70
	9.38	9.71	0.108	**173**	270	**9.56**	11.11
	10.28	10.82	0.144	**381**	518	**10.56**	6.73
	11.51	12.07	0.073	**160**	251	**11.81**	11.56
	12.47	12.87	0.090	**173**	299	**12.65**	11.92
	13.99	14.36	0.058	**110**	203	**14.18**	15.73
	15.59	15.76	0.000	**61**	99	**15.68**	19.38
	17.12	17.68	0.230	**875**	1070	**17.43**	4.06
	19.34	19.75	0.065	**171**	313	**19.57**	12.52
	21.80	22.41	0.188	**163**	279	**22.13**	12.19

Muestra	INICIO	FINAL	Max	Área Neta	Área Total	Centroide (N)	Incertidumbre
4	2.79	3.11	0.154	**514**	640	**2.93**	5.38
	3.11	3.34	0.000	**54**	174	**3.21**	31.75
	3.49	3.82	0.152	**262**	337	**3.67**	7.75
Neta Total	3.86	4.18	0.000	**91**	112	**4.01**	12.67
44095	4.35	4.60	0.000	**61**	187	**4.48**	29.27
	5.29	5.65	0.000	**65**	169	**5.46**	25.42
	5.71	5.92	0.000	**64**	158	**5.84**	25.02
	6.03	6.74	0.176	**34274**	34802	**6.40**	0.55
	6.78	7.29	0.185	**5391**	5793	**7.05**	1.46
	7.77	8.29	0.196	**1954**	2038	**8.04**	2.36
	8.46	8.77	0.141	**478**	765	**8.64**	6.79
	8.82	9.07	0.033	**141**	344	**8.92**	16.65
	9.42	9.71	0.113	**129**	174	**9.59**	11.53
	10.36	10.80	0.053	**155**	265	**10.57**	12.49
	12.43	12.84	0.141	**169**	264	**12.62**	11.21
	13.82	14.24	0.000	**87**	191	**14.04**	19.87
	15.82	16.15	0.000	**95**	162	**15.99**	16.03
	17.19	17.60	0.073	**111**	301	**17.46**	19.96

Muestra	INICIO	FINAL	Max	Área Neta	Área Total	Centroide (N)	Incertidumbre
	2.14	2.47	0.000	**72**	109	**2.29**	16.93
5	2.77	3.09	0.128	**738**	1081	**2.93**	5.11
	3.11	3.38	0.141	**325**	619	**3.26**	9.30
Neta Total	3.53	3.86	0.152	**1107**	1362	**3.68**	3.63
166928	4.35	4.77	0.214	**838**	1360	**4.53**	5.18
	5.27	5.59	0.082	**298**	655	**5.41**	10.68
	5.84	5.97	0.000	**54**	331	**5.90**	46.11
	6.05	6.70	0.178	**135338**	137318	**6.40**	0.28
	6.78	7.29	0.181	**20951**	22503	**7.05**	0.74
	7.77	8.27	0.180	**2682**	2992	**8.04**	2.14
	8.44	8.88	0.182	**2449**	3119	**8.64**	2.51
	9.44	9.74	0.138	**315**	575	**9.59**	9.17
	10.38	10.65	0.150	**243**	441	**10.54**	10.40
	12.51	12.76	0.107	**133**	380	**12.62**	18.91
	14.05	14.26	0.037	**110**	222	**14.16**	16.70
	15.63	15.92	0.030	**108**	309	**15.80**	21.02
	17.12	17.70	0.230	**1060**	1519	**17.43**	4.20
	19.44	19.73	0.051	**107**	380	**19.61**	23.88

4. Energía liberada según tipo de elemento

X-Ray Data Booklet Table 1-2. *Photon energies, in electron volts, of principal K-, L-, and M-shell emission lines.*

Element	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\alpha_2$	$L\beta_1$	$L\beta_2$	$L\gamma_1$	$M\alpha_1$
3 Li	54.3								
4 Be	108.5								
5 B	183.3								
6 C	277								
7 N	392.4								
8 O	524.9								
9 F	676.8								
10 Ne	848.6	848.6							
11 Na	1,040.98	1,040.98	1,071.1						
12 Mg	1,253.60	1,253.60	1,302.2						
13 Al	1,486.70	1,486.27	1,557.45						
14 Si	1,739.98	1,739.38	1,835.94						
15 P	2,013.7	2,012.7	2,139.1						
16 S	2,307.84	2,306.64	2,464.04						
17 Cl	2,622.39	2,620.78	2,815.6						
18 Ar	2,957.70	2,955.63	3,190.5						
19 K	3,313.8	3,311.1	3,589.6						
20 Ca	3,691.68	3,688.09	4,012.7	341.3	341.3	344.9			
21 Sc	4,090.6	4,086.1	4,460.5	395.4	395.4	399.6			

Table 1-2. *Energies of x-ray emission lines (continued).*

Element	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\alpha_2$	$L\beta_1$	$L\beta_2$	$L\gamma_1$	$M\alpha_1$
22 Ti	4,510.84	4,504.86	4,931.81	452.2	452.2	458.4			
23 V	4,952.20	4,944.64	5,427.29	511.3	511.3	519.2			
24 Cr	5,414.72	5,405.509	5,946.71	572.8	572.8	582.8			
25 Mn	5,898.75	5,887.65	6,490.45	637.4	637.4	648.8			
26 Fe	6,403.84	6,390.84	7,057.98	705.0	705.0	718.5			
27 Co	6,930.32	6,915.30	7,649.43	776.2	776.2	791.4			
28 Ni	7,478.15	7,460.89	8,264.66	851.5	851.5	868.8			
29 Cu	8,047.78	8,027.83	8,905.29	929.7	929.7	949.8			
30 Zn	8,638.86	8,615.78	9,572.0	1,011.7	1,011.7	1,034.7			
31 Ga	9,251.74	9,224.82	10,264.2	1,097.92	1,097.92	1,124.8			
32 Ge	9,886.42	9,855.32	10,982.1	1,188.00	1,188.00	1,218.5			
33 As	10,543.72	10,507.99	11,726.2	1,282.0	1,282.0	1,317.0			
34 Se	11,222.4	11,181.4	12,495.9	1,379.10	1,379.10	1,419.23			
35 Br	11,924.2	11,877.6	13,291.4	1,480.43	1,480.43	1,525.90			
36 Kr	12,649	12,598	14,112	1,586.0	1,586.0	1,636.6			
37 Rb	13,395.3	13,335.8	14,961.3	1,694.13	1,692.56	1,752.17			
38 Sr	14,165	14,097.9	15,835.7	1,806.56	1,804.74	1,871.72			
39 Y	14,958.4	14,882.9	16,737.8	1,922.56	1,920.47	1,995.84			
40 Zr	15,775.1	15,690.9	17,667.8	2,042.36	2,039.9	2,124.4	2,219.4	2,302.7	

41 Nb	16,615.1	16,521.0	18,622.5	2,165.89	2,163.0	2,257.4	2,367.0	2,461.8	
42 Mo	17,479.34	17,374.3	19,608.3	2,293.16	2,289.85	2,394.81	2,518.3	2,623.5	
43 Tc	18,367.1	18,250.8	20,619	2,424	2,420	2,538	2,674	2,792	
44 Ru	19,279.2	19,150.4	21,656.8	2,558.55	2,554.31	2,683.23	2,836.0	2,964.5	
45 Rh	20,216.1	20,073.7	22,723.6	2,696.74	2,692.05	2,834.41	3,001.3	3,143.8	
46 Pd	21,177.1	21,020.1	23,818.7	2,838.61	2,833.29	2,990.22	3,171.79	3,328.7	
47 Ag	22,162.92	21,990.3	24,942.4	2,984.31	2,978.21	3,150.94	3,347.81	3,519.59	
48 Cd	23,173.6	22,984.1	26,095.5	3,133.73	3,126.91	3,316.57	3,528.12	3,716.86	
49 In	24,209.7	24,002.0	27,275.9	3,286.94	3,279.29	3,487.21	3,713.81	3,920.81	
50 Sn	25,271.3	25,044.0	28,486.0	3,443.98	3,435.42	3,662.80	3,904.86	4,131.12	
51 Sb	26,359.1	26,110.8	29,725.6	3,604.72	3,595.32	3,843.57	4,100.78	4,347.79	
52 Te	27,472.3	27,201.7	30,995.7	3,769.33	3,758.8	4,029.58	4,301.7	4,570.9	
53 I	28,612.0	28,317.2	32,294.7	3,937.65	3,926.04	4,220.72	4,507.5	4,800.9	
54 Xe	29,779	29,458	33,624	4,109.9	—	—	—	—	
55 Cs	30,972.8	30,625.1	34,986.9	4,286.5	4,272.2	4,619.8	4,935.9	5,280.4	
56 Ba	32,193.6	31,817.1	36,378.2	4,466.26	4,450.90	4,827.53	5,156.5	5,531.1	
57 La	33,441.8	33,034.1	37,801.0	4,650.97	4,634.23	5,042.1	5,383.5	5,788.5	833
58 Ce	34,719.7	34,278.9	39,257.3	4,840.2	4,823.0	5,262.2	5,613.4	6,052	883
59 Pr	36,026.3	35,550.2	40,748.2	5,033.7	5,013.5	5,488.9	5,850	6,322.1	929
60 Nd	37,361.0	36,847.4	42,271.3	5,230.4	5,207.7	5,721.6	6,089.4	6,602.1	978
61 Pm	38,724.7	38,171.2	43,826	5,432.5	5,407.8	5,961	6,339	6,892	—
62 Sm	40,118.1	39,522.4	45,413	5,636.1	5,609.0	6,205.1	6,586	7,178	1,081

Table 1-2. *Energies of x-ray emission lines (continued).*

Element	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\alpha_2$	$L\beta_1$	$L\beta_2$	$L\gamma_1$	$M\alpha_1$
63 Eu	41,542.2	40,901.9	47,037.9	5,845.7	5,816.6	6,456.4	6,843.2	7,480.3	1,131
64 Gd	42,996.2	42,308.9	48,697	6,057.2	6,025.0	6,713.2	7,102.8	7,785.8	1,185
65 Tb	44,481.6	43,744.1	50,382	6,272.8	6,238.0	6,978	7,366.7	8,102	1,240
66 Dy	45,998.4	45,207.8	52,119	6,495.2	6,457.7	7,247.7	7,635.7	8,418.8	1,293
67 Ho	47,546.7	46,699.7	53,877	6,719.8	6,679.5	7,525.3	7,911	8,747	1,348
68 Er	49,127.7	48,221.1	55,681	6,948.7	6,905.0	7,810.9	8,189.0	9,089	1,406
69 Tm	50,741.6	49,772.6	57,517	7,179.9	7,133.1	8,101	8,468	9,426	1,462
70 Yb	52,388.9	51,354.0	59,370	7,415.6	7,367.3	8,401.8	8,758.8	9,780.1	1,521.4
71 Lu	54,069.8	52,965.0	61,283	7,655.5	7,604.9	8,709.0	9,048.9	10,143.4	1,581.3
72 Hf	55,790.2	54,611.4	63,234	7,899.0	7,844.6	9,022.7	9,347.3	10,515.8	1,644.6
73 Ta	57,532	56,277	65,223	8,146.1	8,087.9	9,343.1	9,651.8	10,895.2	1,710
74 W	59,318.24	57,981.7	67,244.3	8,397.6	8,335.2	9,672.35	9,961.5	11,285.9	1,775.4
75 Re	61,140.3	59,717.9	69,310	8,652.5	8,586.2	10,010.0	10,275.2	11,685.4	1,842.5
76 Os	63,000.5	61,486.7	71,413	8,911.7	8,841.0	10,355.3	10,598.5	12,095.3	1,910.2
77 Ir	64,895.6	63,286.7	73,560.8	9,175.1	9,099.5	10,708.3	10,920.3	12,512.6	1,979.9
78 Pt	66,832	65,112	75,748	9,442.3	9,361.8	11,070.7	11,250.5	12,942.0	2,050.5
79 Au	68,803.7	66,989.5	77,984	9,713.3	9,628.0	11,442.3	11,584.7	13,381.7	2,122.9
80 Hg	70,819	68,895	80,253	9,988.8	9,897.6	11,822.6	11,924.1	13,830.1	2,195.3
81 Tl	72,871.5	70,831.9	82,576	10,268.5	10,172.8	12,213.3	12,271.5	14,291.5	2,270.6
82 Pb	74,969.4	72,804.2	84,936	10,551.5	10,449.5	12,613.7	12,622.6	14,764.4	2,345.5
83 Bi	77,107.9	74,814.8	87,343	10,838.8	10,730.91	13,023.5	12,979.9	15,247.7	2,422.6
84 Po	79,290	76,862	89,800	11,130.8	11,015.8	13,447	13,340.4	15,744	—
85 At	81,520	78,950	92,300	11,426.8	11,304.8	13,876	—	16,251	—
86 Rn	83,780	81,070	94,870	11,727.0	11,597.9	14,316	—	16,770	—
87 Fr	86,100	83,230	97,470	12,031.3	11,895.0	14,770	14,450	17,303	—
88 Ra	88,470	85,430	100,130	12,339.7	12,196.2	15,235.8	14,841.4	17,849	—
89 Ac	90,884	87,670	102,850	12,652.0	12,500.8	15,713	—	18,408	—
90 Th	93,350	89,953	105,609	12,968.7	12,809.6	16,202.2	15,623.7	18,982.5	2,996.1
91 Pa	95,868	92,287	108,427	13,290.7	13,122.2	16,702	16,024	19,568	3,082.3
92 U	98,439	94,665	111,300	13,614.7	13,438.8	17,220.0	16,428.3	20,167.1	3,170.8
93 Np	—	—	—	13,944.1	13,759.7	17,750.2	16,840.0	20,784.8	—
94 Pu	—	—	—	14,278.6	14,084.2	18,293.7	17,255.3	21,417.3	—
95 Am	—	—	—	14,617.2	14,411.9	18,852.0	17,676.5	22,065.2	—

5. Resultados Toxicidad por Lixiviación

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental

INFORME DE ANÁLISIS
N° QUI-189-16

Fecha emisión:
20.12.2016

Información del cliente	
Nombre de la empresa	Departamento de Obras Civiles. U.T.F.S.M.
Solicitante	Profesor Rodrigo Delgadillo S.; Yaichi Pérez.
Dirección	Avenida España 1680. Edificio C.

Información del análisis y muestra		
Análisis solicitado	Arsénico, Selenio, Antimonio, Plomo, Cadmio, Níquel.	
Tipo de muestra	Sólida	
Identificación muestra	Escoria de Cobre	CI 577
Fecha de recepción	2 de diciembre de 2016	
Método utilizado	Para todos los analitos la extracción se llevó a cabo a un pH = 4,2; según indica la Norma NCh 2746-2002, para residuos mineros. La medición se realizó en las condiciones indicadas para cada analito. **Arsénico**: Nch2313/9. Absorción Atómica con generación de hidruro	
	Selenio: Nch2313/3. Absorción Atómica con generación de hidruro	
	Antimonio: Absorción Atómica con generación de hidruro.	
	Plomo, Cadmio, Níquel:. Absorción Atómica.	
Muestreado por	Yaichi Pérez	

RESULTADOS

Código interno	Elemento	[mg / Kg de muestra]	[mg / L de lixiviado]	Concentración máxima permisible (CMP); según D.S.148 [mg / l]
CI 577	Arsénico	< 0,05	< 0,0013	5
	Selenio	< 0,08	< 0,002	1
	Antimonio	< 0,05	< 0,0013	No informado
	Plomo	< 4	< 0,1	5
	Cadmio	< 1,6	< 0,04	1
	Níquel	< 8	< 0,2	No informado

Fin del documento

Isabel Jiménez C.
Químico analista

María Elena Ortiz
Jefe de Laboratorio

Av. España 1680, Valparaíso
www.labqi.cl
servicios.analiticos@usm.cl
32 2 654219

QUI-189-16
Versión 01

Los resultados entregados en este Informe solo se refieren a los ítemes ensayados.
Este Informe no debe ser reproducido parcial o totalmente sin la aprobación escrita de este Laboratorio.

Página 1 de 1

6. Concentraciones máximas permisibles según Test de Lixiviación.

Tabla 59: Concentraciones máximas de sustancias permisibles

CÓDIGO RP	Nº CAS	SUSTANCIA	CMP (mg/l)
D004	7440-38-2	Arsénico	5
D007	7440-47-3	Cromo	5
D009	7439-97-6	Mercurio	0,2
D008	7439-92-1	Plomo	5
D010	7782-49-2	Selenio	1
D005	7440-39-2	Bario	100
D018	71-43-2	Benceno	0,5
D006	7440-43-9	Cadmio	1
D019	56-23-5	Tetracloruro de carbono	0,5
D020	57-74-9	Clordano	0,03
D021	108-90-7	Clorobenceno	100
D022	67-66-3	Cloroformo	6
D023	95-48-7	o-Cresol (*)	200
D024	108-39-4	m-Cresol (*)	200
D025	106-44-5	p-Cresol (*)	200
D026	----------	Cresol (*)	200
D016	94-75-7	2,4-D	10
D027	106-46-7	1,4 Diclorobenceno	7,5
D028	107-06-2	1,2 Dicloroetano	0,5
D029	75-35-4	1,1 Dicloroetileno	0,7
D030	121-14-2	2,4 Dinitrotolueno	0,13
D012	72-20-8	Endrin	0,02
D031	76-44-8	Heptacloro (y su epóxido)	0

CÓDIGO RP	Nº CAS	SUSTANCIA	CMP (mg/l)
D032	118-74-1	Hexaclorobenceno	0,13
D033	87-68-3	Hexacloro-1,3-butadieno	0,5
D034	67-72-1	Hexacloroetano	3
D013	58-89-9	Lindano	0,4
D014	72-43-5	Metoxicloro	10
D035	78-93-3	Metiletilcetona	200
D036	98-95-3	Nitrobenceno	2
D037	87-86-5	Pentaclorofenol	100
D038	110-86-1	Piridina	5
D011	7440-22-4	Plata	5
D039	127-18-4	Tetraclroetileno	0,7
D015	8001-35-2	Toxafeno	0,5
D040	49-01-6	Tricloroetileno	0,5
D041	95-95-4	2,4,5-Triclorofenol	400
D042	88-06-2	2,4,6-Triclorofenol	2
D017	93-72-1	2,4,6,-TP(silvex)	1
D043	75-01-4	Cloruro de vinilo	0,2

(*) La suma de las concentraciones de los isómeros (o-Cresol, m-Cresol y p-Cresol) debe ser inferior a la CMP establecida para el Cresol.

F. Registro fotográfico

1. Zona de acopio CODELCO Ventanas

Fotografía N° 1

Fotografía N° 2

Fotografía N° 3

Fotografía N° 4

Fotografía N° 5

Fotografía N° 6

2. Resultado de exudación para granulometría Río Aconcagua

Fotografía N° 7

Fotografía N° 8

Fotografía N° 9

Fotografía N° 10

Fotografía N° 11

Fotografía N° 12

3. Resultado de exudación para granulometría Estero La Patagua

Fotografía N° 13

Fotografía N° 14

Fotografía N° 15

Fotografía N° 16

Fotografía N° 17

Fotografía N° 18

4. Zonas de muestreo para Fluorescencia de Rayos X

Fotografía N° 19: Punto M1 de muestreo

Fotografía N° 20: Punto M2 de muestreo

Fotografía N° 21: Punto M3 de muestreo

Fotografía N° 22: Punto M4 de muestreo

Fotografía N° 23: Punto M5 de muestreo