

Escoria de Cobre como Agregado Pétreo en una Solución Sustentable de
Rodadura de Caminos Básicos
Copper Slag as Aggregate in a Sustainable Solution for Basic Road Pavements

INFORMACIÓN
DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido
14-11-2023
Aceptado
16-04-2024
Publicado
25-04-2024

Palabras Clave:
Escoria
Tratamientos
Superficiales
Sustentabilidad

Article history:

Received
14-11-2023
Accepted
16-04-2024
Available
25-04-2024

Keywords:
Copper slag
Surface
Treatments
Sustainability

Guillermo Brante Lara^{1,2,3,*}

¹Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
²Ministerio de Obras Públicas, Valparaíso, Chile.
³Universidad Viña del Mar, Viña del Mar, Chile.

Resumen

La escoria de cobre es uno de los principales residuos obtenidos del proceso pirometalúrgico aplicado a los concentrados de cobre. Este desecho industrial es considerado un pasivo ambiental, generalmente permanece acopiado ocupando grandes extensiones de superficie de terreno y no brindando un uso práctico. Utilizar este desecho como árido permitiría la disminución de explotación de empréstitos naturales cada vez más escasos y disminuir el impacto ambiental que provocan los acopios de él. El principal objetivo es estudiar la factibilidad del uso de la escoria de cobre como reemplazo total del agregado pétreo utilizado en tratamientos superficiales asfálticos simples. Solución habitual de rodadura de caminos básicos de la región de Valparaíso. Se evalúa las propiedades físicas de la escoria de cobre según los requisitos indicados en la normativa nacional, luego se compara sus propiedades con áridos habitualmente usados en esta tarea en la región de Valparaíso, Chile. Del análisis de resultados se verifica que la escoria de cobre cumple con todos los requisitos establecidos por el Manual de Carreteras de Chile para ser utilizado como árido en Tratamientos Superficiales asfálticos. Este residuo presenta propiedades singulares como una alta cubicidad, baja absorción y alta densidad neta e incluso una mejor adherencia con el ligante que los áridos tradicionales, lo que permitiría obtener una mejor trabazón con la base granular. Como conclusión es posible asegurar que es factible utilizar la escoria como árido para materializar tratamientos superficiales asfálticos, además su uso entrega una alternativa sustentable a la construcción de caminos de bajo tráfico.

Abstract

Copper slag is one of the main residues obtained from the pyrometallurgical process applied to copper concentrates. This industrial waste is considered an environmental liability, typically remaining stockpiled, occupying large areas of land without providing practical use. Using this waste as aggregate would allow for the reduction of exploitation of increasingly scarce natural borrow pits and decrease the environmental impact caused by its stockpiles. The main objective is to study the feasibility of using copper slag as a total replacement for the stone aggregate used in simple asphalt surface treatments, a common solution for basic road pavements in the Valparaíso region. The physical properties of copper slag are evaluated according to the requirements indicated in national regulations, and then its properties are compared with aggregates commonly used in this task in the Valparaíso region, Chile. From the analysis of results, it is verified that copper slag meets all the requirements established by the Chilean Highway Manual to be used as aggregate in asphalt surface treatments. This residue presents unique properties such as high cubicity, low absorption, high net density, and even better adhesion with the binder than traditional aggregates, allowing for better interlocking with the granular base. In conclusion, it is feasible to use slag as aggregate to materialize asphalt surface treatments, and its use provides a sustainable alternative for constructing low-traffic roads.

* Corresponding author at: Guillermo Brante Lara, Universidad de Valparaíso, General Cruz, Valparaíso, Chile.
E-mail address: guillermo.brante@uv.cl

RIOCI

Journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioci/index>

Vol. 12, no. 01, pp. 1–6, Abril 2024

1. Introducción.

1.1. Planteamiento del problema.

La red vial en Chile está constituida por más de 80 mil kilómetros de caminos, según el informe que elabora la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP). De estos trayectos, que incluyen vías principales, pistas regionales y provinciales, así como aquellos que son comunales o de acceso a un lugar específico, el 60%, es decir, 48.474,56 km, es de ripio o de tierra (Miranda, 2017) Estos caminos rurales de menor tránsito deben atenderse a través de obras menores de reperfilados, recebos de material granular o ripiaduras. Si bien estas obras pueden solucionar el problema de conectividad, suelen presentar problemas de contaminación, debido a la presencia de polvo excesivo liberado por la extracción de áridos, 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 tráfico. En el caso de la Región de Valparaíso, debido principalmente al tipo de clima existente, se presentan comúnmente soluciones de tipo tratamientos superficiales simples (TTS). Para la construcción de estos pavimentos es necesaria la utilización de áridos que se extraen de cauces naturales. Según los especialistas, y de acuerdo con cifras disponibles, se estima que la extracción de áridos asciende a 7 millones 500 mil metros cúbicos por año producidos, de los cuales cinco millones corresponden a gravas, gravilla y arenas, el resto se divide entre estabilizados (bases y subbases de pavimentos) y puzolanas (fabricación de cemento) (Trafilaf, 2015).

Las escorias de fundición constituyen uno de los principales desechos sólidos en las plantas de la industria del cobre, lo cual aumenta día a día. En Chile, por cada tonelada de cobre producido se generan alrededor 2,2 toneladas de escoria, y a nivel nacional se producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas por año de escoria, existiendo a la fecha una acumulación de decenas de millones de toneladas. Esta escoria se acumula en canchas colindantes a cada planta industrial, constituyéndose escoriales catalogados como pasivos ambientales, los cuales son potencialmente contaminantes si no son bien manejados. Esto genera la necesidad de poder encontrar usos alternativos a las escorias, de modo de reutilizar y dar un valor agregado a lo que se genera como subproducto de las fundiciones de cobre (Sepúlveda, 2006).

La investigación se centra en proponer la funcionalidad de la escoria de cobre de la fundición de Codelco Ventanas como árido, presentando una alternativa sustentable en el diseño de caminos básicos para la región de Valparaíso, solucionando a su vez el impacto ambiental y social que este genera.

1.2. Antecedentes generales.

1.2.1. 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 poseen una rentabilidad comercial y previa al vertido final, éstas 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.

Tabla 1. Principales características físicas de la escoria de cobre (Fuente: Sepúlveda 2006).

| 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 |

1.2.1.1. Análisis de toxicidad de la escoria de cobre de ventanas.

1.2.1.1.1. Análisis de la escoria según fluorescencia de rayos X.

Se realiza recolección de material de 5 zonas distintas del sector de botadero de Codelco Ventanas. Este muestreo consiste en la recolección de al menos 10 unidades de escoria de cobre que cumplan con las condiciones necesarias para ser ensayadas.

Como se puede observar en la Figura 1, se procura que los puntos de extracción se encuentren distanciados entre sí, de modo que así logren cubrir la mayor parte del sector.



Figura 1. Puntos de muestreo para análisis de fluorescencia por rayos X (Fuente: Elaboración propia).

Del espectro elaborado se logra identificar 14 elementos con claridad, de los cuales destaca por sobre los demás el Hierro, 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.

1.2.1.1.2. Evaluación de 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.

Tabla 2. Resultados obtenidos por Test TCLP, según Decreto 148 (Fuente: Elaboración propia).

| 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 | Sin Norma |
| Antimonio | - | < 0,0013 | Sin Norma |

Se puede observar en la Tabla 2 que todos los elementos presentan una Concentración Observada (CO) bajo los límites establecidos de Concentraciones Máximas Permisibles (CMP) por la norma. En el caso particular del arsénico, la norma establece una concentración lixiviada máxima de 5 [mg/l], mientras que el TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 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, 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.

Finalmente, esto permite concluir que la escoria de cobre de Ventanas no presenta riesgos para la salud humana, en particular para la utilización como árido en obras viales.

1.2.2. 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 con el 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) (Queirolo, 2009).

1.2.2.1. Áridos en tratamientos superficiales.

En los tratamientos superficiales asfálticos, las partículas de agregado se encuentran en contacto directo con las sollicitaciones 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.

Tabla 3. Requisitos de calidad en áridos para tratamientos superficiales (Fuente: Dirección de Vialidad 2022).

| 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 ensayos normalizados, 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.

La banda tradicionalmente utilizada para los tratamientos superficiales simples corresponde a la TN 10-2,5 (Dirección de Vialidad, 2022).

1.2.2.2. 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.

A nivel nacional las emulsiones más usadas son las catiónicas de quiebre rápido, también denominadas CRS-2, las cuales suelen cumplir a cabalidad los requisitos mencionados (Laboratorio Nacional de Vialidad, 2000). 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.

1.2.2.3. 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 (Quinteros, 2007).

Con todo esto;

¿Cómo es posible utilizar la Escoria de cobre de Ventanas para la materialización de caminos?

¿Qué beneficio ambiental provoca la utilización de la Escoria?

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la factibilidad de uso de la escoria de cobre como agregado pétreo de tratamientos superficiales simples, por medio de estudios de laboratorio comparativos con áridos tradicionales de la Región de Valparaíso, con el fin de ofrecer una alternativa de capa de rodadura para el diseño de caminos básicos solucionando el impacto ambiental que genera este árido de botadero.

En los siguientes capítulos se mostrará la forma en que se efectuó la recopilación de datos y desarrollo de ensayos de laboratorio, posteriormente se presentarán los resultados que permitan concluir respecto a esta proposición de árido sustentable.

2. Metodología.

2.1. Proyecto.

Se propone la Utilización de la Escoria de Cobre acopiada en los sectores aledaños al Humedal Campiche como áridos en el Mejoramiento y Construcción de Vialidades rurales (Caminos Básicos) que integren territorios descuidados, devolviendo identidad a sus habitantes. Este proyecto entrega una solución sustentable al problema de conectividad, al hacer uso de pasivos ambientales presentes en el sector de intervención junto con limpiar y posteriormente rehabilitar suelos reponiendo la biodiversidad de los recursos naturales debilitados.

2.2. Justificación del caso.

Al ocupar los desechos ambientales generados por Codelco Ventanas como árido de construcción de caminos se mejora la conectividad de localidades rurales olvidadas y se recupera suelo mediante el saneamiento y rehabilitación de éste. Finalmente, la utilización de pasivos ambientales entrega una solución de ingeniería sustentable con beneficio país al generar economía circular y disminución de la huella ecológica en la construcción de caminos.

2.3. Enfoque de la investigación.

Mediante la revisión y análisis de datos recopilados de estudios previos y ensayos de laboratorio se propondrá alternativa a implementar en la solución de rodadura de caminos básicos. Por consiguiente, el enfoque del trabajo será del tipo cuantitativo y bibliográfico.

2.4. Alcance de la investigación.

Se comenzará con una revisión de antecedentes que den validez a la proposición de intervención, por lo que es posible caracterizar el alcance como exploratorio. En esta etapa se identificará las propiedades físico químicas de la escoria de cobre mediante ensayos normalizados y se estudiará su posible aplicación como árido sustentable para la materialización de caminos del territorio. Posteriormente se evaluarán algunas propiedades de desempeño de este árido en Tratamientos superficiales.

Los áridos de escoria de cobre utilizados se obtendrán de centros de acopio de la refinera de cobre de Ventanas, región de Valparaíso, Chile.

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.

3. Análisis de resultados

3.1. Evaluación de la escoria como árido para tratamientos superficiales.

Se desarrolla 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.

3.1.1. Granulometría y banda de trabajo.

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 realiza de manera comparativa. Para lograr esto se trabaja con 2 agregados tradicionales de la zona, los que son obtenidos tanto del Río Aconcagua como del Estero La Patagua.

Se verifica 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 profundiza 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 internacionales.

En terreno se observa diversos tamaños de material, por lo que realizar una granulometría no resultaría del todo representativo para este caso. A demás, 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, por lo que en esta evaluación se eliminan los efectos producidos por posibles diferencias granulométricas. Para lograr esto, cada granulometría obtenida de los áridos tradicionales es reconstituida en escoria de cobre, logrando así una comparación más representativa respecto a las propiedades del árido.



Figura 2. Diferencias de tamaños en muestra extraída (Fuente: Elaboración propia)

3.1.2. Densidad real, neta y absorción de agua en pétreos gruesos.

La escoria de cobre posee valores muy altos de densidades y muy bajos de absorción. Se observa en la Tabla 4 que los valores de densidad real seca de la escoria de cobre están por sobre los 3800 [kg/m³], mientras que los valores de densidad del árido tradicional están por sobre los 2600 [kg/m³], 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 4. Densidad real, neta y absorción de agua en pétreos gruesos (Fuente: Elaboración propia).

| Primera Comparación | | | | |
|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|--|
| | | Estero La Patagua | Escoria de cobre | |
| D.R.S | kg/m ³ | 2646,8 | 3790,3 | |
| D.N | kg/m ³ | 2781,5 | 3821,3 | |
| ABSORCIÓN | % | 1,83 | 0,21 | |

| Segunda Comparación | | | | |
|---------------------|-------------------|---------------|------------------|--|
| | | Río Aconcagua | Escoria de cobre | |
| D.R.S | kg/m ³ | 2636,7 | 3831,9 | |
| D.N | kg/m ³ | 2710,6 | 3870,5 | |
| ABSORCIÓN | % | 1,03 | 0,26 | |

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.

3.1.3. Cubicidad de Partícula (Dirección de Vialidad, 2022). 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).

Tabla 5. Cubicidad de Partículas (Fuente: Elaboración propia).

| | Primera Comparación | | Segunda Comparación | |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| | Estero La Patagua | Escoria de cobre | Río Aconcagua | Escoria de cobre |
| 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 5, si bien el agregado tradicional proveniente del estero La Patagua 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.

3.1.4. 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, valor necesario para el método de dosificación de la dimensión mínima promedio.

Tabla 6. Densidad aparente de la escoria comparada con los materiales patrones (Fuente: Elaboración propia).

| Material | Densidad Aparente Suelta [kg/m ³] |
|---------------------|---|
| Árido de La Patagua | 1420 |
| Escoria de cobre | 2095 |
| Árido del Aconcagua | 1510 |
| Escoria de Cobre | 2129 |

Como se puede observar en la Tabla 6, los valores de densidad aparente suelta obtenidos con la escoria de cobre resultan superiores para ambos casos, llegando a valores 1,45 veces superior a la del árido de comparación.

3.1.5. Índice de Lajas (NLT-354/91).

Tabla 7. Índice de Lajas (IL) en muestras analizadas (Fuente: Elaboración propia).

| Procedencia | IL (%) |
|-------------------|--------|
| Río Aconcagua | 22 |
| Estero La Patagua | 19 |
| 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 considerables en su granulometría luego de la acción de cargas pesadas.

3.1.6. 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 ensayos corresponde a una emulsión catiónica CRS-2.

3.1.6.1. Adherencia por Método Elástico (MC 8.302.29) (Dirección de Vialidad, 2022).

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.

Para la correcta revisión del ensayo, se analizan 2 muestras por cada procedencia del árido. Se observa en la Tabla 8, 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 8. Adherencia por diversos Métodos (Fuente: Elaboración propia).

| Nº de Muestra | Procedencia | M. Estático | M. Dinámico | M. del Hervido |
|---------------|-------------------|--------------|--------------|----------------|
| 1 | Estero La Patagua | Mayor a 95 % | Mayor a 95 % | Muestra Patrón |
| 2 | Estero La Patagua | Mayor a 95 % | Mayor a 95 % | 85 % |
| 3 | Río Aconcagua | Mayor a 95 % | Mayor a 95 % | Muestra Patrón |
| 4 | Río Aconcagua | Mayor a 95 % | Mayor a 95 % | 90 % |
| 5 | Escoria de cobre | Mayor a 95 % | Mayor a 95 % | Muestra Patrón |
| 6 | Escoria de cobre | Mayor a 95 % | Mayor a 95 % | 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.

3.1.6.2. Adherencia por Método Dinámico (MC 8.302.31) (Dirección de Vialidad, 2022).

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). Igualmente, ambos tienen en común que dependen en gran parte de la experiencia que posea el encargado de realizar el ensayo.

3.1.6.3. Adherencia mediante Método del Hervido (MC 8.302.31) (Dirección de Vialidad, 2022).

El método del hervido describe el procedimiento para determinar la adherencia del agregado con el ligante para las mezclas asfálticas en frío. 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.

Luego de realizar los ensayos, 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 que los áridos tradicionales.

3.1.6.4. Ensayo de adherencia por 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.

Se define la adhesividad mediante la placa Vialit como:

$$A_{Vialit} = 100 - a$$

Para aumentar la comparación entre áridos, en el caso de variaciones de temperatura, se evaluarán también las partículas liberadas de manera sucia (árido con asfalto), definiendo la adherencia manchada como:

$$A_{Man} = 100 - b$$

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

Tabla 9. Ensaye de Placa Vialit para diversas condiciones (Fuente: Elaboración propia).

| Estado | Seco | Húmedo | Placa Sumergida | Árido Sucio | Temperatura | | | | | |
|----------------------------|--------|--------|-----------------|-------------|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | | 19° | 6° | -3° | 19 | 6° | -3° |
| Tipo de Adherencias | Vialit | Vialit | Vialit | Vialit | Vialit | Vialit | Vialit | A Man | A Man | A Man |
| Escoria de cobre | 100 | 100 | 99,3 | 99,7 | 100 | 93,7 | 80,7 | 98,7 | 78,7 | 35 |
| Río Aconcagua | 100 | 100 | 100 | 99,7 | 100 | 96 | 94 | 100 | 68 | 8 |
| Estero la Patagua | 100 | 100 | 100 | 99,3 | 100 | 92,7 | 91,3 | 100 | 55 | 9,3 |

En condición Seca se observa en la Tabla 9 todas las muestras analizadas presentan una buena adhesividad Vialit, no registrando pérdida de árido en condición limpia. Ahora bien, en condición Húmeda se observa 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.

Si se considera Placa Sumergida se observa que todas las muestras ensayadas registraron una buena adherencia para la condición de placa sumergida.

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.

Se observa en la Tabla 9, 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.

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 (Lee et al., 2011). 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).

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

Respecto a 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, para áridos manchados con asfalto, 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 cubricidad existente en la escoria de cobre, lo que generaría una mejor trabazón con el ligante, ya rígido a esta temperatura.

3.1.7. 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 fisicoquímicos resultantes de la cristalización del sulfato.

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

Tabla 10. Desintegración según granulometría del Estero La Patagua (Fuente: Elaboración propia).

| Fracción | Procedencia | Desintegración |
|----------|-------------------|----------------|
| 4 | Estero La Patagua | 0,20 % |
| 4 | Escoria de cobre | 0,02 % |
| 4 | Río Aconcagua | 0,22 % |
| 4 | Escoria de cobre | 0,03 % |

Los resultados obtenidos en la Tabla 10 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 (12%), sino que se encuentran muy por debajo de los obtenidos para los áridos tradicionales, registrando valores 10 veces menores a los mismos.

3.1.8. 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. Se evalúa en la escoria de cobre esta propiedad, mediante el ensaye desgaste de Los Ángeles y el índice de trituración.

3.1.8.1. Desgaste de Los Ángeles (Dirección de Vialidad, 2022).

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.

Tabla 11. Valores de Desgaste de Los Ángeles índice de trituración (Fuente: Elaboración propia).

| Procedencia | % Desgaste | % Trituración |
|-------------------|------------|---------------|
| Río Aconcagua | 13,8 | 3,6 |
| Escoria de cobre | 19,76 | 3,8 |
| Estero La Patagua | 15,04 | 4,5 |

3.1.8.2. Índice de Trituración.

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.

3.2. Evaluación de la escoria de cobre por dosificaciones según la Dimensión Mínima Promedia.

Se espera 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.

3.2.1. 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 12 y 13.

Tabla 12. Dosificación según granulometría del Estero La Patagua (Fuente: Elaboración Propia).

| | | 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 | Dosificación de árido [kg/m ²] | 16,85 | 10,94 |
| B | Dosificación de ligante [l/m ²] | 1,19 | 1,15 |

Tabla 13. Dosificación según granulometría del Río Aconcagua (Fuente: Elaboración Propia).

| | | 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 | Dosificación de árido [kg/m ²] | 16,63 | 10,73 |
| B | Dosificación de ligante [l/m ²] | 1,14 | 1,02 |

4. Conclusiones

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 cubrición que los áridos tradicionales, presentando un porcentaje óptimo de partículas chancadas, lo cual es muy importante para los tratamientos superficiales cuando se utilizan como solución para mejorar la adherencia superficial.

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.

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 ensayo 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 resulta influyente para este estudio, debido a que los tratamientos superficiales simples, no suelen ser utilizados en lugares donde es recurrente esta condición.

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.

La utilización de escoria de cobre, acumulada en el sector de botadero y en consecuencia no obtenida de los ríos ni canteras, elimina todo tipo de contaminación existente en el proceso de extracción generando un impacto positivo en el medioambiente al reducir la huella de carbono y el daño a la biodiversidad.

Considerando que a diario se continúa produciendo grandes cantidades de este material, se hace necesario desarrollar alternativas que permitan su pronta utilización y con esto asegurar la reutilización de este pasivo ambiental. Disponer de escoria para la construcción en obras viales se considera una

buena solución, debido principalmente a los altos volúmenes de material que cada obra vial conlleva.

5. Referencias

- Miranda, A.V. (2017, January 9). El 60% de los caminos en Chile no está pavimentado y regiones VIII y IX lideran. La Tercera.
<http://diario.latercera.com/2017/01/09/01/contenido/pais/31-230614-9-el-60-de-los-caminos-en-chile-no-esta-pavimentado-y-regiones-viii-y-ix-lideran.shtml>
- Trafilaf, S. (2015, February 8). Los peligros de la extracción masiva de áridos. Radio Universidad de Chile.
<http://radio.uchile.cl/2015/02/08/los-peligros-de-la-extraccion-masiva-de-aridos/>
- Sepúlveda, C. (2006). Utilización De Escorias De Fundición Para La Producción De Compuestos De Hierro. Memoria de Título. Universidad De Chile, Santiago.
- Queirolo, A. (2009). Seguimiento de un doble tratamiento superficial para un camino de alto tránsito (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Quinteros, R. (2007). Tratamientos superficiales asfálticos: Perfeccionamiento del método de dosificación de la dimensión mínima promedio (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- Laboratorio Nacional de Vialidad, MOP. (2000). Curso Laboratorista Vial (5ª ed., Vol. II). Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Lee, J., Shields, T., & Jun Ahn, J.H. (2011). Performance Evaluation of Seal Coat Materials and Designs. INDOT Office of Research & Development. West Lafayette, IN.
- Dirección de Vialidad. (2022). Manual de Carreteras, Volumen N°3, N°5 y N°8. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.