

ESTADO DEL ARTE

# Uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos en la construcción





#### AUTORES:

Pia Wiche Latorre

Danilo Bianchi Granato

Nicolás Donoso Ramos

#### ASESORÍA TÉCNICA:

Patricia Martínez

#### REVISORES:

Javier Obach

#### GRÁFICAS Y DIAGRAMACIÓN:

Krystel Contreras Quezada

Fecha: octubre de 2023

Este informe fue producido en el marco del estudio *Análisis del impacto ambiental del uso de escoria de cobre en Chile en comparación con el uso de áridos naturales para la construcción de obras de infraestructura durante todo el ciclo de vida del producto*, solicitado por el Programa Territorio Circular, programa estratégico de CORFO y que impulsa SOFOFA Hub.

Territorio Circular, CORFO, Sofofa Hub ni EcoEd se responsabilizan sobre las declaraciones realizadas o decisiones tomadas en base a los resultados de este estudio.

Cómo citar este documento: Wiche, Pia; Granato, Danilo; Donoso, Nicolás. Estado del Arte: Uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos en la construcción, 2023.

EcoEd, Territorio Circular, Corfo y Sofofa Hub son marcas registradas y de propiedad de sus respectivos dueños.

Imágenes por Getty Images y Pexels.

## Contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	2
Capítulo 2. Áridos Naturales.....	4
2.1 Fuentes de extracción de áridos naturales .....	4
2.2 Ciclo de vida de la extracción de áridos naturales .....	5
2.3 Características de los áridos.....	6
2.4 Cuerpo legal que regula la extracción de áridos naturales.....	7
Capítulo 3. Silicato de hierro .....	9
3.1 Pasivo ambiental.....	11
3.2 Tipos de silicato de hierro .....	11
3.3 Usos y aplicaciones potenciales.....	12
Capítulo 4. Usos de escoria en construcción .....	15
4.1 Construcción de terraplenes .....	16
4.2 Tratamientos superficiales .....	17
4.3 Uso de áridos para morteros y hormigones.....	20
4.4 Uso de silicato de hierro como reemplazo para cemento.....	28
4.5 Toxicidad.....	31
4.6 Resumen.....	34
Capítulo 5. Aspectos metodológicos para la realización de un análisis de ciclo de vida comparativo entre áridos naturales y silicato de hierro.....	36
5.1 Etapas del ciclo de vida de la construcción.....	37
5.2 Reglas por categoría de producto .....	37
5.3 Recomendaciones metodológicas para la realización de un análisis de ciclo de vida exploratorio del silicato de hierro como reemplazo de áridos naturales.....	45
Capítulo 6. Impactos ambientales asociados al uso de escoria de cobre versus áridos naturales	49
6.1 Áridos Naturales.....	49
6.2 Escoria de Cobre.....	50
6.3 Comparación de impactos ambientales del uso de áridos naturales y silicato de hierro para usos en construcción.....	50
Capítulo 7. Desafíos y oportunidades en la implementación .....	54
7.1 Sociales.....	54

7.2 Económicos.....	54
7.3 Regulatorios.....	54
Capítulo 8. Conclusiones .....	56
8.1 Propuestas para futuros proyectos.....	57
Referencias .....	59
Anexo 1. Requisitos técnicos para uso de áridos en terraplenes.....	64
Anexo 2. Requisitos técnicos para uso de áridos en tratamientos asfálticos .....	66
Anexo 3. Requisitos técnicos para uso de áridos en cementos y hormigones.....	67
Anexo 4. Requisitos técnicos para uso de áridos en cemento .....	73
Anexo 5. Información adicional sobre toxicidad y lixiviación de áridos en construcción .....	75

## Índice de tablas

Tabla 1. Ejemplos de usos de áridos en la construcción.....	2
Tabla 2. Comparación de la composición química del silicato de hierro entre el promedio de 163 publicaciones internacionales, de la fundición Ventanas y de la fundición Chagres.....	10
Tabla 3. Uso y ventajas del silicato de hierro en construcción.....	15
Tabla 4. Análisis granulométrico de silicato de hierro puro de fundición Ventanas para uso en mezclas asfálticas en caliente [31].....	17
Tabla 5. Características físicas de silicato de hierro de fundición Ventanas para uso en mezclas asfálticas en caliente [31].....	18
Tabla 6. Granulometría de la mezcla de áridos y silicato de hierro para mezclas asfálticas en caliente. ....	18
Tabla 7. Propiedades físico-mecánicas de la mezcla para mezclas asfálticas en caliente. ..	19
Tabla 8. Características físicas de silicato de hierro proveniente de fundición Ventanas.....	21
Tabla 9. Análisis granulométrico de silicato de hierro proveniente de fundición Ventanas...	21
Tabla 10. Compuestos predominantes en silicato de hierro Fundición Caletones, para producción como reemplazo de cemento.....	28
Tabla 11. Concentraciones máximas permisibles (CMP) de elementos químicos inorgánicos para un Test de Toxicidad por Lixiviación, DS 148.....	32
Tabla 12. Relación porcentual de constituyentes de mezcla para fabricación de baldosas de concreto.....	33
Tabla 13. Composición química de los finos y gravilla utilizados para fabricación de baldosas de concreto. ....	33
Tabla 14. Porcentajes de elementos químicos nocivos (D.S. 148) de las baldosas de concreto. ....	33
Tabla 15. Reglas por categoría de productos consideradas en esta revisión.....	38
Tabla 16. Medidas a ser declaradas en declaraciones ambientales de producto dentro del programa ASTM. Traducción libre de tabla 3 [50].....	42

Tabla 17. Categorías de impacto ambiental solicitadas en la EN 15804 y PCR 2019:14.....	43
Tabla 18. Requerimiento granulométrico de materiales para subbases en caminos. AASHTO. .....	64
Tabla 19. Requerimiento granulométrico de materiales para bases en caminos. AASHTO.	65
Tabla 20. Requisitos de los áridos para tratamiento superficiales.....	66
Tabla 21. Granulometría de materiales para tratamiento superficiales.....	66
Tabla 22. Bandas granulométricas para áridos finos prNCh 163 [32]......	67
Tabla 23. Requisitos granulométricos de la grava prNCh 163 [32]......	68
Tabla 24. Tamices según Norma ASTM D422 - 63.....	69
Tabla 25. Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión, NCh 170 Of.2016.	71
Tabla 26. Clasificación de los hormigones por resistencia a flexotracción, NCh 170 Of.2016. .....	71
Tabla 27. Asentamiento de cono según tipo de estructura, NCh 1019.....	72
Tabla 28. Requisitos del cemento, NCh 148 of.68 [64]......	73
Tabla 29. Requisitos químicos de material puzolánico para ser utilizado, ASTM C618.....	74
Tabla 30. Concentraciones máximas permisibles (CMP) de elementos químicos para un Test de Toxicidad por Lixiviación, DS 148. ....	75
Tabla 31. Concentraciones máximas permisibles de elementos químicos para un Test de Toxicidad por Lixiviación, USEPA.....	75

## Índice de Figuras

Figura 1. Etapas del ciclo de vida de la extracción de áridos naturales. ....	5
Figura 3. Variaciones de la resistencia a compresión con distintos porcentajes de reemplazo de áridos por silicato de hierro con distintas proporciones agua/cemento. Experiencia internacional [39]......	26
Figura 4. Variaciones de la resistencia a compresión con distintos porcentajes de reemplazo de cemento por silicato de hierro. Experiencia internacional [42]......	30
Figura 5. Etapas del ciclo de vida de la construcción. Reproducción de gráfico en ISO 21930. .....	37
Figura 6. Límites del sistema para el caso de materiales en base a residuos.....	41
Figura 7. Gráfico de los impactos relativos entre el uso de gravilla y silicato de hierro para construir caminos [59]. ....	51
Figura 8. Gráficos de los impactos relativos de fabricar cemento Portland con 20% de silicato de hierro [62]. ....	51
Figura 9. Gráfico de los impactos relativos del hormigón tradicional vs utilizar silicato de hierro en reemplazo de 100% de áridos y 20% de cemento [59]. ....	52

## Resumen Ejecutivo

La industria de la construcción demanda altas cantidades de áridos. Se necesita un 1,35 m<sup>3</sup> de árido por m<sup>3</sup> de hormigón y 10,5 m<sup>3</sup> de áridos por m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica [1]. Estos áridos son rocas y arenas extraídas de cauces, lechos de ríos, pozos y canteras, lo que tiene el potencial de generar un gran impacto ambiental: afectan la biodiversidad local, cambian la sedimentación de cursos de agua y generan material particulado y gases producto del uso de maquinaria. Este impacto se amplifica en el caso de la extracción informal de áridos, que en Chile se estima esté en torno al 60% de los áridos comercializados anualmente [2].

En paralelo, la industria minera genera alrededor de 4,5 millones de toneladas de silicato de hierro (escoria de cobre<sup>1</sup>) por año [3]. Estas se suman a los 70 millones de toneladas ya acumuladas en la historia minera del país, conformando un gran pasivo ambiental [3].

El silicato de hierro tiene características fisicoquímicas que permiten su utilización en la construcción, por ejemplo, en el reemplazo de áridos o de cemento en mezclas de hormigón. El uso de escorias en construcción es una práctica habitual en Norteamérica, Europa, Singapur [4] y otros países del mundo, con una mayor diseminación de las escorias provenientes de la producción de hierro o acero.

Por ende, existe la oportunidad de potenciar la economía circular usando el silicato de hierro proveniente de fundiciones de cobre como reemplazo de áridos naturales en la construcción. Esto tiene el potencial de reducir los impactos ambientales generados por la extracción de áridos y también los pasivos ambientales por la acumulación de este material en los vertederos, mientras se impulsa una construcción más circular en el país.

Sin embargo, ¿este cambio será realmente positivo? El estudio “Análisis del impacto ambiental del uso de escoria de cobre en Chile en comparación con el uso de áridos naturales para la construcción de obras de infraestructura durante todo el ciclo de vida del producto” tiene como objetivo evaluar el desempeño ambiental del uso del silicato de hierro proveniente de la fundición de cobre en Chile, en comparación con el uso de áridos naturales para la construcción. Como primer paso en esa dirección, se presenta este Estado del Arte enfocado en los usos del silicato de hierro como reemplazo de áridos naturales. Esta investigación alimenta el desarrollo de un análisis de ciclo de vida comparando los impactos ambientales al usar dos tipos de áridos: áridos naturales y silicato de hierro (escoria de cobre). Esto permite tener una mirada sistémica en todos los procesos de la cadena productiva y estimar en cuánto disminuye (o aumenta) el impacto ambiental de la solución circular.

La primera parte de este Estado del Arte introduce al uso de áridos en la industria de la construcción (capítulo 1) y luego caracteriza las materias primas a evaluar, a saber, los áridos naturales (capítulo 2) y el silicato de hierro (capítulo 3).

---

<sup>1</sup> En este informe se entenderán como sinónimos de silicato de hierro: escoria de cobre, escoria de fundición de cobre, escoria simplemente o también *copper slag* en su traducción en inglés, a no ser que se exprese en el texto lo contrario.

A continuación, se profundiza sobre el uso de silicato de hierro en la construcción (capítulo 4) tanto a nivel nacional como internacional. Para información adicional sobre normas técnicas se tienen cinco anexos.

En seguida, se comparan diversas metodologías para estimar impactos ambientales a través de análisis de ciclo de vida y se sintetizan recomendaciones metodológicas para la evaluación (capítulo 5). Asimismo, se comentan los impactos ambientales ya conocidos del uso de los áridos naturales y el silicato de hierro que están contenidos en la literatura (capítulo 6).

Finalmente, se describen desafíos y oportunidades para implementar el silicato de hierro como reemplazo de áridos naturales (capítulo 7) y se concluye la investigación con propuestas para futuros proyectos en esta línea de trabajo (capítulo 8).

Este informe es producido en el marco del proyecto *Análisis del impacto ambiental del uso de escoria de cobre en Chile en comparación con el uso de áridos naturales para la construcción de obras de infraestructura durante todo el ciclo de vida del producto*, solicitado por el Programa Territorio Circular, programa estratégico de CORFO y que impulsa SOFOFA Hub. El presente informe es el insumo para el análisis de ciclo de vida del uso de silicato de hierro como reemplazo de áridos en la construcción realizado dentro del mismo proyecto.



# Introducción



## Capítulo 1. Introducción

El sector de la construcción en Chile alcanzó los \$3,8 billones de pesos aportando un 6% del PIB en el segundo trimestre de 2023 [5]. Dentro de este sector se destacan los flujos de materiales como cemento, acero, madera y áridos.

Los áridos son arenas, gravas y rocas, que tienen múltiples usos: como materia prima se destaca su participación en la producción de hormigones; como producto final, dos ejemplos son la construcción de terraplenes y la protección marítima. La Tabla 1 muestra más ejemplos de los usos de los áridos.

*Tabla 1. Ejemplos de usos de áridos en la construcción.*

Como producto final		Como materia prima
Defensas de ríos, mares y lagos	Bases y subbases para vías	Hormigones
Terraplenes y pedraplenes	Balastos para vías férreas	Morteros
Rellenos estructurales	Drenes y capas filtrantes	Mezclas asfálticas

Fuente: [1]

Se estima que un 60% de los áridos provienen de extracciones informales [2], ya que la capacidad de producción formal nacional es menor a la demanda. Si bien la extracción de áridos está regulada en la legislación chilena (discutida en la sección 2.4), la extracción formal e informal generan impactos ambientales, en este último caso, desregulados.

La magnitud de la industria de áridos en Chile se puede observar realizando una estimación rápida solamente con respecto a su uso en hormigón. Para hacer 1 m<sup>3</sup> de hormigón se necesitan 300 kg de cemento y 1,35 m<sup>3</sup> de áridos [1]. En 2022, el despacho de cemento en Chile fue de 3,8 millones de toneladas [6]. Si se asume que todo el cemento es usado para fabricar hormigón, la demanda de áridos en 2022 fue de 17,1 millones m<sup>3</sup>. A esto se debe adicionar las pérdidas y otros usos de los áridos.

La magnitud de la industria realza la importancia de reducir los impactos ambientales generados por la extracción de áridos. Por un lado, se está mejorando la legislación (ver sección 2.4). Por otro, se pueden evaluar alternativas para reemplazar los áridos naturales. Una de esas alternativas es reaprovechar el silicato de hierro<sup>2</sup> (escoria de cobre), resultante de la producción de cobre.

Dentro del marco del proyecto de comparar los impactos ambientales entre los áridos naturales y el silicato de hierro, este documento presenta los avances ya realizados en la materia. El capítulo siguiente explica sobre la industria de los áridos naturales y sigue con los avances en usar escoria de cobre como su reemplazo.

<sup>2</sup> En este informe se entenderán como sinónimos de silicato de hierro: escoria de cobre, escoria de fundición de cobre, escoria simplemente o también *copper slag* en su traducción en inglés, a no ser que se exprese en el texto lo contrario.



# Áridos Naturales

## Capítulo 2. Áridos Naturales

### 2.1 Fuentes de extracción de áridos naturales

Los áridos naturales son definidos como: “*material pétreo, inerte con relación aglomerante, que se emplea en la confección de morteros y hormigones y que se clasifica en arenas y gravas. Esto puede ser las arcillas superficiales y las arenas, ripios, gravas, rocas y demás materiales áridos aplicables directamente a la construcción*” [7].

Los áridos pueden ser extraídos desde diversas fuentes:

- Cauces de ríos
- Bancos areneros
- Pozos y canteras
- Mar
- Lagos

En Chile, no es muy común la extracción desde mares y lagos, siendo las más comunes la extracción de ríos y de pozos [1, 8].

La extracción desde cauces de ríos se puede dar desde la sedimentación natural en la ribera del cauce o a partir de pozos y canalones que embancan el río y acumulan el material. En la primera situación, el material es limitado. En la segunda, el río debe asegurar el llenado del banco para asegurar un volumen de extracción.

Los bancos areneros son explotados de forma similar. Canalones acumulan el agua y material. Luego se devuelve el agua a su flujo natural para recoger el material acumulado.

La producción en algunos bancos de arena y cauces de río depende de las aguas de deshielo, por lo que su capacidad productiva es mayor en verano y varía de acuerdo con las lluvias (o falta de) durante el invierno (ej. Río Maipo). Para atender la demanda de áridos en invierno, las empresas mantienen acopios del material o suplen la demanda con la producción desde pozos.

La extracción de pozos y canteras es realizada por un proceso de minería “tradicional”, con perforaciones, explosivos y maquinarias de remoción de tierra.

La extracción de pozos atiende a casi 70% de la demanda de áridos en la Región Metropolitana (RM) [1]. Su producción típicamente se reduce en verano, cuando aumenta la extracción desde cauces.

## 2.2 Ciclo de vida de la extracción de áridos naturales

El ciclo de vida abarca todas las actividades para que un producto pueda cumplir su función. Esto incluye todas las etapas desde la producción de las materias primas y energía hasta la disposición final del producto.<sup>3</sup>

La Figura 1 resume las etapas del ciclo de vida de los áridos [1] que pueden ser clasificados en dos grupos. El ciclo de vida de la infraestructura y del producto. Ambos ciclos de vida se relacionan y tienen entradas de energía y materiales bien como salidas de residuos.

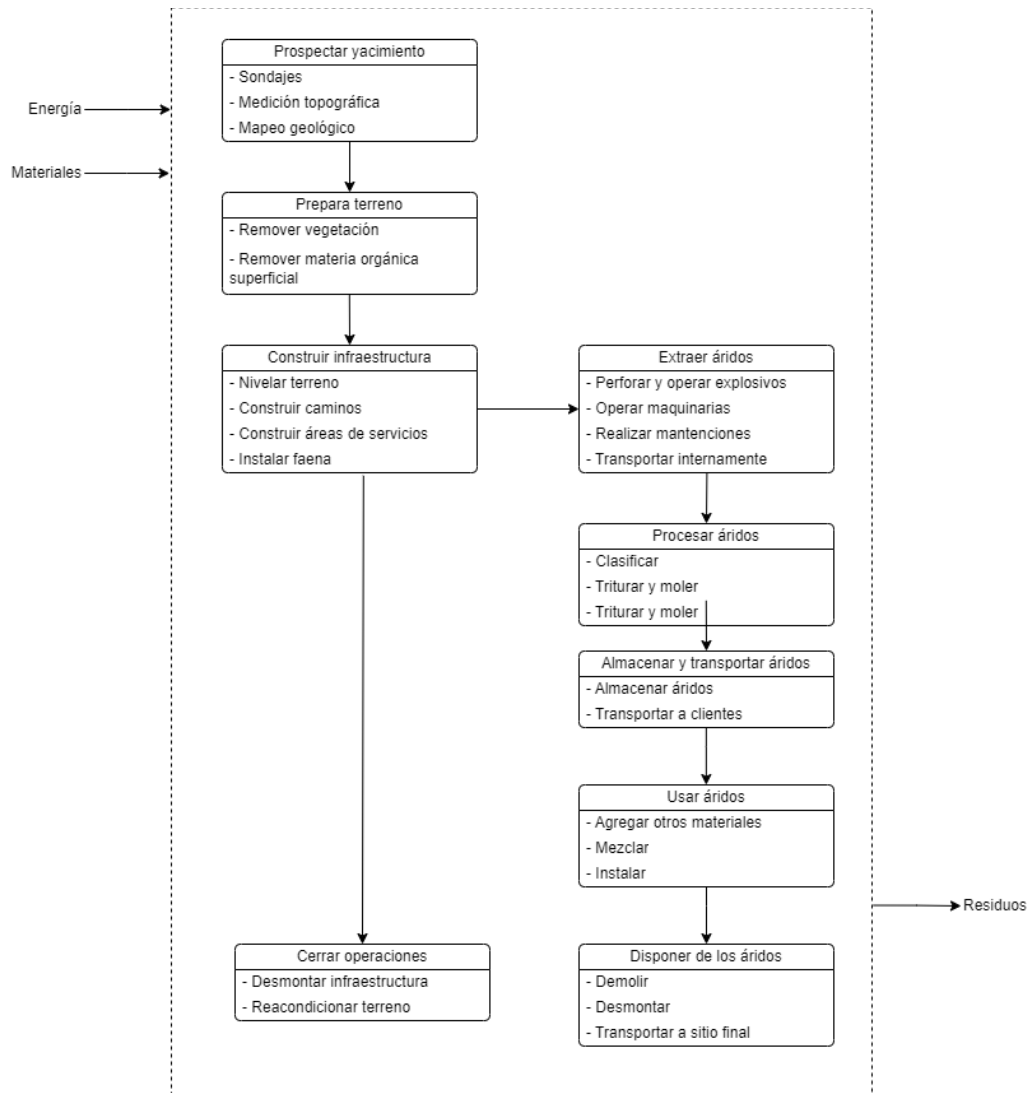


Figura 1. Etapas del ciclo de vida de la extracción de áridos naturales.

<sup>3</sup> Definición de ciclo de vida: “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final”.

Estos procesos son generales y pueden variar significativamente dependiendo del origen de los áridos, del volumen de extracción, del tipo de procesamiento y del uso final.

Con respecto al origen, para la extracción de lechos de río se hacen pozos y canalones que desvían el curso del río para acumular áridos que luego serán retirados. Por otro lado, para extraer desde canteras se necesitan perforaciones y explosivos.

Las actividades también tienen diferencias por si la extracción es industrial o artesanal, especialmente en el uso de maquinarias.

La parte de procesamiento también difiere dependiendo de los áridos y de la tecnología empleada. La principal diferencia es si el proceso de separación es seco (por filtros) o húmedo (por hidrociclones).

Por fin, las actividades varían de acuerdo con el uso final. Por ejemplo, para fabricar mortero seco, algunos áridos deben venir secos. Para esto, se construyen domos donde el material es guardado y secado.

Por esta gran variabilidad de las actividades, no es posible indicar un impacto ambiental promedio de los áridos naturales, siendo más fehaciente estudiar los impactos dependiendo de su origen, formas de procesamiento y volumen de extracción. Por ende, durante el análisis de impactos se tendrá que tomar en cuenta el tipo de árido natural siendo reemplazado para considerar el ciclo de vida lo más similar posible para el proceso considerado.

## 2.3 Características de los áridos

Para cada aplicación, se requieren características distintas de áridos. Estas características dependen mucho del yacimiento y del postratamiento. Algunos ejemplos de propiedades importantes son:

- Tamaño de los granos y su distribución: la dimensión promedio de los granos y la variación de esta dimensión en la mezcla.
- Pureza: ausencia de elementos no deseadas como sustancias arcillosas, orgánicas o solubles en agua.
- Redondez: la agudeza relativa de las aristas y vértices. Por ejemplo, si es más angular o más redondeada.
- Formato del grano: geometría de los granos en las tres dimensiones, que pueden ser similares (ej. cubo), elongadas, aplanadas o lajeadas.
- Textura superficial: el grado de lisura o rugosidad de la superficie de los granos.

Cambios en una característica pueden afectar drásticamente el desempeño dependiendo del uso que se quiera dar. Por ejemplo, hormigones con áridos más redondeados necesitan menos agua y arena, pero tienen menor resistencia a la tracción y a la flexión [1].

Por ende, no se espera reemplazar a los áridos en todos sus usos por el silicato de hierro. Se deben identificar aquellos usos para los cuáles el silicato tiene características similares a su contraparte natural para asegurar un desempeño aceptable en el uso que le será dado.

## 2.4 Cuerpo legal que regula la extracción de áridos naturales

Actualmente, la legislación chilena respecto a la extracción de áridos es bastante fragmentada. El principal actor son las municipalidades, que deben dar la autorización para la extracción de áridos [9, 10]. Si esta es hecha en lechos de corrientes de agua, también deben contar con la revisión técnica de la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Si ésta afecta directamente a los cauces, también debe contar con la aprobación de la Dirección General de Aguas del MOP [11]. Sin embargo, dependiendo del área en que se ejecute, debe contar con permisos del Servicio Agrícola Ganadero (SAG) o del Ministerio de Bienes Nacionales.

Además, la extracción de áridos está considerada en la lista de actividades susceptibles de causar impacto ambiental [12], por lo que debiesen ser sometidas al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental si se cumplen lo siguiente [13]:

- Desde pozos o canteras: sobre 10.000 m<sup>3</sup> mensuales o 100.000 m<sup>3</sup> en la vida total del proyecto o si el proyecto abarca 5 o más hectáreas (artículo i.5.1, decreto 40)
- Desde cuerpos o cursos de agua: el volumen total a extraer en la vida útil del proyecto es igual o mayor a 20.000 m<sup>3</sup> para regiones de Arica y Parinacota a Coquimbo, 50.000 m<sup>3</sup> desde región de Valparaíso a Magallanes y Antártica Chilena, incluyendo la RM.
- Desde playas: extracciones de 50.000 m<sup>3</sup> o más en toda la vida útil del proyecto.

Como se puede observar, la legislación que regula la extracción de áridos es fragmentada en varios cuerpos legales y estamentos responsables, por lo que las normativas vigentes no siempre se cumplen [7, 14]. Asimismo, existen potenciales conflictos de interés. Por ejemplo, las municipalidades son las principales entidades responsables de la fiscalización de la extracción de áridos. Pero como generan ingresos por la extracción, la fiscalización muchas veces no ocurre. Además, aun cuando no se autoriza la extracción ésta se produce en forma clandestina. Incluso hay extracciones nocturnas que son bastante difíciles de fiscalizar [14].

Todo esto genera un reto importante en controlar que la extracción sea hecha de forma responsable. Por esto, está en proceso un proyecto de ley para regular esta actividad y abrir espacio a su mayor fiscalización. Sus principales características son [7, 15]:

- Exigir que toda obra civil, pública o privada, deba contar con certificados de que los áridos provienen de fuentes autorizadas. Esta certificación puede ser fiscalizada.
- Definir responsabilidad de mitigación y reparación ambiental durante y luego de finalizada la extracción.

Aunque sea un proyecto de ley que puede sufrir modificaciones, la tendencia apunta a un mayor control y responsabilidad de los daños socio-ambientales de esta actividad. Especialmente porque la aceptación ciudadana de este proyecto de ley es mayor a un 90% [16]. Esta nueva ley conllevaría un aumento de los costos y de la carga administrativa para todos los involucrados en la cadena de valor. Por ende, se forma un ambiente propicio para alternativas potencialmente más baratas, simples y con un menor impacto ambiental, como es el uso de silicato de hierro como un sustituto de áridos naturales.



**Silicato de hierro**

### Capítulo 3. Silicato de hierro

La escoria de cobre, también conocida como silicato de hierro, se genera en la refinación de cobre virgen o reciclado [17]. Consiste principalmente en silicatos de hierro, aluminio y calcio además de trazas de otros minerales y se asemeja geométricamente a los áridos naturales.

Es un material bien caracterizado y de amplio uso, contando incluso con el código 3744 en la clasificación central de productos (CPC por su sigla en inglés). Se agrupa junto con el cemento Portland, cemento aluminoso y otros cementos hidráulicos similares, excepto aquellos que estén en la forma de Clinker, en su forma más fina, que puede ser usada en reemplazo del cemento [18].

Se producen mundialmente alrededor de 40 millones de toneladas de silicato de hierro cada año, siendo China el principal productor, seguidos por Japón y Chile. Se estima una producción de 4,5 millones de toneladas anuales en el territorio nacional [3], que son normalmente depositados en vertederos autorizados. En el país existen 15 depósitos de escoria de los cuales 6 están activos [19].

Los potenciales elementos químicos de valor son: Cu, Mo, Re,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . En la Tabla 2 se muestra la comparación de la composición química entre un promedio de 163 publicaciones internacionales [20], de la fundición Ventanas y de la fundición Chagres [21].

Entre los silicatos de hierro nacionales, se aprecia una diferencia significativa en las concentraciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$ , con diferencias menores en otros óxidos y elementos. Esto indica que, a pesar de ser del mismo país, los silicatos de hierro tienen composiciones diferentes. Por lo tanto, puede ocurrir que el silicato de hierro de una fundición sea apropiado para un cierto uso, mientras que el de otra fundición puede no tener el mismo desempeño. Por esto es importante caracterizar el material y comprender su desempeño en distintas aplicaciones.



Tabla 2. Comparación de la composición química del silicato de hierro entre el promedio de 163 publicaciones internacionales, de la fundición Ventanas y de la fundición Chagres.

% de óxidos				% de elemento		
Óxido	Promedio internacional	Ventanas	Chagres	Elemento	Ventanas	Chagres
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.40	68.85	--	Fe	48.16	42.00
SiO <sub>2</sub>	30.40	19.08	30.40	O	37.76	--
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.93	2.59	5.60	Si	8.92	--
CaO	4.77	2.07	1.60	Zn	1.82	--
ZnO	2.32	2.26	--	Ca	1.48	--
MgO	1.85	0.95	0.80	Al	1.37	--
SO <sub>3</sub>	1.06	0.73	--	Cu	0.86	0.90
CuO	0.93	1.08	--	Mg	0.57	--
Na <sub>2</sub> O	0.87	0.75	1.20	Na	0.55	--
K <sub>2</sub> O	0.82	0.55	1.20	K	0.46	--
S	0.66	--	0.50	S	0.29	0.50
Sílice Libre	0.50	--	--	Ti	0.18	--
MnO	0.47	--	--	Pb	0.10	0.04
Pb	0.34	--	0.04	Co	0.09	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.30	0.31	--	Ba	0.07	--
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.06	--	Mn	0.07	0.06
Mo	0.23	--	0.15	Mo	0.06	0.15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.05	--	Cr	0.03	--
BaO	0.12	0.07	--	Sb	0.03	0.00
CoO	0.11	0.12	--	Ni	0.02	0.00
Cl	0.09	--	0.01	P	0.02	--
As	0.07	--	0.09	Sn	0.01	--
NiO	0.03	0.03	--	Zr	0.01	--
SrO	0.02	0.01	--	Sr	0.01	--
Cd	0.01	--	0.001	As	--	0.09
PbO <sub>2</sub>	--	0.12	--	F	--	0.02
MnO <sub>2</sub>	--	0.11	--	Cl	--	0.01
MoO <sub>3</sub>	--	0.09	--	Bi	--	0.01
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	--	0.04	--	Cd	--	0.00
SnO <sub>2</sub>	--	0.02	--	Ag	--	0.00
ZrO <sub>2</sub>	--	0.02	--	Au	--	0.00

\*Nota: Valores indicados como "--" no están disponibles.  
Referencias: Elaboración propia con datos de [20] y [21].

### 3.1 Pasivo ambiental

Un pasivo ambiental es un aspecto ambiental<sup>4</sup> que puede causar impactos negativos acumulados por un largo tiempo [22]. Este constituye “*un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente*” [23].

En Chile se generan alrededor de 2,2 toneladas de silicato de hierro (escoria de cobre) por cada tonelada de cobre producida [24], habiendo una producción de 4,5 millones de toneladas anuales [3]. Se suma a esto unos 70 millones de toneladas ya acumuladas anteriormente [3]. Además, el silicato de hierro es potencialmente contaminante si no es bien manejado, por lo que podría ser catalogado como un pasivo ambiental.

Por lo tanto, es de vital importancia encontrar alternativas de uso para este material. Esto agregaría el potencial beneficio ambiental de evitar la producción del producto reemplazado. El uso del silicato de hierro como producto ya es una práctica aceptada en varios países, como se discute en las próximas secciones.

### 3.2 Tipos de silicato de hierro

Los tipos de silicato de hierro se dividen según su pH o por el proceso de enfriamiento a que es sometido.

Para determinar el pH se utiliza el índice de silicatación o el grado de saturación, clasificando el material como ácido, neutro o básico.

La segunda forma de determinar su tipo es según el proceso de enfriamiento a que se somete el material que influencia las propiedades del material sólido. Los tipos existentes son:

- **Expandido:** se agrega una cantidad controlada de aire, agua y vapor al silicato de hierro líquido que se expande y luego es rápidamente enfriado resultando en un material ligero. El material es entonces triturado y clasificado para darle un uso posterior. Resulta útil en la producción de cemento [20].
- **Granallado:** el silicato de hierro es enfriado bruscamente al ser vertido en un pozo con una cantidad de agua constante (granallador). Luego, se separa el agua y se transporta el silicato de hierro a la zona de acopio. Este proceso no altera químicamente el material, pero, como los átomos no tienen tiempo de acomodarse, resulta en estructuras amorfas y porosas, con baja densidad. Este producto es utilizado principalmente para granallados de superficies y obras viales [25] y para la producción de cemento [20].
- **De botadero:** se obtiene al verter el silicato de hierro líquido en el centro de acopio, en donde se enfría lentamente. Así se consigue una mejor distribución de los átomos resultando en una estructura cristalina, de forma regular, de baja porosidad y alta

---

<sup>4</sup> La ISO 14001 define aspecto ambiental como *elemento de las actividades, productos o servicios de una organización que interactúa o puede interactuar con el medio ambiente* [68].

densidad. Este tipo de material es más conveniente como reemplazo de áridos para producir hormigones, pavimentos o aplicaciones geotécnicas [20].

### 3.3 Usos y aplicaciones potenciales

El silicato de hierro tiene varias propiedades que lo hacen viable para el reemplazo de áridos naturales. Es estable, resistente a incendios y a condiciones ácidas y básicas [26]. Tiene una alta densidad específica, es duro y resistente, no absorbe agua, resiste heladas, tiene una forma de grano adecuada y no presenta deformaciones lineales [17].

Además, el silicato de hierro cumple con la norma REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de las Sustancias y Mezclas Químicas) de la Unión Europea, que establece procedimientos para recolectar y evaluar información sobre el peligro de sustancias químicas.

Existen tres tipos principales de productos en base al silicato de hierro, dependiendo de su granulometría [17]:

- Piedra, similar a la roca ígnea
- Granulado, similar al cristal volcánico natural
- Finos

Gracias a las distintas propiedades y características existen diversos usos y aplicaciones potenciales. Entre estas, se mencionan las siguientes.

#### 3.3.1 Cemento

En la producción de cemento clínker existen reacciones químicas que involucran a los óxidos de calcio ( $\text{CaO}$ ), silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y que están presentes en las materias primas. El silicato de hierro contiene estos elementos en el propio material, por lo que se muestra como una materia prima alternativa para producir cemento clínker.

También sirve como material puzolánico para fabricar cemento puzolánico debido a su contenido de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

#### 3.3.2 Abrasivo

El silicato de hierro es utilizado como un medio abrasivo, generalmente en los astilleros y refinerías [4]. Su aplicación en este campo es para remover pinturas, óxidos y otros contaminantes de la superficie de los metales. En comparación a las comúnmente usadas arenas de sílice, la escoria de cobre ha resultado beneficiosa ya que posee una menor concentración de sílice libre, que provoca fibrosis pulmonar incapacitante (silicosis) [27].

#### 3.3.3 Cerámicas

El silicato de hierro resulta un material ideal para la industria de cerámicas, gracias a su alto contenido de sílice. Aunque adicionar demasiado material puede tener efectos desfavorables en el producto final [20].

Asimismo, investigación preliminar muestra que es un material adecuado para aportar en la cristalización, gracias a su contenido de hierro [20].

### **3.3.4 Aditivo en compuestos poliméricos**

Los compuestos poliméricos consisten de un relleno y fibras atadas con un polímero, útiles en aplicaciones aeroespacial, automotriz, eléctrica y marina. En estos materiales se utiliza el silicato de hierro como el material de relleno, aumentando la conductividad térmica del compuesto de polímeros [20].

### **3.3.5 Tratamiento de aguas servidas**

Se ha estudiado el potencial del silicato de hierro en el tratamiento de aguas descargadas de industrias tales como el curtido de cueros, de galvanización y revestimientos [20].

### **3.3.6 Construcción**

El silicato de hierro ya es usado por más de 50 años en la construcción en Europa [17]. Se utiliza como reemplazo de áridos en la fabricación de hormigones y también en obras viales, por ejemplo. Se profundiza este uso en el capítulo 4.5.14.5.1.



## **Usos del silicato de hierro en construcción**

## Capítulo 4. Usos del silicato de hierro en construcción

Existen múltiples usos para el silicato de hierro en construcción, listados en la Tabla 3 [17].

*Tabla 3. Uso y ventajas del silicato de hierro en construcción.*

Área de la construcción	Uso del silicato de hierro	Ventajas del silicato de hierro
Ingeniería hidráulica	Proteger terraplenes, lechos de ríos, canales y dársenas portuarias de las corrientes y olas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capas más delgadas de piedra y menos trabajo de excavación.</li> <li>• Estabilidad por su alta densidad seca, la forma de las partículas y textura superficial.</li> </ul>
Construcción de caminos	Usado como anticongelante y como carpeta de rodamiento de gravilla y subbase.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy buena capacidad para soportar peso.</li> <li>• Resistencia a heladas.</li> <li>• Permeabilidad.</li> </ul>
Producción de cemento	Finos y gránulos usados como aditivo de hierro en ladrillos de clínker o como aditivo mineral reactivo en cementos mixtos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente de hierro lista para usar.</li> <li>• Reduce la temperatura de cocción del clínker y, con ello, el consumo de combustible.</li> </ul>
Producción de hormigón	Usos variados como sustituto para agregados naturales y cemento Portland	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora la maleabilidad del hormigón fresco, mejora propiedades mecánicas y aumenta la durabilidad</li> <li>• Permite tipos de hormigón especiales, por ejemplo, para protección de la radiación, hormigón pesado, entre otros.</li> </ul>
Abrasivos	Granallado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arena para granallar acero, piedra y hormigón</li> </ul>

En las siguientes secciones de este capítulo se comentarán estudios y proyectos ejecutados, tanto en Chile como en el extranjero, donde se ha reemplazado áridos naturales por el silicato de hierro.

Se discuten las propiedades y resultados obtenidos en la confección de hormigón y mortero de cemento [28], como material de relleno en terraplenes, cubierta de caminos asfálticos [25], para la producción de cemento y también sobre toxicidad en elementos constructivos.

Actualmente la legislación chilena tiene una lógica prescriptiva, donde se definen ciertos materiales que se pueden usar en construcción siempre y cuando cumplan con una serie de características técnicas. Los materiales que no están explícitamente mencionados en las normas técnicas vigentes no están aprobados para su uso. Se está trabajando en la transición

a una lógica normativa basada en desempeño, donde cualquier material que cumpla con las características técnicas definidas, podrá ser usado en construcción.

Un ejemplo de esto es la NCh 163 sobre áridos para morteros y hormigones, que actualmente está en consulta pública, donde se definen las características técnicas de los áridos para estos usos. La norma permite el uso de cualquier material que cumpla con las características definidas, marcando una diferencia con la lógica prescriptiva nacional.

En Chile, el órgano principal que entrega especificaciones y requisitos para la construcción y diseño de los caminos e infraestructura vial es el Manual de Carreteras. Particularmente, el volumen N°5 “Especificaciones Técnicas Generales de Construcción” proporciona los requerimientos que deben cumplir los áridos para poder ser empleados en las obras de terraplenes, rellenos, tratamientos superficiales, bases, sellos [29].

En las siguientes secciones se analizan estudios sobre aplicaciones de silicato de hierro de acuerdo a las normas técnicas asociadas a usos de áridos en construcción y se comenta la factibilidad de que este material cumpla con los requisitos técnicos para su uso.

## 4.1 Construcción de terraplenes

Se realizaron pruebas de uso de escoria para la construcción de terraplenes en la autopista de Los Andes el año 2015. Se proyectó la construcción de 4 canchas de prueba, utilizando la escoria de cobre proveniente de la Fundición Chagres (Catemu, Región de Valparaíso) para el núcleo de los terraplenes. En la primera cancha se utilizó una proporción de 50% de árido y 50% escoria. La cancha 2 es con escoria proveniente de los acopios y “*con confinamiento lateral proporcionado por el mismo material*”. La cancha 3 se realizó con escoria y sin confinamiento lateral, y, por último, la cancha 4 es el terraplén de referencia construido en base a material fluvial. [30]

El Ministerio de Obras Públicas, entidad técnica encargada de la medición del desempeño, declaró que el silicato de hierro no presenta problema según los resultados de laboratorio. Sin embargo, por resultados de terreno, recomienda **no utilizar** el silicato de hierro en autopistas, autorutas y caminos primarios. Esto por el “*alto riesgo de aparición prematura de fallas debido a inestabilidad dimensional de este material*” [30].

Por otro lado, concluyó que “**puede utilizarse** la escoria de cobre estudiada en terraplenes de caminos de tránsito menor, tales como caminos locales.”<sup>5</sup> Levantando la advertencia de ser necesario hacer un análisis de estabilidad sísmica en caso de superar los 3 metros de altura de relleno [30].

Para más detalles sobre requisitos técnicos para uso de áridos en terraplenes, por favor ver el Anexo 1.

---

<sup>5</sup> De acuerdo con el Manual de carreteras un camino local es “*provincial o comunal que se conecta a los Caminos Colectores. Están destinados a dar servicio preferentemente a la propiedad adyacente*” .

## 4.2 Tratamientos superficiales

Dentro de los tratamientos superficiales, se encuentran experiencias con silicato de hierro en Chile en mezclas asfálticas en caliente y tratamientos superficiales asfálticos. Para detalles sobre los requisitos técnicos para el uso de áridos en tratamientos superficiales, ver el Anexo 2.

### 4.2.1 Mezcla asfáltica en caliente

El silicato de hierro puede ser usado para generar mezclas asfálticas en caliente mezclado con otros áridos, pero no como material puro.

El análisis de silicato de hierro de fundición Ventanas en la Región de Valparaíso [31] muestra que este material puro, no cumple con los requerimientos de granulometría para tratamientos superficiales, como se ve en la Tabla 4. Las características físicas del material de origen están en la Tabla 5.

*Tabla 4. Análisis granulométrico de silicato de hierro puro de fundición Ventanas para uso en mezclas asfálticas en caliente [31].*

Tamiz		% en peso que pasa de silicato de hierro fundición Ventanas	% en peso que pasa según norma Manual de Carreteras 5.407.202.B TN 12,5 – 5
¾"	20 mm	100	100
½"	12,5 mm	88	90 – 100
⅜"	10 mm	78	40 – 70
N°4	5 mm	51	0 – 15
N°8	2,5 mm	35	0 – 5
N°30	0,63 mm	19	-
N°50	0,315 mm	13	-
N°100	0,16 mm	9	-
N°200	0,08 mm	6	0 – 0,5

Como se ve de la Tabla, el material sin tratamiento de la fundición no cumple con los requerimientos técnicos para ser usados en tratamientos superficiales.



Tabla 5. Características físicas de silicato de hierro de fundición Ventanas para uso en mezclas asfálticas en caliente [31].

	Unidad	Valor	Valor según Manual de Carreteras
Densidad aparente suelta	kg/m <sup>3</sup>	2.175	
Densidad real seca	kg/m <sup>3</sup>	3.801	
Densidad neta	kg/m <sup>3</sup>	3.888	
Absorción de agua	%	0,6	
Partículas chancadas	%	100	Min 70
Partículas rodadas	%	-	
Partículas lajeadas	%	0	Max 30
Desgaste de los Ángeles	%	11	Max 25
Índice de plasticidad	%	NP	

Para lograr las características apropiadas para uso en mezclas asfálticas en caliente se hizo una mezcla de áridos con la siguiente composición: gravilla ¾" (15% en peso), gravilla ½" (15% en peso), polvo roca (40% en peso) y silicato de hierro bajo ¾" (30% en peso). La granulometría de la mezcla de áridos se presenta en la Tabla 6. Se observa que cumple con los parámetros exigidos por el Manual de Carreteras Vol N°5 5.408.201 (4) "Granulometría de áridos" de mezclas semidensas para mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 6. Granulometría de la mezcla de áridos y silicato de hierro para mezclas asfálticas en caliente.

Tamiz		% en peso que pasa de mezcla de áridos naturales y silicato de hierro	% en peso que pasa según norma Manual Carreteras 5.408.201F
¾"	20 mm	100	100
½"	12,5 mm	86	80 – 95
⅜"	10 mm	76	70 – 85
N°4	5 mm	51	43 – 58
N°8	2,5 mm	34	28 – 42
N°30	0,63 mm	17	13 – 24
N°50	0,315 mm	12	8 – 17
N°100	0,16 mm	9	6 – 12
N°200	0,08 mm	6	4 – 8

De los resultados en la tabla se observa que la mezcla de áridos naturales y silicato de hierro cumple con la granulometría estipulada en el manual de carreteras para uso en mezclas asfálticas en caliente.

Las otras propiedades físico-mecánicas también cumplen con los requisitos de Manual de Carreteras Vol N°5 5.408.201 (1, 3 y 4) “Mezcla de áridos”, como se ve en la Tabla 7.

*Tabla 7. Propiedades físico-mecánicas de la mezcla para mezclas asfálticas en caliente.*

Característica	Unidad	Valor	Manual Carreteras 5.408.201A
Partículas chancadas	%	98	Min 90
Partículas rodadas	%	2	
Partículas lajeadas	%	1	Max 10
Desgaste de los Ángeles	%	14,4	Max 25
Índice de plasticidad	%	NP	NP
Sales solubles totales	%	0,018	Max 2
Equivalente de arena	%	57,0	Min 50
Desintegración por sulfatos – fracción gruesa	%	2,3	Max 12
Desintegración por sulfatos – fracción fina	%	3,0	Max 15
Adherencia con CA-24 Método estático Riedel – Weber	% Grado	+95 4-9	Min 95% Min 0-5
Densidad máxima mezcla suelta, DMM	Kg/m <sup>3</sup>	2.769	
Densidad del asfalto	Kg/m <sup>3</sup>	1.010	
Densidad efectiva	Kg/m <sup>3</sup>	3.013	
Densidad real seca	Kg/m <sup>3</sup>	3.005	
Absorción de asfalto	%	0,093	

Como se observa de los datos presentados, la mezcla de áridos de silicato de hierro puede ser usada para mezclas asfálticas en caliente destinadas a tratamientos superficiales.

A pesar del cumplimiento del material con los requerimientos técnicos, actualmente no es posible utilizarlo dado que las normas son prescriptivas y el silicato de hierro es considerado un residuo industrial, por lo que actualmente su uso no es permitido en construcción. Sin embargo, un cambio de tipificación lograría el aprovechamiento de este material para la construcción de tratamientos superficiales.

También es necesario considerar que para cualquier mezcla de silicato de hierro con áridos naturales es necesario realizar los ensayos de caracterización y confirmar que se cumple con el Manual de Carreteras.

## 4.2.2 Tratamientos superficiales asfálticos

Este tratamiento se utiliza en caminos básicos, con bajo flujo de tránsito, como forma de mejorar la calidad de la vía.

La escoria cumple con los requisitos para uso como tratamiento superficial asfáltico solicitados por el Manual de Carreteras 2015 [25], como se ha mostrado en la sección anterior.

La escoria de cobre de CODELCO Ventanas muestra mejor cubrición que los áridos naturales, menor cantidad de lajas y menor índice de lajas, 10 veces más resistencia a la desintegración causada por los ciclos de hielo y deshielo, mejor adherencia con el asfalto que los agregados tradicionales [25].

Mediciones preliminares del ensayo Desgaste de Los Ángeles indican que el desgaste de la escoria está en torno al 20%, dentro de los requisitos del Manual de Carreteras. Se recomienda revisar este resultado dado que el ensayo se realizó en un equipo no preparado para estudiar escoria de cobre [25].

La fórmula de dosificación de la dimensión mínima promedio con escoria de cobre de CODELCO Ventanas no requiere factores de corrección, mostrando buen desempeño con las dosis de árido y ligante [25]. Esto para dosificación en volumen. Si se considera dosificación en masa, se requiere una mayor masa de escoria de cobre que de áridos tradicionales, ya que es un material más denso [25].

Por ser un material más denso, el desprendimiento de partículas de escoria desde un tratamiento superficial asfáltico puede generar más riesgo a los vehículos, debido a que la partícula llevará más energía. Sin embargo, debido a su desempeño dentro de este tipo de recubrimiento se espera que tenga menos desprendimiento de partículas que la alternativa con áridos naturales.

## 4.3 Uso de áridos para morteros y hormigones

Los morteros y hormigones son un gran consumidor de áridos. Si bien hasta el momento no está permitido el uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como árido para morteros y cementos se encuentra en consulta pública la actualización de la NCh 163 *Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales*, que pasa esta norma de una lógica prescriptiva a una basada en desempeño [32]. La nueva norma, con esta nueva lógica, podría permitir el uso de escorias siempre y cuando estas cumplan con el requerimiento técnico solicitado.

A nivel internacional se encuentran múltiples normas técnicas referidas al uso de escorias (normalmente de producción de hierro y acero) en construcción.

En esta sección se presentan experiencias de utilización del silicato de hierro para morteros y hormigones. Para más información sobre las normas técnicas nacionales e internacionales de áridos para morteros y hormigones por favor leer el Anexo 3.

### 4.3.1 Análisis granulométrico de silicato de hierro de fundición Ventanas

Comúnmente las muestras de silicato de hierro al momento de recolección no cumplen con las normas para ser utilizado como áridos en hormigones. Por esto se requiere una etapa de acondicionamiento que considera procesos como chancado y tamizado. Esto no limita el uso de silicato de hierro como material de construcción.

Se presenta el análisis granulométrico para una muestra de silicato de hierro proveniente de la fundición Ventanas (Codelco, Puchuncaví) en el año 2018 [33] en la Tabla 8 y Tabla 9.

*Tabla 8. Características físicas de silicato de hierro proveniente de fundición Ventanas.*

Característica	Unidad	Valor
Densidad aparente Compactada seca	kg/m <sup>3</sup>	2.452
Suelta seca		2.123
Densidad real seca	kg/m <sup>3</sup>	3.725
Densidad real neta	kg/m <sup>3</sup>	3.767
Densidad real SSS	kg/m <sup>3</sup>	3.737
Absorción	%	0,30
Huecos	%	43,2
Finos	%	0,30
Impurezas orgánicas		0 (no presenta)

*Tabla 9. Análisis granulométrico de silicato de hierro proveniente de fundición Ventanas.*

Tamiz	% en peso que pasa
3" – 75mm	100
2 ½" – 62,5mm	96
2" – 50mm	94
1 ½" – 37,5mm	86
1" – 25mm	71
¾" – 20mm	57
½" – 12,5mm	35
⅜" – 10mm	26
Nº4 – 5 mm	11
Nº8 – 2,5 mm	5
Nº30 – 0,63 mm	2
Nº50 – 0,315 mm	1
Nº100 – 0,16 mm	1
Módulo de Finura	7,08

El porcentaje de finos, las impurezas orgánicas y absorción están dentro de los límites para ser utilizado en hormigón o mortero de cemento, según los límites expuestos en prNCh163 Tabla 1, Requisitos físicos [32].

De acuerdo con la norma ASTM D422<sup>6</sup> el tamaño máximo absoluto corresponde al tamiz 75mm (3") y el tamaño máximo nominal corresponde  $\approx 62,5\text{mm}$  (2½"). Observando estos valores, y según los límites expuestos en la norma prNCh 163, es necesario un proceso de molienda con tal de poder utilizar el silicato de hierro en el reemplazo de áridos en confección de hormigones. Dependiendo del árido que se desee sustituir, será la molienda que se efectúe. Esto, ya que los límites para áridos finos y gruesos varían, de acuerdo como se muestra en 0.

En otro set de muestras de silicato de hierro, también de Codelco Ventanas [34] se verificó que se tiene un tamaño máximo nominal de 63mm siguiendo las directrices de ensayo de granulometría (NCh 165 Of.2009 "*Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría*"). Se aprecia, según los límites de las tablas de 0 para arena y gravas, que la muestra necesita un proceso de molienda para así cumplir con los requisitos para ser utilizada en las mezclas para producción de hormigón como áridos.

De acuerdo con el porcentaje de material fino presentado menor a 0,080mm, la escoria de cobre no cumple para ser usada como grava para un hormigón sometido a desgaste. La densidad real del árido seco es superior a 3.740 [kg/m<sup>3</sup>].

De los ensayos revisados, se observa que la densidad de los áridos en base a silicato de hierro es constante y las características físicas, generalmente, cumplen con los requerimientos para ser utilizadas en hormigones, aunque es indispensable realizarles ensayos para verificarlas, como por ejemplo en el caso del último ejemplo donde el porcentaje de finos no cumple con lo que se dispone en la norma NCh163 of.79 Tabla 1, de acuerdo a la norma con que fue realizado el ensayo.

### **4.3.2 Propiedades en hormigón endurecido**

#### **4.3.2.1 Utilización en jardineras y barreras New Jersey**

Con el fin de buscar alternativas para el uso del silicato de hierro, la Fundación Chagres (propiedad de Anglo American) realizó, en conjunto con Control Hidráulico Chile Limitada, el estudio en la fabricación convencional de jardineras cuadradas y redondas, además de barreras New Jersey MOP tipo F Doble utilizando este material [35].

Para el caso de jardineras se utilizó hormigón calidad H25 (de acuerdo a NCh170 Of.85) con una mezcla fresca de: silicato de hierro, cemento, agua y aditivos. Se sustituyeron los áridos (que corresponden a  $\frac{2}{3}$  de arena con granulometría 0-6mm y  $\frac{1}{3}$  de gravilla con una granulometría 6-10mm) de la mezcla original por silicato de hierro.

---

<sup>6</sup> Para más detalles sobre estándares y requisitos técnicos para áridos en morteros y hormigones, revisar el Anexo 3.

Por otro lado, para el estudio de la fabricación de barreras New Jersey se utilizaron 2.200 kg de escoria, una cantidad superior a si se utilizaran áridos, debido a su mayor densidad. Además de la escoria, la mezcla tiene: cemento, desmoldeante, agua y aditivos. Se espera una resistencia de hormigón clase H35 en este caso.

Los resultados obtenidos para ambos productos fueron “*altamente satisfactorios*” de acuerdo con los objetivos planteados al inicio. La calidad y la resistencia final del hormigón fueron las esperadas, sin embargo, para el caso de las barreras jersey se apreció un aumento del peso total debido a la mayor densidad del silicato de hierro, provocando esto algunos cambios en su uso (mayor estabilidad, mayor resistencia al impacto, más dificultoso su traslado). También, se recomienda realizar una etapa previa con tal de asegurar una granulometría óptima, tanto del material fino como el grueso, con el fin de lograr un menor uso de cemento y un aseguramiento en la obtención de un hormigón con resistencia H35. Se concluye finalmente que la utilización de silicato de hierro es una alternativa viable en reemplazo de áridos en la fabricación de jardineras cuadradas y redondas.

#### **4.3.2.2 Durabilidad en hormigones con resistencia a la compresión de 30 MPa**

En este estudio se analizaron propiedades fisicoquímicas y también las relacionadas con la durabilidad del hormigón, al reemplazar el árido grueso con escoria de cobre (tamaño máximo nominal 20mm) en la mezcla [36]. Para la fabricación se utilizó cemento puzolánico Portland. Se realizaron 4 proporciones de sustitución: 25%, 50%, 75% y 100%, además de una quinta, que es el hormigón patrón sin reemplazo de áridos. Se incluye en las propiedades estudiadas las referidas a los ensayos de: permeabilidad, densidad, resistencia a compresión, penetración de iones cloruro y resistividad eléctrica.

La penetración de iones cloruro de los hormigones con reemplazo de escoria de cobre presentaron un comportamiento lineal, por lo que se infiere que el porcentaje de reemplazo es indiferente para el comportamiento. Los iones cloruro pueden penetrar en el hormigón debido a la relación con su permeabilidad, capilaridad, absorción y difusión.

La resistividad eléctrica en los hormigones con reemplazo presentó un comportamiento no lineal, disminuyendo desde el máximo que se produce en el hormigón con 25% de reemplazo. El resultado de los ensayos de esta propiedad implica que el hormigón con reemplazo puede ser utilizado en soluciones constructivas que contengan armadura, por ejemplo, en hormigón armado.

La durabilidad se estima que alcanza su máximo en los hormigones con porcentaje de reemplazo 25% y 50%, luego de esto, las propiedades asociadas a la durabilidad comienzan a disminuir. Por lo tanto, y en base a los resultados generales, los hormigones producidos en estos ensayos aseguran “*una buena durabilidad bajo condiciones moderadas*” [36].

#### **4.3.2.3 Comportamiento resistente del hormigón**

Se estudia experimentalmente la resistencia a flexotracción de hormigones en donde se utiliza el reemplazo de áridos finos por escoria de cobre (provenientes de fundición Caletones, El Teniente, Codelco) [37]. Para esto, se ocuparon porcentajes de reemplazo de 25%, 40% y

50% para dos relaciones de agua/cemento, 0,45 y 0,5, resultando en 6 combinaciones de hormigones experimentales más una mezcla patrón sin sustitución de áridos.

La escoria de cobre originalmente no cumple con la banda granulométrica requerida por la NCh 163, por lo que se le realiza un proceso de molienda con tal que cumpla con los requisitos de granulometría. Además, esta posee una densidad real seca de 4.000 [kg/m<sup>3</sup>] y un porcentaje de absorción de 0,2%.

Los ensayos a flexotracción se siguieron de acuerdo con las directrices de la norma NCh 1038. Al mismo tiempo, se realiza un ensayo de docilidad y exudación a través del asentamiento del Cono de Abrams siguiendo la norma NCh 1019 y también la densidad del hormigón endurecido de acuerdo con la norma NCh 1037.

Los resultados de los ensayos muestran que al incorporar escorias de fundición de cobre esta afecta la trabajabilidad de la mezcla. La docilidad aumenta con el uso de escorias de cobre en comparación al hormigón patrón. Esto se puede atribuir a que las partículas de escoria poseen una textura más lisa en comparación a las arenas originales.

La exudación también aumenta en los hormigones con silicato de hierro, siendo proporcional al porcentaje de sustitución. Lo anterior se atribuye debido al alto peso específico de la escoria en relación con el resto de los materiales, así como también a la baja capacidad de absorción que poseen.

También aumenta la densidad del hormigón sobrepasando los valores de 2.600 [kg/m<sup>3</sup>] al utilizar una tasa de reemplazo de 50%. Este incremento de densidad es proporcional al aumento de la sustitución, debido al mayor peso específico del silicato de hierro versus el árido original.

Los valores de la resistencia a la flexotracción y compresión también aumentan en función del porcentaje de incorporación de silicato de hierro (se esperan valores de resistencia a flexotracción a 28 días de 4,3 MPa y 3,6 MPa, de acuerdo con una relación agua/cemento 0,45 y 0,52, respectivamente). Los valores máximos se encuentran en hormigones con contenido entre 40% y 50% de escoria.

#### **4.3.2.4 Utilización de residuos industriales como áridos en la fabricación de hormigones**

En este estudio se analizaron las propiedades de 4 mezclas distintas para la fabricación de hormigón: 1 mezcla patrón sin sustitución, 2 utilizando escoria de cobre y 1 sólo con árido de reciclado de hormigón [38]. Se utilizaron escorias de fundición de cobre (provenientes de la fundición Ventanas) en reemplazo de áridos finos, aunque ambas contenían al mismo tiempo escorias de reciclado de hormigón en la misma cantidad. La primera mezcla contiene un 25% de silicato de hierro y la segunda un 50% en relación con el árido fino total ocupado.

Granulometría: es necesario realizarle un proceso de molienda a la escoria de cobre, con tal que pueda cumplir con los requisitos de norma NCh163. A pesar de todo, su uso no presentó problemas para la fabricación de las mezclas.

Densidad: se observa un aumento de la densidad del hormigón debido al peso específico del silicato de hierro mayor al de un árido natural (en un 31%), alcanzando un valor de 2.520 [kg/m<sup>3</sup>] para la mezcla con un 50% de sustitución. Para ambas mezclas se advierte que la densidad aumenta en forma directamente proporcional al aumento de reemplazo de árido por escoria de cobre.

Resistencia al desgaste: al igual que la densidad, el reemplazo de silicato de hierro por áridos influye en un aumento en esta propiedad para los hormigones.

Docilidad: se observa una disminución en esta propiedad para la mezcla con un 25% de acuerdo con los resultados del ensayo Asentamiento de Cono (NCh 1019 Of.2009). Sin embargo, para la mezcla con un 50% de sustitución esta propiedad se mantuvo similar al hormigón patrón. Cabe destacar, que ambas mezclas cumplen con los requisitos normados.

Resistencia a compresión: ambas mezclas presentaron una resistencia mayor a los 28 días en comparación a la mezcla patrón. Entre las dos, la que mostró una mayor fue la que contiene 50% de sustitución sobrepasando a la mezcla patrón en un 8% (21,83 MPa versus 23,72MPa).

Resistencia a flexión: se observaron aumentos a los 28 días para la mezcla con 50% de sustitución en comparación al hormigón patrón, aunque en este caso, las variaciones son menores. (4,4 MPa versus 4,6 MPa). El hormigón con 25% de reemplazo refleja una pequeña disminución (alrededor de un 2,3%).

#### **4.3.2.5 Experiencia internacional**

Se han realizado varias investigaciones con tal de estudiar las propiedades mecánicas en el posible uso de hormigón y mortero con un porcentaje de áridos finos y gruesos sustituidos por escoria de cobre. Dentro de estos, distintos estudios han reportado que las resistencias a la compresión y tracción de los hormigones fabricados con silicato de hierro es la misma o incluso mayor que los hormigones con mezcla sin escoria de cobre.

[39] utilizando distintas tasas de agua/cemento evaluaron la resistencia a la compresión desarrollada por morteros y hormigones. Con relación a los morteros, observaron que mientras mayor era el porcentaje de reemplazo con escoria de cobre menor resistencias tempranas poseían, con una proporción agua/cemento 0,48. Sin embargo, las resistencias finales de los morteros entre un 20-80% de sustitución fueron mayores que el mortero patrón. Por otro lado, los hormigones con porcentaje de sustitución expusieron resistencia a la compresión con tendencia similar a lo que mostraron los morteros, resultando en resistencias tardías mayores que el hormigón patrón, independiente de la relación agua/cemento. Esto se muestra en la Figura 2:

[40] y [41] reportan que el hormigón fabricado con escoria de cobre en reemplazo de áridos gruesos y arenas mostraron propiedades mecánicas similares con los hormigones patrones.



[42] concluye que cuando se fabrican morteros y hormigones utilizando silicato de hierro en reemplazo de cemento o de áridos, estos tienen un “*buen rendimiento en comparación cuando se utiliza cemento Portland, teniendo una resistencia igual o incluso mayor*”.

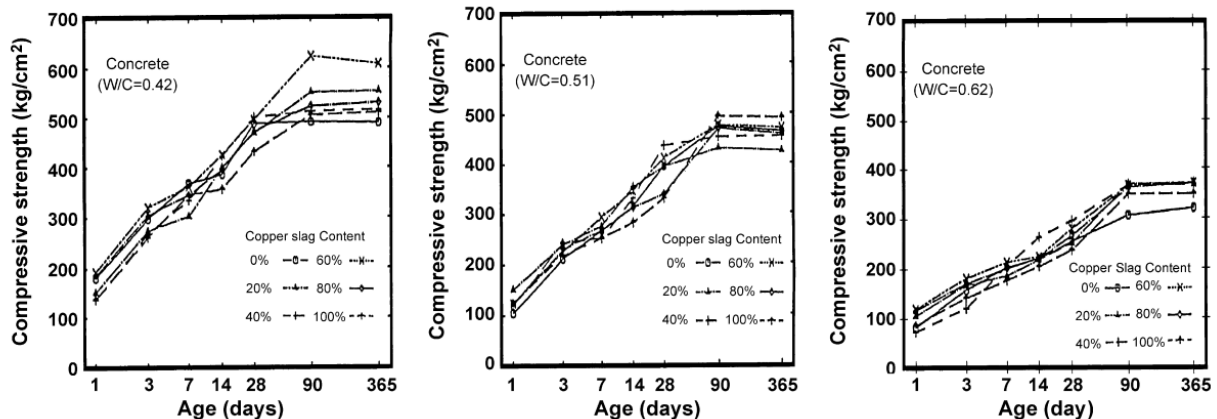


Figura 2. Variaciones de la resistencia a compresión con distintos porcentajes de reemplazo de áridos por silicato de hierro con distintas proporciones agua/cemento. Experiencia internacional [39].

[43] realizan un estudio amplio sobre la literatura aplicada a la resistencia de los hormigones donde se utiliza escoria de cobre en reemplazo de arena. Dentro de las principales conclusiones sugiere que el uso de silicato de hierro no limita el desarrollo de las resistencias mecánicas (compresión, tracción y flexión) del hormigón fabricado, mientras se haga a través de un buen diseño y buenas prácticas en la selección de los materiales, granulometría y tamaño del árido, y proceso de fabricación. Así mismo, indica que la resistencia a la compresión del hormigón con silicato de hierro obtiene más beneficio en comparación a las resistencias a tracción y flexión. Finalmente, los encargados del proyecto estarían habilitados para utilizar escoria de cobre por arena en el uso de hormigones, independiente de la proporción de reemplazo, sin embargo, se debe tener cuidado con respecto al peso del hormigón y al efecto de endurecimiento retardado.

### 4.3.3 Propiedades en hormigón fresco

#### 4.3.3.1 Experiencia internacional

[20] en relación con la trabajabilidad concluye, luego de una revisión bibliográfica, que el uso de escoria de cobre en reemplazo de áridos para la producción de hormigón es factible, y debería acrecentar la trabajabilidad de este. Al mismo tiempo, el uso de aditivos y de agua para la mezcla se podría reducir, resultando en un aumento de la resistencia para un contenido dado de cemento.

Los mismos autores [20] señalan la importancia de utilizar una adecuada proporción de agregados finos para controlar la exudación del hormigón, en particular, utilizar granulometrías similares entre áridos finos y escoria de cobre. Al ocupar un 100% de

reemplazo con escoria de cobre, el hormigón se hace más sensible a la exudación, por lo tanto, se debe revisar la mezcla, por ejemplo, limitar el porcentaje de uso de escoria, aumentar la cantidad de los agregados finos, o reducir el contenido de agua.

Además [42] indican que el tiempo de fraguado se retrasa, especialmente cuando se ha utilizado escoria de cobre para reemplazar el árido fino. [43] señalan que el uso de escoria de cobre retrasa también el proceso de hidratación, y lo asocia con la presencia de metales pesados, como el zinc y el plomo, por lo que el inicio y término del tiempo de fraguado se retrasan, debiendo tener cuidado en los pasos en la fabricación del hormigón, considerando para que proyecto pueda ser beneficioso o perjudicial.

#### **4.3.4 Utilización de escoria de cobre en morteros de cemento**

Se busca analizar los cambios en las propiedades físicas y mecánicas del mortero de cemento (orientado a revestimiento y albañilería) cuando se utiliza escoria de cobre (proveniente de fundición Ventanas, Codelco) en reemplazo de la arena como árido [24]. Asimismo, una comparación de la trabajabilidad que posee el mortero fresco.

Los morteros para albañilería y para revestimiento se encuentran definidos en la norma NCh 2256/1:

- Albañilería: mezcla compuesta de cemento, árido fino, agua y, eventualmente cal, aditivos y/o adiciones, para un uso en albañilería.
- Revestimiento: mezcla compuesta de uno o más aglomerantes inorgánicos, áridos, agua, y, a veces, adiciones y/o aditivos para realizar revestimientos o estucos.

Habitualmente se utilizan áridos finos en la mezcla de morteros, por lo general arena, de manera que las propiedades del mortero dependerán de la calidad del árido incorporado. El porcentaje de agua tiene relación con la capacidad de hidratar al cemento, por lo tanto, con la trabajabilidad que posea el mortero. En este experimento se utilizaron proporciones de cemento/arena de 1/3 y 1/5 y cuatro porcentajes de sustitución de escoria de cobre por arena: 0%, 30%, 60% y 90%.

En este caso la escoria de cobre utilizada no cumple con los requisitos de la banda granulométrica como dicta NCh 163, no así la arena utilizada. Además, la densidad de la escoria es un 47% mayor que la arena ubicándose en el rango entre 2.300 – 3.750 [kg/m<sup>3</sup>], al mismo tiempo, posee una menor absorción de agua.

Consistencia: debido a la poca absorción de la escoria de cobre la consistencia de los morteros frescos fabricados aumenta a medida que el porcentaje de reemplazo aumenta para ambos porcentajes de cemento/arena. Sin embargo, no traspasan el límite señalado por la norma para los distintos usos destinados del mortero.

Adherencia: este ensayo se realiza con el mortero ya endurecido. Al observar los resultados se aprecia que el reemplazo de silicato de hierro por arena favorece esta propiedad en el mortero, cumpliendo con los requisitos mínimos establecidos en la norma.

Densidad: como se mencionó anteriormente la densidad de la escoria es mayor a la que posee la arena. Esto se refleja en los resultados de ensayos de densidad donde el mortero sufre un aumento de densidad entre 21% y 27% comparándolo con el mortero patrón (sin reemplazo). Se recomienda no utilizar el mortero con sustitución de silicato de hierro para estucos.

Resistencia mecánica: esta propiedad aumenta para todos los casos donde se utiliza escoria de cobre, haciéndolo más resistente a medida se aumenta el porcentaje de sustitución. Para el mortero con mayor porcentaje de reemplazo se debería ajustar la cantidad de agua de amasado, disminuyendo, por lo tanto, la relación agua/cemento. El reemplazo óptimo de sustitución es de 90%. Sin embargo, para una dosis de cemento/arena de 1/3 se debe ajustar la cantidad de agua, y para una razón 1/5 el agua de amasado constante.

#### 4.4 Uso de silicato de hierro como reemplazo para cemento

A nivel nacional se ha avanzado en normas técnicas para la incorporación de escorias (de altos hornos) y cenizas volantes en puzolanas. A nivel internacional se cuenta con múltiples alternativas comerciales de cementos en base a escorias, principalmente de la producción de hierro y acero. En el Anexo 4 se encuentra más información sobre normas técnicas nacionales e internacionales sobre materiales de reemplazo al cemento.

Además de utilizar el silicato de hierro para reemplazar los áridos en la fabricación de morteros y/o hormigones, también se han realizado experimentos para observar el comportamiento de la mezcla al reemplazar un porcentaje del cemento, principalmente, por sus propiedades puzolánicas como se describieron Capítulo 3.

##### 4.4.1 Uso de Escoria de Cobre en Cementos, Chile

Se reemplaza cemento Portland por silicato de hierro (producida a través de enfriamiento brusco) proveniente de la fundición Caletones (El Teniente, Codelco) en distintos porcentajes, 25% y 40%, para la fabricación de mortero de cemento hidráulico, favorecido por las propiedades puzolánicas del silicato de hierro. Con esto, se espera examinar las propiedades mecánicas (flexotracción y compresión) [44]. Al mismo tiempo se espera medir otras características, tales como: consistencia, tiempo de fraguado, calor de hidratación y la resistencia al ataque de sulfatos, comparándolas con los límites normativos de Chile.

En la siguiente tabla se muestran los componentes y sus respectivos porcentajes predominantes de la escoria seleccionada para los ensayos:

*Tabla 10. Compuestos predominantes en silicato de hierro Fundición Caletones, para producción como reemplazo de cemento.*

Elemento	Porcentaje (%)
Cobre	0,86
Magnetita	6,6
Fierro	42,6
Sílice	32,7

Alúmina	6,6
Otros	10,64

Los cementos con adiciones puzolánicas se clasifican de acuerdo con la norma NCh 148, la cual los separa en relación con la cantidad de adición de puzolana en peso respecto al cemento:

- Cemento Portland puzolánico: hasta 30% de puzolana
- Cemento puzolánico: entre 15% y 50% de puzolana

De acuerdo con los resultados de los ensayos se apreció que los morteros con adición de silicato de hierro cumplen con los requisitos mínimos normados para tiempo de fraguado en ambas graduaciones, comportándose el silicato de hierro como un retardante de fraguado, en comparación al mortero patrón sin sustitución.

Al observar los resultados de los ensayos de resistencias mecánicas se observa que en las mezclas con sustitución ensayadas disminuyen en comparación con la mezcla patrón (sin sustitución), así como también disminuyen al aumentar el porcentaje de sustitución, sin embargo, siguen estando sobre los niveles mínimos para la graduación corriente (de acuerdo a NCh148 Of.68). El mortero con 25% de reemplazo de escoria de cobre sigue estando sobre el nivel mínimo para la graduación corriente y alta resistencia, no así el mortero con 40% de reemplazo, en el cual solamente grado corriente cumple con lo mínimo, descartando el grado de alta resistencia para esta tasa de reemplazo. Se utilizó un aditivo reductor de agua para la mezcla con 40% de reemplazo, aumentando “*drásticamente*” la resistencia del mortero.

Con respecto al calor de hidratación, se observa que este disminuye a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de silicato de hierro. Esto podría ser útil en proyectos donde se necesita cementos en grandes masas, en los cuales suelen ocurrir fracturas y agrietamientos debido a esta propiedad.

Al contrario que el punto anterior, se refleja que los morteros con reemplazo no presentan un buen comportamiento frente al ataque de sulfatos, sobrepasando los límites mínimos de deformación.

Sí presentan un buen comportamiento en la capacidad de retención de elementos químicos contaminantes, como, por ejemplo, arsénico, bario y mercurio, por lo que se puede catalogar esta mezcla de mortero como no tóxico para el medio ambiente.

El estudio deja abierta la opción de seguir investigando en encontrar un nivel de molienda óptimo, también en el efecto de utilizar silicato de hierro directamente en la molienda de clínker y la dosificación óptima en la cantidad de adición.

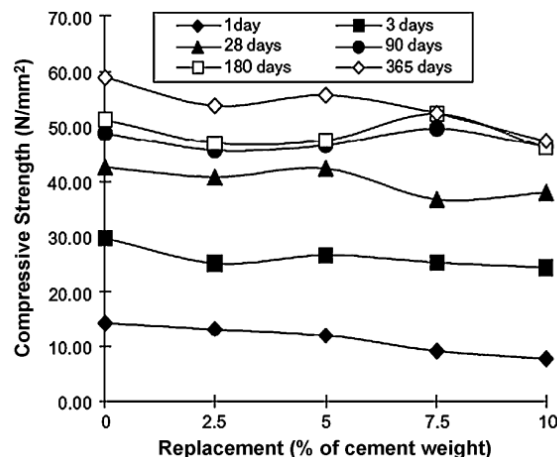
#### 4.4.2 Reemplazo de cemento por silicato de hierro, experiencia internacional

El uso de la escoria de fundición de cobre como material puzolánico para sustituir cemento Portland, así como sus efectos sobre las reacciones de hidratación y las propiedades en el mortero y en el concreto han sido estudiadas en diversas publicaciones científicas.

Además, se ha identificado un problema subyacente a este uso, que trata sobre el alto contenido de metales y sus características de lixiviación (lo cual también se ha examinado en algunos ensayos chilenos). Los límites de normas internacionales con respecto a la lixiviación de níquel, cobre, plomo y zinc se pueden apreciar en 0. Con respecto a esto [45] concluye que un mortero incorporando hasta un 10% de silicato de hierro (con origen en Malasia) es seguro en relación con los elementos químicos mencionados anteriormente. Existiendo también otros estudios (por ejemplo [46]) donde se menciona que estos elementos lixiviados están bajo los límites impuestos por otras regulaciones (por ejemplo, USEPA).

Acerca de las propiedades mecánicas de un hormigón con sustitución de cemento por escoria de cobre (proveniente de Bahía, Brasil) en un porcentaje de 10% [47] muestran que la resistencia a compresión del hormigón es menor en comparación a un hormigón sin sustitución. Mientras que la resistencia a flexión es similar en ambos tipos de hormigón, con una relación de agua/cemento de 0,4-0,5. [45] con el fin de observar la resistencia a la compresión del mortero con reemplazo, indican que éste muestra una resistencia ligeramente menor en comparación a un mortero patrón, recalcando que una tasa de reemplazo entre 5% y 7,5% entrega una resistencia a la compresión óptima. Se aprecian los resultados en la siguiente figura:

Figura 3. Variaciones de la resistencia a compresión con distintos porcentajes de reemplazo de cemento por silicato de hierro. Experiencia internacional [42].



## 4.5 Toxicidad

La lixiviación de materiales pesados desde el silicato de hierro es una preocupación constante para las partes interesadas, especialmente al considerar el origen del material (fundiciones de cobre), que tienen altas emisiones de metales pesados. Sin embargo, la lixiviación es una característica de cualquier árido, natural o reciclado y depende de su composición y la exposición al ambiente, por lo que podría darse también en áridos naturales.

En Chile, el Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos (D.S. 148) reglamenta qué se considera tóxico. Un residuo tendrá la característica de toxicidad cuando su disposición final se realice *en el suelo* y las concentraciones máximas permisibles (CMP) después de un Test de Toxicidad por Lixiviación sean superiores a lo que se indique en la Tabla 11 [48].

Tabla 11. Concentraciones máximas permisibles (CMP) de elementos químicos inorgánicos para un Test de Toxicidad por Lixiviación, DS 148.

Elemento	CMP [mg/l]
Arsénico (As)	5
Cromo (Cr)	5
Plomo (Pb)	5
Mercurio (Hg)	0,2
Selenio (Se)	1
Bario (Ba)	100
Cadmio (Cd)	1
Plata (Ag)	5

Para aplicaciones de construcción el análisis de Toxicidad por Lixiviación es la prueba más apropiada.

En general se observa que los áridos sueltos lixivian más que los áridos dentro del hormigón.

Para más información sobre la regulación nacional e internacional, revisar el Anexo 5.

#### 4.5.1 Ensayos de Toxicidad

Además de las propiedades físico y mecánicas, existe un punto importante a mencionar que es respecto a la toxicidad que posee una *mezcla* de hormigón o morteros de cementos cuando se utiliza silicato de hierro en la mezcla. Esto debido a los elementos químicos presentes en la composición de la escoria (como se menciona en la Tabla 11), y que se pueden medir a través de ensayos específicos. A continuación, se presenta un ejemplo de Chile, sobre fabricación de baldosas de concreto con silicato de hierro en reemplazo de áridos.

##### 4.5.1.1 Fabricación de baldosas de concreto

En este caso se realizan los ensayos propios con tal de examinar las características químicas, en específico, la toxicidad bajo un procedimiento de lixiviación [28]. Para esto, se elaboran 5 baldosas de cemento con distintas proporciones de reemplazo de áridos por silicato de hierro en forma de fino y gravilla, proveniente de dos fundiciones, Lampa y Chagres.

La mezcla para la fabricación del producto tiene los siguientes porcentajes de sustitución:

Tabla 12. Relación porcentual de constituyentes de mezcla para fabricación de baldosas de concreto.

	Arena		Gravilla	
	Árido	Escoria	Árido	Escoria
E1	0%	100%	0%	100%
E2	50%	50%	50%	50%
E3	50%	50%	0%	100%
E4	0%	100%	75%	25%
E5	100%	0%	0%	100%

La composición química de los elementos Cu, Fe y As del material original se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 13. Composición química de los finos y gravilla utilizados para fabricación de baldosas de concreto.

Elemento	Fino Chagres	Gravilla	Fino Lampa
Cobre	2,89%	1,85%	0,39%
Hierro	21,15%	15,94%	4,58%
Arsénico	0,05%	0,03%	0,00%

Una vez fabricados los productos se sometieron a la prueba TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), con tal de obtener las concentraciones de los elementos nocivos indicados en D.S. 148. Los resultados se ven en la Tabla 14.

Tabla 14. Porcentajes de elementos químicos nocivos (D.S. 148) de las baldosas de concreto.

Elemento	CMP* [mg/L] D.S. 148	E1	E2	E3	E4	E5
Plomo	5,0	<0,0770	<0,0770	<0,0770	<0,0770	<0,0770
Cadmio	1,0	<0,0165	<0,0165	<0,0165	<0,0165	<0,0165
Cromo	5,0	<0,0550	0,078	0,084	0,076	0,080
Selenio	1,0	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400
Arsénico	5,0	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400
Plata	5,0	<0,0275	<0,0275	<0,0275	<0,0275	<0,0275

\*CMP = Concentraciones Máximas Permisibles

Se puede observar que los elementos mencionados se encuentran por debajo de la concentración máxima permisible (CMP) del D.S. 148, cumpliendo de esta forma con el reglamento sanitario que regula el manejo de residuos peligrosos. Se concluye que los elementos constructivos baldosas no son contaminantes tóxicos por lixiviación. En este análisis de elementos inorgánicos falta el Mercurio y Bario.



## 4.6 Resumen

En general, se observa de los experimentos y ensayos descritos, que la escoria de fundición de cobre como reemplazo de áridos puede aportar al incremento de propiedades físicas y mecánicas del hormigón endurecido y fresco, como la trabajabilidad (la docilidad), independiente si sea mortero o hormigón, y la adherencia.

En cuanto a las propiedades del hormigón endurecido. Los mejores resultados se encuentran en tasas de reemplazo entre 40% y 50%, de acuerdo con los estudios expuestos anteriormente. Sin embargo, se debe tener cuidado al utilizar el silicato de hierro en elementos constructivos debido al mayor peso específico que posee en relación al árido ([20] menciona que es un factor de 3,6), aumentando así la densidad del hormigón (el mismo autor señala que aumenta en un 1% cada 10% de adición de silicato de hierro), lo cual requiere de un análisis en el diseño estructural específico de cada proyecto para observar el comportamiento estructural y sismorresistente del elemento.

Los resultados en cuanto a toxicidad de la escoria por presencia de elementos químicos nocivos también resultaron favorables, presentando límites menores que los establecidos por las regulaciones nacionales.

En otro tipo de elementos constructivos igualmente se observaron resultados favorables para su utilización, como es el caso del diseño y construcción de terraplenes, principalmente en su utilización como material de relleno en el núcleo. Sin embargo, de acuerdo con los proyectos efectuados en territorio nacional, es recomendable, por ahora, su utilización para caminos locales. Igualmente, se ha observado que al utilizar silicato de hierro en mezclas de áridos para ser usada en tratamientos asfálticos en caliente cumplen con los requisitos del Manual de Carreteras.



**Aspectos metodológicos para la realización de un análisis de ciclo de vida comparativo entre áridos naturales y silicato de hierro**

## Capítulo 5. Aspectos metodológicos para la realización de un análisis de ciclo de vida comparativo entre áridos naturales y silicato de hierro

El análisis de ciclo de vida es una metodología estandarizada en las ISO 14040 y 14044. Se utiliza para realizar estudios de impactos ambientales potenciales de sistemas de producto, que son el conjunto de actividades que ocurren para que un producto pueda cumplir su función. Estas actividades abarcan desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final o revalorización de un producto, pasando por todos los procesos de manufactura, transportes y uso del producto.

Estos estudios se realizan habitualmente en base a la *unidad funcional*, que es una medida cuantificable del servicio que el producto presta. Por ejemplo, para evaluar el ACV de una pintura, se consideran los metros cuadrados a cubrir y el tiempo que se requiere que la superficie esté pintada. Esto da como resultado un cierto volumen de pintura a utilizar en el periodo. Este volumen constituye el *flujo de referencia* sobre el cual se realizan los cálculos.

El uso de la *unidad funcional* es particularmente relevante para la comparación de los impactos ambientales potenciales de diferentes productos, ya que sus *flujos de referencia* podrían ser diferentes. Por ejemplo, al comparar los impactos ambientales potenciales de dos pinturas diferentes para cubrir una superficie de 10 m<sup>2</sup> durante 5 años, podría necesitar un galón de un tipo de pintura y tres galones de otro tipo de pintura.

De esta forma se logran comparaciones más justas, evaluando el sistema de producto según su desempeño y no según una cantidad fija.

El estándar ISO 14025 define el procedimiento para generar análisis de ciclo de vida estandarizados, que permitan comparaciones entre productos de una misma categoría de productos. Sin embargo, para lograr la comparabilidad, se deben cumplir ciertas reglas:

- Solo se pueden comparar desempeños ambientales de productos cuyos ACV consideren el ciclo de vida completo (de la cuna a la tumba) y que estén basados en la misma función, vida útil de referencia y cuantificados por la misma unidad funcional.
- Deben cumplir todas las condiciones establecidas en la ISO 14025 sección 6.7.2.

Los análisis de ciclo de vida parciales (de la cuna a la puerta) sólo podrán ser usados para comparaciones si:

- Usan una unidad funcional común
- Cumplen las condiciones establecidas en la ISO 14025 sección 6.7.2.
- Cumplen las condiciones establecidas en la ISO 21930 sección 5.6 cuando el producto es usado en edificios.

No se pueden comparar productos si sus análisis de ciclo de vida están hechos en base a una unidad declarada.



Por la variedad de productos de construcción, es usual contar con reglas de categoría de producto complementarias (RCP-c) que estandarizan las decisiones metodológicas para categorías específicas de productos de la construcción.

En esta sección se ha considerado la revisión de las reglas por categoría de productos detalladas en la Tabla 15:

*Tabla 15. Reglas por categoría de productos consideradas en esta revisión.*

Código	Nombre/Descripción	Tipo de RCP	Organización
EN 15804	Productos de construcción	General	Unión Europea
ISO 21930	Productos y obras de construcción	General	ISO
RCP 2019:14	Productos de construcción. Adecuación de EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 e ISO 21930:2017	General	EPD System
RCP 014	Agregados naturales, concreto triturado y escoria de hierro o acero	Específica	ASTM
<b>Sin código</b>	Cemento de escoria de hierro	Específica	ASTM

En Chile está adoptada la norma ISO 21930:2017 por el INN, sin embargo, la mayoría de las Declaraciones Ambientales de Producto están hechas con la EN 15804 o la RCP 2019:14 [51].

Por otro lado, la RCP más cercana al material en estudio es la de agregados de construcción de la ASTM [50], que, si bien tenía vigencia hasta diciembre de 2021, aún está en uso. Esta regla por categoría de producto considera también los áridos en base a escoria de la producción de hierro.

No se encontraron normas técnicas ni reglas por categoría de producto que mencionaran el silicato de hierro de fundiciones de cobre (escoria de cobre, *copper slag*). Esto abre una oportunidad para que la industria nacional participe de potenciales reglas por categoría de producto. Actualmente se encuentra en desarrollo la regla por categoría complementaria del EDP System “Agregados que se pretende integrar en morteros, concreto, mezclas bituminosas o mezclas hidráulicas”. Esta es una adecuación de un estándar europeo sobre los mismos productos.

En las próximas secciones se detallarán las principales decisiones metodológicas que afectan el resultado del estudio, sus diferencias entre estas reglas por categoría de producto y la recomendación para la realización del análisis de ciclo de vida del silicato de hierro como reemplazo de áridos en la construcción.

### **5.2.1 Definición del silicato de hierro como coproducto o como residuo**

La definición del silicato de hierro como coproducto o como residuo es relevante ya que implica asignar o no asignar parte de los impactos de la producción de cobre a este material.

En general, se entiende un coproducto como “*cualquier de dos o más materiales, productos o combustibles vendibles del mismo proceso unitario, pero que no son el objeto del análisis*” (traducción libre de EN 15804).

Por otro lado, un residuo es *una sustancia u objeto que el titular descarta, pretende descartar o está obligado a descartar* (traducción libre de EN 15804).

Considerando estas definiciones, el silicato de hierro proveniente de fundiciones de cobre debería ser clasificado como residuo. Sin embargo, la propia EN 15804 establece que para aquellos materiales que alcanzan el estado de “fin de residuo” en los módulos A1 a A3<sup>7</sup> se deberán asignar como coproductos, a menos que esto no sea posible. La RCP para agregados de la construcción de la ASTM [50] también indica que en el caso de escorias (en ese caso, de hierro) se debe asignar parte de la carga ambiental de la producción de hierro a la escoria utilizando un criterio económico.

Por el contrario, en ISO 21930 se define que los residuos que se pueden reutilizar no deben considerarse coproductos y por lo tanto no se les debe asignar carga ambiental ya sean materiales o energía. Esto se condice con la RCP para cemento en base a escoria del Centro Nacional de Estándares de Sustentabilidad [52].

Por su parte, la RCP 2019:14 [51] indica que se debe tomar la determinación metodológica que aporte más carga ambiental al producto bajo estudio. Para ello establece una serie de reglas para tomar la decisión de si el producto es un residuo o un coproducto y cómo asignarle carga ambiental.

La determinación de si el material es un coproducto o un residuo suele atribuirse a su valor económico. De esta forma, si un residuo tiene valor económico luego de una adecuación, la EN 15804 lo considera un coproducto y los procesos de adecuación del material se incorporan al sistema producto que le dio origen, es decir, a la producción de cátodos de cobre.

La forma de asignar cargas está definida en la ISO 14040, con la siguiente jerarquía:

1. Si los coproductos pueden ser producidos independientemente, se realiza el análisis para cada sistema independiente, evitando la asignación de cargas.
2. Si los coproductos surgen del mismo sistema, existe una relación física entre el producto y sus coproductos y la diferencia en valor económico por unidad de masa o energía del producto y sus coproductos es baja, entonces se realiza asignación en base a la relación física (masa o energía).
3. En todos los otros casos, la asignación deberá hacerse según el valor económico de los productos y coproductos. Por ejemplo, las ventas (producción por precio para cada producto y coproducto) anuales. En este caso, se debe realizar un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto sobre los resultados que han tenido las decisiones sobre los precios de cada material.

---

<sup>7</sup> Los módulos A1 a A3 se refieren a la producción de materiales de construcción, o las actividades que ocurren antes de la actividad de construir la obra.

En este último caso, si el valor económico del coproducto es cero, entonces es equivalente a considerarlo un residuo o aplicar el criterio de la ISO 21930:2017.

En general, si el esfuerzo para realizar la asignación es desproporcionado al incremento de la exactitud del resultado, en la PCR 2019:14 [51] se permite realizar suposiciones conservadoras, que son:

- Si el material está saliendo del sistema producto en estudio, se puede considerar que no tiene valor económico y por lo tanto no lleva carga ambiental. Esto sería válido, en este caso, si el sistema producto en estudio fuera la producción de cátodos de cobre.
- Si el material está entrando en el sistema producto en estudio, se debe asumir que trae una carga ambiental.

En consecuencia, para establecer el impacto ambiental del silicato de hierro se hace necesario evaluar su valor económico.

Un segundo caso posible es que el silicato de hierro se considere un residuo. Como se dijo anteriormente, en el caso de seguir la ISO 21930:2017, no se le debería asignar carga ambiental al silicato.

Sin embargo, existen múltiples procesos necesarios para que el silicato de hierro se pueda usar en una obra, por ejemplo: chancado, lavado, transporte. La pregunta es cuáles de estos procesos se deben considerar en la estimación de los impactos ambientales del ciclo de vida de la obra.

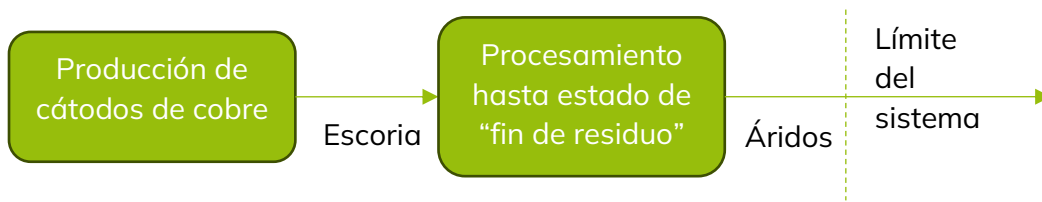
Para ello, según la PCR 2019:14 [51], es necesario establecer el punto en el que el material ya no es un residuo (punto de no residuo). Este punto se establece cuando [51]:

- El material o producto recuperado se usa comúnmente para fines específicos;
- Existe un mercado o demanda, identificado por un valor económico positivo, para el material o producto recuperado;
- El material o producto recuperado cumple con los requerimientos técnicos para los usos específicos en que se utiliza y cumple con la legislación existente y los estándares aplicables para el uso; y
- El uso del material o producto recuperado no llevará a impactos adversos sobre la salud del medio ambiente o las personas, lo que se entiende como que su contenido de sustancias peligrosas está por debajo de los límites en la legislación aplicable.

En este caso se considera que el residuo ha pasado a ser un material.

Por efectos del segundo punto, los impactos ambientales asociados a la adecuación del residuo para que sea un producto se asignan al sistema producto original, como se ve en la Figura 5.

Figura 5. Límites del sistema para el caso de materiales en base a residuos.



Considerando las reglas de asignación y coproductos, esto significa que para el silicato de hierro se debe asignar económicamente una parte de los impactos de la producción de cátodos de cobre y adicionar el impacto de los procesos necesarios para generar un árido listo para usarse en reemplazo de áridos naturales.

En resumen, existen dos formas de realizar la asignación de cargas ambientales al silicato de hierro:

- No asignar carga ambiental (ISO 21930) al residuo, agregando solamente los impactos de los procesos de adecuación del residuo para transformarlo en un producto.
- Asignar parte de la carga ambiental del sistema de producto original (es decir, de la producción de cobre) (EN 15804) y agregar los impactos de los procesos de adecuación del residuo para transformarlo en un producto. Esto debería ser hecho por criterio económico.

Por ello la recomendación es realizar un análisis de sensibilidad de esta decisión metodológica en el análisis de ciclo de vida, de forma de determinar la variabilidad que tendrían los resultados en ambos casos.

## 5.2.2 Categorías de impacto ambiental

Cada programa de declaraciones ambientales de producto cuenta con un conjunto de indicadores y modelos de impacto requeridos para estimar los impactos en el ciclo de vida de los productos.

Si bien los diferentes modelos de impacto son relativamente similares en los impactos ambientales que consideran, pueden diferir en las sustancias químicas que incluyen y en la forma como son medidas (factores de caracterización), por lo que no se pueden comparar. Para lograr comparaciones los resultados deben haber sido obtenidos utilizando la misma regla por categoría de producto y el mismo modelo de impacto.

En la Tabla 16 se muestra la lista de impactos ambientales requeridas para el estándar de agregados de construcción de la ASTM [50].



Tabla 16. Medidas a ser declaradas en declaraciones ambientales de producto dentro del programa ASTM. Traducción libre de tabla 3 [50].

Medidas a ser declaradas	Unidad
Categorías de impacto	
Potencial de calentamiento global (GWP)	kgCO <sub>2</sub> eq
Potencial de acidificación	kgSO <sub>2</sub> eq
Potencial de eutrofización	kgN eq
Potencial de creación de smog	kgO <sub>3</sub> eq
Potencial de reducción de ozono	kgCFC-11 eq
Consumo de energía primaria total	
No renovable fósil	MJ (HHV)
No renovable nuclear	MJ (HHV)
Renovable (solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica)	MJ (HHV)
Renovable (Biomasa)	MJ (HHV)
Consumo de recursos materiales	
Recursos materiales no renovables	kg
Recursos materiales renovables	kg
Agua dulce neta (entradas menos salidas)	L
Generación de residuos no peligrosos	kg
Generación de residuos peligrosos	kg

Los impactos ambientales deben estimarse usando el método de impacto TRACI. Las categorías de impacto exigidas están en concordancia con el estándar ISO 21930:2007 sección 8.2 y la ISO 14044:2006.

El método TRACI está disponible en la página web de la EPA y también en los principales softwares de ACV gratuitamente. Es un método desarrollado específicamente para Estados Unidos.

En el caso de la EN 15804 (European Commission, 2023) y la PCR 2019:14 (EPD System, 2021) se requieren indicadores estimados con los métodos de la Huella Ambiental de Producto (PEF, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Tabla 17.

Esta lista de indicadores se basa en la versión 3.1 de la Huella Ambiental de Productos. Es más extensa que la lista de indicadores solicitados en los estándares norteamericanos. Este método es específico para Europa y se encuentra disponible en los principales softwares de análisis de ciclo de vida.

Actualmente no existen métodos de impactos ambiental específicos para Chile o para América Latina, aunque sí hay adecuaciones. Las declaraciones ambientales de productos de construcción de Chile habitualmente se realizan al alero del EPD System y, por lo tanto, siguen la lista de indicadores ambientales y métodos de impacto presentados en Tabla 17.

Tabla 17. Categorías de impacto ambiental solicitadas en la EN 15804 y PCR 2019:14.

Categorías de impacto	Unidad
Acidificación	mol H <sup>+</sup> eq
Cambio Climático	
Biogénico	kg CO <sub>2</sub> eq
Fósil	
Uso y cambio de uso de la tierra	
Ecotoxicidad	
Agua dulce	CTU eq
Agua dulce – inorgánicos	
Agua dulce – orgánicos	
Eutrofización marina	kg N eq
Eutrofización de agua dulce	kg P eq
Eutrofización terrestre	mol N eq
Toxicidad humana	
Cáncer	CTUh
Cáncer, inorgánicos	
Cáncer, orgánicos	
No cáncer	
No cáncer, inorgánicos	
No cáncer, orgánicos	
Radiación ionizante, salud humana	kBq U-235 eq
Uso de suelo	Pt
Agotamiento del ozono	kg CFC11 eq
HA-material particulado	aumento de enfermedades
Formación de ozono fotoquímico, salud humana	kg NMVOC eq
Uso de recursos	
Fósiles	MJ
Minerales y metales	kg Sb eq
Uso de agua	escasez m <sup>3</sup>

El uso de distintos métodos de impacto ambiental en los diversos programas de declaración ambiental de productos (DAP) genera un problema práctico: los perfiles ambientales de productos con DAP de distintos programas no pueden compararse.

Además de las categorías de impacto señaladas en la Tabla 16 y Tabla 17, dependiendo del programa de declaraciones ambientales de producto, se debe incluir información adicional relevante, por ejemplo:

- Impactos sobre la biodiversidad,
- Toxicidad a las personas o el medio ambiente
- Aspectos geográficos relacionados a cualquier etapa del ciclo de vida
- Datos de desempeño de la construcción si tiene relevancia ambiental,
- Información sobre uso de créditos de energías renovables
- Información derivada del ACV pero que no se comunique en los formatos habituales de inventario o análisis de impacto del ciclo de vida
- Instrucciones y límites para el uso eficiente de la información
- Análisis de riesgos sobre la salud de las personas o el medio ambiente
- Información sobre presencia de materiales en el producto que tengan relevancia ambiental en ciertas áreas
- Sistema de manejo de residuos preferido para los productos de la construcción
- Potencial de incidentes que puedan tener impactos sobre el medio ambiente, como el fin de vida (deconstrucción, reuso, demolición, reciclaje y disposición), mejoras en energía y agua, contenido de energía del edificio que se pueda recuperar en el fin de vida, contenido de material reciclado o tasas de reciclaje.
- Entre otros.

### 5.2.3 Alcance y unidad funcional

Es común para las reglas de categoría de productos de la construcción (como los áridos) definir un alcance de análisis de ciclo de vida parcial (de la cuna a la puerta, módulos A1 a A3) y estar hechos en base a un flujo de referencia (unidad declarada) y no una unidad funcional, por lo que normalmente las comparaciones no son posibles. Para los áridos, un flujo de referencia habitual es una tonelada en base seca [50].

Para construcciones se debe considerar todo el ciclo de vida de la construcción (módulos A1 a C4) y establecer una unidad funcional. El establecimiento de unidades funcionales de obras de construcción es complejo y aún no está estandarizado a nivel global. Sin embargo, las unidades funcionales deberían tener al menos la magnitud de la función, la calidad con la que se cumple y la duración del servicio (ISO 14040).

En el caso de los estándares que consideran “*cut-off*” (ISO 21930, ASTM), el alcance del análisis de ciclo de vida del árido debería considerar los siguientes procesos [52]:

- Extracción de la escoria desde el horno
- Granulación, molienda
- Transportes
- Utilización de combustibles y energía
- Materiales, emisiones y residuos de la manufactura
- *Packaging*
- Transporte de residuos
- Fin de vida de residuos

Las actividades de refinación del metal original (en este caso, hierro), pueden generar una carga ambiental adicional dependiendo del estándar utilizado y la forma de modelación, como se comentó anteriormente.

En general para la producción de análisis de ciclo de vida de productos se excluyen actividades como la construcción de infraestructura y maquinaria para los procesos productivos, actividades relacionadas al personal y consumos asociados a la venta del producto [50, 51, 52, 49].

Asimismo, los estándares coinciden en requerir datos de un año calendario completo para estimar los impactos ambientales.

### 5.2.3.1 Exclusiones

Todo análisis de ciclo de vida requiere reglas de exclusión, particularmente para justificar flujos que son difíciles de caracterizar. En *EPD System* se deben incluir al menos el 95% de los flujos de entrada por cada módulo de sistema (A, B, C, D). Adicionalmente, se deben agregar los flujos que generen al menos el 95% de los impactos ambientales [51]. Para las normas de la ASTM se pueden excluir flujos que no representen más del 1% de la masa del ciclo de vida y que en conjunto no superen el 5% de la masa del ciclo de vida [50]. Si bien ambos requerimientos parecen similares, el del *EPD System* es más estricto pues considera cada módulo del sistema.

A pesar de ello, no se deben excluir flujos de materiales peligrosos o tóxicos u aquellos que se sepa tienen un impacto ambiental importante por unidad de masas.

## 5.3 Recomendaciones metodológicas para la realización de un análisis de ciclo de vida exploratorio del silicato de hierro como reemplazo de áridos naturales

Se encontraron 5 artículos científicos dedicados a evaluar el análisis de ciclo de vida del uso de silicato de hierro en reemplazo a áridos naturales en construcción, además de una revisión más amplia del ACV del uso de residuos industriales en construcción. En esta sección se resume el análisis de estas publicaciones para orientar metodológicamente el análisis de la situación chilena.

Los usos considerados fueron: reemplazo de áridos finos [53, 4] y reemplazo de áridos gruesos [54] para hormigón, además de reemplazo de áridos finos con silicato de hierro de fundiciones chilenas para asfalto en Chile [55].

Los estudios difieren en su metodología, distanciándose de la aplicación estricta de la ISO 14040 e ISO 14044. Ninguno de ellos hace referencia a reglas por categoría de producto. La aplicación correcta de los estándares ISO es una condición básica para tener resultados transparentes y que apoyen a la toma de decisiones [56].

Las recomendaciones que surgen del análisis de estas publicaciones, las reglas por categoría de productos comentadas anteriormente y la experiencia profesional de los autores son las siguientes:

### 5.3.1 Objetivo y alcance

1. Se debe explicitar las decisiones que se esperan tomar con el análisis.
2. Preferir una unidad funcional (p. ej. 1 km de camino con sus características técnicas) sobre una unidad de referencia (p. ej. 1 m<sup>3</sup> de hormigón). Una unidad habitual está referida a la resistencia a la compresión [53, 54, 56].
3. Para estudios con potencialidad de modificar el mercado, preferir un análisis de vida consecucional y agregar los cambios marginales, como la reducción de demanda de áridos naturales. Esto contrasta con el enfoque atribucional indicado en las reglas por categoría de producto, cuyo fin es explicitar el impacto de un producto específico. Aquí la principal pregunta a discernir es: ¿el estudio a realizar busca certificar el perfil ambiental de un material específico (p. ej. El silicato de hierro de una fundición particular) o estudiar el impacto del uso del material en la economía? En el primer caso se debería preferir el enfoque atribucional y en el segundo el consecucional.
4. El alcance del estudio debe incluir: las actividades de acondicionamiento del silicato de hierro, el transporte y la lixiviación tanto del material secundario como del agregado natural.
5. La asignación de impactos ambientales al silicato de hierro debería realizarse con criterio económico [51, 4].

### 5.3.2 Análisis de inventario

1. La composición de las mezclas varía con la inclusión de silicato de hierro, lo que se debería reflejar en el inventario.
2. Los materiales a utilizar deberían reflejar lo más fielmente la situación de uso real en su contexto siempre que esta se conozca.
3. Se debería incluir la reducción de disposición final del silicato de hierro, así como la reducción de extracción de áridos naturales (esto último solo es válido en el caso de usar un enfoque consecucional).
4. Se debería incluir la lixiviación tanto de los áridos naturales como secundarios, de preferencia bajo las condiciones de uso, ya que los ensayos de laboratorio no necesariamente las reflejarán. La lixiviación también ocurre en el escorial, por lo que es relevante para el análisis comparativo. En general se observa que la lixiviación es mayor en materiales sueltos que en ligados [56].
5. En el caso de dudas, realizar suposiciones conservadoras [51], lo que significa asumir el escenario que asigna más impactos ambientales al objeto del estudio.

### **5.3.3 Análisis de impacto**

1. Utilizar las categorías de impacto ambiental consensuadas en las reglas por categoría de producto y realizar un comentario adicional sobre impactos ambientales relevantes al territorio y que no se puedan realizar en base a los datos de ciclo de vida disponibles.
2. Justificar las categorías de impacto ambiental que han sido excluidas del análisis
3. Con respecto a los métodos de impacto, existe consenso en el uso del método IPCC más reciente a la fecha del estudio, pero no hay consenso sobre el método a preferir para las otras categorías de impacto. Algunos encontrados son: TRACI [50], ReCiPe [53], CML [54], IPCC [55], energía embebida [4] y huella ambiental de producto [57].

### **5.3.4 Interpretación**

1. Se debe realizar un análisis de sensibilidad de la distancia de transporte de los áridos y también con el precio de la escoria, ya que eso afectará los impactos asignados a ella.
2. Explicitar las limitaciones del estudio, en particular a lo que se refiere a la toma de decisiones definida en el objetivo y alcance.
3. Verificar la completitud y consistencia de los datos y transparentar falencias en estos campos.



# **Impactos ambientales asociados al uso de escoria de cobre versus áridos naturales**

## Capítulo 6. Impactos ambientales asociados al uso de escoria de cobre versus áridos naturales

### 6.1 Áridos Naturales

La extracción de áridos tiene impactos ambientales, sociales y económicos tanto negativos como positivos, por lo que no es posible indicar a ciencia cierta el efecto que tendría desplazar su utilización con áridos reciclados.

Por un lado, la extracción de áridos naturales puede representar una ganancia social por los ingresos municipales (por concesiones de terrenos para extracción) y ahorros estatales de conservación de los ríos (por ahorro en limpiezas de cauces) [14].

Los ahorros al Estado están relacionados a que la extracción es equivalente a las limpiezas de cauce realizadas por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del MOP [14]. Si la extracción es bien encausada y de acuerdo con un proyecto técnico adecuado, apoya la conservación y limpieza de los cauces sin costo para el Estado (aparte de la fiscalización).

Adicionalmente, los pozos de extracción agotados pueden ser usados como depósitos de residuos de la construcción, lo que potencialmente reduciría el vertido ilegal y reduciría la necesidad de acomodar otras áreas para este fin.

Estos beneficios ocurren si la obra está regularizada y sigue los proyectos técnicos autorizados, algo que típicamente no ocurre debido a obras clandestinas o incluso autorizadas pero que no son fiscalizadas [14, 8].

Por otro lado, las actividades de extracción de áridos naturales afectan la biodiversidad local, cambian la sedimentación de cursos de agua, y generan material particulado y gases producto del uso de maquinaria [1].

Algunos áridos naturales, en teoría, son recursos renovables, pudiendo ser extraídos hasta la tasa de recuperación. Arena y roca se sedimentan naturalmente en los cauces de los ríos llevados por aguas de lluvia o deshielo. Sin embargo, la capacidad de recuperación (y, por ende, extracción) está justamente regulada por la lluvia, que se ha reducido considerablemente en los últimos años y que se espera se reduzca aún más en el futuro [58]. Por lo tanto, la capacidad de renovación del material no es suficiente para cubrir la demanda actual de áridos [1] lo que pone una presión extra en el medio ambiente.

Por lo tanto, es imperativo encontrar alternativas a los áridos naturales para suplir la creciente demanda de este material y mantenerse dentro los límites de recuperación de las extracciones bien reguladas.



## 6.2 Escoria de Cobre

La escoria de cobre es un material más pesado que los áridos naturales, por lo que un aspecto ambiental que aumentará es el consumo de combustible para su transporte, así como las emisiones derivadas de la combustión [25].

Debido al volumen de escoria presente en el país, su utilización masiva para la construcción puede generar un desplazamiento visible de los áridos naturales dentro del mercado. Esta reducción de la extracción de áridos naturales traería asociada una reducción a los impactos físicos y de biodiversidad en los ríos [25]. Por otro lado, la utilización de este pasivo ambiental liberaría espacio actualmente utilizado para botaderos y reduciría el consumo de agua y otros insumos asociados a la mantención del botadero y minimización del polvo, entre otros impactos ambientales.

También se debe considerar que el remplazo de áridos naturales por silicato de hierro puede cambiar el desempeño del producto final, por lo que es necesario utilizar más o menos material para alcanzar la función deseada.

Como los sistemas son complejos, es esencial usar una metodología científica validada para comparar los impactos ambientales de ambas alternativas y evaluar las dimensiones en que una tiene un menor impacto que la otra. A continuación, se discuten los resultados de estudios publicados usando el análisis de ciclo de vida para comparar el impacto de ambos materiales.

## 6.3 Comparación de impactos ambientales del uso de áridos naturales y silicato de hierro para usos en construcción

### 6.3.1 Construcción de caminos

Un análisis de ciclo de vida para Europa estimó los impactos de reemplazar el 100% de gravilla por silicato de hierro en la construcción de caminos [59]. Los impactos relativos entre los materiales son mostrados en la Figura 6.

La huella de carbono de la gravilla se estima en 12.2 kg CO<sub>2</sub> eq/ton, mientras que la del silicato de hierro es de 1,53 kg CO<sub>2</sub> eq/ton, una reducción de 87%. Otros impactos ambientales tienen una mejora más pronunciada, pudiendo llegar a un 95% de reducción de los impactos de eutrofización y del agotamiento de la capa de ozono.

## Impactos relativos de la sustitución de gravilla por silicato de hierro en la construcción de caminos

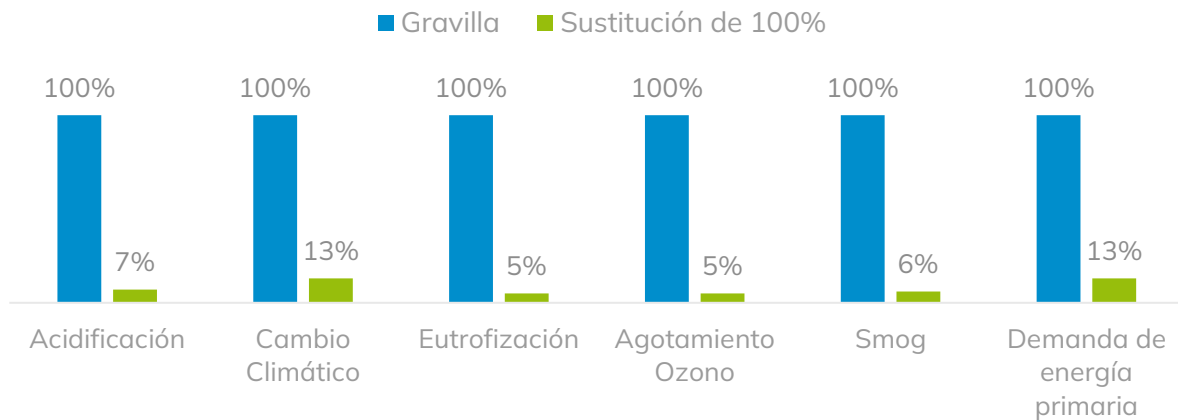


Figura 6. Gráfico de los impactos relativos entre el uso de gravilla y silicato de hierro para construir caminos [59].

### 6.3.2 Producción de cemento

El uso de finos y gránulos de silicato de hierro tiene el potencial de reducir la huella de carbono del cemento. Con un 20% de reemplazo del cemento Portland, se logra una reducción del 20% de la huella de carbono, bajando de 853 kgCO<sub>2</sub> eq/ton a 684 kgCO<sub>2</sub> eq/ton [59]. Otros impactos reducen similarmente alrededor de 20%, como se muestra en la Figura 7.

## Impactos relativos de la sustitución de cemento Portland por silicato de hierro

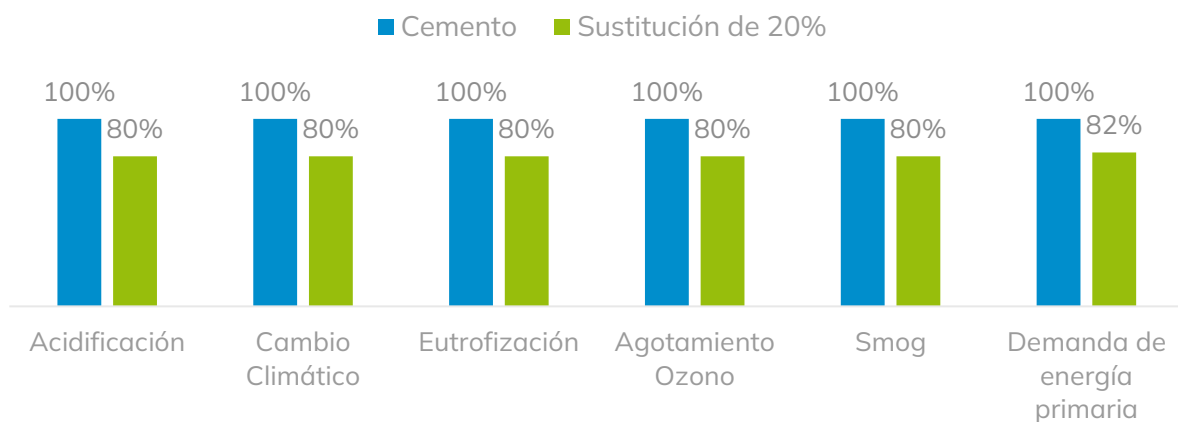


Figura 7. Gráficos de los impactos relativos de fabricar cemento Portland con 20% de silicato de hierro [62].

### 6.3.3 Producción de hormigón

En el caso del hormigón, el silicato de hierro se puede usar para reemplazar parte del cemento Portland y los áridos. En un escenario de reemplazo de 20% del cemento y 100% de los áridos, se podría lograr una reducción de 26% de la huella de carbono [59]. Otros impactos ambientales bajarían entre un 1% (agotamiento de la capa de ozono) y un 36% (demanda primaria de energía). Las comparaciones de impacto son mostradas en la Figura 8.

Adicionalmente, existe el potencial de ahorro de agua cuando se reemplazan áridos naturales por silicato de hierro en hormigones [20, 43, 60]. Esto porque el silicato de hierro tiene menor porcentaje de absorción en comparación con los áridos naturales [24, 61]. Por lo tanto, se puede fabricar mezclas de hormigones con una trabajabilidad fija reduciendo el consumo de agua [20, 44].

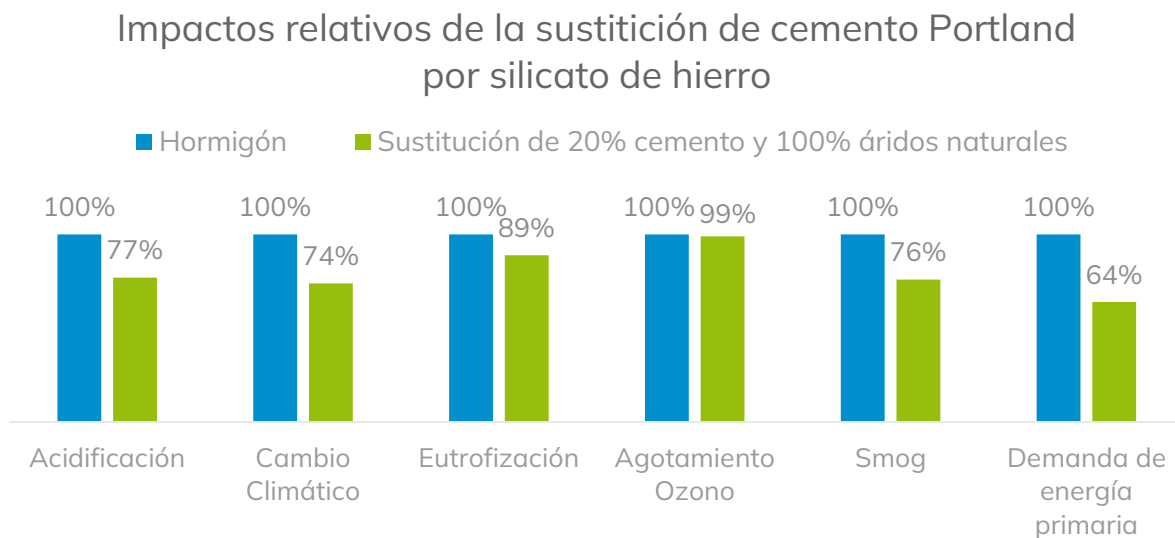


Figura 8. Gráfico de los impactos relativos del hormigón tradicional vs utilizar silicato de hierro en reemplazo de 100% de áridos y 20% de cemento [59].



## **Desafíos y oportunidades en la implementación**

## Capítulo 7. Desafíos y oportunidades en la implementación

### 7.1 Sociales

El desconocimiento del público general con respecto a las características físico-químicas de la escoria de cobre, su desempeño en construcción y la reducción de impactos ambientales potenciales surgen como algunos motivos para el rechazo existente al uso de escorias de cobre en construcción [25].

### 7.2 Económicos

La escoria de cobre puede ser aplicada en volúmenes similares a los áridos naturales, lo que no implica ajustes en las dosis de material a utilizar. Sin embargo, al no estar valorizado este residuo, es complejo realizar estimaciones sobre cómo cambia el costo de la obra.

Dentro de la lógica de la Ley de Fomento al Reciclaje,<sup>8</sup> los generadores del residuo (por ejemplo, las personas) tienen la responsabilidad de llevar el residuo prioritario al gestor de forma gratuita, para que se lleve a cabo su revalorización. En este caso, la revalorización de la escoria podría ser su chancado a una granulometría adecuada para diferentes aplicaciones en construcción, luego de lo cual podría ser comercializada.

Si bien la escoria de cobre no es por el momento un residuo prioritario, este antecedente podría dar luces sobre cómo estimar valores de comercialización.

### 7.3 Regulatorios

La utilización de escorias de cobre para construcción podría ser una alternativa permitida dentro de licitaciones, en particular cuando las obras se realizarán a menos de 200 km de los botaderos de escoria. El criterio de cercanía se basa en la alta densidad del material y mayor gasto de combustible para su transporte.

---

<sup>8</sup> El silicato de cobre no está afecto a la Ley del Fomento al Reciclaje. Se hace alusión al espíritu de la ley para mantener una cohesión lógica de la legislación de gestión de residuo en Chile.



## Conclusiones

## Capítulo 8. Conclusiones

De esta revisión del estado del arte sobre uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos naturales en construcción se puede concluir que este material, actualmente considerado un residuo industrial y pasivo ambiental, puede utilizarse en diversas aplicaciones en construcción. Entre otras ventajas, se cuentan:

- Mejoramiento de propiedades físicas y mecánicas del hormigón, como la resistencia, dependiendo de los porcentajes de sustitución
- Proporciona un sustituto de áridos en el uso en infraestructura vial, como relleno de terraplenes y mezclas asfálticas
- Posee un potencial de reducción en consumo de agua en mezclas de hormigones y morteros de cemento
- Reduce el consumo de Clinker (para aplicación como cemento), como también puede sustituir puzolana en cementos puzolánicos
- Evita la extracción de áridos naturales (y con ellos sus impactos ambientales)
- Permite una nueva fuente de áridos para la industria de la construcción

Entre las aplicaciones se cuentan infraestructura vial, mezclas de hormigones, elementos constructivos, entre otros. Las aplicaciones en Chile se ven limitadas por la falta de mención en la normativa actual, que tiene un carácter prescriptivo. Esta naturaleza de la normativa está cambiando a un modelo basado en desempeño que podría abrir oportunidades para el aprovechamiento del silicato de hierro en la industria de la construcción.

Los resultados de los ensayos físicos primarios muestran que es necesario, en la mayoría de los casos, realizar procesos de molienda para poder ser utilizados como áridos finos, y también como áridos gruesos, por lo que los análisis granulométricos resultan indispensables al inicio del proyecto. Es importante no ser indiferente al peso del hormigón final, el cual aumenta debido al mayor peso específico del silicato de hierro en comparación al árido natural. Esto debe ser tomado en cuenta en los cálculos y uso final del elemento.

Con respecto a la toxicidad del material, esta resulta aceptable en aplicaciones constructivas, con una lixiviación menor para aplicaciones ligadas (dentro del hormigón, por ejemplo) que sueltas (por ejemplo, como material de relleno en terraplenes). En general las evaluaciones de Toxicidad por Lixiviación muestran resultados menores al rango de medición o menores a la legislación.

Sin importar los resultados de las experiencias mostradas en este estado del arte, siempre debería realizarse ensayos de granulometría de los áridos de silicato y de lixiviación de sus aplicaciones. Asimismo, mantener buenas prácticas de selección, diseño y trabajo con el material utilizado y la confección del producto cuando se trabaje con silicato de hierro.

Cada una de estas aplicaciones puede tener ventajas ambientales o no, dependiendo de las características de la obra y el material deseado y la distancia desde la fuente de silicato de hierro a la obra. Desde el punto de vista metodológico la determinación del perfil ambiental

de silicato de hierro aplicado a la construcción depende también del valor económico que se espere para este material.

En cuanto a metodologías de evaluación de impactos en el ciclo de vida, se encuentra abierta la posibilidad de construir una regla por categoría de producto específica para el uso de silicato de hierro proveniente de fundiciones de cobre, ya que por el momento las reglas se refieren principalmente a escorias de altos hornos.

Estos impactos ambientales no son solo para el silicato de hierro. La extracción de áridos naturales también tiene impactos ambientales (y podría incluso tener lixiviación de metales), por lo que se debe consensuar una metodología justa para realizar comparaciones entre ambos sistemas de producto.

## **8.1 Propuestas para futuros proyectos**

Este estado del arte se enfocó en la utilización de escoria de cobre en reemplazo de áridos naturales, sin embargo, se identificaron múltiples usos adicionales para la escoria dentro de la construcción. Uno de los más importantes es su uso en reemplazo parcial del cemento Portland para la producción de cemento, debido a las propiedades puzolánicas que posee la escoria de cobre o silicato de hierro. En este caso, existen estudios internacionales que prevén reducciones de huella de carbono del cemento, de proporción similar al porcentaje de escoria en la composición. Se recomienda realizar un estudio similar enfocándose en este uso potencial en Chile.

Dentro de este informe se han incluido ensayos de material proveniente de algunos, no de todos, los acopios de escoria de cobre que se encuentran a nivel nacional. Resulta interesante conocer las características fisicoquímicas de muestras de todos los acopios (existen algunas plantas de fundiciones de cobre que han comenzado su cierre, por ejemplo, Ventanas), con tal de tener una línea base sobre sus cumplimientos a los requerimientos para poder ser usados como áridos en la construcción y así poder incorporar el silicato de hierro a una estrategia y planificación nacional a futuro, abarcando todas las variables mencionadas en este informe.





## Referencias

## Referencias

- [1] Comisión Nacional de Áridos, *Industria del Árido en Chile Tomo 1: Sistematización de Antecedentes Técnicos y Ambientales*, Convenio MOP, MINVU y Cámara Chilena de la Construcción, 2001.
- [2] Revista Nueva Minería y Energía, «Áridos: los minerales olvidados en Chile,» 26 septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.nuevamineria.com/revista/aridos-los-minerales-olvidados-en-chile/>. [Último acceso: 18 septiembre 2023].
- [3] A. San Martín, R. Cayumil, C. Carrasco, C. Aguilar y M. Sánchez, «Valorización de residuos mediante procesos metalúrgicos: Experiencias locales,» *Revista Nueva Minería y Energía*, 2022.
- [4] H. W. Kua, «The Consequences of Substituting Sand with Used Copper Slag in Construction,» *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, n° 6, pp. 869-879, 2013.
- [5] Banco Central, «Cuentas nacionales trimestrales,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.bcentral.cl/web/banco-central/cuentas-nacionales-trimestrales-estadisticas-en-excel>. [Último acceso: 18 septiembre 2023].
- [6] Cámara Chilena de la Construcción, «Índice de despacho de cemento,» 2023.
- [7] Boletín N° 15.096-09, «Proyecto de ley, iniciado en moción de los Honorables Senadores señor De Urresti, señora Sepúlveda y señor Soria, que regula la extracción de áridos.,» Senado de Chile, 2022.
- [8] Ministerio de Bienes Nacionales, «Extracción ilegal de áridos,» 12 febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.bienesnacionales.cl/?p=34472>. [Último acceso: 19 septiembre 2023].
- [9] Ley 18.695, Art. 5, «Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades».
- [10] Ley 11.402, Art. 11, «Dispone que las obras de defensa y regularización de las riberas y cauces de los ríos, lagunas y esteros que se realicen con participación fiscal, solamente podrán ser ejecutadas y proyectadas por la dirección de obras sanitarias del ministerio de obras».
- [11] E. B. Gómez, «Regulaciones sobre la extracción de áridos en Chile y el extranjero, y normas específicas que apuntan al daño a la propiedad pública o privada,» Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2018.
- [12] Ley 19.300, Art. 10, «Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente».

- [13] Ministerio del Medio Ambiente, *Decreto 40 Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*, 2023.
- [14] Cámara de Diputados, «Informe de la comisión investigadora encargada de analizar las extracciones ilegales de aguas y áridos en los ríos del país.» 2011.
- [15] Boletín N° 15.676-09, «Proyecto de ley, iniciado en Moción del Honorable Senador señor Castro Prieto, que dicta normas sobre extracción de áridos.» Senado de Chile, 2023.
- [16] Participación Ciudadana, «Informe de Participación Ciudadana Boletines Refundidos N°15096-09 Y N°15676-09 que Regulan la Extracción de Áridos.» 2023.
- [17] Peute Baustoff GmbH, *Factsheet Iron Silicate: A versatile and Sustainable Substitute for Natural Minerals*, 2020.
- [18] División de Estadísticas de las Naciones Unidas, *Central Product Classification (CPC) Version 2.1*, 2015.
- [19] Sernageomin, «Catastro de depósitos de relaves, actualización 08-2020.» 2020.
- [20] R. K. Dhir, J. de Brito, R. Mangabhai y C.-Q. Lye, *Sustainable Construction Materials: Copper Slag*, Woodhead Publishing, 2017.
- [21] S. Herrera, «Evaluación de la Utilización de Escoria, Producto de la Extracción de Cobre, como Árido para Pavimentos Flexibles.» Valparaíso, 2016.
- [22] A. Villagrán Walter, «Pasivos ambientales en la legislación chilena, la ineficacia del sistema de responsabilidad por daños al medio ambiente.» Santiago, 2005.
- [23] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Pasivos Ambientales Mineros en Chile.» 2012.
- [24] P. Guerrero Collao, «Influencia de la Escoria de Fundición de Cobre como reemplazo de la Arena en Morteros de Cemento.» Valparaíso, 2017.
- [25] Y. E. Pérez Mejías, *Utilización de Escoria de Cobre de CODELCO Ventanas como agregado pétreo para Tratamientos Superficiales Asfálticos Simples en la Región de Valparaíso*, Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.
- [26] Centro de Estudios Medición y Certificación de Calidad, «Muestreo y Análisis para Determinar Características de Peligrosidad de los Residuos.» 2017.
- [27] Ministerio de la Salud, «Exposición a Silice en los Lugares de Trabajo.» 2015. [En línea]. Available: <https://dipol.minsal.cl/departamentos-2/salud-ocupacional/exposicion-a-silice/>. [Último acceso: 20 septiembre 2023].

- [28] PUCV, Centro de Minería y Escuela de Ingeniería Química, «Caracterización química de baldosas fabricadas a partir de Escorias de Fundición,» Valparaíso, 2022.
- [29] Dirección de Vialidad, Manual de Carreteras, Santiago, Chile, 2002.
- [30] Ministerio de Obras Públicas, «Convenio específico de colaboración y complementación de capacidades para la experimentación de materiales en la construcción de obras públicas,» 2015.
- [31] Laboratorio Terra Ltda., «Informe de Ensayo: Estudio de dosificación mezcla en planta en caliente tipo concreto asfáltico en rodado,» 2021.
- [32] INN, «Proyecto de Norma en Consulta Pública - prNCh163,» 2021.
- [33] Dictuc: Unidad de Resistencia de Materiales, «Informe de ensayo de áridos para hormigón,» Santiago, 2017.
- [34] IDIEM, «Informe de Ensayo Oficial N° 1.347.134 V2,» Santiago, 2017.
- [35] C. H. C. Limitada, «Desarrollo de elementos constructivos de hormigón, reemplazando áridos por escoria de fundición de cobre,» 2023.
- [36] C. M. Pizarro, «Influencia de la incorporación de escoria de cobre sobre la durabilidad de hormigones,» Valparaíso, 2013.
- [37] P. Cendoya, «Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón,» *Revista Chilena de Ingeniería*, vol 17 N°1, pp. 85-94, 2009.
- [38] F. Catalán, «Valorización de residuos industriales como áridos para el hormigón, influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas,» Valparaíso, 2016.
- [39] C. Hwang y J. Laiw, «Properties of concrete using copper slag as a substitute for fine aggregate,» *Proceedings of the 3rd international conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*, pp. 1677-1695, 1989.
- [40] Li, «Test research on copper slag concrete,» *Journal of Fuzhou Unniversity*, pp. 59-62, 1999.
- [41] Zong, «The replacement of granulated copper slag for sand concrete,» *Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering*, pp. 20-22, 2003.
- [42] C. Shi, C. Meyer y A. Behnood, «Utilization of copper slag in cement and concrete,» *ELSEVIER*, 2008.

- [43] Lye, Koh, Mangabhai y Dhir, «Use of copper slag and washed copper slag as sand in concrete: a state-of-the-art review,» *Magazine of Concrete Research*, pp. 665-679, 2015.
- [44] S. A. Orizola Gómez, «Uso de Escoria de Cobre en Cementos,» Santiago, 2006.
- [45] M. Zain, M. Islam, S. Radin y S. Yap, «Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag,» *Cement & Concrete composites*, pp. 845-851, 2004.
- [46] H. Alter, «The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the Basel Convention,» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 353-360, 2005.
- [47] W. Moura, A. Masuero, D. Dal Molin y A. Vilela, «Concrete performance with Admixtures of Electrical Steel Slag and Copper concerning mechanical properties,» *International Concrete Abstracts*, pp. 81-100, 1999.
- [48] Ministerio de Salud, «DECRETO 148 "Aprueba Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos",» Santiago, Chile, 2003.
- [49] ISO, *IO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, 2022.
- [50] ASTM, «ASTM C33 - Standard Specification for Concrete Aggregates,» 2018.
- [51] EPD System, *PCR 2019:14 Construction Products*, 2021.
- [52] NSF International, *PCR for slag cemento*, 2020.
- [53] A. P. Gursel y C. Ostertag, «Life-Cycle Assessment of High-Strength Concrete Mixtures with Copper Slag as Sand Replacement,» *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [54] S. Filipović, S. Marinković y D. Zakić, «Environmental assessment of copper slag aggregate concrete,» *Building materials and structures*, vol. 65, pp. 57-63, 2022.
- [55] D. Movilla-Quesada, M. Lagos-Varas, A. C. Raposeiras, O. Muñoz-Cáceres, V. C. Andrés-Valeri y C. Aguilar-Vidal, «Analysis of Greenhouse Gas Emissions and the Environmental Impact of the Production of Asphalt Mixes Modified with Recycled Materials,» *Sustainability*, vol. 13, p. 8081, 2021.
- [56] C. Dierks, T. Hagedorn, A. Campitelli, W. Bulach y V. Zeller, «Are LCA Studies on Bulk MineralWaste Management Suitable for Decision Support? A Critical Review,» *Sustainability*, n° 13, p. 4686, 2021.
- [57] European Commission, «European Platform on LCA | EPLCA,» 2023. [En línea]. Available: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml>.

- [58] Ministerio del Medio Ambiente, «Atlas de riesgos ambientales,» 2020. [En línea]. Available: <https://arclim.mma.gob.cl/>.
- [59] Quantis, «Life Cycle Assessment of different substitution scenarios for iron silicate,» 2020.
- [60] S. K. Koh y C. Q. Lye, «Maximising the Use of WCS in Concrete,» Singapore, 2012.
- [61] Comisión Chilena del Cobre, «Identificación de oportunidades mediante la implementación de la Economía Circular en minería secundaria del Cobre,» 2021.
- [62] INN, «NCh 163 Of.2013 "Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales",» Santiago, 2013.
- [63] INN, «NCh 170 "Hormigón - Requisitos generales",» Santiago, 2016.
- [64] INN, «Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales,» 1968.
- [65] INN, «NCh 148 "Cemento - Terminología, clasificación y requisitos generales",» Santiago, 2021.
- [66] AngloAmerican Chagres, «Generación y características de la Escoria,» 2022.
- [67] ISO, *ISO 21930:2017 Sustainability in buildings and civil engineering works — Core rules for environmental product declarations of construction products and services*, 2023.
- [68] ISO, *ISO 14001:2015 Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*, 2015.

## Anexo 1. Requisitos técnicos para uso de áridos en terraplenes

La sección 5.205 “Formación y Compactación de Terraplenes” del volumen 5 del manual de carreteras indica que las características principales que debe tener el material son “*ser inorgánicos, libres de materia vegetal, escombros, basuras, materiales congelados, terrones, trozos de roca o bolones degradables o deleznable o trozos cementados de tamaño superior al especificado.*”

Salvo indicación contraria, los materiales deben “*tener un poder de soporte no inferior al 10% CBR, determinado según 8.102.11, y medido al 95% de la D.M.C.S. según el método descrito en 8.102.7. El tamaño máximo del material será de 150mm, aceptándose una tolerancia de 5% en peso entre 150mm y 200mm.*”

Un segundo uso de áridos en terraplenes está asociado a la capa superior. La parte superior del terraplén, los 0.30 metros del coronamiento, deben ser “*construidos con material de subrasante, cuyo poder de soporte no deberá ser inferior a 20% CBR...; el tamaño máximo del material no será superior de 10mm.*” [29]

### Regulaciones internacionales

La norma que regula los materiales para utilizar en construcción de caminos en U.S.A. es la AASHTO M147 “*Specification for Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses*”. En las siguientes tablas se muestran los requisitos para los agregados que utilicen en las capas de subbase, base y de rodadura o superficial.

Tabla 18. Requerimiento granulométrico de materiales para subbases en caminos. AASHTO.

Tamiz	Graduación 1	Graduación 2
62,5 mm (2 ½")	100	
50 mm (2")	90 – 100	100
37,5 mm (1 ½")	-	90 – 100
25 mm (1")	-	55 – 85
19 mm (¾")	-	50 – 80
9,5 mm (¾")	-	40 – 70
4,75 mm (N°4)	35 – 70	30 – 60
2.54 (N°10)	-	20 – 50
0,425 (N°40)	-	10 – 30
0,075 mm (N°200)	0 – 15	0 – 15
<b>Requisitos de calidad</b>		
Equivalente de arena	25 min.	Equivalente de arena
Índice de plasticidad	6 max.	Índice de plasticidad

Pérdida de abrasión	50 max.	Pérdida de abrasión
<i>California bearing ratio</i> (CBR)	50 min.	<i>California bearing ratio</i> (CBR)

Tabla 19. Requerimiento granulométrico de materiales para bases en caminos. AASHTO.

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	Graduación 1	Graduación 2	Graduación 3
50 mm (2")	100		
37,5 mm (1 ½")	-	100	
25 mm (1")	55 – 85	70 – 95	100
19 mm (¾")	50 – 80	55 – 85	70 – 100
4,75 mm (N°4)	30 – 60	30 – 60	35 – 65
0,425 (N°40)	10 – 25	10 – 25	15 – 25
0,075 mm (N°200)	3 – 10	3 – 10	3 – 10
Requisitos de calidad			
<i>Sodium sulphate soundness &amp; Loss</i>	12 max.	<i>Sodium sulphate soundness &amp; Loss</i>	12 max.
Pérdida de abrasión	45 max.	Pérdida de abrasión	45 max.
Equivalente de arena	45 min.	Equivalente de arena	45 min.
Límite líquido	25 max.	Límite líquido	25 max.
Índice de plasticidad	6 max.	Índice de plasticidad	6 max.
<i>California bearing ratio Grading 1</i>	100 min.	<i>California bearing ratio Grading 1</i>	100 min.
<i>California bearing ratio Grading 2</i>	80 min.	<i>California bearing ratio Grading 2</i>	80 min.
<i>California bearing ratio Grading 3</i>	65 min.	<i>California bearing ratio Grading 3</i>	65 min.



## Anexo 2. Requisitos técnicos para uso de áridos en tratamientos asfálticos

En el Manual de Carreteras, Volumen N°5, capítulo 5.407, se indican los requisitos, tanto físico, mecánicos como granulométricos, que deben cumplir los áridos para ser utilizados en tratamiento superficiales para caminos. Se muestran en la Tabla 20 y Tabla 21.

Tabla 20. Requisitos de los áridos para tratamiento superficiales.

Ensayos	Exigencia	Método
Desgaste de los Ángeles	Máximo 25% (*)	8.202.11
Desintegración con Sulfato de Sodio	Máximo 12%	8.202.17
Adherencia Método Estático	Mínimo 95%	8.302.29
Árido Chancado	Mínimo 70%	8.202.6
Lajas	Máximo 10%	8.202.6
Índice de Laja	Máximo 30%	8.202.7
Fino por lavado	Máximo 0,5%	8.202.4

(\*) El proyecto podrá indicar otro valor debidamente justificado, el cual no podrá superar 35%.

Tabla 21. Granulometría de materiales para tratamiento superficiales.

Tamices mm (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 – 12.5b	TN 10 – 6.3a	TN 10 – 6.3b
40 (1 ½")	100								
25 (1")	90 – 100	100				100	100		
20 (¾")	20 – 55	90 – 100	100			85 – 100	95 – 100		
12.5 (½")	0 – 10	20 – 55	90 – 100	100		0 – 20	0 – 20	100	100
10 (⅜")	0 – 5	0 – 15	40 – 70	85 – 100	100	0 – 7	0 – 5	95 – 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
Tamices mm (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 – 12.5b	TN 10 – 6.3a	TN 10 – 6.3b
40 (1 ½")	100								

\*Las bandas granulométricas TN 20-12.5 a y b, y TN 10-6,3 a y b, se utilizarán normalmente cuando se especifiquen tratamientos superficiales de tamaño único. El porcentaje de árido chancado en estos casos, será de mínimo 95%, según el método descrito en 8.202.6 del Manual de Carreteras Vol N° 8.

## Anexo 3. Requisitos técnicos para uso de áridos en cementos y hormigones

### Regulación chilena

La NCh 163: *Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales* es la referencia nacional para uso de áridos en morteros y hormigones. Actualmente está en consulta pública su nueva versión que cambia de una lógica prescriptiva a una basada en el desempeño (prNCh163 [32]). En ésta última se busca asegurar que los áridos empleados, se comporten satisfactoriamente para la mayoría de los morteros y hormigones. Además, se especifican requisitos adicionales para casos especiales.

Los áridos se clasifican en relación con el tamaño de sus partículas: arena y grava. Estas últimas se catalogan de acuerdo con los tamaños límites de sus partículas. Acorde a la NCh 163, en primera instancia los áridos deben estar compuestos por “*partículas duras, de forma y tamaño estables y deben estar limpios y libres de terrones, partículas blandas o laminadas, arcillas, impurezas orgánicas, sales y otras sustancias que por su naturaleza o cantidad afecten la resistencia o durabilidad del mortero y hormigones*”. Para los valores límites de las propiedades se puede consultar en la respectiva norma en circulación [62] como también en el proyecto de consulta pública [32] entre las cuales existen ciertas diferencias en los requerimientos, se pueden mencionar:

Tabla 22. Bandas granulométricas para áridos finos prNCh 163 [32].

Tamice nominal, mm	% acumulado que pasa						
	1 Muy gruesa	2 Gruesa	3 Media	4 Media Gruesa	5 Fina	6 Muy Fina	7 Discontinua
10	100	100	100	100	100	100	100
5	60–75	75–90	95–100	70–90	90–100	95–100	30–60
2,5	35–55	55–80	80–100	40–80	85–100	90–100	30–40
1,25	27–50	35–60	50–85	40–70	70–90	85–100	30–40
0,630	15–40	22–40	25–60	40–60	60–80	80–100	17–40
0,315	8–25	12–25	5–30	25–37	37–50	50–62	9–25
0,160	3–10	3–10	0–10	6–13	12–20	15–20	4–10

En el proyecto de consulta pública para la actualización los áridos finos se dividen en categorías, dependiendo de los porcentajes acumulados que pasen por los tamices: muy gruesa, gruesa, media, media gruesa, fina, muy fina y discontinua. En comparación con los rangos de áridos finos para la NCh163 Of.79 se aumentan de 1 a 7 tipos, que en caso de ésta última se acercan más a la categoría “media” de la tabla anterior.

Adicionalmente, en la norma se definen los límites para calificación de grava, que se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Requisitos granulométricos de la grava prNCh 163 [32].

Tamices mm	% acumulado que pasa para los siguientes grados (definidos por tamaños límites en mm)								
	63-37,5	50-25	50-4,75	37,5-19	37,5-4,75	25-4,75	19-4,75	12,5-4,75	9,5-2,36
80	100								
63	90 – 100	100	100						
50	35 – 70	90 – 100	90 – 100	100	100				
40	0 – 15	35 – 70	-	90 – 100	90 – 100	100			
25	-	0 – 15	35 – 70	20 – 55	-	90 – 100	100		
20	0 – 5	-	-	0 – 15	35 – 70	-	90 – 100	100	
12,5	-	0 – 5	10 – 30	-	-	25 – 60	-	90 – 100	100
10	-	-	-	0 – 5	10 – 30	-	20 – 55	40 – 70	90 – 100
5	-	-	0 – 5	-	0 – 5	0 – 10	0 – 10	0 – 15	10 – 30
2,5	-	-	-	-	-	0 – 5	0 – 5	0 – 5	0 – 10
1,25	-	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5

En este caso también existen diferencias entre la NCh163 Of.79 con respecto al proyecto de consulta pública para la actualización, aunque en general los requisitos son similares. Diferencias mínimas en los porcentajes de tamices y en las notaciones del porcentaje acumulado que pasa.

Existen algunos ensayos obligatorios (existen la posibilidad de ensayos optativos) los cuales se deben realizar con tal de observar la aptitud del árido utilizado para la fabricación de los hormigones:

- Recepción:
  1. Granulometría: arena retenida en tamiz 5mm; tamaños límites de la grava.
  2. Material fino
  3. Impureza orgánica
  4. En relación con condiciones especiales de la obra: propiedades críticas del árido, hormigones de características especiales
- Para el uso:
  1. Granulometría
  2. Densidad: aparente y real
  3. Absorción de agua
  4. Huecos
  5. Humedad y esponjamiento

La norma también hace referencia a los áridos combinados (arenas y gravas), entregando figuras para determinar los límites dentro de los cuales estos áridos que se utilicen cumplan

con las condiciones necesarias para fabricar hormigones. Así mismo, entrega una tabla de referencia con porcentajes y tamaños de tamices.

Además del tamaño y características físicas, los áridos deben tener resistencia al desgaste. Esta resistencia se determina a través del Método de la Máquina de los Ángeles, NCh 1369 Of.2010 “Áridos – Determinación del desgaste de las gravas – Método de la máquina de los Ángeles”.

### Regulación internacional

A nivel internacional se ha comenzado a incorporar el silicato de hierro en las regulaciones como sustitutos aptos para agregados en hormigón, o también se utilizan las regulaciones de áridos para determinar la aplicabilidad del silicato de hierro en construcción (normativa con lógica de desempeño).

En el siguiente listado se muestran normas de U.S.A. y Japón para los agregados de hormigón o cemento. Más adelante se muestran límites regulados por algunas normas:

- ASTM C989/C989M, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars
- AASHTO M 302, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars
- CSA A3001, Cementitious Materials for Use in Concrete
- ASTM C618-03, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
- ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM C330, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.
- Japanese Standard Association 2016, Slag aggregate for concrete - Part3: copper slag aggregate.

**Ejemplo: ASTM D422 – 63 (2007), “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”.**

Es la norma que se utiliza en Estados Unidos para cuantificar la distribución de tamaños de las partículas de áridos para utilizar en mortero y hormigón. La Tabla 24 muestra los tamices correspondientes con sus tamaños en mm, de forma de compararlos con la norma chilena.

*Tabla 24. Tamices según Norma ASTM D422 - 63.*

Tamices cumplen con ASTM E 11	
3 pulgadas (75 mm)	N°10 (2,00 – mm)
2 pulgadas (50 mm)	N°20 (850 – μm)
1 ½ pulgadas (37,5 mm)	N°40 (4250 – μm)
1 pulgada (25,0 mm)	N°60 (250 – μm)

¾ pulgada (19,0 mm)	N°140 (106 – μm)
⅜ pulgada (9,5 mm)	N°200 (75 – μm)
N°4 (4,75 – mm)	
<b>Tamices alternativos</b>	
3 pulgadas (75 mm)	N°16 (1,18 – mm)
1 ½ pulgadas (37,5 mm)	N°30 (600 – μm)
¾ pulgada (19,0 mm)	N°50 (300 – μm)
⅜ pulgada (9,5 mm)	N°100 (150 – μm)
N°4 (4,75 mm)	N°200 (75 – μm)
N°8 (2,36 mm)	

### **Ejemplo: ASTM C33, “Standard Specification for Concrete Aggregates”.**

Norma estadounidense que define “*los requerimientos de granulometría y la calidad de los agregados finos y gruesos para usarse en el hormigón*” [50].

Se pueden apreciar algunas diferencias en los áridos finos con respecto a la norma chilena. Los tamices ASTM son un poco más pequeños en todos los niveles, aunque manteniendo el porcentaje pasando (%).

Lo mismo sucede con los áridos gruesos, donde algunos valores de tamices son un poco menores que los indicados en la norma chilena, además de iniciar con un valor de tamiz mayor (90mm v/s 80mm).

Dentro de los tipos de áridos, tanto finos como gruesos que se permiten en esta norma, no se menciona la escoria de fundición de cobre. Tampoco se menciona como tipos de agregado en la norma ASTM C330 “*Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*”.

### **Requisitos del hormigón**

Además de cumplir con los requisitos técnicos de los áridos, el propio hormigón debe cumplir con una serie de requisitos técnicos que se detallan aquí. Por supuesto, si el árido cumple, pero el hormigón en base a él no, entonces no sirve para el uso. Un ejemplo de esto es la densidad. Como el silicato de hierro es más denso, generará hormigones más pesados.

La norma NCh170 “Hormigón – Requisitos generales” [63] establece los requisitos para el hormigón que se utilice en obras simples, hormigón armado y pretensado, con una densidad entre 2.000-2.800 [kg/m<sup>3</sup>].

El hormigón se clasifica de acuerdo con su resistencia especificada a compresión ( $f_c$ ), medida en probetas utilizando las normas NCh1017 Of.75 “Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción” y NCh1037 Of.2019 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”, a la edad de 28 días. Se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 25. Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión, NCh 170 Of.2016.

Grado	Resistencia especificada, $f_c$ MPa
G05	5
G10	10
G15	15
G17	17
G20	20
G25	25
G30	30
G35	35
G40	40
G45	45
G50	50
G55	55
G60	60

La norma también menciona una guía de recomendación de usos de hormigones según los grados de la tabla anterior, aunque teniendo en cuenta factores como: condiciones de servicio, de las armaduras, del tipo de elemento estructural a fabricar, por ejemplo.

De acuerdo con su resistencia a flexotracción ( $f_t$ ), medida en probetas siguiendo la norma NCh1017 Of.75 y NCh1038 Of.2009 "Hormigón – Ensayo de tracción por flexión", a la edad de 28 días, se clasifican en relación a la siguiente tabla:

Tabla 26. Clasificación de los hormigones por resistencia a flexotracción, NCh 170 Of.2016.

Grado de flexotracción	Resistencia especificada, $f_t$	
	MPa	Kgf / cm <sup>2</sup>
HF 3	3,0	(30)
HF 3,5	3,5	(35)
HF 4	4,0	(40)
HF 4,5	4,5	(45)
HF 5	5,0	(50)
HF 5,5	5,5	(55)
HF 6	6,0	(60)

**Docilidad: NCh1019**

La docilidad del hormigón en el momento de su colocación se mide según la NCh1019, y se guía bajo los parámetros de la Tabla 27.

*Tabla 27. Asentamiento de cono según tipo de estructura, NCh 1019.*

<b>Tipo de estructura</b>	<b>Asentamiento de cono para compactación por vibración (cm)</b>
Hormigón armado	4 a 10
Hormigón sin armar	2 a 8
Pavimentos	Inferior a 5

Existen también otras normas que regulan otras propiedades del hormigón, que en el caso sea necesario se pueden consultar:

- Densidad aparente y rendimiento: NCh1564
- Uniformidad: NCh1789

<b>Pérdida por ignición, max.</b>	<b>10,0</b>
-----------------------------------	-------------

## Anexo 4. Requisitos técnicos para uso de áridos en cemento

### Regulación chilena

#### *Requisitos y propiedades del cemento*

Los términos y especificaciones generales para el cemento están indicados en la NCh148 Of.2021 “Cemento – Terminología, clasificación y requisitos generales” [32], que es la última actualización. El cemento se prepara a base de clínker, yeso y un material específico (que puede ser puzolana u otro). Se puede dividir el cemento de acuerdo a 3 grados de resistencia.

Propiedades físico y mecánicas: El peso específico del cemento Portland debe ser superior o igual a 3.000 [kg/m<sup>3</sup>]. El tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión y flexión son las indicadas en la siguiente tabla, de acuerdo como muestra NCh148 Of.68, donde existen 2 grados de resistencia:

*Tabla 28. Requisitos del cemento, NCh 148 of.68 [64].*

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo min	Final máximo h	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

Asimismo, debe tenerse en cuenta la norma NCh 160: 2021, Cemento – Agregado Tipo A para su uso en cemento, donde se orienta sobre las regulaciones y características de los materiales que se quieran incorporar como adiciones al cemento.

#### *Puzolana*

Esta debe cumplir con los requisitos que se señalan en la norma NCh161:2021 “Cemento – Puzolanas, escoria básica y cenizas volantes para uso en cementos – Especificaciones”.

La puzolana *“es un material silíceo-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando finalmente está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente”* [65].

El cemento puzolánico por definición se divide en 2 tipos:

- Cemento Portland puzolánico: es el cemento donde la puzolana está en una proporción no mayor al 30% en peso del producto terminado
- Cemento puzolánico: es el cemento en donde la puzolana está en una proporción entre 30% y 50% en peso del producto terminado.



Además, es posible consultar la norma NCh3520:2020 “Cenizas volantes para hormigón – Requisitos”, la cual entrega información y requerimientos para cenizas volantes que se quieran utilizar para la fabricación de hormigón como agregados.

### Regulación internacional

En Estados Unidos existe la norma ASTM C618, “*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*”, la cual acepta y regula materiales puzolánicos para el uso en hormigones. Sin embargo, no menciona específicamente el uso de escoria de cobre como reemplazo de puzolana en la confección de cementos.

Define una puzolana clase N, que son puzolanas naturales en bruto o calcinadas, que cumplan con los requisitos químicos especificados mostrados en la siguiente tabla:

*Tabla 29. Requisitos químicos de material puzolánico para ser utilizado, ASTM C618.*

Elemento / compuesto	Porcentaje (%)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70,0
$\text{SO}_3$ , max.	4,0
Contenido de humedad, max.	3,0

## Anexo 5. Información adicional sobre toxicidad y lixiviación de áridos en construcción

### Regulación nacional

Para conocer el potencial de toxicidad de la escoria de cobre dentro de cualquier aplicación en construcción, se debe realizar un análisis de Toxicidad por Lixiviación. Ensayos realizados con escoria de CODELCO Ventanas indican que las cantidades lixiviadas de arsénico, selenio, antimonio, plomo, cadmio y níquel son menores a las concentraciones máximas permisibles del Reglamento Sanitario sobre el manejo de residuos sólidos (DS 148) [25]. Sin embargo, se recomienda realizar este ensayo con una variación de pH más amplia en consideración a la acidificación del mar por efectos de cambio climático (para aplicaciones en costas y estuarios), la acidificación de la lluvia y potenciales desastres naturales o eventos extremos de clima que pudieran dañar la infraestructura o edificaciones construidas con escoria de cobre como árido.

El principal documento que reglamenta la toxicidad de los componentes y elementos químicos en la composición y uso de la escoria de fundición de cobre es el D.S. N° 148 “Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos”. En él se definen cuáles son los residuos peligrosos, estableciendo responsabilidades para los generadores, transportistas y los destinatarios.

Un residuo tendrá la característica de toxicidad cuando su disposición final se realice en el suelo y las concentraciones máximas permisibles (CMP) después de un Test de Toxicidad por Lixiviación sean superiores a lo que se indique en la siguiente tabla [48].

*Tabla 30. Concentraciones máximas permisibles (CMP) de elementos químicos para un Test de Toxicidad por Lixiviación, DS 148.*

Elemento	CMP [mg/l]
Arsénico (As)	5
Plomo (Pb)	5
Mercurio (Hg)	0,2
Selenio (Se)	1
Cadmio (Cd)	1
Plata (Ag)	5

### Regulación internacional

En términos medioambientales, existen regulaciones extranjeras donde se limita la cantidad de algunos elementos químicos para la escoria de fundición de cobre. En la siguiente tabla se muestran los valores límites de U.S.A. (USEPA, *United States Environmental Agency*):

*Tabla 31. Concentraciones máximas permisibles de elementos químicos para un Test de Toxicidad por Lixiviación, USEPA.*

<b>Elemento</b>	<b>USEPA [mg/l]</b>
Arsénico (As)	5
Plomo (Pb)	5
Cobre (Cu)	N/R
Níquel (Ni)	-
Cadmio (Cd)	1
Zinc (Zn)	N/R
Cromo (Cr)	5

