

Uso de relaves de flotación de escorias de cobre en hormigón

Use of copper slag flotation tailings in concrete

Fecha de entrega: 3 de junio 2025

Fecha de aceptación: 2 de septiembre 2025

Amin Nazer¹, Osvaldo Pavez^{2,3} y Hugo Flores³

¹ Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Construcción, Facultad de Ingeniería, Benavente 980, La Serena, Chile, amin.nazerv@userena.cl (Orcid: 0000-0002-0176-2344)

² Universidad de Atacama, Centro Regional de Investigación y Desarrollo Sustentable de Atacama, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile, osvaldo.pavez@uda.cl (Orcid: 0000-0001-5720-351X)

³ Universidad de Atacama, Departamento de Ingeniería en Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile, hugo.metalurgia1@gmail.com (Orcid: 0000-0002-9423-1963)

Este estudio preliminar explora el potencial de los relaves de flotación de escoria de cobre (CSFW), un subproducto de la industria minera del cobre en Chile, como reemplazo parcial del cemento Portland en hormigón. Se caracterizó una muestra de CSFW de una fundición chilena, y se probaron mezclas de hormigón con sustituciones de CSFW del 0% al 20% (en incrementos del 5%) para evaluar la resistencia a la compresión a 7, 28 y 60 días. La difracción de rayos X (XRD) reveló que el CSFW está compuesto principalmente por hedenbergita, magnetita, fayalita y albita. Aunque la resistencia a la compresión disminuyó con mayores niveles de sustitución de CSFW, la mezcla con 5% de reemplazo alcanzó aproximadamente el 80% de la resistencia del hormigón de control a los 60 días. La plasticidad aumentó significativamente con el contenido de CSFW, triplicándose el asentamiento en la mezcla con 20% respecto al control, lo que indica un aumento en la trabajabilidad pero también un exceso de agua en la mezcla. Estos resultados, sugieren que el CSFW es una alternativa viable para reemplazos de cemento de bajo nivel, promoviendo la valorización de residuos mineros y la sostenibilidad ambiental en el sector de la construcción en Chile.

Palabras clave: relaves de flotación de escoria de cobre, hormigón, reemplazo de cemento, resistencia a la compresión, reciclaje de residuos, construcción sostenible

This preliminary study explores the potential of copper slag flotation tailings (CSFW), a byproduct of the copper mining industry in Chile, as a partial replacement for Portland cement in concrete. A CSFW sample from a Chilean smelter was characterized, and concrete mixtures with CSFW substitutions ranging from 0% to 20% (in 5% increments) were tested to evaluate compressive strength at 7, 28, and 60 days. X-ray diffraction (XRD) revealed that CSFW is primarily composed of hedenbergite, magnetite, fayalite, and albite. Although compressive strength decreased with higher levels of CSFW substitution, the mixture with 5% replacement achieved approximately 80% of the control concrete's strength at 60 days. Plasticity increased significantly with CSFW content, with slump tripling in the 20% mixture compared to the control, which indicates an increase in workability but also an excess of water in the mix. These results suggest that CSFW is a viable alternative for low-level cement replacements, promoting the valorization of mining waste and environmental sustainability in the construction sector in Chile.

Keywords: copper slag flotation tailings, concrete, cement replacement, compressive strength, waste recycling, sustainable construction

Introducción

La industria minera de Chile, pilar de su economía, es uno de los principales productores mundiales de cobre. Sin embargo, genera grandes cantidades de residuos sólidos, incluyendo la escoria de cobre (CS), un subproducto vítreo

de la fundición de concentrados ricos en cobre. A nivel global, se estima que la producción de CS alcanza los 24.6 millones de toneladas anuales (Gorai *et al.*, 2003). En Chile, las fundiciones producen aproximadamente 3 millones de toneladas de CS al año, contribuyendo a una

acumulación histórica de 20 millones de toneladas (Díaz, 2012; Valenzuela, 2016). Generalmente depositada en vertederos, la CS ocupa vastas áreas y representa riesgos ambientales debido a la posible lixiviación de metales pesados (Dung *et al.*, 2014). Alternativamente, la CS se ha utilizado en chorreado abrasivo (Dung *et al.*, 2014), como árido en morteros y hormigones (Mithun y Narasimhan, 2016; Vinotha y Brindha, 2021), como sustituto parcial del cemento Portland CP (Chew y Bharati, 2010; Nazer *et al.*, 2016) o en mezclas asfálticas (Patel *et al.*, 2012; Raposeiras *et al.*, 2018; Wang y Emery, 2004). La CS también contiene entre 0.3% y 2.1% de CuO, recuperable para uso comercial (Shi *et al.*, 2008).

En hormigón, la CS y subproductos similares producen resultados mixtos. Wang *et al.* (2021) encontraron que un reemplazo de CS inferior al 40% puede mejorar la resistencia a la compresión debido a propiedades puzolánicas. Sin embargo, Afshoon y Sharifi (2017) reportaron una reducción de resistencia con reemplazos de CS hasta el 15%, debido a una menor actividad puzolánica. Sharma y Khan (2017) observaron tendencias similares en morteros, con una disminución de resistencia por encima del 10% de reemplazo debido a un aumento en la demanda de agua. Moura *et al.* (1997) señalaron que la naturaleza cristalina de la CS limita su contribución a la hidratación del cemento, mientras que Al-Jabri *et al.* (2009) destacaron que su alta absorción de agua impacta negativamente la resistencia. Najimi *et al.* (2011) sugirieron el uso de superplastificantes para mitigar problemas de trabajabilidad.

Las fundiciones de cobre chilenas han adoptado recientemente procesos de molienda y flotación para recuperar el cobre residual en las escorias de cobre, generando relaves de escoria de cobre (CSFW). De las siete fundiciones de Chile, cinco utilizan flotación, produciendo CSFW que se descarga en vertederos de relaves de escorias de cobre (Richter, 2017). El contenido de metales pesados del CSFW, incluyendo hierro y cobre, plantea desafíos ambientales si no se gestiona adecuadamente (Dung *et al.*, 2014). En regiones como Atacama en el norte chileno, la acumulación de CSFW exacerba los conflictos por el uso de la tierra y la degradación ambiental, lo que requiere estrategias innovadoras de gestión de residuos.

La investigación sobre el uso de CSFW en la construcción es limitada pero prometedora. Se ha explorado su uso en la

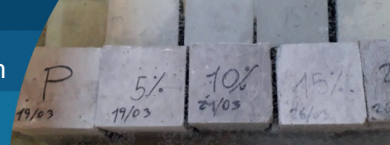
producción de cemento (Alp *et al.*, 2008), vitrocerámicas (Cocić *et al.*, 2017; Karamanov *et al.*, 2007) y pigmentos cerámicos (Ozel *et al.*, 2006). Los metales pesados y el hierro del CSFW pueden inmovilizarse en matrices cementicias, garantizando seguridad para la construcción (Alp *et al.*, 2008; Çoruh *et al.*, 2006; Mesci *et al.*, 2009). En Chile, donde la producción de CSFW está aumentando, su uso en hormigón podría reducir la dependencia de vertederos, disminuir el consumo de cemento y apoyar el desarrollo sostenible. Sin embargo, el comportamiento del CSFW en mezclas cementicias, particularmente en Chile, sigue siendo poco estudiado.

Estas aplicaciones reducen la demanda de áridos naturales y cemento, que son intensivos en energía, y desvían residuos de los vertederos. En contraste, el CSFW ha recibido menos atención debido a su reciente aparición. Alp *et al.* (2008) demostraron el potencial del CSFW en la producción de clínker de cemento, con metales pesados inmovilizados de manera segura. Çoruh *et al.* (2006) y Cocić *et al.* (2017) exploraron su uso en vitrocerámicas, destacando la estabilización de metales pesados. Mesci *et al.* (2009) encontraron que el CSFW en morteros mejora la inmovilización de metales pesados, garantizando seguridad. Estos estudios se centran principalmente en aplicaciones no relacionadas con el hormigón.

En Chile, la investigación sobre CS y CSFW es limitada a pesar de la significativa producción de cobre. Nazer *et al.* (2016) encontraron resultados positivos con CS antigua en matrices cementicias a bajos niveles de reemplazo. Sin embargo, el menor tamaño de partícula y el mayor contenido de hierro del CSFW requieren una investigación específica.

Este estudio evalúa el CSFW de una fundición chilena como reemplazo parcial del cemento Portland en hormigón, abordando una brecha en la literatura. Al caracterizar el CSFW y evaluar su impacto en la resistencia a la compresión y la plasticidad, el estudio analiza su viabilidad como material de construcción sostenible, promoviendo la valorización de residuos y la sostenibilidad ambiental, particularmente en Atacama.

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto de la sustitución del 0–20% de CSFW en la resistencia mecánica y la plasticidad del hormigón.



Materiales y métodos

Materiales

Se utilizó cemento Portland de alta resistencia, conforme a la norma NCh148 (1968), obtenido de Hormigones Bicentenario BSA. La arena y grava de río, cumpliendo con los estándares locales de construcción, se adquirieron de un proveedor en Copiapó, Chile. El CSFW, caracterizado por un aspecto negro y vítreo, fue donado por la Planta Manuel Antonio Matta de la Empresa Nacional de Minería. Todos los materiales fueron preparados mecánicamente para garantizar uniformidad y caracterizados para su idoneidad en la producción de hormigón.

Caracterización del CSFW

La distribución de tamaño de partícula (particle size distribution PSD) del CSFW se determinó utilizando un analizador de difracción láser (Mastersizer 2000, Malvern Instruments). El CSFW original tenía un tamaño de partícula inferior a 600 μm , con el 91% por debajo de 212 μm y el 4% por debajo de 75 μm , eliminando la necesidad de molienda (Figura 1). Posteriormente, se tamizó descartando tamaños $> 90 \mu\text{m}$. Esta PSD fina (Figura 2) respalda el potencial del CSFW como sustituto del cemento sin procesamiento adicional.



Figura 1: Tamizado de relave de escoria de cobre.

La estructura cristalina se analizó mediante difracción de rayos X (XRD, Shimadzu XRD-6100) con radiación $\text{Cu K}\alpha$, escaneando de 5° a $70^\circ 2\theta$ con un paso de 0.02° . Las muestras se prepararon en un laboratorio controlado para minimizar la contaminación. El análisis cuantitativo

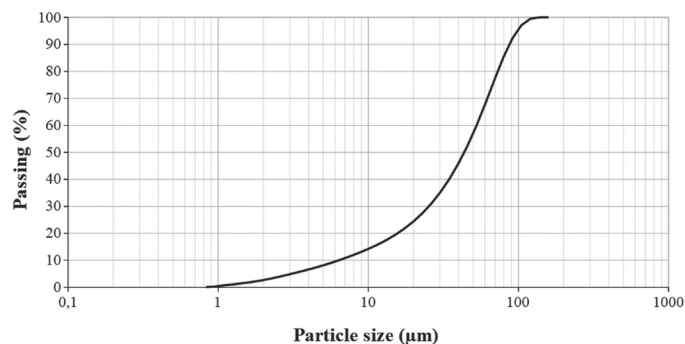


Figura 2: Distribución de tamaño de partícula del CSFW tamizado ($< 90 \mu\text{m}$) usado en las mezclas de hormigón con un rango de $0.95 \mu\text{m}$ a $120.23 \mu\text{m}$ y porcentajes volumétricos de 0.08% y 4.82%, respectivamente

mediante espectrofotometría de absorción atómica (Agilent Technologies, Mod. G8432A) identificó hedenbergita (23.90%), magnetita (20.36%), fayalita (20.00%), albita (18.05%), fengita (9.55%) y cuarzo (2.01%). Se debe tener presente que la composición mineralógica es variable, entendiendo que la fundición de cobre se realiza teniendo como material de partida el concentrado de cobre de diferentes yacimientos, se hace un mix para alcanzar la ley necesaria para los hornos. En este caso, se trata de escorias de vertederos históricos de la empresa estatal ENAMI. Los patrones de DRX de CSFW se muestran en la Figura 3.

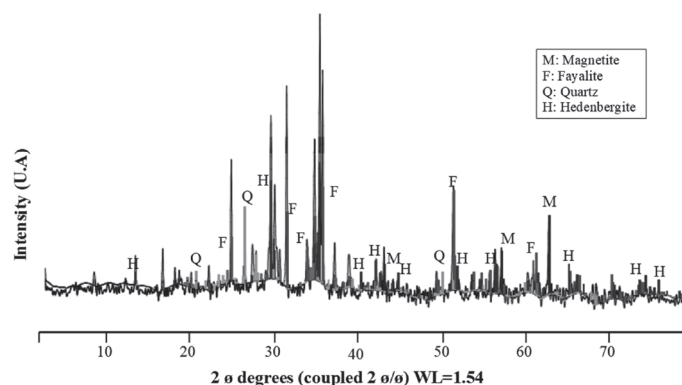
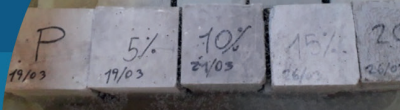


Figura 3: Patrones de difractogramas de rayos X del CSFW original. Magnetita (Fe_3O_4 : COD 9005838); Fayalita (Fe_2SiO_4 : COD 9000555); Cuarzo (SiO_2 : COD 9006666); Hedenbergita ($\text{Ca}_{0.758}\text{FeNa}_{0.242}\text{Si}_2\text{O}_6$: COD 9010078)

El análisis químico reveló un alto contenido de hierro (32.35%) y silicio (17.45%), con menores cantidades de calcio (4.13%), cobre (1.25%), potasio (0.92%) y aluminio (0.64%). Estas composiciones sugieren el potencial del CSFW como filler, aunque su naturaleza cristalina puede



limitar la actividad puzolánica.

Las propiedades físicas, incluyendo la densidad (método del picnómetro) y la absorción de agua, se midieron para el CSFW y la arena para garantizar compatibilidad con los estándares de hormigón (Tabla 1). Las pruebas siguieron protocolos ASTM, con múltiples mediciones para precisión.

Tabla 1: Propiedades físicas del CSFW y la arena

Material	Partículas < 0.08 mm, %	Absorción, %	Densidad, g/cm³
CSFW	3.88	0.5	3.84
Arena	5.11	1.2	2.49
Grava	0.20	13.67	2.38

Preparación del hormigón

Los áridos (arena y grava) se homogeneizaron en triplicado usando divisores de rifle para asegurar muestras representativas, según las normas chilenas. El CSFW se tamizó a través de una malla #170 ASTM (90 µm) para obtener partículas < 90 µm, alineando su tamaño de partícula con el del cemento Portland (típicamente < 45 µm) para mejorar la compatibilidad, la trabajabilidad y maximizar su efecto como filler en la matriz cementicia. Esta fracción más fina se eligió para garantizar una mezcla uniforme, reducir impurezas potenciales y optimizar la integración del material en el hormigón sin requerir molienda intensiva en energía. El CSFW tamizado se secó a 100 ± 5°C durante 24 horas para obtener una muestra de 10 kg. El CSFW seco se homogeneizó usando un divisor de rifle. Propiedades cementicias del CSFW como la reactividad puzolánica del CSFW con partículas menores a 15 µm por el método de la variación de pH y conductividad eléctrica en suspensiones no son parte de este estudio, pero se pueden consultar, por ejemplo, en Nazer *et al.* (2016).

Se prepararon cubos de hormigón (de 15 cm de arista) con reemplazos de cemento Portland del 0% (control), 5%, 10%, 15% y 20% en peso, siguiendo un diseño de mezcla estandarizado (ver Tabla 2) para una resistencia esperada de 40 MPa a los 28 días. Las proporciones de la mezcla mantuvieron el contenido de agua constante. Sin embargo, la razón A/C fue aumentando. La prueba de asentamiento, según NCh1019 (2009), midió la plasticidad del hormigón fresco usando el método del cono de Abrams. Los cubos se curaron a 20°C en una solución saturada de hidróxido de

calcio (Figura 4), con monitoreo diario de las condiciones. Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron a 7, 28 y 60 días usando una prensa hidráulica calibrada, según las normas chilenas.



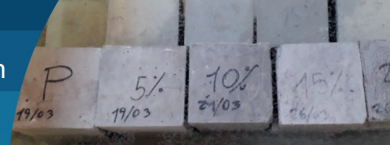
Figura 4: Curado de muestras cúbicas de hormigón.

Tabla 2: Composición de las mezclas de hormigón

Muestra	CSFW, %	Cemento, kg/m³	CSFW, kg/m³	Arena, kg/m³	Grava, kg/m³	Agua, kg/m³
Control	0	350.0	0	700	1050	175
CSFW-5	5	332.5	17.5	700	1050	175
CSFW-10	10	315.0	35.0	700	1050	175
CSFW-15	15	297.5	52.5	700	1050	175
CSFW-20	20	280.0	70.0	700	1050	175

Resultados y discusión
Caracterización del CSFW

La XRD confirmó la naturaleza cristalina del CSFW, compuesto principalmente por hedenbergita, magnetita, fayalita, albita, fengita y cuarzo, como se detalla en la sección de Métodos. El análisis químico destacó un alto contenido de hierro y silicio, sugiriendo el rol del CSFW como filler, aunque su mineralogía cristalina puede limitar la reactividad puzolánica en comparación con materiales amorfos como la ceniza volante. La PSD fina del CSFW tamizado (0.95–120.23 µm; Figura 3) respalda su uso sin molienda, una ventaja económica. Entonces, los CSFW ensayados poseen bajas propiedades cementicias. La reactividad de CSFW sería más favorable con tamaños de partículas inferiores a 45 µm. Como se ha señalado, en este estudio se aprovechó de evaluar la resistencia en hormigones con el relave de escoria de cobre con la granulometría de origen, sin modificarla.



La mayor densidad del CSFW (3.84 g/cm^3) y su menor absorción de agua (0.5%) en comparación con la arena (2.49 g/cm^3 , 1.2%; ver Tabla 1) indican compatibilidad con las mezclas de hormigón. Las propiedades físicas del CSFW, como su baja absorción de agua (0.5%), son relevantes para el comportamiento del hormigón. Aunque la relación agua/cemento no fue constante en todas las mezclas, el bajo requerimiento de agua del CSFW significó que a medida que se aumentaba la sustitución, la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento era excesiva. Este exceso de agua incrementó la plasticidad, triplicando el asentamiento en la mezcla con 20% de sustitución. Este aumento de la relación efectiva agua/cemento diluyó la pasta y, como consecuencia, resultó en una reducción de la resistencia a la compresión observada en niveles más altos de CSFW.

Plasticidad del hormigón fresco

Los resultados de las pruebas de asentamiento (ver Figura 5) muestran un aumento en la plasticidad con el contenido de CSFW, concluyente para la trabajabilidad. Las mezclas de control y CSFW-5 mostraron una consistencia plástica, adecuada para la mayoría de las aplicaciones, mientras que CSFW-10 mostró una consistencia blanda. Las mezclas CSFW-15 y CSFW-20 presentaron una consistencia fluida, según los estándares EHE-08 (2011), con el asentamiento de CSFW-20 triplicando el del control. Este aumento probablemente resulta de las partículas finas de CSFW que incrementan el área superficial.

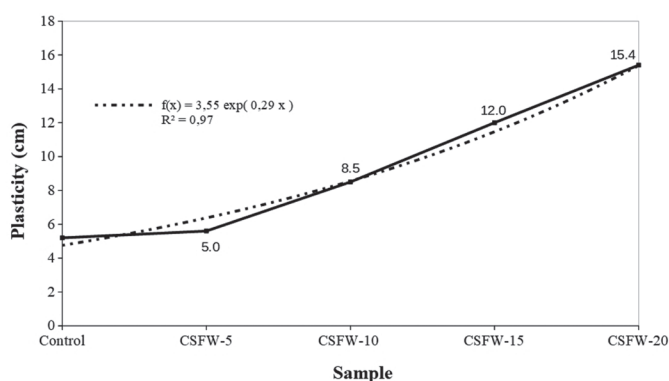


Figura 5: Resultados de las pruebas de asentamiento para las mezclas de hormigón con diferentes contenidos de CSFW, mostrando un aumento en la plasticidad con mayor sustitución de CSFW.

La alta plasticidad en niveles elevados de CSFW sugiere

un exceso de agua, lo que puede reducir la resistencia. Esto coincide con Al-Jabri *et al.* (2009), quienes señalaron que la baja absorción de agua de la escoria de cobre afecta la trabajabilidad. En la región árida de Atacama, Chile, gestionar la plasticidad es importante para la durabilidad.

Resistencia a la compresión

La Figura 6 muestra el ensayo a compresión de la probeta de hormigón, y los resultados de resistencia a la compresión a 7, 28 y 60 días, expresados como porcentaje del control, se muestran en la Figura 7. Todas las mezclas con CSFW tuvieron menor resistencia que el control, disminuyendo con mayor sustitución. La mezcla CSFW-5 tuvo el mejor desempeño, alcanzando ~80% de la resistencia del control a 28 y 60 días, indicando un potencial práctico. La resistencia mejoró con el tiempo de curado, sugiriendo que el CSFW actúa como filler, mejorando la resistencia a largo plazo al llenar vacíos en la matriz cementicia.

La reducción de resistencia en niveles más altos de CSFW probablemente resulta de un menor contenido de cemento y del exceso de agua, como se observó en la alta plasticidad de CSFW-15 y CSFW-20. Esto se debe a la baja absorción de agua del CSFW en comparación con el cemento, lo que aumenta la relación agua/cemento efectiva y diluye la pasta, reduciendo la hidratación y, por consiguiente, la resistencia. Esto coincide con Afshoon y Sharifi (2017), quienes notaron una menor resistencia con un 15% de reemplazo de CS debido a baja actividad puzolánica.



Figura 6: Ensayo a la compresión de probetas de hormigón conteniendo CSFW.

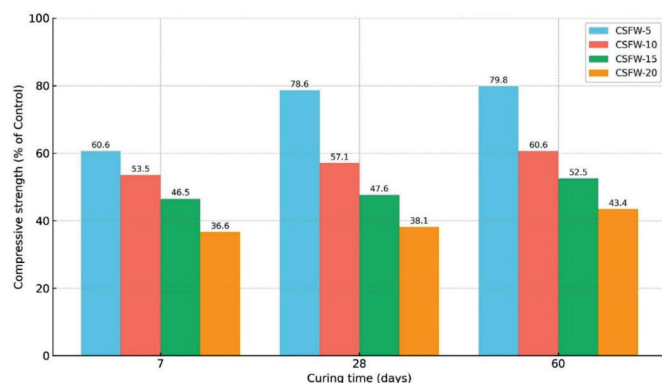


Figura 7: Resistencia a la compresión de mezclas de hormigón a 7, 28 y 60 días, relativa al control (%), mostrando el desempeño superior de la mezcla CSFW-5.

También coincide con el resultado de Sharma y Khan (2017), quienes observaron caídas de resistencia por encima del 10% de reemplazo. En contraste, Wang *et al.* (2021) reportaron una mayor resistencia con reemplazos de CS inferiores al 40%, posiblemente debido a diferencias en las propiedades del material. La mineralogía cristalina del CSFW, dominada por hedenbergita y fayalita, probablemente contribuye menos a la hidratación que las escorias amorfas (Moura *et al.*, 1997). La baja absorción de agua, señalada por Al-Jabri *et al.* (2009), produciría la reducción de resistencia.

El desempeño de la mezcla CSFW-5 sugiere que los niveles bajos de reemplazo equilibran la resistencia y la sostenibilidad. En Chile, donde la producción de cemento es intensiva en energía, un reemplazo del 5% de CSFW podría reducir los impactos ambientales sin comprometer el rendimiento.

A pesar de la baja actividad puzolánica, la naturaleza fina y la densidad del CSFW permiten un efecto filler, lo que contribuye a la densificación de la matriz de cemento. Este mecanismo es de gran importancia para explicar la ganancia de resistencia observada con el tiempo en la mezcla CSFW-5, mejorando la resistencia a largo plazo al llenar los vacíos en la matriz cementicia y compensando parcialmente la reducción de cemento.

Análisis estadístico

Las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron en triplicado, reportando valores promedio. La desviación estándar de la mezcla de control fue inferior al 5%, indicando consistencia. Las mezclas con CSFW tuvieron

desviaciones estándar de 6–10%, reflejando variabilidad en sustituciones más altas, posiblemente debido a las partículas heterogéneas del CSFW.

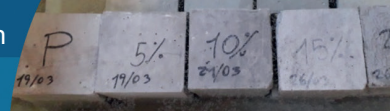
Implicaciones prácticas

El uso de CSFW en hormigón ofrece beneficios significativos para los sectores de construcción y minería de Chile. Con un reemplazo del 5%, los proyectos pueden reducir el uso de cemento, disminuyendo emisiones. En Atacama, donde el CSFW es abundante, los productores locales podrían integrarlo en las cadenas de suministro, reduciendo la dependencia de vertederos. La PSD fina del CSFW elimina la necesidad de molienda, haciéndolo rentable en comparación con la ceniza volante o el humo de sílice.

La alta plasticidad en niveles elevados de CSFW presenta desafíos y oportunidades. La consistencia fluida (*e.g.*, CSFW-20) puede ser adecuada para aplicaciones no estructurales como elementos prefabricados.

Para mitigar la reducción de resistencia en niveles de sustitución más altos y aprovechar la alta plasticidad del CSFW, se propone el uso de superplastificantes (Najimi *et al.*, 2011). Estos aditivos permiten reducir la relación agua/cemento, que es la causa principal de la pérdida de resistencia a altos niveles de sustitución, sin comprometer la trabajabilidad. Un diseño de mezcla optimizado que combine CSFW con superplastificantes podría no solo mejorar la resistencia a la compresión, sino también reducir el contenido total de cemento y, por lo tanto, los costos y las emisiones de CO₂. Este enfoque haría que sustituciones del 15% o 20% sean viables para aplicaciones no estructurales o de menor resistencia, optimizando el uso de este residuo. El uso de mineralogía puzolánica como la ceniza volante es otra opción para compensar la falta de reactividad química en el CSFW.

La matriz de hormigón, formada por la pasta de cemento, tiene la capacidad de encapsular (Alp *et al.*, 2008; Mesci *et al.*, 2009) y fijar los metales pesados presentes en el CSFW, como el hierro y el cobre, garantizando así la inmovilización de estos elementos. Este proceso impide la lixiviación de los metales al medio ambiente, un riesgo ambiental importante asociado a los residuos mineros. De esta forma, el uso del CSFW en hormigón aborda las preocupaciones de seguridad y convierte un desecho potencialmente



peligroso en un material de construcción seguro. En Chile, adoptar el CSFW se alinea con regulaciones ambientales más estrictas y objetivos de economía circular.

Conclusiones

Este estudio caracterizó los residuos de flotación de escoria de cobre (CSFW), un subproducto de la minería del cobre en Chile, y evaluó su uso como reemplazo parcial del cemento Portland. El CSFW, compuesto principalmente por hedenbergita, magnetita y fayalita, no requiere molienda, ofreciendo ventajas prácticas. La mezcla CSFW-5 (5% de reemplazo) alcanzó aproximadamente el 80% de la resistencia del control a 60 días, mientras que sustituciones mayores redujeron la resistencia debida al aumento en la relación agua/cemento efectiva provocado por la baja absorción del CSFW. La plasticidad aumentó significativamente con sustituciones mayores de CSFW, lo que indica su potencial para la producción de hormigones con alta trabajabilidad, adecuados para aplicaciones no estructurales o para diseños que no requieran alta resistencia a la compresión. Para que las sustituciones superiores al 10% sean viables para usos estructurales, la optimización de la mezcla con aditivos como superplastificantes es esencial. Esto compensaría la pérdida de resistencia, haciendo que el uso de CSFW sea una solución más competitiva en términos de costo y rendimiento.

Respaldado por estudios sobre CS y subproductos similares (Afshoon y Sharifi, 2017; Sharma y Khan, 2017; Moura *et al.*, 1997; Al-Jabri *et al.*, 2009; Najimi *et al.*, 2011), el CSFW es una opción viable y sostenible para reemplazos de cemento de bajo nivel. En Chile, particularmente en Atacama, el uso de CSFW podría reducir vertederos. La inmovilización de metales pesados garantiza seguridad.

El CSFW podría convertirse en un material suplementario estándar en la industria de la construcción de Chile, promoviendo la gestión sostenible de residuos y la eficiencia de recursos derivados de la minería del cobre.

Referencias

Afshoon, I. and Sharifi, Y. (2017). Use of copper slag microparticles in self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal* **114**(5), 691-699

Al-Jabri, K.S., Hisada, M., Al-Saidy, A.H. and Al-Oraimi, S.K. (2009). Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. *Construction and Building Materials* **23**(6), 2132-2140

Alp, I., Deveci, H. and Süngün, H. (2008). Utilization of flotation wastes of copper slag as raw material in cement production. *Journal of Hazardous Materials* **159**(2-3), 390-395

Chew, S.H. and Bharati, S.K. (2010). Use of recycled copper slag in cement-treated Singapore marine clay. *Advances in Environmental Geotechnics: International Symposium on Geoenvironmental Engineering*, Hangzhou, China, Springer Berlin Heidelberg, 705-710

Cocić, M., Logar, M., Erić, S., Tasić, V., Dević, S., Cocić, S. and Matović, B. (2017). Application of the final flotation waste for obtaining the glass-ceramic materials. *Science of Sintering* **49**(4), 431-443

Çoruh, S., Ergun, O. N. and Cheng, T.W. (2006). Treatment of copper industry waste and production of sintered glass-ceramic. *Waste Management & Research* **24**(3), 234-241

Díaz, N. (2012). Evaluación escorias. *XIII Congreso Geológico Chileno*, Sociedad Geológica de Chile, Antofagasta, Chile, 76-78

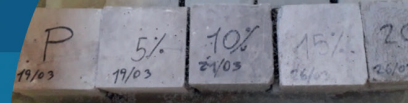
Dung, T.T.T., Cappuyns, V., Swennen, R., Vassilieva, E. and Phung, N.K. (2014). Leachability of arsenic and heavy metals from blasted copper slag and contamination of marine sediment and soil in Ninh Hoa district, south central of Vietnam. *Applied Geochemistry* **44**, 80-92

EHE-08 (2011). Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Gobierno de España

Gorai, B., Jana, R.K. and Premchand (2003). Characteristics and utilisation of copper slag—a review. *Resources, Conservation and Recycling* **39**(4), 299-313

Karamanov, A., Aloisi, M. and Pelino, M. (2007). Vitrification of copper flotation waste. *Journal of Hazardous Materials* **140**(1-2), 333-339

Mesci, B., Çoruh, S. and Ergun, O.N. (2009). Leaching behaviour and mechanical properties of copper flotation waste in stabilized/solidified products. *Waste Management & Research* **27**(1), 70-77



- Mithun, B.M. and Narasimhan, M.C. (2016). Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production* **112**(Part 1), 837–844
- Moura, W.A., Gonçalves, J.P. and Lima, M.B.L. (2007). Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete. *Journal of Materials Science* **42**(7), 2226-2230
- Najimi, M., Sobhani, J. and Pourkhorshidi, A.R. (2011). Durability of copper slag contained concrete exposed to sulfate attack. *Construction and Building Materials* **25**(4), 1895-1905
- Nazer, A., Payá, J., Borrachero, M.V. and Monzó, J. (2016). Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices. *Journal of Environmental Management* **167**, 115–123
- NCh1019 (2009). Hormigón. Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile
- NCh148 (1968). Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile
- Ozel, E., Turan, S., Çoruh, S. and Ergun, O.N. (2006). Production of brown and black pigments by using flotation waste from copper slag. *Waste Management & Research* **24**(2), 125–133
- Patel, S., Shahu, J.T. and Senapati, A. (2012). Feasibility of copper slag–fly ash mix as a road construction material. *ACEE International Journal on Transportation and Urban Development* **2**(1), 11–14
- Raposeiras, A.C., Movilla-Quesada, D., Bilbao-Novoa, R., Cifuentes, C., Ferrer-Norambuena, G. and Castro-Fresno, D. (2018). The use of copper slags as an aggregate replacement in asphalt mixes with RAP: physical–chemical and mechanical behavioural analysis. *Construction and Building Materials* **190**, 427–438
- Richter, G. (2017). Desafíos fundición y refinería Codelco. Presentación en Seminario Desafíos y Oportunidades del Arsénico en la Industria Minera en Chile, Codelco, Chile
- Sharma, R. and Khan, R.A. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production* **151**, 179-192
- Shi, C., Meyer, C. and Behnood, A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling* **52**(10), 1115–1120
- Valenzuela, A. (2016). Mining waste management in Chile: Experience, challenges and opportunities. Presentación XIV Congreso Internacional Expomin, Chile, 1–27
- Vinotha, J. and Brindha, D. (2021). Development of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete – in aspects of flexure, fracture and microstructure. *Revista de la Construcción* **20**(1), 62–90
- Wang, G. and Emery, J. (2004). Technology of slag utilization in highway construction. *Environmental Benefits of In-situ Material Recycling and Strengthening Session, Annual Conference of Transportation Association of Canada*, Québec, Canada, 1–15
- Wang, R., Shi, Q., Li, Y., Cao, Z. and Si, Z. (2021). A critical review on the use of copper slag (CS) as a substitute constituent in concrete. *Construction and Building Materials* **292**, 123371