

Escoria de cobre: una alternativa sustentable para la construcción de pavimentos rígidos

Copper slag: a sustainable alternative for rigid pavement construction

Fecha de entrega: 22 de agosto 2025

Fecha de aceptación: 3 de noviembre 2025

Benjamín Valdés-Kern, Claudia Burbano-García, Yimmy Silva, Gerardo Araya-Letelier, Marcelo González

Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile, b.valdeskern@uc.cl (<https://orcid.org/0009-0006-5072-8982>), cpburbano@uc.cl (<https://orcid.org/0000-0001-9068-0959>), yimmy.silva@uc.cl (<https://orcid.org/0000-0003-3888-457X>), gerardo.araya@uc.cl (<https://orcid.org/0000-0003-4252-1341>), magonza7@uc.cl

Este artículo investiga el uso de escoria de cobre (EC), residuo masivo de la industria minera, como material cementicio suplementario (MCS) en mezclas de hormigón con posibles usos en pavimentos, evaluando las propiedades mecánicas y durabilidad frente a agentes agresivos. Experimentalmente, se observó que reemplazar hasta un 20% (volumen) del cemento con EC no reduce significativamente la resistencia a la flexo-tracción (FT), y que un 10% de EC aumenta en un 3,3% la resistencia a la FT a largo plazo (360 días) respecto al hormigón de referencia (sin EC). Además, se registró una reducción de la profundidad de penetración de agua en un 36% y 38%, a los 28 y 90 días respectivamente. Se concluye que la EC tiene un uso potencial para mezclas de hormigón para pavimentos, con un adecuado desempeño estructural y un menor impacto medioambiental, aunque son necesarios estudios adicionales específicos de pavimentación para validar estos hallazgos.

Palabras clave: escoria de cobre, material cementicio suplementario, pavimentos de hormigón, durabilidad

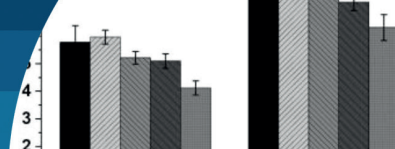
This article investigates the use of copper slag (CS), a massive waste product of the mining industry, as a supplementary cementitious material (SCM) in concrete mixes for potential pavement applications, evaluating its mechanical properties and durability against aggressive agents. Experimentally, it was observed that replacing up to 20% (volume) of the cement with CS does not significantly reduce flexural and tensile strength (FT), and that 10% CS increases long-term FT strength (360 days) by 3.3% compared to the reference concrete (without CS). Furthermore, a reduction in water penetration depth of 36% and 38% was recorded at 28 and 90 days, respectively. It is concluded that CS has potential use in concrete mixes for pavements, with adequate structural performance and a lower environmental impact, although further specific pavement studies are needed to validate these findings.

Keywords: copper slag, cementitious material, concrete pavements, durability

Introducción

El hormigón es el material manufacturado más utilizado a nivel mundial, principalmente por su durabilidad, resistencia y bajo costo. No obstante, la producción de cemento, el componente esencial del hormigón, genera alrededor del 7% de las emisiones globales de CO₂, lo que plantea un desafío ambiental importante (de Pedro *et al.*, 2023). Por ejemplo, en el año 2020 se produjeron aproximadamente 14 billones de m³ de hormigón, lo que implica un consumo de 4,2 billones de toneladas de cemento, considerando

300 kg de cemento por metro cúbico de hormigón, la cantidad mínima recomendada para la dosificación de un hormigón para pavimento (GCCA, 2024; Yepes, 2023). La búsqueda de alternativas para mitigar las emisiones de CO₂ ha impulsado el desarrollo de materiales cementicios suplementarios (MCS) que puedan sustituir parcialmente al clínker en la producción de cemento o reemplazar una fracción de cemento en el hormigón, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de carbono (Juenger *et al.*, 2019).



La escoria de cobre (EC), un residuo masivo de la industria minera, ha mostrado ser un MCS prometedor, tal como se reporta en diferentes estudios (Dhir *et al.*, 2017; Moura *et al.*, 2007). Su uso en hormigón como MCS puede mejorar tanto las propiedades mecánicas como la durabilidad, como es el caso del aumento de la resistencia a la flexotracción (FT) y la reducción de la porosidad, especialmente a largo plazo. La extracción de cobre genera grandes cantidades de EC, estimándose que se producen entre 2 y 3 toneladas de EC por cada tonelada de cobre extraído (Najimi y Pourkhorshidi, 2011). En particular Codelco, uno de los principales productores de cobre en el mundo, genera aproximadamente 163 toneladas de EC diariamente en Chile, lo que se traduce en alrededor de 371 millones de toneladas de EC acumuladas entre el año 2014 y 2020 (USGS, 2020).

La incorporación de EC como MCS en el hormigón no solo podría reducir las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de cemento y disminuir la acumulación de EC en vertederos, sino también mejorar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón con aplicaciones, por ejemplo, en pavimentos. En particular, la resistencia a la FT es fundamental en pavimentos, puesto que permite que la estructura soporte las solicitaciones impuestas por las cargas dinámicas y estáticas producto del tráfico vehicular, que generan tensiones de flexión (Chen *et al.*, 2023). Las fisuras que pueden surgir por estas tensiones facilitan la infiltración de agua y otros agentes que aceleran el deterioro del pavimento, afectando su durabilidad y seguridad y reduciendo su vida útil (Aghaeipour y Madhkan, 2020).

Estudios previos sobre el uso y efecto de la EC como MCS en hormigón han mostrado mejoras en la resistencia a la FT de los hormigones, lo que sugiere un potencial uso para pavimentos de hormigón (Arredondo *et al.*, 2024; Moura *et al.*, 2007; Najimi y Pourkhorshidi, 2011). Sin embargo, estos estudios se han centrado en aplicaciones generales del hormigón, y no específicamente en su uso para pavimentos. De esta manera, este estudio tiene como objetivo analizar el potencial de la EC como MCS para mejorar la resistencia a la FT en hormigones con potencial uso en pavimentos de hormigón.

La novedad de este estudio radica en la exploración del uso de la EC como MCS en porcentajes de reemplazo crecientes en volumen, es decir, 0, 10, 20, 30, 50%,

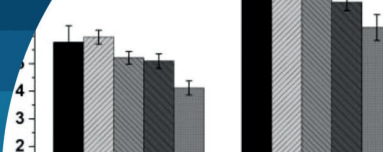
incluyendo una mezcla con 0% de reemplazo de EC como referencia, para evaluar el efecto de dosis crecientes de EC en el comportamiento mecánico (compresión, FT) y de durabilidad, a corto y largo plazo, de mezclas de hormigón con potencial uso en pavimentos. Contribuyendo con este enfoque a la posible reducción de la acumulación de desechos mineros y a la disminución de las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento.

El artículo se estructura de la siguiente manera: se describe la metodología experimental utilizada en este estudio, incluyendo los materiales, diseño de mezcla y procedimientos de evaluación de propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón con EC. Luego se presenta los resultados obtenidos y su análisis detallado, con un enfoque en la trabajabilidad, resistencia a la compresión y a la FT, así como la resistencia del hormigón ante agentes agresivos. Después se evalúa la seguridad y el impacto medioambiental del uso de EC en hormigón, incluyendo una revisión bibliográfica de aspectos de toxicidad y radioactividad, y complementando con una prueba de lixiviación de metales pesados hecha en este estudio. Finalmente, se resumen los principales hallazgos del estudio y se proponen futuras investigaciones para validar el uso de EC en pavimentos de hormigón, particularmente en condiciones reales de tráfico y durabilidad a largo plazo.

Metodología

Esta investigación sigue un enfoque experimental, acompañado de un análisis estadístico sobre los datos obtenidos. Inicialmente, se describen los materiales y las diversas mezclas de hormigón empleadas, especificando los parámetros evaluados a partir de los resultados experimentales. El estudio se centra en dos propiedades fundamentales del hormigón utilizado en pavimentos: la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexotracción FT. Además, se analizará la durabilidad del hormigón con incorporación de EC como MCS mediante una revisión exhaustiva de literatura existente.

Con esta metodología, se pretende contrastar los resultados obtenidos con las normativas vigentes para pavimentos, evaluando así el potencial de la EC para mejorar el rendimiento y la durabilidad de los pavimentos de hormigón.



Materiales

En este estudio, el cemento Portland tipo I (OPC) se empleó como principal material cementante, conforme a la norma ASTM C150 (2022). La EC, proporcionada por Codelco, el mayor productor de cobre a nivel mundial, se utilizó como MCS tras un proceso de molienda (Barros *et al.*, 2022).

En cuanto a las propiedades físicas de la EC, su densidad es de 3500 kg/m³, mientras que la distribución del tamaño de partículas se obtuvo mediante difracción láser, utilizando un MasterSizer 2000 de Malvern. En este análisis, se identificaron los distintos diámetros (D90, D50 y D10), cuyos valores se detallan en la Tabla 1. Por su parte, la composición química se determinó a partir de un análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Los principales óxidos presentes en la EC fueron Fe₂O₃ y SiO₂, con menores proporciones de otros óxidos como CaO, Al₂O₃ y MgO. En cuanto a la pérdida por calcinación (PPC), este valor fue del 5,2%, lo que puede atribuirse al proceso de oxidación que ocurre en la fase de fayalita (Fe₂SiO₄) (Mahajan y Muhammad, 2024).

Por otro lado, la composición mineralógica de la EC se analizó a través de Difracción de Rayos X (DRX), cuyos resultados se presentan en la Figura 1. El espectro de DRX muestra que las principales fases cristalinas son la fayalita (Fe₂SiO₄), un mineral perteneciente al grupo de los nesosilicatos, y la magnesioferrita (MgFe₂O₄), un mineral compuesto por óxidos de hierro y magnesio. Además, esta EC presenta una fase amorfa del 50%, calculada mediante el método de Rietveld.

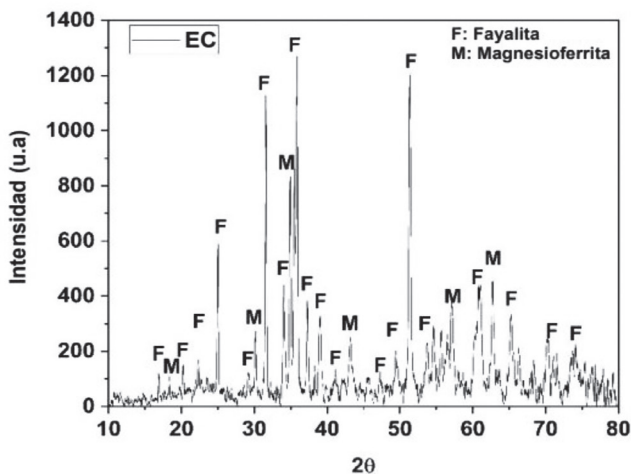


Figura 1: Patrón de difracción de rayos X de la EC

Como árido fino, se empleó arena de río natural, con una gravedad específica de 2580 kg/m³, una absorción de 1,85% y un módulo de finura de 2,67. Para el árido grueso, se utilizó grava chancada con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm, una gravedad específica de 2650 kg/m³ y una absorción de 1,65%. Además, se incorporó un aditivo superplastificante reductor de agua (SP) a base de policarboxilato tipo F, de acuerdo con la norma ASTM C494 (2019). En todas las mezclas de hormigón se utilizó agua potable de red.

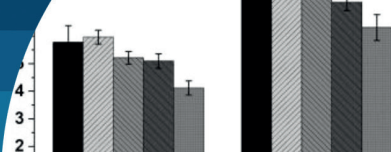
Tabla 1: Composición química y valores de tamaño de partícula del OPC y la EC

Materiales	OPC	EC
Composición química (% en peso)		
SiO ₂	25.08	29.15
CaO	59.15	2.84
Fe ₂ O ₃	3.41	59.15
Al ₂ O ₃	5.12	5.84
MgO	0.94	1.02
SO ₃	2.72	1.15
CuO	-	1.34
Na ₂ O	0.13	1.02
K ₂ O	0.77	1.28
TiO ₂	0.28	0.48
P ₂ O ₅	0.17	0.19
PPC	1.99	- 5.16
Tamaño de partículas		
D90 (μm)	38.93	66.06
D50 (μm)	11.23	15.71
D10 (μm)	1.90	1.36
TMP* (μm)	17.37	26.48

*TMP: Tamaño medio de partículas

Diseño de mezclas

El diseño de las mezclas se desarrolló conforme al código ACI 211.1 (2022). La Tabla 2 detalla las cinco mezclas empleadas: una de referencia con 100% de OPC como material aglomerante y cuatro con reemplazo parcial, en volumen, de OPC por EC en proporciones de 10, 20, 30 y 50% (denominadas 10% EC, 20% EC, 30% EC y 50% EC). Los áridos fino y grueso, el agua y el SP se mantuvieron constantes en todas las mezclas para evaluar el impacto específico de la EC en las propiedades del hormigón, tanto en el estado fresco como en el endurecido.



Tras la preparación de cada mezcla, se evaluó la trabajabilidad del hormigón mediante la prueba de asentamiento de cono. Posteriormente, el hormigón fue vaciado en moldes plásticos y, tras 24 horas de curado inicial, cada espécimen fue desmoldado y colocado en tanques con agua saturada de cal, manteniendo una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para su curado final.

Para cumplir con las recomendaciones para pavimentos de hormigón, se estableció una relación agua/cemento (A/C) de 0,55 y una dosificación de OPC de 400 kg/m^3 en la mezcla de referencia, alineándose con las especificaciones sugeridas en la literatura: A/C de 0,4 y 300 kg/m^3 de OPC (Yepes, 2023).

Tabla 2: Dosificación de las mezclas de hormigón con EC

Mezcla ID	Reemplazo, %	OPC, kg/m^3	EC, kg/m^3	Agua, kg/m^3	Arena, kg/m^3	Grava, kg/m^3	SP, kg/m^3
Ref.	0	400	0	218	856.8	812.4	1.77
10% EC	10	360	47.3	218	856.8	812.4	1.77
20% EC	20	320	94.7	218	856.8	812.4	1.77
30% EC	30	280	142	218	856.8	812.4	1.77
50% EC	50	200	236.7	218	856.8	812.4	1.77

*El porcentaje de reemplazo de OPC por EC es en volumen

Es importante señalar que en todas las mezclas la cantidad de agua se mantuvo constante, mientras que la masa de OPC disminuyó progresivamente conforme aumentó el porcentaje de reemplazo por EC. En consecuencia, la reducción de OPC implica un incremento en la relación A/C expresada en términos de masa, sin embargo, la relación entre agua y mezcla cementante (OPC + EC), considerada en términos de volumen, permanece invariable en todos los casos.

Además, dado que el reemplazo se efectuó en base a volumen y no a masa, las cantidades resultantes de cada material cementante no son equivalentes, debido a la diferencia entre sus densidades (3000 kg/m^3 para OPC y 3500 kg/m^3 para EC). Esta condición explica la variación de 36.7 kg observada entre las masas de OPC y EC en la mezcla con un 50% de reemplazo, en la cual la mitad del volumen total de la mezcla cementante corresponde a EC.

Propiedades del hormigón endurecido

Para evaluar la resistencia a compresión, se utilizaron especímenes cilíndricos de hormigón de 76,2 mm de

diámetro y 152,4 mm de altura, conforme a la norma ASTM C39 (2021), con mediciones a los 7, 28, 90, 180 y 360 días de curado. La resistencia a flexión se midió en especímenes prismáticos de $75\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 300\text{ mm}$, siguiendo la norma ASTM C293 (2016), con ensayos a los 28 y 360 días de curado. Se analizaron tres especímenes de cada mezcla en cada período de curado, para asegurar la representatividad estadística de los resultados de cada propiedad evaluada.

Ensayo de lixiviación de metales pesados

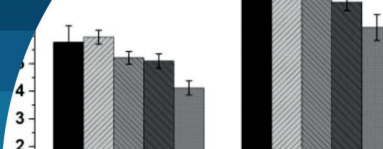
Para evaluar el potencial de lixiviación de metales pesados de las mezclas, se realizó el Ensayo de Procedimiento Característico de Toxicidad (TCLP, por sus siglas en inglés). Este método, estandarizado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), simula las condiciones de un vertedero para determinar la movilidad de contaminantes inorgánicos.

El ensayo se realizó sobre muestras de hormigón endurecido con porcentajes de reemplazo de 20% y 50% de OPC por EC (en volumen). Los lixiviados obtenidos se analizaron para determinar la concentración de ocho metales pesados: As, Ba, Cd, Cr, Hg, Ag, Pb y Se. Los resultados se compararon con los límites establecidos por la EPA (1992) y el Reglamento Sanitario sobre manejo de residuos peligrosos de Chile (DS148, 2004).

Resultados

Antes de presentar los resultados experimentales, se establece un contexto normativo aplicable en Chile y España para ampliar el alcance y validez de los hallazgos. En Chile, el Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación (CNETOP) exige para pavimentos de hormigón una resistencia mínima a compresión de 30 MPa y una resistencia a FT de al menos 5 MPa a los 28 días de curado. Para vías de menor tráfico, como vías de servicio, locales y pasajes, la resistencia a FT permitida puede oscilar entre 4 y 5 MPa (MINVU, 2018).

En el ámbito internacional, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento de España establece un rango de resistencia a compresión de entre 25 y 35 MPa y una resistencia a FT de 3,5 a 4,5 MPa a los 28 días de curado (Yepes, 2023).



Las siguientes secciones examinan el rendimiento de las mezclas de hormigón con distintos porcentajes de sustitución de OPC por EC frente a estas normativas, comparando con la mezcla de referencia. Además, se realiza un análisis de la literatura existente sobre la durabilidad de mezclas de hormigón que incorporan EC como MCS, proporcionando una visión integral del desempeño de estas mezclas.

Trabajabilidad (prueba de asentamiento de cono)

La Figura 2 muestra como la incorporación de EC afecta la trabajabilidad del hormigón. Las barras en esta y las figuras subsiguientes (Figura 3 y Figura 4) representan los valores promedio, mientras que las barras de error muestran una desviación estándar arriba y abajo del promedio. El asentamiento promedio de la mezcla de referencia, compuesta por 100% OPC, fue de 14,3 cm. Con un reemplazo del 10% de OPC por EC, el asentamiento promedio aumentó ligeramente, lo cual coincide con estudios previos (Mahajan y Muhammad, 2024).

En la mezcla con un 20% de EC, se observó una reducción en el asentamiento promedio de 16,1% respecto a la mezcla de referencia. Esta disminución en trabajabilidad se puede atribuir a la forma angular e irregular de las partículas de EC en comparación con las de OPC, lo cual afecta negativamente la fluidez de la mezcla. Además, el SP mostró menor efectividad en las partículas de EC que en las de OPC.

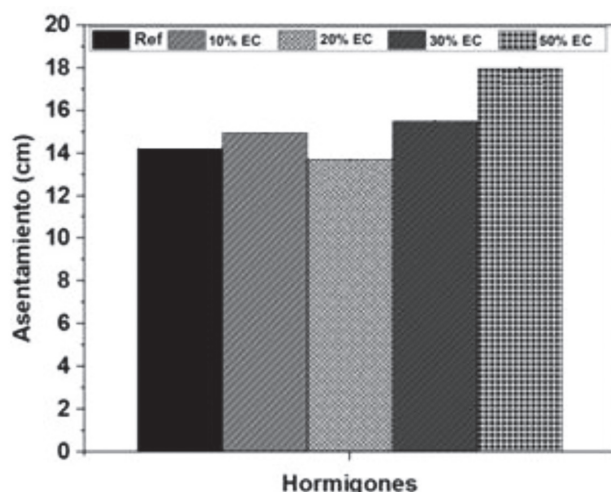


Figura 2: Prueba de asentamiento de cono de las mezclas de hormigón

Por otro lado, las mezclas con mayor porcentaje de reemplazo de EC (30% y 50%) presentaron un asentamiento promedio más alto, alcanzando hasta un 27,3% más que el de la mezcla de referencia. Este aumento en la trabajabilidad se explica por una mayor relación entre el agua y el OPC, ya que al mantenerse constante el agua y disminuir la masa de OPC en la mezcla cementicia (OPC + EC), se incrementa el asentamiento al reducir la concentración de compuestos del clínker (C_3S , C_2S , C_3A), disminuyendo así la actividad inicial en la reacción de hidratación (Zeyad *et al.*, 2023).

Resistencia a compresión

La Figura 3 muestra los resultados de la resistencia a compresión de mezclas de hormigón con distintos porcentajes de reemplazo de OPC por EC, evaluados a los 7, 28, 90, 180 y 360 días de curado. En todos los casos, la resistencia a compresión aumentó con el tiempo de curado, como era previsible. Sin embargo, los valores promedio de resistencia disminuyeron consistentemente a medida que aumentaba el porcentaje de EC, con reducciones entre un 9,1% (10% EC) y un 63% (50% EC) a los 7 días en comparación con la mezcla de referencia, que alcanzó 35,1 MPa. A los 28 días, las reducciones variaron entre 6,1% (10% EC) y 55,81% (50% EC), con una resistencia de referencia de 44,3 MPa.

Este patrón concuerda con investigaciones previas, que también informan disminuciones en la resistencia inicial al reemplazar OPC con EC (Mahajan y Muhammad, 2024). Estudios sobre otros MCS, como cenizas volantes y cenizas de cáscara de arroz, documentaron igualmente una menor resistencia inicial, atribuida a la baja reactividad en las primeras etapas de hidratación (Karim *et al.*, 2024; Yaseen *et al.*, 2024).

Con tiempos de curado más largos, la diferencia en resistencia entre la mezcla de referencia y la mezcla con un 10% de EC disminuyó considerablemente, con diferencias de 4,3, 2,8 y 0,5% a los 90, 180 y 360 días, respectivamente, lo que indica que la EC contribuye a la formación de C-S-H en etapas avanzadas. Una tendencia similar se observó en la mezcla con 20% de EC, que a los 360 días alcanzó el 95,3% de la resistencia de la mezcla de referencia (54,3 MPa). No obstante, mezclas con 30% y 50% de EC mostraron pérdidas significativas

de resistencia a compresión en todas las edades evaluadas, con reducciones de entre 21,1 y 46,9% a los 180 días, y entre 20,1 y 39,8% a los 360 días.

Estos resultados indican que el hormigón con hasta un 30% de EC puede cumplir con las normativas chilenas e internacionales. La Figura 3 muestra que, a los 28 días de curado, las mezclas con hasta un 30% de EC alcanzan resistencias a compresión superiores a 30 MPa, cumpliendo con los requisitos del CNETOP chileno y el PG-3 español.

En conjunto, estos resultados sugieren que el uso de hasta un 30% de EC como reemplazo parcial de OPC constituye una alternativa viable y sostenible para pavimentos de hormigón, cumpliendo con normativas técnicas exigidas.

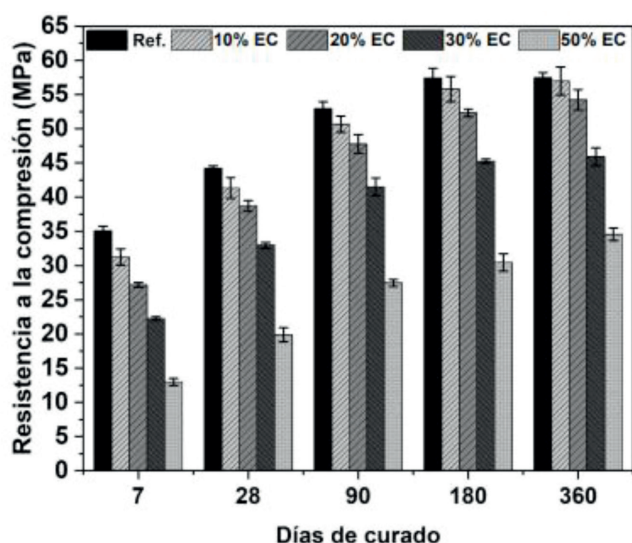


Figura 3: Resultados de resistencia a compresión de las mezclas de hormigón con días de curado ascendentes

Resistencia a flexión

La Figura 4 muestra los resultados de resistencia a flexión de las mezclas de hormigón a los 28 y 360 días de curado. A los 28 días, la mezcla con un 10% de EC alcanzó una resistencia de 5,97 MPa, superando en un 3,3% a la mezcla de referencia, atribuible al efecto de relleno de las partículas finas de EC (D10: 1.36 μ m). No obstante, en mezclas con mayores porcentajes de reemplazo de OPC por EC, la resistencia a flexión disminuyó progresivamente, debido al efecto de dilución y la baja reactividad inicial de la EC. Estudios anteriores también reportan incrementos en resistencia a flexión con adiciones moderadas de EC (2 a 10%), relacionándolos con mejoras en la zona de transición

interfacial gracias a reacciones puzolánicas y al efecto de relleno (Burbano-Garcia *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2023).

A los 360 días, la mezcla con 10% de EC presentó la mayor resistencia promedio a flexión (8,64 MPa), seguida de cerca por la mezcla de referencia (8,36 MPa). La mezcla con 20% de EC alcanzó el 96% de la resistencia de la referencia, mientras que la menor resistencia (6,31 MPa) correspondió a la mezcla con 50% de EC.

En síntesis, a los 28 días de curado, las mezclas con hasta 30% de EC lograron resistencias superiores a 5 MPa, cumpliendo las normativas chilenas y españolas. Incluso con un 50% de EC, la resistencia se mantuvo por encima de 4 MPa, suficiente para pavimentos de menor carga en Chile y dentro de los requisitos españoles. A los 360 días, todas las mezclas superaron los 5 MPa, destacando el potencial de la EC como MCS en pavimentos de hormigón y su contribución a una construcción más sostenible.

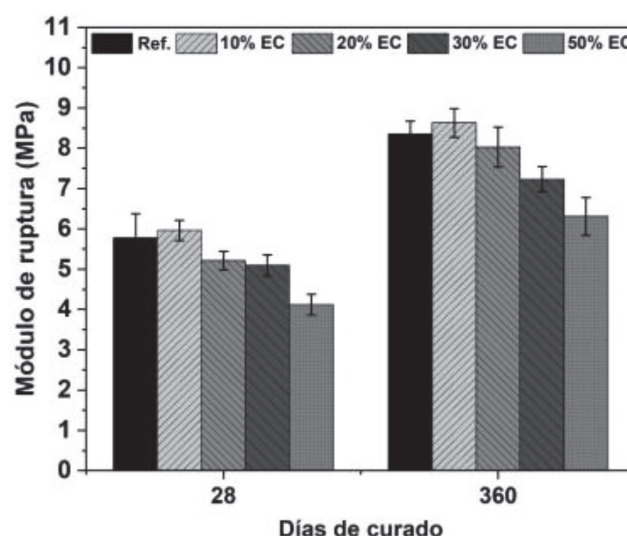
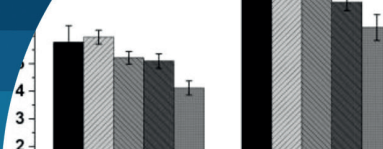


Figura 4: Resultados de resistencia a flexión de las mezclas de hormigón con días de curado ascendentes

Resistencia ante agentes agresivos

El hormigón con EC muestra un comportamiento favorable frente a agentes agresivos, destacando mejoras en durabilidad comparado con el hormigón convencional. La EC actúa como material de relleno, densificando la microestructura y reduciendo la porosidad del hormigón, lo cual mejora su resistencia a la penetración de agentes como agua, sulfatos y cloruros, que son causas de deterioro a largo plazo.



Estudios anteriores reportan una menor profundidad de carbonatación en el hormigón con EC respecto a la mezcla de referencia, indicando que la menor porosidad limita la difusión de CO₂ y reduce la degradación por carbonatación, lo cual protege mejor contra la corrosión (Moura *et al.*, 2007). Además, con un 10% de EC, la penetración de agua se redujo en un 36% y 38% a los 28 y 90 días, respectivamente, y se observó menor permeabilidad a los iones de cloruro en etapas avanzadas, disminuyendo el riesgo de corrosión del acero y extendiendo así la vida útil de las estructuras.

Frente a soluciones de sulfatos, el hormigón con EC mostró menor expansión, especialmente con un 10% de EC, lo que reduce la formación de productos expansivos como la etringita, disminuyendo las microfisuras y mejorando la integridad estructural del hormigón (Najimi y Pourkhorshidi, 2011; Silva *et al.*, 2025a, 2025b).

En conclusión, la EC es adecuada para hormigones expuestos a ambientes agresivos, donde se requiere alta durabilidad. Su menor permeabilidad y expansión mejoran la resistencia del hormigón frente a ataques químicos y reducen la probabilidad de degradación estructural a largo plazo.

Seguridad y medioambiente

En esta sección se presenta un análisis de la seguridad y el impacto ambiental de la EC como MCS. El análisis se compone de dos partes: (1) una revisión de literatura y normativa vigente sobre toxicidad y radioactividad, y (2) un análisis experimental de los resultados de la prueba de lixiviación (TCLP) realizada en este estudio.

Toxicidad y lixiviación de metales pesados

La seguridad en el uso de la EC en mezclas de hormigón está respaldada por la Convención de Basilea de las Naciones Unidas, que no clasifica la EC como residuo peligroso. Estudios de lixiviación indican que los niveles de metales pesados en hormigones con EC están por debajo de los límites establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y las Órdenes de Calidad Ambiental de Malasia (Shi *et al.*, 2008).

El uso de EC en mezclas con OPC facilita la encapsulación física y estabilización química de metales pesados, reduciendo su movilidad y riesgo de lixiviación. Según

la norma GB 5085.3–2007: Estándares de identificación para residuos peligrosos, las concentraciones de metales lixiviados en hormigón con EC se mantienen dentro de límites seguros (He *et al.*, 2021). Estos resultados confirman que la EC es segura para su uso en hormigón, sin un riesgo significativo de contaminación ambiental.

Para complementar el análisis de literatura, los resultados del ensayo TCLP realizado sobre las mezclas 20% EC y 50% EC se presentan en la Tabla 3. Los resultados experimentales demuestran que las concentraciones de todos los metales analizados en los lixiviados están muy por debajo de los límites máximos permisibles, tanto de la norma estadounidense (EPA, 1992) como de la chilena (DS148, 2004).

Específicamente, metales pesados como As, Cr, Pb, Cd y Ag arrojaron concentraciones por debajo del límite de detección del método. El Bario (Ba), aunque presente, mostró una concentración máxima de 1,573 mg/L (incluso en la mezcla 50% EC), un valor insignificante frente al límite de 100 mg/L. Estos hallazgos confirman que la matriz cementicia del hormigón encapsula y estabiliza eficazmente los metales pesados de la EC, validando su uso seguro.

Tabla 3: Resultados del ensayo de lixiviación (TCLP) en mg/L

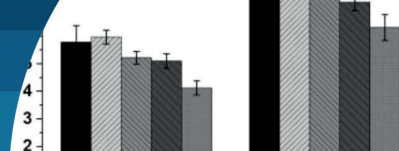
Mezcla ID	As, mg/L	Cr, mg/L	Hg, mg/L	Pb, mg/L	Se, mg/L	Ba, mg/L	Cd, mg/L	Ag, mg/L
20% EC	<0,002	<0,007	0,005	<0,051	<0,001	1,101	<0,046	<0,032
50% EC	<0,002	<0,007	<0,002	<0,051	<0,001	1,573	<0,046	<0,032
EPA*	5	5	-	5	-	100	1	-
CMP-	5	5	0,2	5	1	100	1	5

*EPA, umbral límite estándar (mg/L)

-Concentración Máxima Permitida (CMP), Reglamento Sanitario sobre manejo de residuos peligrosos (DS148, 2004)

Radioactividad

En cuanto a la radioactividad, estudios han mostrado que el reemplazo de hasta un 30% de OPC por EC no presenta un riesgo radiológico significativo. Sin embargo, cuando el porcentaje de reemplazo aumenta a un 50%, los niveles de radionúclidos pueden superar los límites de seguridad establecidos por la normativa GB 6566-2010: Límites de radionúclidos en materiales de construcción (Wang *et al.*, 2020).



Este hallazgo indica que, si bien la EC es segura en aplicaciones de hormigón, se debe realizar una evaluación rigurosa al emplear porcentajes superiores al 30%, especialmente en contextos de exposición prolongada al material. Por lo tanto, se recomienda limitar el uso de EC a un 30% para cumplir con estándares de seguridad radiológica y asegurar la protección de los usuarios y el entorno a largo plazo.

Conclusiones

Este estudio propone que la escoria de cobre EC es un material cementicio suplementario MCS viable para su aplicación en pavimentos de hormigón, aportando beneficios tanto técnicos como ambientales. A continuación, se presentan los principales hallazgos.

Viabilidad técnica: La incorporación de EC en proporciones de hasta un 30% demostró ser técnicamente factible, cumpliendo con los requisitos de resistencia a compresión y a flexo-tracción FT establecidos en las normativas chilenas e internacionales para pavimentos de hormigón. Estos resultados validan el uso de EC como reemplazo parcial de cemento en la fabricación de pavimentos duraderos y resistentes.

Docilidad y trabajabilidad: La inclusión de EC en las mezclas de hormigón no afecta significativamente la trabajabilidad ni la docilidad del material. Las mezclas con diferentes porcentajes de EC presentaron asentamientos similares a los de la mezcla de referencia, sin requerir ajustes considerables en la cantidad de agua. Este comportamiento facilita la colocación y manipulación del hormigón en obra, manteniendo la facilidad de aplicación en grandes superficies, una característica ventajosa para aplicaciones en pavimentación.

Porosidad y durabilidad: Una de las principales ventajas de utilizar EC como MCS es la reducción de la porosidad del hormigón, lo cual mejora su durabilidad, especialmente en entornos expuestos a agentes agresivos. La disminución de la permeabilidad contribuye a una mayor resistencia a la penetración de cloruros, sulfatos y agua, limitando los efectos de la carbonatación y otros mecanismos de degradación a largo plazo. Estas características son especialmente relevantes para pavimentos en ambientes costeros o industriales, donde la durabilidad es esencial.

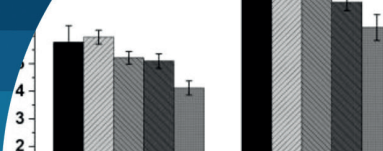
Impacto ambiental positivo: La sustitución parcial de cemento por EC en el hormigón representa una alternativa sostenible en la construcción. Al reducir la acumulación de desechos mineros y las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento, la utilización de EC contribuye significativamente a la mitigación del impacto ambiental de la industria de la construcción, promoviendo prácticas constructivas más sostenibles.

Seguridad y confiabilidad: El ensayo de lixiviación (TCLP) realizado en este estudio confirma experimentalmente que el hormigón con reemplazos de OPC por EC (incluso hasta 50%) cumple con las normativas sobre liberación de metales pesados. Esto, sumado a la revisión de literatura que indica que la radioactividad no es un riesgo en dosis de hasta 30% de reemplazo, garantiza la viabilidad del uso de EC en pavimentación sin comprometer la seguridad pública ni el medio ambiente.

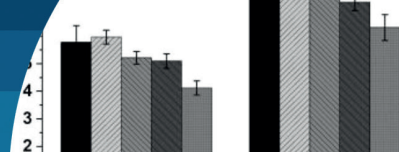
En conclusión, esta investigación respalda el uso de EC como MCS para hormigón, siendo una alternativa técnica y ambientalmente viable en la producción de pavimentos. La incorporación de EC no solo mejora la durabilidad y resistencia del hormigón, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental en la industria de la construcción, al disminuir los desechos mineros y las emisiones de CO₂. Se recomienda, sin embargo, que futuras investigaciones incluyan ensayos a gran escala en condiciones de tráfico real, así como estudios de durabilidad a largo plazo, para validar y ampliar los resultados obtenidos en este estudio y consolidar su aplicación en infraestructuras viales sostenibles.

Referencias

- Aghaeipour, A. and Madhkhani, M. (2020). Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavement (RCCP) – a review. *Road Materials and Pavement Design* 21(7), 1775–1798. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1579754>
- ACI PRC-211.1 (2022). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. American Concrete Institute, Detroit MI, USA
- Arredondo, P.W.C., Silva, Y.F., Araya-Letelier, G. and Hernández, H. (2024). Valorization of recycled aggregate and copper slag for sustainable concrete mixtures: mechanical, physical, and environmental performance. *Sustainability* 16(24), 11239. <https://doi.org/10.3390/su162411239>



- ASTM C293 (2016). Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading. ASTM International, West Conshohocken PA, USA, https://doi.org/10.1520/C0293_C0293M-16
- ASTM C494 (2019). Standard specification for chemical admixtures for concrete. ASTM International, West Conshohocken PA, USA, https://doi.org/10.1520/C0494_C0494M-19
- ASTM C39 (2021). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken PA, USA, https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- ASTM C150 (2022). Standard specification for Portland cement. ASTM International, West Conshohocken PA, USA, https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-22
- Barros, K.S., Vielmo, V.S., Moreno, B.G., Riveros, G., Cifuentes, G. and Bernardes, A.M. (2022). Chemical composition data of the main stages of copper production from sulfide minerals in Chile: a review to assist circular economy studies. *Minerals* **12**(2), 250. <https://doi.org/10.3390/min12020250>
- Burbano-Garcia, C., Silva, Y.F., Araya-Letelier, G. and González, M. (2025). Hydration kinetics and mechanical performance of cement pastes with copper slag as supplementary cementitious material. *Journal of Building Engineering* **112**, 113673. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113673>
- Chen, W., Li, B. and Xu, Y. (2023). Recycled aggregate concrete for pavement rapid repair. In *Multi-Functional Concrete with Recycled Aggregates*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Y. Xu and R. Jin (eds.), 251–265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89838-6.00010-4>
- de Pedro, J.P.Q., Lagao, J.A.T. and Ongpeng, J.M.C. (2023). Life cycle assessment of concrete using copper slag as a partial cement substitute in reinforced concrete buildings. *Buildings* **13**(3), 746. <https://doi.org/10.3390/buildings13030746>
- Dhir, R.K., de Brito, J., Mangabhai, R. and Lye, C.Q. (2017). Introduction. In *Sustainable Construction Materials: Copper Slag*, Elsevier, 1–8. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100986-4.00001-8>
- DS148 (2004). Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. Decreto Supremo 148. Diario Oficial de la República de Chile, Ministerio de Salud, Santiago, Chile.
- EPA (1992). Method 1311: Toxicity characteristic leaching procedure. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods (SW-846). US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA
- GCCA (2024). Concrete future - roadmap to net zero. Cement and Concrete around the World. Global Cement and Concrete Association, London, UK
- He, R., Zhang, S., Zhang, X., Zhang, Z., Zhao, Y. and Ding, H. (2021). Copper slag: The leaching behavior of heavy metals and its applicability as a supplementary cementitious material. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **9**(2), 105132. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105132>
- Juenger, M.C.G., Snellings, R. and Bernal, S.A. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research* **122**, 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Karim, R., Islam, Md. H., Datta, S.D. and Kashem, A. (2024). Synergistic effects of supplementary cementitious materials and compressive strength prediction of concrete using machine learning algorithms with SHAP and PDP analyses. *Case Studies in Construction Materials* **20**, e02828. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02828>
- Mahajan, D.S. and Muhammad, S. (2024). Assessment of the viability of pozzolanic activity of copper slag for use as supplementary cementitious material in ordinary Portland cement. *Journal of Building Engineering* **83**, 108375. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108375>
- MINVU (2018). Código de normas y especificaciones técnicas de obras de pavimentación. Estándares Técnicos de Construcción. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0997-4>
- Najimi, M. and Pourkhorshidi, A.R. (2011). Properties of concrete containing copper slag waste. *Magazine of Concrete Research* **63**(8), 605–615. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.605>
- Shi, C., Meyer, C. and Behnood, A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling* **52**(10), 1115–1120. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>



Silva, Y.F., Burbano-Garcia, C., Araya-Letelier, G. and Izquierdo, S. (2025a). Sulfate attack performance of concrete mixtures with use of copper slag as supplementary cementitious material. *Case Studies in Construction Materials* **22**, e04846. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04846>

Silva, Y.F., Burbano-Garcia, C., Rueda, E.J., Reyes-Román, A. and Araya-Letelier, G. (2025b). Short- and long-term mechanical and durability performance of concrete with copper slag and recycled coarse aggregate under magnesium sulfate attack. *Applied Sciences* **15**(15), 8329. <https://doi.org/10.3390/app15158329>

USGS (2020). Copper statistics and information. Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity copper. United States Geological Survey, USA.

Wang, D., Wang, Q. and Huang, Z. (2020). Reuse of copper slag as a supplementary cementitious material: Reactivity and safety. *Resources, Conservation and Recycling* **162**, 105037. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105037>

Wang, Y., Yuan, Z., Yang, J., He, Y., He, X., Su, Y. and Strnadel, B. (2023). Utilization of ultra-fine copper slag to prepare eco-friendly ultrahigh performance concrete by replacing silica fume. *Construction and Building Materials* **406**, 133476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133476>

Yaseen, N., Alcivar-Bastidas, S., Irfan-ul-Hassan, M., Petroche, D.M., Qazi, A.U. and Ramirez, A.D. (2024). Concrete incorporating supplementary cementitious materials: Temporal evolution of compressive strength and environmental life cycle assessment. *Heliyon* **10**(3), e25056. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25056>

Yepes, V. (2023). El hormigón para pavimentos de hormigón en carreteras. Poli Blogs. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Zeyad, A.M., Shubaili, M. and Abutaleb, A. (2023). Using volcanic pumice dust to produce high-strength self-curing concrete in hot weather regions. *Case Studies in Construction Materials* **18**, e01927. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01927>