



Influencia de la escoria de cobre como material cementicio suplementario en morteros

Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.40
Julio - diciembre de 2023
Reia4022 pp. 1-24

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

GABRIEL ANTONIO VIZCAÍNO MÉNDEZ¹

✉ YIMMY FERNANDO SILVA URREGO¹

1. Pontificia Universidad Católica de Chile - Chile.

Resumen

La demanda de cemento Portland (OPC) impacta de gran manera el medio ambiente, debido a la generación de gases de efecto invernadero y el consumo de materias primas no renovables durante su fabricación. Por tal razón, la búsqueda de materiales alternativos para disminuir el consumo de cemento es vital en la búsqueda de la sustentabilidad. Por esta razón, la escoria de cobre (EC) como materia cementicio suplementario (SCM) en la elaboración de morteros con menor contenido de OPC es una opción para generar un ambiente sostenible. Este estudio, investigo la influencia de la EC frente a la trabajabilidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión a diferentes edades de curado. Morteros con 0%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de EC como reemplazo parcial de OPC se elaboraron, donde se evidencio una mayor fluidez en los morteros con EC. Las propiedades mecánicas, se vieron afectas de manera monotonica en las primeras edades evaluadas (7, 28 y 90 días), donde los morteros con mayor contenido de EC presentaron la mayor perdida de resistencia. Sin embargo, a los 150 días de curado, la mezcla 10% EC presento una resistencia a la compresión de 43,6 MPa, 7,6% mayor que la mezcla de referencia.

Palabras Claves: mortero; escoria de cobre; Resistencia a la compresión; material cementicio suplementario.

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Vizcaíno Méndez, G. A.; Silva Urrego, Y. F.

Influencia de la escoria de cobre como material cementicio suplementario en morteros
Revista EIA, 20(40), Reia4022.
pp. 1-24.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1709>

✉ *Autor de correspondencia:*

Silva Urrego, Y. F. (Yimmy Fernando).
Ingeniero de Materiales
Correo electrónico:
yimmy.silva@uc.cl

Recibido: 3-06-2023
Aceptado: 15 -06-2023
Disponible online: 01-06-2023

Influence of copper slag as supplementary cementitious material in mortar

Abstract

The high consumption of Portland cement (OPC) has a significant impact on the environment due to the generation of greenhouse gases and the use of non-renewable raw materials during its manufacturing. Therefore, the search for alternative materials to reduce cement consumption is crucial in the pursuit of sustainability. For this reason, copper slag (CS) as a supplementary cementitious material (SCM) in the production of mortars with lower OPC content is an option to create a sustainable environment. This study investigated the influence of CS on workability, compressive strength, and flexural strength at different curing ages. Mortars were prepared with 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% CS as partial replacement for OPC, where mortars with CS demonstrated increased flowability. The mechanical properties were monotonically affected during the initial evaluated ages (7, 28, and 90 days), with mortars containing higher CS content showing the greatest loss of strength. However, at 150 days of curing, the 10% CS mixture exhibited a compressive strength of 43.6 MPa, which was 7.6% higher than the reference mixture

Keywords: mortar; copper slag; compressive strength; supplementary cementitious material.

1. Introducción

La industria de la construcción genera gran impacto ambiental debido a la extracción de materiales (50% de toda la materia prima extraídas) y alto consumo energético (entre el 30-70% de la energía generada) (Cruz Juarez & Finnegan, 2021; Ige et al., 2021). Gran parte de este impacto se genera en la producción de cemento, siendo responsable del 7% del consumo de energía mundial (WBCSD, 2018) y aproximadamente entre 7 y 8% de las emisiones antropogénicas (Liang et al., 2023; Sousa & Bogas, 2021; Zajac et al., 2021), debido a que por cada tonelada de cemento producida se generan 0,63 toneladas de CO₂ (Santos et al., 2022); significando la liberación de aproximadamente 2,2 Gt de CO₂ al año (Galusnyak et al., 2022). En este contexto, la disminución del consumo de Clinker o cemento mediante el reemplazo parcial por materiales cementicios suplementarios - SCM (*supplementary cementitious materials*) ha sido considerada una de las alternativas viables para reducir el impacto ambiental generado por el cemento (Ayati et al., 2022; Ndahirwa et al., 2022; Shahas et al., 2022).

Los SCM hace varios años han generado el interés de la industria de la construcción por las diversas ventajas ambientales, económicas

y de desempeño que ofrece su utilización en materiales de matriz cementicia (Z. Li et al., 2022). Los SCM presentan generalmente fases amorfas, compuestas por aluminosilcatos, sílice y aluminosilcatos cálcicos (Chang et al., 2022). El uso de ellos genera efectos en la hidratación, microestructura, resistencia y durabilidad en las mezclas cementicias, todo esto dependiendo del tipo de SCM (Ndahirwa et al., 2022). Respecto a la hidratación, el fraguado puede verse afectado por retraso debido al efecto dilución, o acelerado por el efecto filler (Chang et al., 2022). La microestructura, propiedades mecánicas y de durabilidad están influenciadas por la proporción de sitios de nucleación, o la mayor formación de silicato calcico hidratado (C-S-H) (Teymouri & Shakouri, 2023). Los SCM más importantes son la ceniza volante (FA), la escoria de alto horno (GGBS), humo de sílice (SF), metacaolin (MK) y piedra caliza molida (LP) (Fernando et al., 2019; Hafez et al., 2023; W. Li et al., 2022; Z. Li et al., 2022; Navarrete et al., 2022; P. Sharma et al., 2022), cuyo suministro podría ser un problema en el futuro cercano. Por esta razón, es necesario la búsqueda de materiales alternativos que puedan ser utilizados en la producción de compuestos de matriz cementicia.

La escoria de cobre (EC) es un residuo sólido generado en la producción de cobre metálico. Los mayores productores de este subproducto industrial en el 2015 fueron China, Japón, Chile, Rusia e India (Sheikh et al., 2022). Por cada tonelada de este metal se producen aproximadamente 2,2 -3 toneladas de escoria (Wang et al., 2020). La generación de este sub-producto industrial alcanza los 68,7 millones de toneladas en el mundo (R. Sharma & Khan, 2017), el cual suele eliminarse en vertederos a pesar de los altos costos y riesgos medioambientales (Mirnezami et al., 2023; Sheikh et al., 2022).

En la actualidad existen varios estudios sobre la valorización de este material de desecho de la extracción del cobre metálico como árido fino en la elaboración de hormigones. Sheikh et al. (2023) utilizó la EC como sustituto parcial del árido fino en un rango entre 0% y 60% en la elaboración de hormigones, afirmando que la resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión aumentó con el uso de EC en todos los porcentajes utilizados (Sheikh et al., 2022). Panda and Sarkar (2022) evaluaron la resistencia a la abrasión (desgaste) de concretos con EC en diferentes porcentajes de sustitución de la arena (40%, 60% y 80%), reportando que esta propiedad se ve influenciada de forma positiva con mayores cantidades de EC en el diseño del hormigón (Panda & Sarkar, 2022). Sridharan and Madhavi reportaron que el uso de CS como sustituto de la arena de río generaban un mayor asentamiento e incremento en todos los niveles de reemplazo (desde 10% a 90%) en mezclas de hormigón (Sridharan & Madhavi, 2020). Rohith and Ravikumar estudiaron el efecto del uso de CS como árido

fino y ceniza volante (FA) como reemplazo parcial del cemento, para ello, realizaron siete (7) mezclas variando el porcentaje de CS entre 10% y 60%, obteniendo la mayor resistencia a la compresión el hormigón con 30% de (FA) y 30% (EC) equivalente a 51.6 MPa, mientras que el hormigón de referencia alcanzo una resistencia de 49.5 MPa (Rohith & Ravikumar, 2022). Kumar and Tejaswini (2022) observaron que el uso de EC en un 40% de reemplazo del árido fino, a medida que se incrementaba el grado del hormigón no generaba ningún efecto negativo y por el contrario, la resistencia a la compresión aumentaba en todos los grados de hormigón (M20, M25, M30, M35 y M40) (Kumar & Tejaswini, 2022). El efecto positivo generado por la EC como árido fino puede atribuirse a una mayor densidad de empaquetamiento y a la angularidad de las partículas que mejora la unión entre los materiales del hormigón (Kumar & Tejaswini, 2022; Sridharan & Madhavi, 2020).

Si bien, el uso de EC como sustituto del árido fino en materiales de matriz cementicia es una alternativa viable en lo relacionado al desempeño físico y mecánico debido al efecto positivo que presenta, además de generar un material de construcción respetuoso con el medio ambiente, debido a que ayuda a un menor consumo de recursos naturales como lo es la arena. Otra alternativa del uso del CS en el sector de la construcción es como SCM, donde existen pocos estudios sobre su efecto cuando se reemplaza parcialmente por cemento Portland (Gopalakrishnan & Nithiyantham, 2020; Wang et al., 2020) . Este trabajo de investigación, le EC se utilizó como SCM en diferentes niveles de reemplazo en volumen del cemento en la elaboración de morteros. El uso de EC disminuirá el uso de terrenos para su deposición, además de reducir el consumo de cemento.

2. Programa experimental

2.1. Materiales

La EC utilizada en esta investigación fue una escoria primaria procedente de la extracción de metales a partir de minerales. La EC es un subproducto, obtenido mediante el refinamiento del cobre, proviene de una planta de cobre en Chile. Cemento Portland (OPC) tipo I de acuerdo a las especificaciones de la ASTM C150 (ASTM C150, 2022) fue utilizado como el aglomerante principal. La composición química de la EC y el OPC se muestran en la tabla 1, la cual fue determinada mediante el uso de fluorescencia de rayos X (FRX). La figura 1 muestra la morfología de las partículas de EC y OPC mediante microscopia electrónica de barrido (SEM), donde se evidencia diferentes tamaños

de partícula para los dos materiales finos, así como morfologías irregulares. Como árido fino se utilizó arena local con módulo de finura y absorción de 2,18 y 2,11% respectivamente. La tabla 2 muestra las características de la arena

Tabla 1. Composición química de CS y OPC

Materiales	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cu	SO ₃
OPC	25,1	59,1	5,1	3,4	0,8	0,1	0,9	-	2,7
EC	28,9	2,7	6,2	55,6	1,1	1,0	0,9	1,1	0,7

Figura 1. Morfología de la escoria de cobre (EC) y cemento Portland (OPC) a x1000 y x2000 magnificaciones

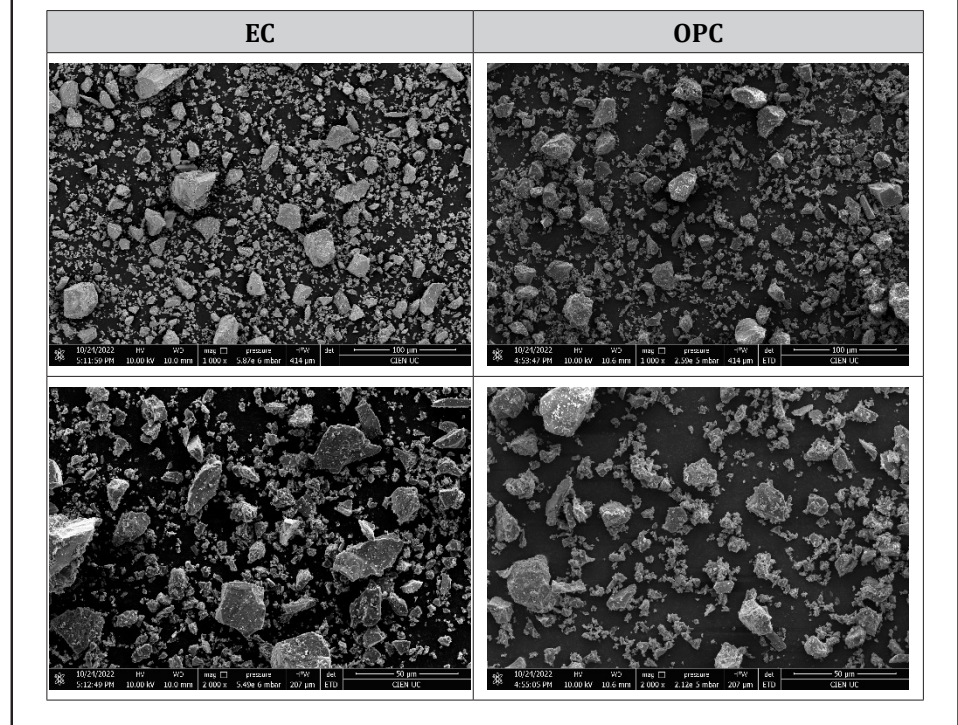


Tabla 2. Características del agregado fino (arena natural de río)

Agregado fino	Norma	Característica
Densidad aparente compacta (kg/m ³)	ASTM C29/NCh 1116	1.670
Densidad aparente suelta (kg/m ³)	ASTM C29/ NCh 1116	1.550
Densidad real seca (kg/m ³)	ASTM C128/NCh 1239	2.550
Densidad real S.S.S (kg/m ³)		2.600
Densidad neta (kg/m ³)		2.700
Absorción (%)		2,11
Material fino menor a 0,08 mm (%)	NCh 1223	5,6
Contenido de materia orgánica	ASTM C40	Aceptable (color N° 2 en la placa de Gardner)

2.2. Diseño de mezcla

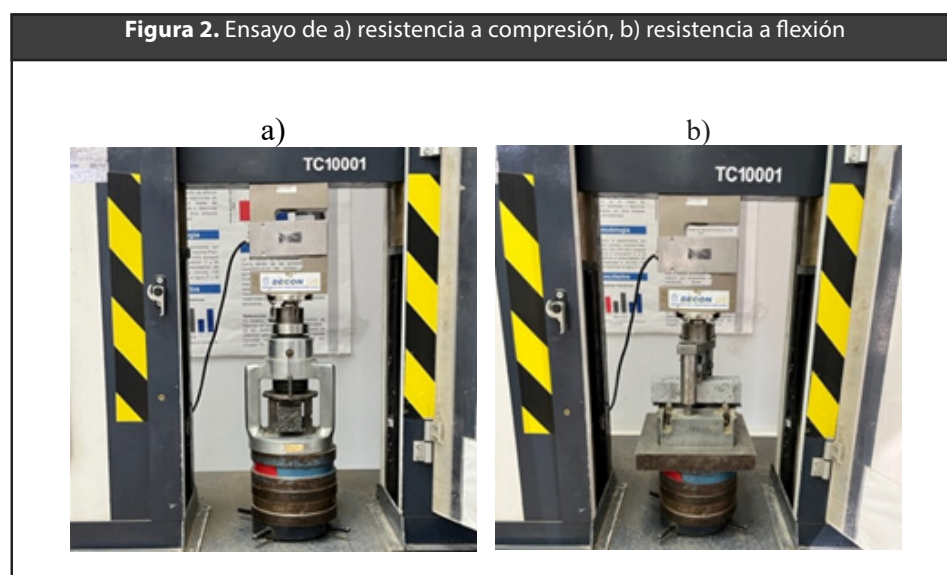
En este estudio, el OPC fue sustituido parcialmente por CS. El contenido de CS, vario entre 0 y 50% en volumen en niveles crecientes de 10%. Se utilizo inicialmente una relación agua/cemento (a/c) de 0,65, siendo una cantidad de 318,5 kg/m³ en todas las mezclas. La relación OPC: arena en peso se selecciono de acuerdo a la norma ASTM C109, la cual corresponde a 1:2,75. La tabla 3 muestra la dosificación y nomenclatura utilizada (ID) de cada una de las mezclas.

Tabla 3. Proporción de mezcla de morteros con EC

No de mezcla	ID	OPC (kg/m ³)	EC (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)
1	Ref.	490	0	318,5	1347,5
2	10% E	441	58	318,5	1347,5
3	20% E	393	116	318,5	1347,5
4	30% E	343	174	318,5	1347,5
5	40% E	294	232	318,5	1347,5
6	50% E	245	290	318,5	1347,5

2.3. Prueba de trabajabilidad, resistencia a la compresión y flexión

En este estudio antes de realizar los especímenes para evaluar las propiedades en estado endurecido, se determinó la trabajabilidad de los morteros siguiendo la especificación de la ASTM C230 (ASTM C230, 2021). Para las pruebas mecánicas se utilizaron moldes metálicos de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Los morteros fueron desmoldados después de 24 horas, y se curaron en agua hasta el día de la evaluación de la propiedad mecánica (resistencia a la compresión y flexión, Figura 2). Cada valor reportado de los morteros y edad evalúa pertenece al promedio de tres ensayos.

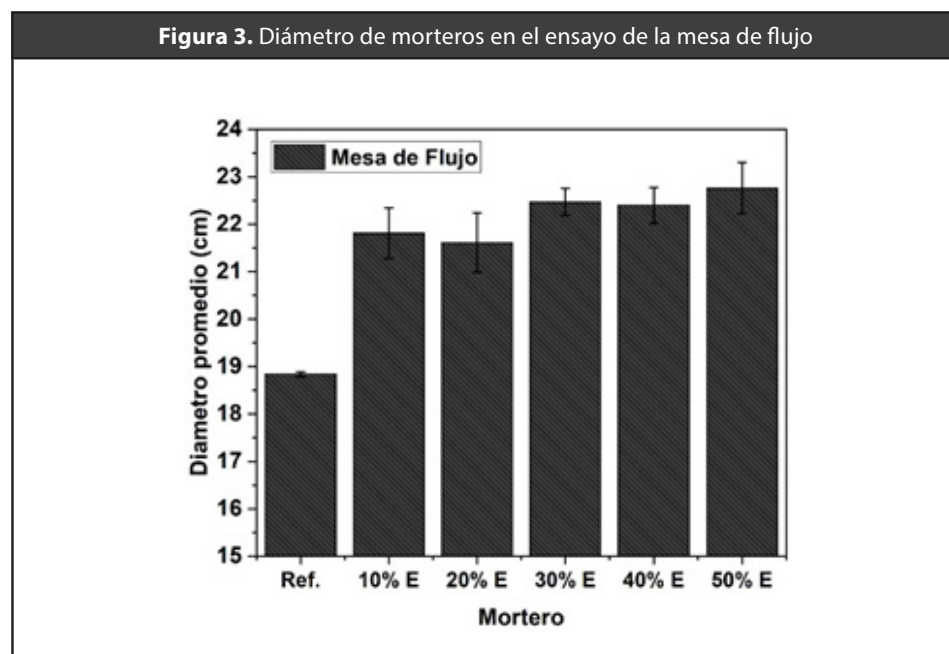


3. Resultados y discusiones

3.1. Consistencia de mortero

La figura 3 muestra el diámetro promedio del mortero de referencia y los morteros con EC. El mayor diámetro en las mezclas significa un incremento en trabajabilidad de los morteros, lo que se relaciona con una mayor facilidad en el mezclado, vaciado y acabado (Al Biajawi et al., 2022; Leong et al., 2022). Es evidente que el uso de la EC genera un aumento en el diámetro entre 14,7% y 21% en comparación con el mortero de referencia. Algunos estudios han mostrado que el uso de MCS con baja reactividad mejoran la fluidez debido al retraso de las reacciones de hidratación (Çelik et al., 2023), y en el caso particular de la EC que presenta baja absorción (Edwin et al., 2016) y reactividad,

el efecto dilución gobierna el comportamiento, lo que generaría una relación agua/cementante mayor a medida que se aumenta la sustitución de OPC por CE.



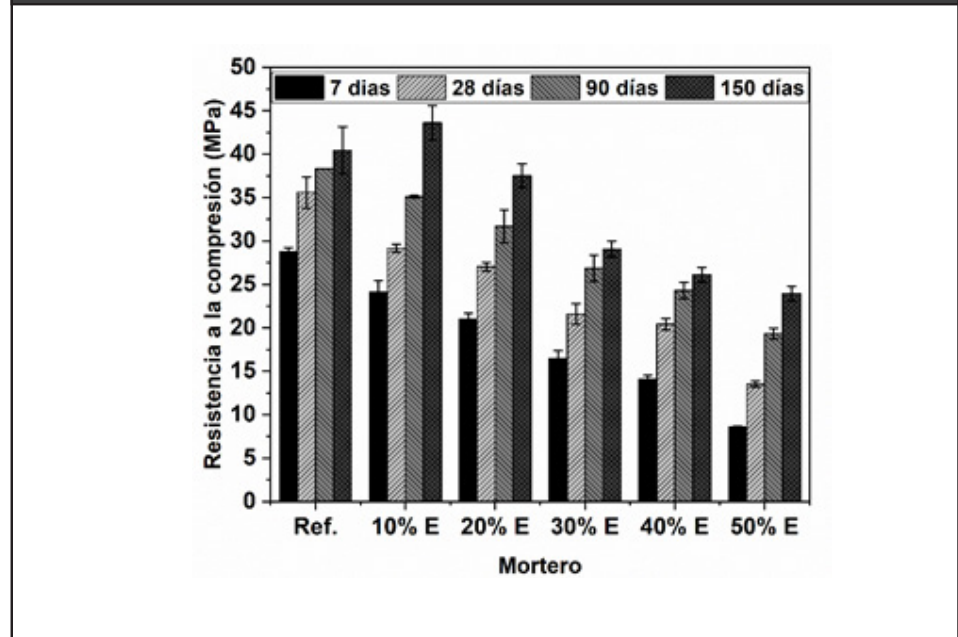
3.2. Resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a la compresión de los morteros se muestra en la Figura 4, donde se evidencia una pérdida monótonica de resistencia en las primeras edades evaluadas, cuando el contenido de EC aumenta en las mezclas, siendo mayor la pérdida de resistencia en el mortero con mayor contenido de EC. A los 7 y 28 días de curado la disminución de esta propiedad mecánica estaba entre 16,2% - 70% y 18% - 62% respectivamente, cuando se compara el mortero de referencia y los morteros con EC. Es claro que el incremento en la sustitución de OPC genera una pérdida en la resistencia a la compresión. Cuando el OPC se reemplaza por un SCM, la hidratación de este aglomerante puede verse afectada por el efecto dilución y/o puzolánico (Bahurudeen et al., 2016; Jones et al., 2023; Silva, Izquierdo, et al., 2019). Al reemplazar parcialmente el cemento por EC, se produce el efecto dilución debido a la disminución de los productos de hidratación formados. Este efecto es más evidente en el mortero 50% E, debido a que altas cantidades de SCM retrasa la actividad puzolánica, disminuye el calor de hidratación y aumenta la porosidad capilar (Ndahirwa et al., 2022).

A edades más prolongadas de curado la diferencia entre el mortero de referencia y los morteros con EC se hace menor, e incluso en el caso

específico del concreto 10% E supero la resistencia a la compresión en 7,6%. A los 90 curado la disminución de la resistencia a la compresión estaba entre 8,4% - 49,5% y para los 150 días entre 0% - 40,7%, evidenciando una mayor ganancia de resistencia en las mezclas con EC a edades prolongadas. La mejora en la resistencia a la compresión a los 150 días de curado, podría atribuirse al efecto puzolánico, el cual consiste en que el SiO_2 y Al_2O_3 activo en la EC reacción con la Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) generado en la hidratación del C3S y C2S, en un ambiente húmedo para formar más geles C-S-H (Jin et al., 2023; Pang et al., 2022; Silva, Lange, et al., 2019).

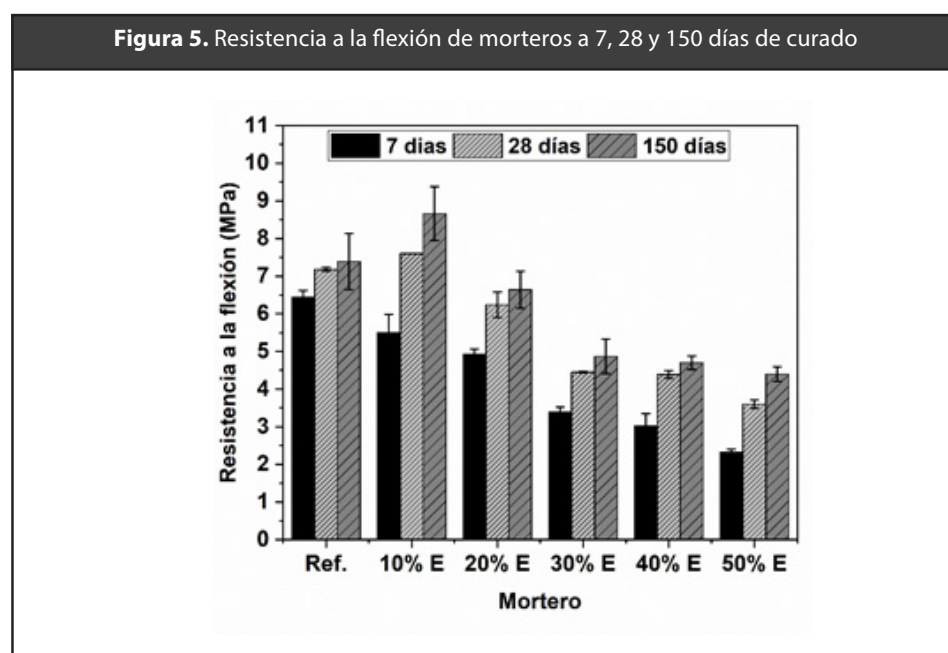
Figura 4. Resistencia a la compresión de morteros con escoria de cobre a 7, 28, 90 y 150 días de curado



3.3. Resistencia a la flexión

La figura 5 muestra los resultados el modulo de ruptura de los diferentes morteros, donde todas las muestras muestran un incremento de esta propiedad a mayores días de curado. La resistencia a la flexión a los 7 días de curado sigue el mismo patrón que el desarrollado en la resistencia a la compresión, donde la perdida de resistencia a la flexión se hace mayor a medida que aumenta el contenido de EC. Cuando se sustituyo el 50% de OPC por EC, la resistencia a la flexión disminuyo 63,9% y 49,8% a los 7 y 28 días de curado respectivamente. Este comportamiento podría atribuirse a los elementos que no tienen reactividad, reduciendo la reacción de hidratación. Por otra parte, la

resistencia a la flexión ligeramente superior presentada por la mezcla 10% E a los 28 días y 150 días, puede atribuirse a la capacidad de relleno de las partículas más finas de EC, y en cantidades superiores de este subproducto, el efecto dilución y la lenta reactividad puzolánica gobiernan la influencia en esta propiedad mecánica (Bheel et al., 2023). Este efecto, fue más evidente a los 150 días de curado, don la mezcla 10% EC, presentaba un modulo de ruptura 17,2% mayor al compararse con la mezcla de referencia.



4. Conclusiones

El uso de escoria de cobre (EC) como material cementicio suplementario en morteros para generar un material de construcción ecológico se desarrollo en esta investigación. La influencia de EC en las propiedades en estado fresco, y las propiedades en estado endurecido como la resistencia a la compresión y a la flexión se investigaron mediante la sustitución parcial de diferentes porcentajes de EC por cemento. A continuación, se presentan las conclusiones más importantes del estudio:

La trabajabilidad determinada mediante la mesa de flujo fue mayor en todos los morteros con EC en comparación con el mortero de referencia. El mayor diámetro de flujo fue de 22,7 cm presentado por el mortero con 50% EC, y el más bajo fue de 18,8 cm.

La resistencia a la compresión disminuyó en los morteros con escoria a los 7, 28 y 90 días de curado, haciéndose mayor a medida que el porcentaje de EC aumentaba. Sin embargo, esta diferencia se hizo menor a medida que el tiempo de curado aumentaba. A los 150 días de curado la resistencia a la compresión de la mezcla con 10% EC, fue mayor a la de la mezcla de referencia (0% EC), lo que podría significar que la EC presenta una baja reactividad y su desempeño como material cementicio suplementario activo se da a edades de curado prolongadas.

La Resistencia a la flexión se vio afectada por la presencia de EC en la mezcla de mortero. Sin embargo, fue menor la pérdida de esta propiedad mecánica en comparación al efecto generado en la resistencia a la compresión. La resistencia más baja, lo presentó el mortero 50% E en todas las edades de curado cuando se compara con el mortero Ref, en 63,9%, 49,8% y 40,4% a los 7, 28 y 150 días respectivamente.

5. Agradecimiento

Los autores agradecen al proyecto Fondecyt de Iniciación No 11221114, Decon UC de la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y al programa de investigación en pregrado (IPRE) de la UC.

6. Referencias

- Al Biajawi, M. I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., & Obianyo, I. I. (2022). Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious Composites: A review. *Construction and Building Materials*, 338(May). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127624>
- ASTM C150. (2022). *Standard Specification for Portland Cement*. ASTM International, West Conshohocken, PA. 1–9. <https://doi.org/10.1520/C0150>
- ASTM C230. (2021). *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. 1–7. <https://doi.org/10.1520/C0230>
- Ayati, B., Newport, D., Wong, H., & Cheeseman, C. (2022). Low-carbon cements: Potential for low-grade calcined clays to form supplementary cementitious materials. *Cleaner Materials*, 5, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100099>
- Bahurudeen, A., Wani, K., Basit, M. A., & Santhanam, M. (2016). Assesment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001361](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001361)
- Bheel, N., Ali, M. O. A., Shafiq, N., Almujiabah, H. R., Awoyera, P., Benjeddou, O., Shittu, A., & Olalusi, O. B. (2023). Utilization of millet husk ash as a supplementary cementitious material in eco-friendly concrete: RSM modelling and optimization. *Structures*, 49(February), 826–841. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.015>
- Çelik, D. N., Demircan, R. K., Shi, J., Kaplan, G., & Durmuş, G. (2023). The engineering properties of high strength mortars incorporating juniper seed ash calcined at different temperatures: Comparison with other SCMs. *Powder Technology*, 422(March). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118474>
- Chang, Z., Long, G., Xie, Y., & Zhou, J. L. (2022). Chemical effect of sewage sludge ash on early-age hydration of cement used as supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 322(January). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126116>
- Cruz Juarez, R. I., & Finnegan, S. (2021). The environmental impact of cement production in Europe: A holistic review of existing EPDs. *Cleaner Environmental Systems*, 3(August). <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100053>
- Edwin, R. S., De Schepper, M., Gruyaert, E., & De Belie, N. (2016). Effect of secondary copper slag as cementitious material in ultra-high performance mortar. *Construction and Building Materials*, 119, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.007>
- Fernando, Y., Urrego, S., Rojas, J. E., & Gamboa, J. A. (2019). diseño de mezcla de vértices extremos , en concretos y cal hidratada Artículo en prensa / Article in press Optimization of Compressive Strength Using Design of Extreme Vertices Mixing , in Ternary Concretes Based desenho de mescla de vértices extremos , e. *Revista EIA*, 57(2), 99–113.
- Galusnyak, S. C., Petrescu, L., & Cormos, C. C. (2022). Environmental impact assessment of post-combustion CO2 capture technologies applied to cement production plants. *Journal of Environmental Management*, 320(July). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115908>
- Gopalakrishnan, R., & Nithiyantham, S. (2020). Microstructural, mechanical, and electrical properties of copper slag admixed cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 31(March). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101375>
- Hafez, H., Teirelbar, A., Tošić, N., Ikumi, T., & de la Fuente, A. (2023). Data-driven optimization tool for the functional, economic, and environmental properties of blended cement concrete using supplementary cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 67(January). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106022>
- Ige, O. E., Olanrewaju, O. A., Duffy, K. J., & Obiora, C. (2021). A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production. *Journal of Cleaner Production*, 324(September). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129213>

- Jin, L., Chen, M., Wang, Y., Peng, Y., Yao, Q., Ding, J., Ma, B., & Lu, S. (2023). Utilization of mechanochemically pretreated municipal solid waste incineration fly ash for supplementary cementitious material. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109112>
- Jones, C., Ramanathan, S., Suraneni, P., & Hale, M. (2023). Mitigating calcium oxychloride formation in cementitious paste using alternative supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 377(May 2022).
- Kumar, A., & Tejaswini, M. L. (2022). Studies on hardened properties of concrete incorporated with copper slag. *Materials Today: Proceedings*, 60, 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.264>
- Leong, G. W., Pahdili, E. H. H., Mo, K. H., & Ibrahim, Z. (2022). Impacts of polyvinyl alcohol and basalt fibres on green fly ash cenosphere lightweight cementitious composite. *Materials Today: Proceedings*, 61, 512–516. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.519>
- Liang, X., Dang, W., Yang, G., & Zhang, Y. (2023). Environmental feasibility evaluation of cement co-production using classified domestic waste as alternative raw material and fuel: A life cycle perspective. *Journal of Environmental Management*, 326(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116726>
- Li, W., Hua, L., Shi, Y., Wang, P., Liu, Z., Cui, D., & Sun, X. (2022). Influence of metakaolin on the hydration and microstructure evolution of cement paste during the early stage. *Applied Clay Science*, 229(July). <https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106674>
- Li, Z., Gao, X., Lu, D., & Dong, J. (2022). Early hydration properties and reaction kinetics of multi-composite cement pastes with supplementary cementitious materials (SCMs). *Thermochimica Acta*, 709(September 2021). <https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179157>
- Mirnezami, S. M., Hassani, A., & Bayat, A. (2023). Evaluation of the effect of metallurgical aggregates (steel and copper slag) on the thermal conductivity and mechanical properties of concrete in jointed plain concrete pavements (JPCP). *Construction and Building Materials*, 367(January). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129532>
- Navarrete, I., Kurama, Y., Escalona, N., Brevis, W., & Lopez, M. (2022). Effect of supplementary cementitious materials on viscosity of cement-based pastes. *Cement and Concrete Research*, 151(February 2021). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106635>
- Ndahirwa, D., Zmamou, H., Lenormand, H., & Leblanc, N. (2022). The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review. *Cleaner Materials*, 5(July). <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100123>
- Panda, S., & Sarkar, P. (2022). Abrasion resistance of copper slag aggregate concrete designed by Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 65, 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.545>
- Pang, L., Liu, Z., Wang, D., & An, M. (2022). Review on the Application of Supplementary Cementitious Materials in Self-Compacting Concrete. *Crystals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/cryst12020180>
- Rohith, N., & Ravikumar, M. S. (2022). Strength characteristics of concrete made with copper slag and fly-ash. *Materials Today: Proceedings*, 60, 738–745. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.337>
- Santos, T. A., Cilla, M. S., & Ribeiro, e D. V. (2022). Use of asbestos cement tile waste (ACW) as mineralizer in the production of Portland cement with low CO2 emission and lower energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 335(May 2021), 130061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130061>
- Shahas, S., Girija, K., & Nazeer, M. (2022). Evaluation of pozzolanic activity of ternary blended supplementary cementitious material with rice husk ash and GGBS. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.073>
- Sharma, P., Sharma, N., & Kumar Parashar, A. (2022). Scientific investigation of metakaolin-based cement concrete with rock sand infill. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4147–4150. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.674>

- Sharma, R., & Khan, R. A. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 151, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.031>
- Sheikh, E., Mousavi, S. R., & Afshoon, I. (2022). Producing green Roller Compacted Concrete (RCC) using fine copper slag aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 368(December 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133005>
- Silva, Y. F., Izquierdo, S. R., & Delvasto, S. (2019). Effect of masonry residue on the hydration of portland cement paste. *DYNA (Colombia)*, 86(209), 367–377. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.77286>
- Silva, Y. F., Lange, D. A., & Delvasto, S. (2019). Effect of incorporation of masonry residue on the properties of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.132>
- Sousa, V., & Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
- Sridharan, M., & Madhavi, T. C. (2020). Investigating the influence of copper slag on the mechanical behaviour of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3225–3232. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.195>
- Teymouri, M., & Shakouri, M. (2023). *Optimum pretreatment of corn stover ash as an alternative supplementary cementitious material*. 12(March).
- Wang, D., Wang, Q., & Huang, Z. (2020). Reuse of copper slag as a supplementary cementitious material: Reactivity and safety. *Resources, Conservation and Recycling*, 162(April). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105037>
- WBCSD. (2018). *Cement technology roadmap shows how the path to achieve CO2 reductions up to 24% by 2050*. <https://www.wbcds.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>
- Zajac, M., Bolte, G., Skocek, J., & Ben Haha, M. (2021). Modelling the effect of the cement components fineness on performance and environmental impact of composite cements. *Construction and Building Materials*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122108>