

Estudio Preliminar Sobre La Durabilidad de Las Mezclas de Mortero de Cemento con Sustituto Árido Fino Reciclado de Escoria de Cobre Residual (ECr).

Preliminary Study on the Durability of Cement Mortar Mixes with Recycled Fine Aggregate Substitute from Residual Copper Slag (ECr).

Berta Vivar ^{1,*}, Yasna Segura ¹, Katherine Millapel ², Claudio Villarreal ¹.

¹Universidad de Magallanes, Facultad de Ingeniería, Punta Arenas, Chile.

²Davison Company Group, Departamento Técnico, Punta Arenas, Chile.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del
artículo:

Recibido
07-05-2024
Aceptado
07-04-2025
Publicado
30-04-2025

Palabras Clave:

Agregados pétreos
Resistencia a la
compresión
Durabilidad
Escoria de cobre
residual

Article history:

Received
07-05-2024
Accepted
07-04-2025
Available
30-04-2025

Keywords:
Aggregates
Compressive
strength
Durability
Residual copper
slag

Resumen

En la Región de Magallanes y Antártica Chilena, las empresas dedicadas al montaje de estructuras metálicas, utilizan un subproducto de la industria del cobre (escoria de cobre residual - ECr), como material abrasivo en la limpieza en la superficie. La empresa ASMAR - Magallanes, produce anualmente 380 Tn aproximadamente de residuo de granalla. En la actualidad estos residuos se acopian en el lugar de producción. En la presente investigación se analiza la posibilidad de la reutilización de la ECr como sustituto del árido fino en las mezclas de mortero de cemento, elaborando distintas mezclas verificando los resultados de las resistencias mecánicas a compresión sustituyendo la ECr (10-20-30-40-50 %). Una vez evaluados los resultados se escogieron tres mezclas de morteros - Patrón / 50-50 / 80-20 - con esto se evaluó el comportamiento ante la durabilidad, siendo sometidos a los ciclo de congelación/deshielo y ataque por sulfatos, ensayadas mediante normativas vigentes. Además, se obtuvo la resistencia mecánica a compresión por medio del ensayo no destructivo (END). Como análisis final ante la exposición de estos ataques ambos ensayos entregaron resultados positivos, al compararlos con las probetas control, las probetas no sufrieron descascaramiento o un gran cambio de longitud. Los resultados correspondientes a resistencia a compresión se mantienen o aumentan, en la mezcla 80-20.

Abstract

In the Magallanes and Chilean Antarctic Region, companies dedicated to the assembly of metal structures use a byproduct of the copper industry (copper slag - ECr) as an abrasive material for surface cleaning. The company ASMAR - Magallanes produces approximately 380 tons of granulate waste annually. Currently, this waste is stored at the production site. This research analyzes the possibility of reusing ECr as a substitute for fine aggregate in cement mortar mixes, creating different mixtures to verify the results of the compressive strength by replacing ECr (10-20-30-40-50%). Once the results were evaluated, three mortar mixtures were selected - Pattern / 50-50 / 80-20 - to assess their behavior in terms of durability, subjecting them to freeze-thaw cycles and sulfate attack, tested according to current standards. Additionally, the compressive strength was obtained through non-destructive testing (NDT). As a final analysis, in response to these exposures, both tests yielded positive results; when compared to the control specimens, the test specimens did not suffer spalling or significant changes in length. The results related to compressive strength remain stable or increase in the 80-20 mixture.

* Corresponding author at: Berta Vivar, Universidad de Magallanes, Facultad de Ingeniería, Av. Bulnes 01855, Punta Arenas, Chile. E-mail address: berta.vivar@umag.cl

RIOCI

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 13, no. 02, pp. 36-43, Abril 2025

1. Introducción.

Muchos países están experimentando un rápido crecimiento en la industria de la construcción, que implica el uso de recursos naturales para el desarrollo de la infraestructura (Al-Jabri et al., 2009). El principal material que se utiliza es el hormigón, el cual es poco respetuoso con el medio ambiente (Tu et al., 2006), debido a sus componentes individualmente también contaminan, según Hoenig et al (Hoenig et al., 2007) para producir 1 Tn de cemento se generan entre 0,8-1 Tn de CO₂ a la atmósfera (Ahmari et al., 2012)(Segura-Sierpe et al., 2016). Los áridos ocupan entre 55%-80% del volumen del hormigón, a nivel mundial según los miembros de GAIN, representan el 70% de la producción mundial de áridos, que asciende a unos 50.000 millones de Tm, que equivale a más de 6 Tm/persona/año («GAIN», s. f.).

En Chile, se estima que el consumo de árido anual es superior a los 11 millones de m³ y su extracción tiene fuertes impactos medio ambientales como son la erosión y la pérdida de suelos naturales (CDT, s. f.).

La industria de la construcción en la región de Magallanes y Antártica Chilena ha ido en constante crecimiento, con un 27% mayor en comparación al 2020, según el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) con nuevos proyectos de viviendas y mejoramiento de infraestructuras (calzadas, aceras, parques, etc.), en construcción y por construir. Además, según estadísticas del MINVU el 35% de los residuos sólidos proviene de la construcción y la demolición. Se proyectó que para el año 2025 el nivel de residuos alcance la cifra de 7,4 millones de toneladas al año (Construye2025, 2021), que van desde desecho inertes - pétreos (hormigón endurecido), no peligrosos (metal, madera, plástico) y peligrosos (anticongelantes, aceites, agentes espumantes, etc.).

La empresa ASMAR en la ciudad de Punta Arenas (Astillero Magallanes, 2021) utiliza escoria de cobre para limpiar estructuras de acero por medio del método de granallado y produce anualmente 380 Tn aproximadamente de residuo. Este material actualmente no tiene ningún tipo de uso y genera externalidades negativas, tales como barrera de material para el crecimiento de la vegetación natural del sector, afectando la convivencia con los vecinos del sector. A partir de esto, y desde la perspectiva del desarrollo sostenible, la reutilización de los subproductos industriales es la medida más económica y segura (Vijayaraghavan et al., 2017).

La escoria de cobre (CS) puede utilizarse como agregado en los pavimentos de mezcla de asfalto en caliente (Abdelfattah et al., 2018), áridos para hormigones, conglomerantes, herramientas de corte, azulejos y vidrio, entre otras (Gorai et al., 2003). En

comparación con otras industrias, la construcción puede consumir más materiales de desecho, lo que constituye sin duda el mercado más prometedor para el reciclaje de materiales de desecho. La resistencia a la compresión del hormigón puede verse aumentada mediante el uso de determinados residuos industriales en lugar de los áridos naturales como materia prima del hormigón (Wang et al., 2021).

A partir de lo anterior, el aumento del uso de residuos o escorias de cobre residual como áridos en el hormigón requiere un mayor conocimiento de cómo influyen los diferentes factores ambientales en su proceso de curado, su durabilidad y su vida útil (Aparicio et al., 2020).

Akihiko y Takashi, entre otros autores investigaron el uso de la escoria de la fundición de cobre como agregado fino en el hormigón examinaron los efectos del uso de varios tipos de escoria sobre las reacciones del mortero y del hormigón, la corrosión del acero de refuerzo, la abrasión, la trabajabilidad y el asentamiento, la contracción y las características de congelación y descongelación, obteniendo buenas resistencia a compresión, pero presentan problemas por la superficie vidriada del grano, trayendo consigo aumento en el tiempo de fraguado (Al-Jabri et al., 2011)(Al-Jabri et al., 2011a). Para el caso en estudio debido a la ubicación geográfica de la ciudad de Punta Arenas es que se realizan los ensayo de ataque externo de sulfato, este fenómeno produce etringita, ocurre de una manera heterogénea; estas reacciones expansivas pueden producir también fisuración, desprendimiento del hormigón («Canales Sectoriales», 2018) y pérdida de resistencia, puesto que ocurren cuando el hormigón está endurecido y es un cuerpo rígido y los ciclos de congelación/deshielo, este fenómeno aparece cuando existen cambios de temperaturas bajo y sobre 0 °C es una de las causas principales en la degradación del hormigón y los cambios de tensión interna en donde ocasiona la pérdida de la capacidad resistente del hormigón (Legal, Rodrigo, 2005). En resumen, el presente trabajo pretende evaluar los efectos de la sustitución parcial del árido fino por escoria de cobre residual y determinar las características físicas del árido, resistencia a compresión del mortero y la durabilidad del mortero ante el ataque externo de sulfato y los ciclos de congelación/deshielo.

2. Metodología.

Se prepararon mezclas de morteros de cemento con diferentes proporciones de ECr utilizadas como sustituto parcial de lo árido fino para investigar el efecto de la sustitución en la resistencia y la durabilidad del material. Se prepararon seis mezclas de morteros con diferentes proporciones de ECr. Las proporciones fueron las siguientes 0% (para la mezcla de control), 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. A continuación, se seleccionaron las mezclas

Control y las sustituciones 20% y 50% con el fin de realizar los ensayos de ataque externos ante los ciclos de congelación/deshielo y ataque de sulfatos. En la Tabla 1 se muestra las proporciones de los distintos materiales.

Tabla 1. Proporción de las mezclas de morteros ($a/c = 0,45$).

Nº	Tipo de mezcla	Cemento (g)	Arena (g)	ECr (g)
M0	Control 100% A		1.350	---
M1	90% A -10% ECr		1.215	135
M2	80% A -20% ECr		1.080	270
M3	70% A -30% ECr	450	945	405
M4	60% A - 40% ECr		810	540
M5	50% A - 50% ECr		675	675

2.1. Características de los materiales.

2.1.1. Cemento.

El cemento utilizado es un cemento Portland Puzolánico de alta resistencia, de la Petroquímica Comodoro Rivadavia S.A, el cual cumple con las normas NCh147 (INN, 1969)(INN, 1969; Instituto Nacional de Normalización (INN), 1969) y NCh148 (INN, 1968)(INN, 1968; Instituto Nacional de Normalización (INN), 1968), donde la pérdida al fuego es 1,6%, peso específico 3,11 g/ml y residuo insoluble 3,2%.

2.1.2. Escoria de cobre residual (ECr).

La escoria de cobre residual (ECr) es un material que se obtiene del segundo o tercer uso del mantenimiento, construcción y reparación de los buques, que tiene base en la ciudad de Punta Arenas (ver la Figura 1). Para llegar a este residuo, la primera actividad que se realiza es la limpieza de la estructura con la escoria de cobre certificada. Una vez que el casco queda desnudo, toda la granalla que se utilizó se recolecta y acopia, al tener restos de pintura se quema en un cilindro con una llama directa de 40 cm de longitud. La ECr sale a una temperatura entre 40 ó 50 °C, se pasa por un tamiz donde se separa los restos de pintura y polvo que quedan, se almacena y se reutiliza nuevamente como granalla. Al termino de este nuevo proceso se obtiene el desecho que se utilizará como árido fino y denominaremos escoria de cobre residual de segundo uso (ECr). Para caracterizar a este nuevo material se realizaron distintos ensayos de caracterización físico y químico del árido. El rango granulométrico del material estaba entre 2,5 a 0,160 mm.



Figura 1. Escoria residual de cobre (ECr) 2º uso.

2.1.3. Agregado fino — Arena y ECr.

En la Tabla 2 se muestra los resultados la curva granulométrica de la arena rodada de la cantera Concremag y la ECr, ambos materiales se tamizaron a través de la serie preferida entre 1,25 a 0,16 mm, según la norma NCh165 (Instituto Nacional de Normalización (INN), 2009). Ambos materiales se clasifican como árido fino medio, correspondiente a la Zona 3, según la NCh163 (INN 2013).

Tabla 2. Granulometría de la arena y ECr (INN, 2009a).

Tamiz Nominal (mm)	Arena	ErC	Árido Fino, Zona 3	
	% que pasa			
10	100	100	100	100
5	100	100	95	100
2,5	100	100	80	100
1,25	61	99	50	85
0,63	30	46	25	60
0,315	11	9	10	30
0,16	4	4	2	10

2.1.4. Requisitos de los agregados finos.

En la Tabla 3 se muestran las características físicas del árido natural (arena) y del árido procesado (ECr).

Tabla 3. Parámetros físicos de los agregados finos.

Propiedades físicas	Arena	ECr	Norma
Módulo de Finura	2,34	2,42	NCh165(INN, 2009a)
Material fino menor 0,080 mm (%)	2,64	1,07	NCh1223(INN, 1977)
Densidad real saturado superficialmente seco (rRss) (kg/m ³)	2.590	2.967	NCh1239(INN, 2009)
Densidad real árido seco (rRs) (kg/m ³)	2.550	2.961	NCh1239(INN, 2009)
Densidad neta (rN) (kg/m ³)	2.656	2.979	NCh1239(INN, 2009)
Absorción de agua (a) (%)	1,57	0,21	NCh1239(INN, 2009)
Densidad aparente suelta (ras) (kg/m ³)	1.600	1.600	NCh1116(INN, 2008)
Densidad aparente compactada (rac) (kg/m ³)	1.725	1.780	NCh1116(INN, 2008)
Desintegración de los áridos mediante el método sulfato de sodio (Na ₂ SO ₄)	10,4	39,8	ASTM C88-13(ASTM, 2013)

Con respecto al módulo de finura de ECr es un 3,3% mayor que la arena, ambos materiales cumplen con los requisitos de agregado fino, clasificando ésta como arena media de la zona 3 y el MF está entre los rangos de 2,15 a 3,45, según NCh163(INN 2013). De acuerdo a los ensayos realizados bajo las normas NCh1239 (INN, 2009) y NCh1116 (INN, 2008), la densidad relativa de la ECr es mayor a la arena en un 13,8% y la absorción de la ECr difiere en un 86,6 % respecto a la arena, esto se puede explicar debido a que los granos presentan superficies lisas y de muy baja porosidad (dos Anjos et al., 2017), además, debido a la baja absorción se espera que el contenido de agua libre en la mezcla, se puede aumentar el contenido de ECr (Al-Jabri et al., 2011b). Estas características de la ECr le dan solidez, buena resistencia a la abrasión, estabilidad y un alto ángulo de fricción debido a su forma angular (Gorai et al., 2003). También se determinó la degradación de los áridos, los cuales fueron expuesto en sulfato de sodio para simular la expansión del agua al congelarse, según la NCh 1328 (INN, 1977) y ASTM C88 (ASTM, 2013). Para este estudio el árido fino cumple con lo especificado en la normativa, ya que su porcentaje de pérdida de peso es menor a 12%, para la ECr el resultado tiene una diferencia de 3,3 veces el resultado esperado; por lo tanto, el material debe usar en combinación con el árido fino en proporciones bajas. ASTM C33 (ASTM, 2001).

2.1.5. Mezclas de morteros.

Los morteros se confeccionaron según la norma NCh158 (INN, 2019), se utilizaron moldes de 40 x 40 x 160 mm³ y 40 x 40 x 40 mm³. Las muestras se curaron en cámara húmeda con una

temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa de 90% durante 24 h. Después del desmoldeo las probetas se sumergieron en agua detenida y saturada en cal a temperatura de 23 ± 2 °C, hasta el momento del ensayo a edades de 7, 28 y 90d.

3. Análisis de resultados.

3.1. Resistencia a compresión.

En la Tabla 4 se observa que la resistencia mecánica a compresión de las distintas mezclas y curada a los 7, 28 y 90 d. Se observa que la muestra M1 a los 7 d con la sustitución ECr al 10% es mayor en un 13,3% y al sustituir un 50% la resistencia disminuye en un 34% respecto al mortero patrón (M0). Las mezclas curadas a 28 d tienen un comportamiento similar a los 7 d. En el caso de la resistencia a compresión a 90 d se puede observar que la mezcla de menor sustitución M1 presentó una disminución de un 11% y para la mezcla M5 la resistencia a compresión sólo disminuyó en un 2,9%.

Tabla 4. Resistencia mecánica a compresión para morteros curados a 7,28 y 90 d.

Tipo de mezcla	Rc (MPa)					
	7d		28d		90d	
M0	36,5	± 1,8	48,5	± 5,8	54,6	± 2,7
M1	42,1	± 1,7	58,7	± 1,8	48,6	± 2,4
M2	38,2	± 1,4	51,6	± 2,8	45,6	± 1,6
M3	30,7	± 2,1	43,2	± 5,9	47,1	± 2,3
M4	20,0	± 0,8	36,9	± 1,5	47,1	± 2,6
M5	27,8	± 1,1	38,1	± 0,3	53,1	± 1,6

En resumen, como se observa en la Figura 2, la resistencia mecánica a compresión en todas las mezclas mejora con el tiempo, a partir de estos resultados se eligieron 3 mezclas para analizar su comportamiento ante los ciclos de congelación/deshielo y ataque de sulfatos externos, mezclas M0, M2 y M5.

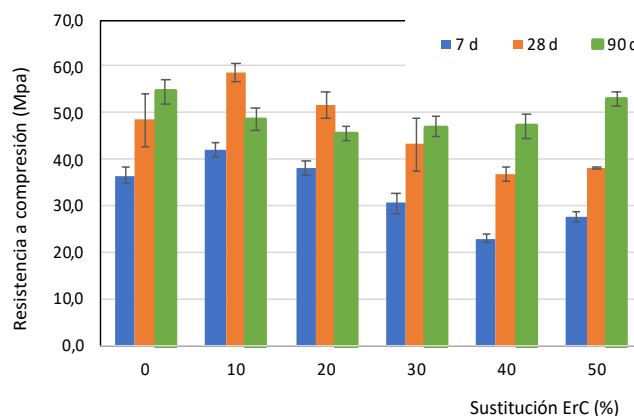


Figura 2. Resistencia mecánica a compresión mezclas de Arena/ECr con a/c = 0,45.

3.2. Ataque externo de sulfatos (AES).

En los morteros expuestos a disolución de sulfato sódico al 5% (ASTM C1012), en el caso del mortero control M0 (Control) comienza a evidenciar mayores daños por expansión a partir de 28d, llegando a 0,29% como se observa en la Figura 3, lo que se atribuye a la a la formación de yeso y etringita. En cambio, los morteros M2 y M5 han tenido un comportamiento constante sin mostrar evidencias de expansión hasta 112d de inmersión.

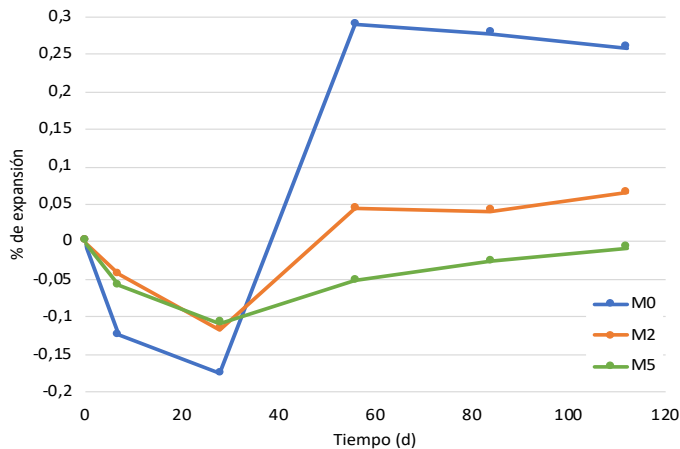


Figura 3. Expansión sufrida por las probetas durante la inmersión en sulfato sódico al 5%.

3.3. Degradación por ciclo de congelación/deshielo (CCD).

En la Figura 4 se puede observar las variaciones de peso los distintos morteros. En el caso de los morteros M2 y M5 tiene una pérdida de masa constante durante todo el desarrollo de la experiencia llegando a tener diferencia de hasta un 0,21 y 0,23%, respectivamente. Al compararlo con M0, este tiene una pérdida de peso de 1,21% de ganancia de peso. Las mezclas con sustitución con ECr mejora significativamente la resistencia a la congelación/deshielo, lo cual se puede atribuir a la reducción del tamaño y distancia de los huecos de aire (Peirovi et al., 2019).

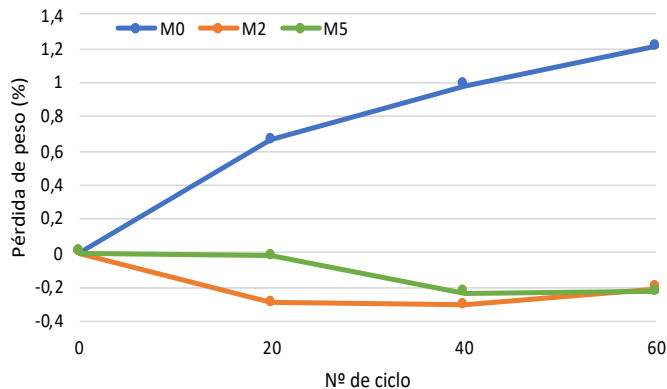


Figura 4. Pérdida de peso en porcentaje (%) tras los CCD.

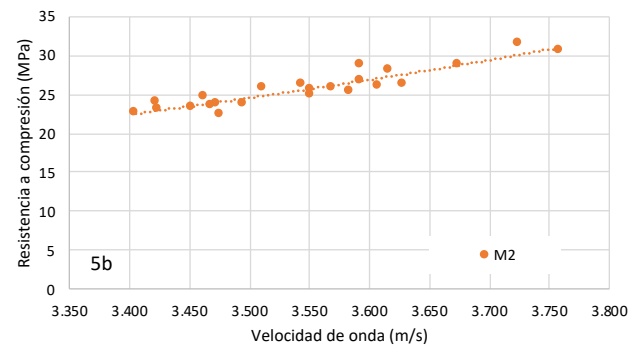
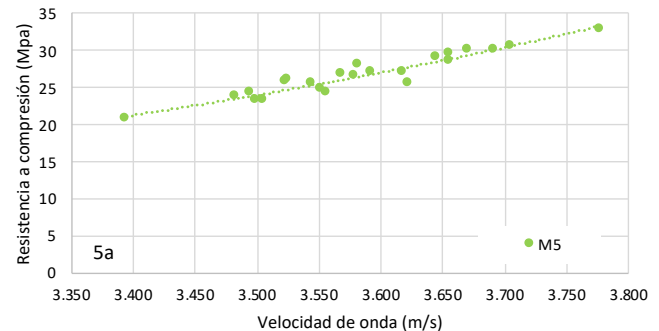
3.4. Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

Este ensayo se utilizó para determinar la homogeneidad de las muestras de ensayo. El ensayo se realizó en cada muestra durante los distintos ciclos, tanto para AES y CCD. El equipo de ensayo utilizado fue el "Pundit Lab+ Ultrasonic Pulse Velocity Tester (Proceq)" siguiendo la metodología de la norma BS 1881: Parte 203: 1986.

En las Figuras 5a, 5b y 5c se observa la resistencia a la compresión y VPU de las mezclas M0, M2 y M5. Se consideraron el total de los resultados promedio expuestos a los ciclos de congelación/deshielo, de acuerdo al grado de calidad del hormigón en términos de uniformidad, está relacionado con la velocidad, según la Tabla 5, los morteros analizados presentan una calidad dudosa.

Tabla 5. Criterio de velocidad para la clasificación del hormigón

Clase	Valor promedio de la velocidad de pulso (km/s)	Calificación de la calidad del hormigón
I	Sobre 4.4	Excelente
II	3.75 a 4.4	Bueno
III	3.00 a 3.75	Dudosa
IV	Bajo 3.00	Pobre



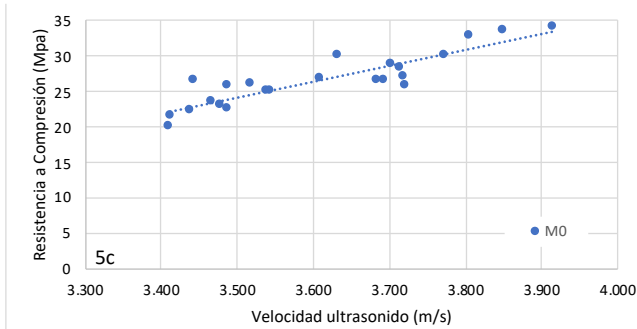


Figura 5. Resistencia a compresión v/s VPU mezclas expuestas a los CCD: a) M0, b) M2 y c) M5.

En las Figura 6a, 6b y 6c se observa la resistencia a compresión y VPU de las mezclas de mortero expuestas al ataque de sulfatos.

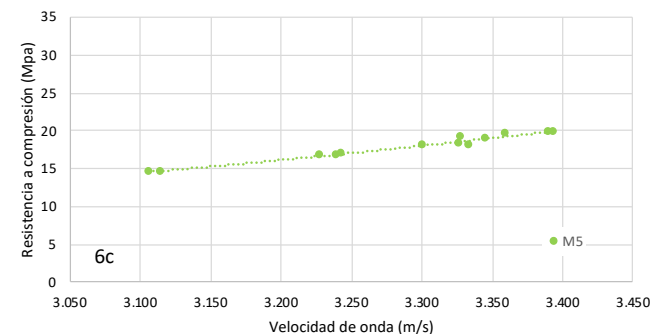
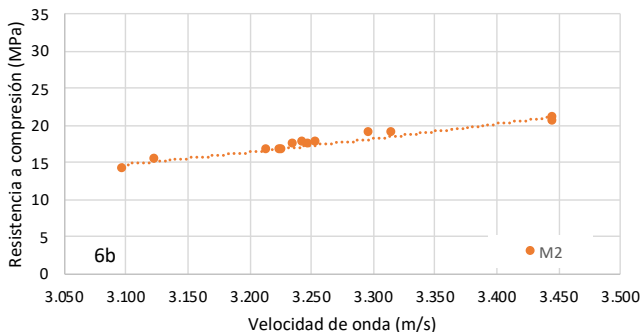
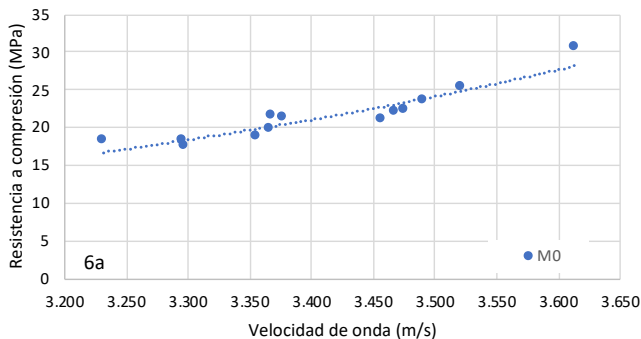


Figura 6. Resistencia a compresión v/s VPU mezclas expuestas AES: a) M0, b) M2 y c) M5.

4. Conclusiones.

El uso de ECr como sustitución de la arena, la resistencia compresión de la mezcla más desfavorable, M5 (50% arena-50% ECr), sólo disminuye un 2,9% en relación con la mezcla M0. Para el caso de la mezcla M2 tiene una resistencia compresión a 28d, superior al M0 en un 6,4%. Para obtener resistencias a compresión homogéneas, se debe procurar una adecuada eliminación de los residuos, como pintura y óxidos. Por lo tanto, para los ensayos de durabilidad, ciclo de congelación/deshielo y ataque externos de sulfatos se escogieron las mezclas M0, M2 y M5. La sustitución de arena fina por ECr en las mezclas M2 y M5, ante el ataque externo de sulfato han tenido un comportamiento constante sin mostrar evidencias de expansión, al contrario, en la mezcla M0 la cual se expande un 0,29%. Las mezclas M2 y M5 aumentan significativamente la resistencia a los ciclos de congelación/deshielo, presentando una pérdida de peso constante, lo cual se debe a la homogeneidad de las mezclas, lo que reduce el tamaño de los huecos de aire.

Los resultados entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico que las 3 muestras M0, M2 y M5, ante el CCD tienen una clasificación dudosa, ya que su velocidad varía entre 3.000 a 3.750 m/s. Este estudio presenta una solución práctica para la eliminación de la ECr, material es perjudicial y destructiva para el medio ambiente, se sugiere un enfoque para sustituir la arena fina y, en consecuencia, poder reducir los costes de producción. Considerando los resultados obtenidos, se recomienda futuros estudios de hormigones de prueba para hormigones de pavimento y fabricación de elementos prefabricados.

5. Agradecimientos.

Los autores desean expresar sus agradecimientos a la Universidad de Magallanes por el apoyo durante el desarrollo de este proyecto de investigación. Además, este trabajo fue posible gracias a la Empresa Concremag S.A. y Asmar Magallanes.

6. Referencias.

- Abdelfattah, H. F. H., Al-Shamsi, K., & Al-Jabri, K. (2018). Evaluation of rutting potential for asphalt concrete mixes containing copper slag. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(7), 630-640. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199875>
- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials*, 35, 718-729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.044>

- Al-Jabri, K. S., Al-Saidy, A. H., & Taha, R. (2011). Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 933-938. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090>
- Al-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Oraimi, S. K., & Al-Saidy, A. H. (2009). Copper slag as sand replacement for high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 483-488. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007>
- Aparicio, S., Hernández, M. G., & Anaya, J. J. (2020). Influence of environmental conditions on concrete manufactured with recycled and steel slag aggregates at early ages and long term. *Construction and Building Materials*, 249, 118739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118739>
- Astillero Magallanes. (2021). <https://www.asmar.cl/astilleros/magallanes>
- ASTM. (2001). ASTM C33 Standard Specification for Concrete Aggregates. 8.
- ASTM. (2013). ASTM C88 Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate and magnesium sulfate.
- CDT. (s. f.). Áridos reciclados disminuirían fuertemente los residuos en construcción. <https://www.cdt.cl/aridos-reciclados-disminuirian-fuertemente-los-residuos-en-construccion/>
- Construye2025. (2021). Escombros de la construcción llenarían 15 veces el Estadio Nacional para 2025 ¿Qué hacemos para evitarlo?. <https://construye2025.cl/2019/11/05/escombros-de-la-construccion-llenarian-15-veces-el-estadio-nacional-para-2025-que-hacemos-para-evitarlo/>
- dos Anjos, M. A. G., Sales, A. T. C., & Andrade, N. (2017). Blasted copper slag as fine aggregate in Portland cement concrete. *Journal of Environmental Management*, 196, 607-613. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.032>
- GAIN. (s. f.). Global Aggregates Information Network. <https://www.gain.ie/>
- Gorai, B., Jana, R. K., & Premchand. (2003). Characteristics and utilisation of copper slag—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 39(4), 299-313. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00171-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00171-4)
- Hoenig, V., Hoppe, H., & Emberger, B. (2007). Carbon Capture Technology-Options and Potentials for the Cement Industry. *PCA R&D Serial No. 3022*, 3022, 98.
- INN. (1968). NCh148:1968 Cemento—Terminología, clasificación y especificaciones generales.
- INN. (1969). NCh 147:1969 Cementos—Análisis químico.
- INN. (1977). NCh1223:1977 «Concrete and mortar aggregates—Determination of material finer than 0,080 mm». Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2008). NCh1116:2008 «Concrete and mortar aggregates—Determination of apparent density». Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2009). NCh1239:2009 «Aggregates for mortar and concrete—Determination of real and net density and absorption of fine aggregate». Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2019). NCh158:2019 Compressive strengths of cement mortar. Instituto Nacional de Normalización.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (1968). NCh148:1968 Cemento—Terminología, clasificación y especificaciones generales. 8.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (1969). NCh 147:1969 Cementos—Análisis químico. 29.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2009). NCh165:2009 Aridos para morteros y hormigones—Tamizado y determinación de la granulometría. 14.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2013). NCh 163:2013 Aridos para morteros y hormigones—Requisitos. 29.
- Legal, Rodrigo. (2005). Hormigonado en tiempo fría. Universidad Austral de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfci1522h/doc/bmfci1522h.pdf>
- Peirovi, M., Labafzadeh, M. S., Dehghani, A., & Meftahi, F. (2019). Durability and mechanical properties of precast concrete curb containing waste copper slag. *Magazine of Concrete Research*, 71(11), 567-576. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00264>
- Segura-Sierpe, Y. P., Borrachero-Rosado, M. V., Monzó-Balbuena, J. M., & Payá-Bernabeu, J. (2016). Preliminary studies on hydrated cement for its reuse in geopolymers | Estudios preliminares sobre cemento hidratado para su reutilización en geopolímeros. *DYNA (Colombia)*, 83(196). <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.54189>
- Tu, T.-Y., Chen, Y.-Y., & Hwang, C.-L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943-950. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.022>
- Vijayaraghavan, J., Jude, A. B., & Thivya, J. (2017). Effect of copper slag, iron slag and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of concrete. *Resources Policy*, 53, 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.06.012>
- Wang, R., Shi, Q., Li, Y., Cao, Z., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123371>