



Relaves de flotación de escoria de cobre como árido fino en morteros de cemento

Copper slag flotation tailings as fine aggregate in cement mortars

Elizabeth Olave¹ y Amin Nazer^{2*}

¹ Universidad de Atacama, Departamento de Construcción, Facultad Tecnológica, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile, eolavear@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-3661-617X>

² Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Construcción, Facultad de Ingeniería, Benavente 980, La Serena, Chile, amin.nazerv@userena.cl. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0176-2344>

* Autor de correspondencia: amin.nazerv@userena.cl

Los relaves de flotación de escoria de cobre (CSFW) son un residuo secundario de la recuperación hidrometalúrgica de cobre desde la escoria de fundición; en la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI (Copiapó, Chile) se depositan ~65.000 t/mes. Este estudio evaluó el CSFW como reemplazo parcial de arena normalizada en morteros de cemento (1:3 en masa) en niveles de sustitución de 0 (control), 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 75%, ensayados a 7, 28 y 90 días. Las sustituciones se realizaron en masa manteniendo constante la masa total de árido, lo que, dada la mayor densidad del CSFW, implica una reducción progresiva del volumen de árido; este efecto se cuantifica y discute explícitamente. Se prepararon probetas prismáticas (40 × 40 × 160 mm) evaluando consistencia, densidad endurecida, resistencia a flexión y compresión. La resistencia a compresión se analizó por ANOVA de un factor y prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), complementados con verificación de supuestos (Shapiro-Wilk, Levene) y con contrastes robustos (ANOVA de Welch, Kruskal-Wallis y Games-Howell). El CSFW presentó mineralogía cristalina (hedenbergita, magnetita, fayalita, albita), densidad real seca de 3.760 kg/m³ y absorción de agua de 1,71%. La consistencia disminuyó con el contenido de CSFW y la densidad endurecida aumentó proporcionalmente. La mezcla CSFW con 25% de sustitución produjo la mayor resistencia a compresión entre los niveles evaluados, 44,17 ± 0,83 MPa a 28 días, 22,9% sobre el control ($p < 0,05$), y la mayor resistencia a flexión (7,89 ± 0,35 MPa a 28 días, +7,6%). El incremento se atribuye a la acción combinada del aumento de la razón volumétrica pasta/árido y de la densificación física de la matriz cementicia por las partículas finas y de alta densidad del CSFW. Dado que no se ensayaron niveles intermedios entre 25 y 50%, el óptimo global podría situarse en dicho intervalo.

Palabras clave: relaves de flotación de escoria de cobre; árido fino; mortero de cemento; resistencia a compresión; valorización de residuos

Copper slag flotation tailings (CSFW) are a secondary residue generated during hydrometallurgical copper recovery from smelting slag. At the Manuel Antonio Matta Plant of Empresa Nacional de Minería (ENAMI), Copiapó, Chile, approximately 65,000 t/month are deposited in tailings impoundments. This study evaluated CSFW as a partial replacement for normalized river sand in cement mortars (1:3 mass ratio) at substitution levels of 0, 5, 10, 15, 20, 25, 50 and 75%, tested at 7, 28 and 90 days. Replacement was performed on a mass basis at constant total aggregate mass; because CSFW is denser than sand, this entails a progressive reduction in aggregate volume, an effect that is quantified and discussed explicitly. Prismatic specimens (40 × 40 × 160 mm) were evaluated for consistency, hardened density, flexural strength and compressive strength. One-way analysis of variance (ANOVA) and Tukey HSD post-hoc tests ($\alpha = 0.05$) were applied to compressive strength data, together with assumption checks (Shapiro-Wilk, Levene) and robust alternatives (Welch ANOVA, Kruskal-Wallis and Games-Howell). CSFW exhibited predominantly crystalline mineralogy (hedenbergite, magnetite, fayalite, albite), real dry density of 3,760 kg/m³ and water absorption of 1.71%. Fresh mortar consistency decreased progressively with CSFW content, while hardened density increased proportionally. The CSFW 25% mix achieved the highest compressive strength among the levels tested, 44.17 ± 0.83 MPa at 28 days, 22.9% above control ($p < 0.05$), and the highest flexural strength (7.89 ± 0.35 MPa at 28 days, +7.6%). The enhancement is attributed to the combined action of an increased paste-to-aggregate volume ratio and physical densification of the cement matrix by the fine, high-density CSFW particles. As intermediate levels between 25 and 50% were not tested, the global optimum may lie within that interval.

Keywords: copper slag flotation tailings; fine aggregate; cement mortar; compressive strength; waste valorization



Introducción

Chile es el principal productor mundial de cobre, con aproximadamente el 27% de la producción global (Cochilco, 2019). La fundición de concentrados de cobre genera grandes volúmenes de escoria de fundición de cobre (CS) como subproducto vítreo del proceso pirometalúrgico. Wang et al. (2021), en una revisión crítica de más de cien estudios, reportaron que la producción global de CS superó los 57 millones de toneladas en 2021 y que la disposición en vertederos sigue siendo el método de manejo dominante, con riesgos asociados de lixiviación de metales pesados y ocupación de suelo. Las fundiciones chilenas producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas de CS anuales (Nazer et al., 2016). En respuesta a la disminución de las leyes de mineral, varias fundiciones chilenas han incorporado circuitos de molienda y flotación para recuperar el cobre residual contenido en la CS acumulada, generando un residuo secundario conocido como relaves de flotación de escoria de cobre (CSFW). En la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI, en Copiapó, Región de Atacama, se generan aproximadamente 65.000 toneladas mensuales de CSFW (Herrera, 2018), las cuales se depositan actualmente en tranques de relave y representan un pasivo ambiental creciente en una región árida.

La valorización de CS como árido fino en hormigones y morteros está ampliamente documentada. Wang et al. (2021) concluyeron que sustituciones moderadas (20–50% en volumen) mejoran consistentemente la resistencia mecánica y la durabilidad, con reducciones de porosidad documentadas mediante microscopía electrónica de barrido. Abdalla y Alahmari (2024), en la revisión más reciente del estado del arte en la materia, confirmaron que la microestructura del hormigón con CS se vuelve más densa y homogénea al aumentar el contenido de CS, evidenciando una zona de transición interfacial (ITZ) más compacta. En el caso de morteros, Al-Jabri et al. (2011) demostraron que todas las mezclas con CS como árido fino (0–100% sustitución) produjeron resistencias a compresión iguales o superiores al mortero de control, con incrementos de más del 70% para sustituciones del 50%. Panda et al. (2022) verificaron microestructuralmente el mecanismo de densificación de la ITZ en hormigón con CS. En el contexto chileno, Nazer et al. (2013) demostraron que la CS de fundiciones de la Región de Atacama mejora la resistencia

a compresión y flexión de morteros independientemente del tipo de cemento, y Pradena et al. (2019) confirmaron su viabilidad en morteros de albañilería, con incrementos de 18,1% y 20,2% en resistencia a compresión y adherencia, respectivamente. Cendoya (2009) reportó incrementos de resistencia en hormigones con sustituciones de 25–50% en volumen de CS como árido fino.

Como reemplazo parcial del cemento, la CS y el CSFW muestran un comportamiento marcadamente distinto. Su mineralogía predominantemente cristalina, dominada por silicatos de hierro como fayalita y hedenbergita, les confiere reactividad puzolánica despreciable, lo que se traduce en reducciones de resistencia a compresión al aumentar el nivel de sustitución del cemento (Afshoon y Sharifi, 2017; Sharma y Khan, 2017). Nazer et al. (2025) confirmaron este comportamiento para CSFW de la misma planta de ENAMI, donde un 5% de reemplazo del cemento alcanzó aproximadamente el 80% de la resistencia del hormigón de control a 60 días.

Pese a la abundante literatura sobre CS como árido fino, los reportes en literatura científica del uso de CSFW son prácticamente inexistentes. El CSFW difiere de la CS sin procesar en dos aspectos clave: una distribución granulométrica más fina, derivada de la etapa de molienda previa a la flotación, y mayores concentraciones de metales pesados (Fe, Cu) procedentes del proceso de flotación. Estas diferencias implican que los resultados publicados para CS no pueden extrapolarse directamente al CSFW. Un aspecto adicional que condiciona la comparación con la literatura es la base de sustitución empleada: la mayoría de los estudios sobre CS reportan reemplazos en volumen (Cendoya, 2009; Wang et al., 2021), mientras que el presente trabajo emplea reemplazo en masa conforme al protocolo comparativo de NCh 2260. Dada la elevada densidad del CSFW, ambas bases no son equivalentes, lo que se aborda de forma explícita en la sección de resultados.

Este estudio aborda esta brecha de conocimiento evaluando el desempeño mecánico de morteros de cemento en los cuales se reemplaza parcialmente la arena normalizada por CSFW de la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI en ocho niveles de sustitución (0, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 75%), ensayados a 7, 28 y 90 días. Los objetivos específicos son: (i) caracterizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del CSFW; (ii) determinar el efecto del



nivel de sustitución sobre la consistencia del mortero fresco y la densidad del mortero endurecido; y (iii) evaluar la resistencia a compresión y flexión de los morteros con CSFW relativos a una mezcla de control, soportado por ANOVA de un factor y análisis post-hoc de Tukey HSD. Estos resultados contribuyen a una línea de investigación enfocada en la valorización de residuos mineros de la región de Atacama para la producción de materiales alternativos de construcción de baja huella de carbono.

Materiales y métodos

Materiales

Relaves de flotación de escoria de cobre (CSFW).

El CSFW se obtuvo de la Planta Manuel Antonio Matta operada por ENAMI en Copiapó, Región de Atacama, Chile. El material presenta apariencia negra y vítrea, y se genera durante la flotación de la escoria de fundición de cobre para recuperar el cobre residual. El CSFW se utilizó sin molienda adicional.

Cemento. Cemento Portland de alta resistencia (tipo HR), conforme a NCh 148 (INN, 1968). Proveedor: Hormigones Bicentenario BSA, Copiapó.

Árido fino. Arena normalizada de río preparada según NCh 2260 (INN, 1996), tamizada y combinada para cumplir con los requisitos granulométricos de la norma.

Agua. Agua potable conforme a NCh 1498 (INN, 1982).

Condición de humedad de los áridos. Tanto la arena normalizada como el CSFW se emplearon en condición seca de horno. Ambos materiales se secaron en estufa eléctrica a 110 ± 5 °C durante 24 h y se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente en desecador antes de su pesaje y amasado. La misma condición se aplicó en la determinación de las propiedades físicas reportadas en

la Tabla 2, de modo que la absorción de agua indicada corresponde al agua que los áridos son capaces de captar desde el agua de amasado durante el mezclado. Esta precisión es relevante para la interpretación del balance de agua libre presentada más adelante.

Caracterización del CSFW

La composición química se determinó por espectrofotometría de absorción atómica (AAS), y la composición mineralógica por difracción de rayos X (XRD) usando un difractómetro Shimadzu XRD-6100 (radiación Cu K α , 5°–70° 2 θ , paso 0,02°). La distribución granulométrica (PSD) se determinó por análisis granulométrico según NCh 165 (INN, 2009); el contenido de finos (< 0,08 mm) por tamizado húmedo según NCh 1223 (INN, 1977). Las densidades real seca, neta y la absorción de agua se determinaron según NCh 1239 (INN, 2009) y NCh 1116 (INN, 2008); la densidad aparente según NCh 1116 (INN, 2008). Los mismos ensayos se aplicaron a la arena normalizada para comparación.

Diseño de mezcla y preparación de probetas

Las mezclas de mortero se prepararon con una relación cemento-árido en masa de 1:3 según NCh 2260 (INN, 1996). Se confeccionaron ocho mezclas: una de control (0% CSFW) y siete con CSFW reemplazando arena normalizada en 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 75% en masa. La razón agua-cemento ($a/c = 0,65$) se mantuvo constante en todas las mezclas, definida a partir del ensayo de consistencia de la mezcla de control conforme al protocolo de NCh 2260. Las dosificaciones y los volúmenes equivalentes de árido se presentan en la Tabla 1. Dado que la sustitución se efectuó en masa y que la densidad real seca del CSFW (3.757 kg/m³) es 47,6% mayor que la de la arena normalizada (2.545 kg/m³), el volumen de árido incorporado disminuye

Tabla 1. Dosificación de las mezclas de mortero y volúmenes equivalentes de árido.

Mezcla	CSFW (%)	Cemento (g)	CSFW (g)	Arena (g)	Agua (g)	V arena (cm ³)	V CSFW (cm ³)	V árido total (cm ³)	CSFW (% vol.)
Control	0	844,80	0,00	2.534,40	549,12	995,8	0,0	995,8	0,0
CSFW-5	5	844,80	126,72	2.407,68	549,12	946,0	33,7	979,8	3,4
CSFW-10	10	844,80	253,44	2.280,96	549,12	896,3	67,5	963,7	7,0
CSFW-15	15	844,80	380,16	2.154,24	549,12	846,5	101,2	947,6	10,7
CSFW-20	20	844,80	506,88	2.027,52	549,12	796,7	134,9	931,6	14,5
CSFW-25	25	844,80	633,60	1.900,80	549,12	746,9	168,7	915,5	18,4
CSFW-50	50	844,80	1.267,20	1.267,20	549,12	497,9	337,3	835,2	40,4
CSFW-75	75	844,80	1.900,80	633,60	549,12	249,0	505,9	754,9	67,0

Volúmenes calculados a partir de las densidades reales secas de la Tabla 2 (CSFW: 3.757 kg/m³; arena normalizada: 2.545 kg/m³). Masas de cemento (844,80 g) y agua (549,12 g) constantes en todas las mezclas.

progresivamente con el nivel de sustitución: de 995,8 cm³ en el control a 915,5 cm³ en CSFW-25 (-8,1%) y a 754,9 cm³ en CSFW-75 (-24,2%). En consecuencia, una sustitución del 25% en masa equivale a solo 18,4% en volumen. Puesto que las masas de cemento y agua permanecen constantes, la razón volumétrica pasta/árido aumenta un 8,8% en CSFW-25 y un 31,9% en CSFW-75 respecto del control. Las implicancias de este efecto sobre la interpretación de los resultados se analizan en la sección de resultados.

Se moldearon nueve probetas prismáticas (40 × 40 × 160 mm) por mezcla: tres por cada edad de ensayo (7, 28 y 90 días). Las probetas se desmoldaron a las 48 h y se curaron en solución saturada de Ca(OH)₂ a 20 ± 2 °C hasta el ensayo (NCh 2261, INN, 2010).

Consistencia del mortero fresco

La consistencia del mortero se determinó mediante el ensayo de asentamiento con cono de 15 cm según NCh 2257/3 (INN, 1996), que es el método normalizado para morteros y el prescrito por NCh 2260 para la comparación de morteros patrón (requisito: 60 ± 20 mm). El asentamiento se midió como el descenso del mortero moldeado respecto de la altura del molde. La razón a/c de la mezcla de control se ajustó por incrementos sucesivos del 5% del peso de cemento hasta alcanzar el requisito normativo, obteniéndose a/c = 0,65 para un asentamiento de 66 mm; dicha razón se aplicó sin modificación a todas las mezclas con sustitución, conforme al protocolo comparativo de NCh 2260.

Ensayos en mortero endurecido

Densidad. Calculada a partir de la masa y mediciones geométricas (pie de metro, ±0,01 mm) según NCh 1037 (INN, 2009).

Resistencia a flexión (ff). Ensayo de flexión en tres puntos (luz = 100 mm, velocidad de carga = 15 kgf/cm²·s) según NCh 158 (INN, 1967): $ff = 3 \cdot P \cdot L / (2 \cdot b \cdot h^2)$. Se reporta media ± DE para n = 3 por mezcla y edad.

Resistencia a compresión (fc). Se ensayaron las dos mitades fracturadas de cada probeta de flexión, sobre un área de 40 × 40 mm (velocidad de carga = 15 kgf/cm²·s), según NCh 1037 (INN, 2009): $fc = F/A$; A = 1.600 mm². Se reporta media ± DE para n = 6 por mezcla y edad.



Figura 1. Preparación de muestras y ensayos a flexión y compresión.

Análisis estadístico

Se evaluó el efecto del nivel de sustitución de CSFW sobre la resistencia a compresión mediante ANOVA de un factor a cada edad (7, 28 y 90 días), con el nivel de sustitución como factor único (ocho niveles). Cuando el ANOVA indicó diferencias significativas ($\alpha = 0,05$), las comparaciones por pares se realizaron mediante la prueba de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Los datos de resistencia a flexión se reportan de forma descriptiva (n = 3 por celda). Todos los cálculos se realizaron en Python (SciPy v1.11).

Previamente a la aplicación del ANOVA se verificaron sus supuestos. La normalidad se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk aplicada a los residuos del modelo de cada edad (N = 48) y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene basada en la mediana, robusta frente a desviaciones de la normalidad. Dado que el supuesto de normalidad no se cumplió a 7 días (véase la sección de resultados), el análisis se complementó con procedimientos robustos que no requieren homocedasticidad ni

normalidad: el ANOVA de Welch, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y, para las comparaciones múltiples, la prueba de Games-Howell. Se reportan tanto los resultados clásicos como los robustos, y se adopta como criterio de significancia la concordancia entre ambos enfoques.

Resultados y discusión

Caracterización del CSFW

El análisis por AAS identificó el Fe como elemento dominante (32,35%), seguido de Si (17,45%), Ca (4,13%), K (0,92%), Al (0,64%) y Cu (0,53%). El análisis XRD reveló una mineralogía predominantemente cristalina compuesta por hedenbergita (23,90%), magnetita (20,36%), fayalita (20,00%), albita (18,05%), fengita (9,55%) y cuarzo (2,01%).

La PSD del CSFW (Figura 2) muestra una granulometría continua entre 0,15 y 4,75 mm (100% pasante por tamiz 4,75 mm). El contenido de finos (< 0,08 mm) fue de 3,88%, por debajo del límite del 5% establecido en NCh 163 (INN, 2013). Las propiedades físicas del CSFW y de la arena normalizada se comparan en la Tabla 2. La densidad real seca del CSFW (3.757 kg/m³) supera en un 47,6% a la de la arena normalizada (2.545 kg/m³), consistentemente con su mineralogía rica en hierro (magnetita, fayalita, hedenbergita). La absorción de agua del CSFW (1,71%) es inferior a la de la arena (2,68%).

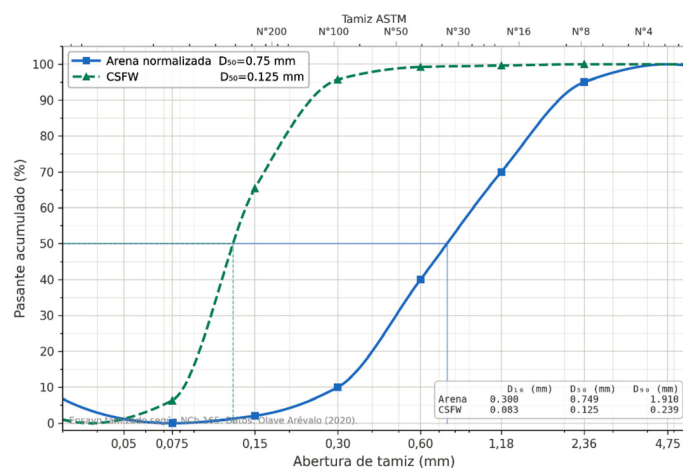


Figura 2. Distribución granulométrica del CSFW comparada con la banda granulométrica de la arena normalizada (NCh 2260)

Efecto de la base de sustitución sobre el volumen de árido

La sustitución en masa a masa total de árido constante

Tabla 2. Propiedades físicas del CSFW y de la arena normalizada.

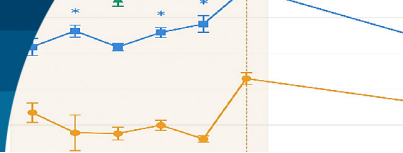
Propiedad	CSFW	Arena normalizada
Densidad real seca (kg/m ³)	3.760	2.545
Densidad neta (kg/m ³)	4.015	2.739
Absorción de agua (%)	1,71	2,68
Densidad aparente (kg/m ³)	2.047	1.691
Finos < 0,08 mm (%)	3,88	0,00

La densidad real seca del CSFW (3.757 kg/m³) excede el rango de aplicabilidad de NCh 1239, diseñada para áridos silíceos; el resultado es físicamente consistente con la mineralogía ferrosa del material.

implica que el volumen de árido incorporado disminuye a medida que aumenta el contenido de CSFW, dada su mayor densidad real (Tabla 1). Este efecto debe considerarse al interpretar el desempeño mecánico, ya que un menor volumen de árido con masas constantes de cemento y agua se traduce en una razón volumétrica pasta/árido mayor, lo cual por sí solo tiende a incrementar la resistencia dentro de ciertos límites.

No obstante, este efecto volumétrico no explica por sí mismo el comportamiento observado. Si el aumento de la razón pasta/árido fuese el mecanismo dominante y único, la resistencia debería crecer de forma monótona con el contenido de CSFW, puesto que dicha razón aumenta monótonamente (+1,6% en CSFW-5, +8,8% en CSFW-25, +19,2% en CSFW-50 y +31,9% en CSFW-75). Sin embargo, la resistencia a compresión a 28 días alcanza un máximo en CSFW-25 (44,17 MPa) y decae marcadamente en CSFW-50 (35,61 MPa) y CSFW-75 (29,02 MPa), siendo esta última la mezcla con la mayor razón pasta/árido y, simultáneamente, la de menor resistencia. Por lo tanto, el efecto volumétrico opera como una contribución favorable en el rango bajo y moderado de sustitución, pero es superado por un mecanismo competitivo de degradación asociado a la pérdida de trabajabilidad y a la consiguiente deficiencia de compactación en el rango alto.

En consecuencia, el incremento de resistencia observado en CSFW-25 debe atribuirse a la acción combinada de al menos dos contribuciones favorables, el aumento de la razón volumétrica pasta/árido y la densificación física aportada por las partículas finas y densas del CSFW, que el presente diseño experimental no permite deconvolucionar. Para separar ambas contribuciones sería necesario un diseño con sustitución en base volumétrica, en el cual el volumen de árido se mantenga constante; esto se plantea como línea prioritaria de trabajo futuro.



Consistencia del mortero fresco

La consistencia del mortero fresco disminuyó de forma monótona con el aumento del contenido de CSFW (Tabla 3). La mezcla de control alcanzó un asentamiento de 66,0 mm, cumpliendo el requisito de NCh 2260 (60 ± 20 mm). Las mezclas CSFW-5 a CSFW-20 se mantuvieron dentro del rango normativo (47,8–61,4 mm), mientras que CSFW-25 (43,0 mm) quedó ligeramente por debajo del límite inferior. La mezcla CSFW-50 alcanzó 21,2 mm y la mezcla CSFW-75 no presentó asentamiento medible, dificultando notablemente el amasado.

Tabla 3. Consistencia del mortero fresco (asentamiento de cono de 15 cm, NCh 2257/3)

Mezcla	CSFW (%)	Asentamiento (mm)	Reducción vs. control (%)
Control	0	66,0	—
CSFW-5	5	61,4	−7,0
CSFW-10	10	57,0	−13,6
CSFW-15	15	52,4	−20,6
CSFW-20	20	47,8	−27,6
CSFW-25	25	43,0	−34,8
CSFW-50	50	21,2	−67,9
CSFW-75	75	0,0	−100,0

Esta reducción progresiva se atribuye principalmente al aumento del área superficial específica del árido. El CSFW aporta una fracción de finos inferiores a 0,08 mm equivalente al 3,88% de su masa, mientras que la arena normalizada no contiene finos en ese rango (Tabla 2). En términos absolutos, la masa de finos aportada por el CSFW crece desde 0 g en el control hasta 24,6 g en CSFW-25 y 73,8 g en CSFW-75. Este material ultrafino demanda agua para el humedecimiento superficial, agua que deja de estar disponible para la lubricación entre partículas, reduciendo la fluidez de la mezcla. A ello se suma la mayor angulosidad de las partículas de CSFW, derivada de la etapa de molienda previa a la flotación, frente a la morfología más redondeada de la arena de río, lo que incrementa la fricción interna del esqueleto granular.

Conviene precisar que el efecto de la menor absorción de agua del CSFW actúa en sentido opuesto al observado, pero su magnitud es marginal y no revierte la tendencia. El balance de agua indica que el agua absorbida por el árido disminuye de 67,9 g en el control a 49,5 g en CSFW-75, de modo que el agua libre aumenta solo de 481,2 g a 499,6 g (+3,8%), lo que equivale a un incremento de la razón a/c

efectiva de 0,570 a 0,591 ($\Delta = +0,022$). Este incremento resulta un orden de magnitud menor que el efecto de la superficie específica descrito en el párrafo anterior, razón por la cual la consistencia disminuye pese a la mayor disponibilidad nominal de agua libre. Esta aclaración corrige la interpretación presentada en la versión anterior del manuscrito.

Densidad del mortero endurecido

La densidad del mortero endurecido aumentó con el contenido de CSFW en todas las edades (Tabla 4). A 90 días, la densidad varió de 2.207 kg/m³ (control) a 2.452 kg/m³ (CSFW-75), un aumento aproximado del 11%. Esta tendencia refleja directamente la sustitución de arena ($\rho = 2.545$ kg/m³) por CSFW de mayor densidad ($\rho = 3.757$ kg/m³) y el llenado de vacíos interpartícula por la fracción fina del CSFW.

Tabla 4. Densidad del mortero endurecido (kg/m³) a 7, 28 y 90 días

Mezcla	CSFW (%)	7 días	28 días	90 días
Control	0	2.168	2.168	2.207
CSFW-5	5	2.188	2.188	2.207
CSFW-10	10	2.207	2.227	2.227
CSFW-15	15	2.207	2.227	2.259
CSFW-20	20	2.259	2.272	2.279
CSFW-25	25	2.305	2.305	2.279
CSFW-50	50	2.363	2.363	2.382
CSFW-75	75	2.389	2.402	2.452

Resistencia a flexión

Los resultados de resistencia a flexión (media $\pm$ DE, $n = 3$) se presentan en la Tabla 5. La mezcla CSFW-25 produjo la mayor resistencia a flexión entre los niveles evaluados, en todas las edades: $6,19 \pm 0,22$ MPa a 7 días (+9,8% sobre el control), $7,89 \pm 0,35$ MPa a 28 días (+7,6%) y $8,48 \pm 0,45$ MPa a 90 días (+9,0%). Las mezclas CSFW-5 y CSFW-15 produjeron resultados dentro de un $\pm 5\%$ del control en todas las edades. Las sustituciones de 50% y 75% redujeron la resistencia a flexión a 28 días en 16–18% respecto del control. Dado que $n = 3$ por celda (según NCh 158), estos resultados se interpretan de forma descriptiva, en conjunto con los datos de compresión.

Resistencia a compresión

Las estadísticas descriptivas de resistencia a compresión ($n = 6$ por celda) se presentan en la Tabla 6 y la Figura 3. El



Tabla 5. Resistencia a flexión (MPa): media $\pm$ DE a 7, 28 y 90 días (n = 3 por celda)

Mezcla	CSFW (%)	7d Media $\pm$ DE	28d Media $\pm$ DE	90d Media $\pm$ DE	Δ 28d	Δ 90d
Control	0	5,64 $\pm$ 0,11	7,33 $\pm$ 0,26	7,78 $\pm$ 0,43	—	—
CSFW-5	5	5,60 $\pm$ 0,14	7,47 $\pm$ 0,35	8,23 $\pm$ 0,23	+2,0%	+5,7%
CSFW-10	10	5,13 $\pm$ 0,24	7,06 $\pm$ 0,48	7,46 $\pm$ 0,11	-3,6%	-4,1%
CSFW-15	15	5,15 $\pm$ 0,36	7,15 $\pm$ 0,49	7,97 $\pm$ 0,26	-2,4%	+2,5%
CSFW-20	20	4,95 $\pm$ 0,09	7,17 $\pm$ 0,43	7,53 $\pm$ 0,12	-2,2%	-3,3%
CSFW-25	25	6,19 $\pm$ 0,22	7,89 $\pm$ 0,35	8,48 $\pm$ 0,45	+7,6%	+9,0%
CSFW-50	50	5,78 $\pm$ 0,35	6,13 $\pm$ 0,52	7,83 $\pm$ 0,31	-16,4%	+0,6%
CSFW-75	75	5,30 $\pm$ 0,47	6,04 $\pm$ 0,63	7,85 $\pm$ 0,47	-17,6%	+0,9%

Nota: Δ calculado respecto a la media del control en cada edad.

Tabla 6. Resistencia a compresión: media $\pm$ DE (MPa), n = 6 por celda

Mezcla	%	7d Media $\pm$ DE	CV%	28d Media $\pm$ DE	CV%	90d Media $\pm$ DE	CV%
Control	0	26,75 $\pm$ 1,35	5,0	35,93 $\pm$ 1,21	3,4	45,74 $\pm$ 1,36	3,0
CSFW-5	5	23,94 $\pm$ 2,49	10,4	38,16 $\pm$ 0,84	2,2	48,30 $\pm$ 1,28	2,6
CSFW-10	10	23,83 $\pm$ 0,91	3,8	35,91 $\pm$ 0,50	1,4	42,62 $\pm$ 1,00	2,3
CSFW-15	15	24,99 $\pm$ 0,72	2,9	37,94 $\pm$ 0,71	1,9	46,17 $\pm$ 0,90	1,9
CSFW-20	20	23,07 $\pm$ 0,44	1,9	39,13 $\pm$ 1,15	2,9	47,70 $\pm$ 1,16	2,4
CSFW-25	25	31,50 $\pm$ 0,81	2,6	44,17 $\pm$ 0,83	1,9	49,10 $\pm$ 1,18	2,4
CSFW-50	50	27,33 $\pm$ 0,99	3,6	35,61 $\pm$ 1,58	4,4	41,39 $\pm$ 0,77	1,9
CSFW-75	75	20,57 $\pm$ 2,78	13,5	29,02 $\pm$ 0,89	3,1	37,30 $\pm$ 1,67	4,5

coeficiente de variación (CV) se mantuvo $\leq 5,5\%$ en todas las celdas, con la excepción de CSFW-5 a 7 días (CV = 10,4%), CSFW-75 a 7 días (CV = 13,5%), atribuibles a la mayor variabilidad propia de las edades tempranas y de las sustituciones extremas.

La verificación de supuestos del ANOVA se resume en la Tabla 7. A 28 y 90 días se cumplen tanto la normalidad de los residuos (Shapiro-Wilk, $p = 0,706$ y $p = 0,281$) como la homogeneidad de varianzas (Levene, $p = 0,333$ y $p = 0,419$). A 7 días se mantiene la homocedasticidad ($p = 0,493$) pero se rechaza la normalidad ($p = 0,001$), desviación originada en una determinación de la celda CSFW-75 (26,09 MPa frente a un rango de 18,79–20,61 MPa en las cinco restantes). Dado este incumplimiento parcial, se aplicaron contrastes robustos como análisis confirmatorio.

El ANOVA de un factor confirmó un efecto altamente significativo del nivel de sustitución sobre la resistencia a compresión en las tres edades (Tabla 8). Los contrastes robustos conducen a la misma conclusión: el ANOVA de Welch y la prueba de Kruskal-Wallis resultan significativos ($p < 0,001$) en las tres edades, de modo que el rechazo de

la hipótesis nula de igualdad de medias no depende del cumplimiento de los supuestos paramétricos.

Tabla 7. Verificación de los supuestos del ANOVA para la resistencia a compresión

Edad	Shapiro-Wilk (residuos)	Levene (mediana)	Decisión
7 días	W = 0,899; $p = 0,001$	F = 0,93; $p = 0,493$	Normalidad rechazada
28 días	W = 0,983; $p = 0,706$	F = 1,19; $p = 0,333$	Ambos supuestos cumplidos
90 días	W = 0,971; $p = 0,281$	F = 1,04; $p = 0,419$	Ambos supuestos cumplidos

Shapiro-Wilk aplicado a los residuos del modelo ($N = 48$ por edad); Levene basado en la mediana ($k = 8$ grupos, $n = 6$ por grupo). Criterio de decisión: $\alpha = 0,05$.

Tabla 8. Contrastes globales para la resistencia a compresión (factor: nivel de sustitución de CSFW)

Edad	ANOVA clásico	ANOVA de Welch	Kruskal-Wallis
7 días	F = 27,52; $p < 0,001$	F(7; 16,8) = 65,40; $p < 0,001$	H = 37,52; $p < 0,001$
28 días	F = 104,92; $p < 0,001$	F(7; 17,0) = 117,60; $p < 0,001$	H = 40,44; $p < 0,001$
90 días	F = 68,79; $p < 0,001$	F(7; 17,1) = 51,51; $p < 0,001$	H = 43,26; $p < 0,001$

Tabla 9. Comparaciones múltiples frente al control: Tukey HSD y Games-Howell ($\alpha = 0,05$)

Mezcla	7d: Δ vs. control	Sig.	28d: Δ vs. control	Sig.	90d: Δ vs. control	Sig.
CSFW-5	-2,80 (-10,5%)	ns	+2,23 (+6,2%)	ns	+2,56 (+5,6%)	ns
CSFW-10	-2,92 (-10,9%)	*	-0,02 (-0,1%)	ns	-3,12 (-6,8%)	*
CSFW-15	-1,75 (-6,5%)	ns	+2,02 (+5,6%)	ns	+0,43 (+0,9%)	ns
CSFW-20	-3,67 (-13,7%)	*	+3,20 (+8,9%)	*	+1,96 (+4,3%)	ns
CSFW-25	+4,75 (+17,8%)	*	+8,24 (+22,9%)	*	+3,36 (+7,3%)	*
CSFW-50	+0,59 (+2,2%)	ns	-0,32 (-0,9%)	ns	-4,35 (-9,5%)	*
CSFW-75	-6,18 (-23,1%)	*	-6,91 (-19,2%)	*	-8,44 (-18,5%)	*

HSD de Tukey: 7d = 2,84 MPa; 28d = 1,87 MPa; 90d = 2,20 MPa. (*) diferencia significativa bajo ambos criterios (Tukey y Games-Howell); ns = no significativa o no concordante entre criterios. Diferencias expresadas en MPa (porcentaje respecto del control).

Las comparaciones frente al control se presentan en la Tabla 9. Los signos de significancia corresponden a la prueba de Games-Howell, robusta a la heterocedasticidad, y se indican únicamente cuando coinciden con la conclusión de la prueba de Tukey HSD. A 7 días, la mezcla CSFW-25 superó significativamente al control (+17,8%). A 28 días, las mezclas CSFW-20 y CSFW-25 excedieron al control en magnitudes estadísticamente significativas bajo ambos criterios, alcanzando CSFW-25 la mayor diferencia (+22,9%); las mezclas CSFW-5 y CSFW-15, significativas bajo Tukey, no alcanzan significancia bajo Games-Howell ($p = 0,062$ y $p = 0,088$, respectivamente), por lo que se reportan como no concluyentes. A 90 días, CSFW-25 mantuvo una diferencia positiva significativa (+7,3%), mientras que CSFW-10, CSFW-50 y CSFW-75 resultaron significativamente inferiores al control; CSFW-20 no difirió significativamente del control (+4,3%).

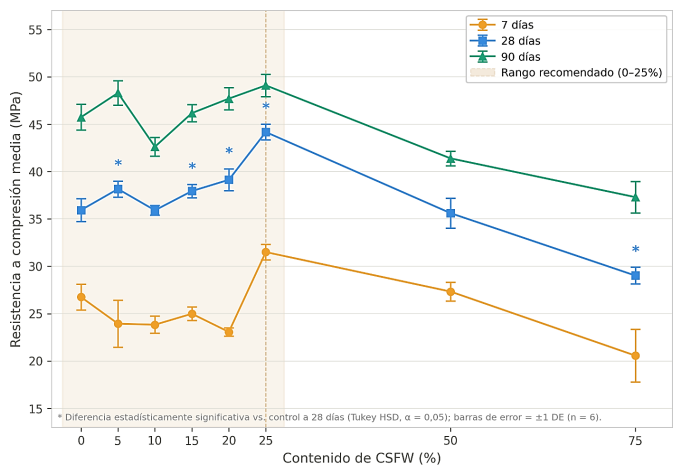


Figura 3. Resistencia media a compresión (MPa) en función del nivel de sustitución de CSFW a 7, 28 y 90 días ($n = 6$ por celda; barras de error = ± 1 DE). Asteriscos (*): diferencias estadísticamente significativas frente al control a 28 días (Tukey HSD y Games-Howell, $\alpha = 0,05$). Zona sombreada: rango de sustitución recomendado (0–25%)

Cabe destacar que la superioridad de CSFW-25 frente al control se mantiene en las tres edades bajo el criterio robusto de Games-Howell ($p = 0,001$ a 7 días; $p < 0,001$ a 28 días; $p = 0,016$ a 90 días), lo que confirma que la conclusión principal del estudio no depende del cumplimiento de los supuestos paramétricos del ANOVA clásico.

Interpretación mecánica

El desempeño mecánico superior de la muestra CSFW-25 no puede atribuirse a reactividad puzolánica. El análisis XRD confirma una mineralogía completamente cristalina, sin fase amorfa detectable, descartando una contribución significativa a la formación adicional de gel C-S-H, consistente con Wang et al. (2021) y Nazer et al. (2025). La mejora de resistencia se atribuye a la acción combinada de tres contribuciones de naturaleza física: (i) el aumento de la razón volumétrica pasta/árido derivado de la sustitución en masa, cuantificado en +8,8% para CSFW-25; (ii) la densificación del esqueleto granular, dado que reemplazar arena ($\rho = 2.545 \text{ kg/m}^3$) por CSFW ($\rho = 3.757 \text{ kg/m}^3$) reduce la porosidad efectiva de la matriz, confirmado por el aumento monótono de la densidad endurecida (Tabla 4); y (iii) el llenado de vacíos en la ITZ por la fracción fina del CSFW ($3,88\% < 0,08 \text{ mm}$), que mejora la transferencia de carga entre árido y pasta. Panda et al. (2022) verificaron este último mecanismo microestructuralmente en hormigón con CS mediante SEM, documentando una ITZ más compacta y libre de defectos en comparación con árido convencional. En el presente estudio, la ausencia de análisis SEM-EDS impide la verificación directa y, en particular, impide cuantificar la contribución relativa de cada uno de los tres mecanismos señalados.

El mejor desempeño a 25% de sustitución, nivel inferior



al rango 40–50% reportado para CS sin procesar (Al-Jabri et al., 2011; Wang et al., 2021), se explica por el efecto combinado de la PSD más fina del CSFW y de su mayor angulosidad. Al aumentar el contenido de CSFW, su mayor área superficial específica eleva rápidamente la demanda de agua para humectación superficial y la fricción interna del esqueleto granular, deteriorando progresivamente la trabajabilidad (Tabla 3). Por sobre el 25% de sustitución, la pérdida de trabajabilidad compromete la compactación bajo condiciones de mezclado manual, generando vacíos de aire atrapado que contrarrestan y finalmente superan las tres contribuciones favorables descritas. Este mecanismo de degradación, y no el aumento de la razón a/c efectiva, cuya variación total es de solo +0,022 unidades entre el control y CSFW-75, podría explicar la caída de resistencia en el rango alto de sustitución.

Estos resultados muestran la dualidad funcional del CSFW: su mineralogía cristalina y de alta densidad constituye una limitación cuando se utiliza como material cementicio suplementario (donde se requiere reactividad), pero un activo cuando se emplea como árido fino (donde dominan el empaquetamiento físico y la densidad), confirmando que el rol óptimo del material depende del contexto funcional.

Deben señalarse cuatro limitaciones del estudio: (i) no se evaluaron propiedades de durabilidad ni la lixiviación de metales pesados (Fe, Cu), aspecto que constituye un requisito previo para aplicación en obra dado el contenido de 32,35% Fe y 0,53% Cu; (ii) no se realizó caracterización por SEM-EDS, por lo que el mecanismo de densificación se sustenta en evidencia macroscópica indirecta; (iii) no se ensayaron niveles intermedios entre 25 y 50% de sustitución, de modo que el nivel de 25% corresponde al mejor desempeño entre los niveles evaluados y no necesariamente al óptimo global, el cual podría situarse en 30, 35 o 40%; (iv) la sustitución en masa impide desacoplar la contribución del aumento de la razón volumétrica pasta/árido respecto de la del efecto de densificación del CSFW. Las prioridades de investigación futura incluyen un diseño experimental con sustitución en base volumétrica y niveles intermedios de 30, 35 y 40%, ensayos de lixiviación, análisis SEM-EDS de la interfaz pasta-árido CSFW, amasado mecanizado y ensayos de durabilidad en condiciones representativas de la Región de Atacama.

Conclusiones

Sobre la base de los resultados experimentales y del análisis estadístico, se concluye que:

1. El CSFW de la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI es un material predominantemente cristalino, con densidad real seca de 3.757 kg/m^3 y granulometría compatible con el uso como árido fino en morteros de cemento sin molienda adicional.
2. La consistencia del mortero fresco disminuyó de forma monótona con el contenido de CSFW, manteniéndose dentro del requisito de NCh 2260 ($60 \pm 20 \text{ mm}$) hasta una sustitución del 20% y resultando impracticable al 75%. La reducción se explica principalmente por el aumento del área superficial específica y de la angulosidad del árido, y no por el balance de agua libre, cuya variación es marginal (+3,8%).
3. La densidad del mortero endurecido aumentó con el contenido de CSFW, alcanzando 2.452 kg/m^3 a 90 días para CSFW-75, frente a 2.207 kg/m^3 del control.
4. La mezcla CSFW-25 produjo la mayor resistencia a compresión entre los ocho niveles evaluados: $31,50 \pm 0,81 \text{ MPa}$ (7 días), $44,17 \pm 0,83 \text{ MPa}$ (28 días) y $49,10 \pm 1,18 \text{ MPa}$ (90 días). El incremento a 28 días (+22,9% respecto al control) es estadísticamente significativo tanto bajo la prueba de Tukey HSD como bajo la prueba robusta de Games-Howell ($p < 0,001$). La resistencia a flexión siguió la misma tendencia: $7,89 \pm 0,35 \text{ MPa}$ a 28 días (+7,6%).
5. Dado que no se ensayaron niveles de sustitución intermedios entre 25 y 50%, el valor de 25% corresponde al mejor desempeño observado dentro del rango evaluado y no puede afirmarse que constituya el óptimo global.
6. El mejor nivel de sustitución de CSFW como árido fino identificado en este estudio (25%) es inferior al rango 40–50% reportado para escoria de cobre (CS) sin procesar, y se atribuye a la distribución granulométrica más fina y a la mayor angulosidad del CSFW, las cuales desplazan el umbral de degradación de la trabajabilidad, y con ello el de la resistencia, hacia niveles de sustitución menores.
7. La mejora de resistencia se atribuye a mecanismos de naturaleza física y no a reactividad puzolánica, consistentemente con la mineralogía cristalina determinada por XRD. Dichos mecanismos incluyen el aumento de la



razón volumétrica pasta/árido inducido por la sustitución en masa (+8,8% en CSFW-25), la densificación del esqueleto granular y el llenado de vacíos en la ITZ. El diseño experimental empleado no permite cuantificar la contribución individual de cada mecanismo, lo que requiere un estudio complementario con sustitución en base volumétrica.

8. Se recomienda el uso de CSFW como reemplazo de árido fino en morteros de cemento de uso no estructural hasta un 25% de sustitución en masa (equivalente a 18,4% en volumen), condicionado a la verificación futura de la seguridad ambiental mediante ensayos de lixiviación y a la verificación microestructural del mecanismo de densificación mediante SEM-EDS. Estos resultados contribuyen a una línea de investigación más amplia sobre la valorización de residuos mineros de la Región de Atacama para la producción de materiales alternativos de construcción de baja huella de carbono.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), Planta Manuel Antonio Matta de Copiapó, por el suministro del material CSFW utilizado en este estudio.

Referencias

Abdalla, T.A. y Alahmari, T.S. (2024). Mechanical strength and microstructure properties of concrete incorporating copper slag as fine aggregate: A state-of-the-art review. *Advances in Civil Engineering* 2024, 4389616

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

Al-Jabri, K.S., Al-Saidy, A.H. y 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

Cendoya, P. (2009). Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 17(1), 85–94

Cochilco (2019). Producción de cobre en Chile 2018. Comisión Chilena del Cobre, Santiago, Chile

Herrera, C. (2018). Evaluación de circuitos de flotación de escoria de cobre en Planta Manuel Antonio Matta. Memoria de título, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

INN (1967). NCh 158. Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1968). NCh 148. Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1977). NCh 1223. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menor que 0,080 mm. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1982). NCh 1498. Hormigón – Agua de amasado – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1996). NCh 2257/3. Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 3: Método del cono de 15 cm. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1996). NCh 2260. Cementos – Arena normal para morteros de cemento – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2008). NCh 1116. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2009). NCh 165. Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2009). NCh 1037. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2009). NCh 1239. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real, neta y la absorción de agua de las arenas. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2010). NCh 2261. Cementos – Determinación de la resistencia a la compresión. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2013). NCh 163. Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile



Nazer, A., Pavez, O. y Toledo, I. (2013). Effect of type of cement on the mechanical strength of copper slag mortars. *REM. Revista Escola de Minas* 66(1), 85–90

Nazer, A., Payá, J., Borrachero, M.V. y Monzó, J. (2016). Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices. *Journal of Environmental Management* 167, 115–123

Nazer, A., Pavez, O. y Flores, H. (2025). Uso de relaves de flotación de escorias de cobre en hormigón. *Obras y Proyectos* 38, 27–34

Olave Arévalo, E.S. (2020). Estudio de la incorporación de relaves de flotación de escoria de cobre como árido fino en morteros de cemento. Memoria de título, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

Panda, S., Sarkar, P. y Davis, R. (2022). Microstructural characterization of ITZ in copper slag concrete composite. *Journal of Materials in Civil Engineering* 34(8), 04022149

Pradena-Miquel, M., Cendoya-Hernández, P. y Borkowsky-Opazo, A. (2019). Factibilidad técnica del uso de escorias de cobre como reemplazo de arena en morteros de pega de muros de albañilería. *Tecnología en Marcha* 32(2), 100–111

Sharma, R. y Khan, R.A. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production* 151, 179–192

Wang, R., Shi, Q., Li, Y., Cao, Z. y 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