

Potencial de utilización de relaves de cobre como agregado fino en mortero de cemento

María Gutierrez-Senepa¹, René Gómez-Puigpinos², Adolfo Alcayaga-Restelli³, Siva Avudaiappan⁴, Cristian Canales-Cárdenas⁵, Fernando Betancourt-Cerda⁶

¹Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile. Email: mariavgutierrez@udec.cl

²Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile. Email: regomez@udec.cl

³Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile. Email: aalcayagarestelli@gmail.com

⁴Departamento de Ciencias de la Construcción, Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile. Email: s.avudaiappan@utem.cl

⁵Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Email: cristcanales@udec.cl

⁶Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile. Email: fbetancourt@udec.cl

Resumen

El cobre es uno de los metales más utilizados en la sociedad. Debido a sus propiedades únicas, el cobre es esencial para varios sectores económicos, incluyendo infraestructura, cableado, plomería, transporte y equipos eléctricos y electrónicos tanto de consumo como industriales. La minería del cobre es una de las industrias mineras más importantes del mundo; la producción en 2023 fue de aproximadamente 22,52 millones de toneladas. Sin embargo, la industria minera genera enormes volúmenes de desechos. Los relaves mineros, también conocidos como residuos de procesamiento, son subproductos resultantes de la extracción y tratamiento de minerales, careciendo de valor económico y siendo desechados en vertederos o presas de relaves. Estos materiales, compuestos principalmente de roca triturada y residuos de plantas de concentración, representan desafíos ambientales significativos debido a su potencial impacto negativo en los ecosistemas circundantes. Sin embargo, en años recientes, se ha explorado activamente el potencial de los relaves mineros como materia prima alternativa en diversas aplicaciones industriales. Reemplazar el cemento y los agregados naturales con subproductos y desechos de otras industrias es una posible forma de lograr este objetivo. Una de estas aplicaciones es su utilización en la fabricación de morteros de cemento. Al incorporar relaves de cobre en la mezcla de mortero de cemento, se pueden obtener materiales de construcción con propiedades mejoradas, al tiempo que se reduce la cantidad de desechos mineros que requieren disposición. Este enfoque no solo ofrece una solución sostenible para la gestión de desechos mineros, sino que también puede contribuir a reducir la huella ambiental de la industria de la construcción. Este estudio tiene como objetivo añadir valor a los relaves de minería de cobre utilizándolos como sustitutos de agregados finos en la fabricación de morteros de cemento. Los estudios realizados sobre la resistencia de los especímenes, al reemplazar hasta un 30% de los agregados finos con relaves, indican un aumento general en la resistencia. Sin embargo, se observa una tendencia a la disminución de la resistencia con reemplazos más altos. El estudio mineralógico de los relaves revela la presencia de cuarzo como el mineral principal, seguido de micas. Los resultados de la prueba de flujo de los morteros muestran una disminución en la trabajabilidad a medida que aumenta el contenido de relaves como reemplazo del agregado fino.

Palabras clave: Relaves mineros, mortero, reemplazo de agregado fino, resistencia del mortero.

Abstract

Copper is one of the most widely used metals in society. Due to its unique properties copper is essential for several economic sectors, including infrastructure, wiring, plumbing, transportation, and consumer and industrial electrical and electronic equipment. Copper mine is one of the most important mining industries in the world, the production in 2023 was about 22.52 million tons. The mining industry does, however, produce enormous volumes of waste. The mining tailings, also known as processing tailings, are by-products resulting from the extraction and treatment of minerals, lacking economic value and disposed of in landfills or tailings dams. These materials, primarily composed of ground rock and beneficiation plant residues, pose significant environmental challenges due to their potential negative impact on surrounding ecosystems. However, in recent years, the potential of mining

tailings as an alternative raw material in various industrial applications has been actively explored. Replacing cement and natural aggregates with byproducts and waste from other industries is one possible way of achieving this goal. One of these applications is their utilization in the manufacturing of cement mortars. By incorporating copper tailings into the cement mortar mix, construction materials with improved properties can be obtained, while simultaneously reducing the amount of mining waste requiring disposal. This approach not only offers a sustainable solution for mining waste management but also can contribute to reducing the environmental footprint of the construction industry. This study aims to add value to copper mining tailings by using them as substitutes for fine aggregate in cement mortar manufacturing. The studies conducted on the strength of specimens, when replacing up to 30% of tailings with sand, indicate a general increase in strength. However, there is an observed tendency for strength to decrease with higher replacements. The mineralogical study of the tailings reveals the presence of quartz as the major mineral, followed by micas. The Flow test results of the mortars show a decrease in workability as the tailings content increases as a replacement for fine aggregate.

Keywords: Mine tailings, mortar, fine aggregate replacement, mortar strength.

1. Introducción

Las repercusiones ambientales adversas derivadas del sector minero y de la industria de producción de concreto han suscitado una creciente preocupación en la comunidad. Específicamente, no se puede subestimar el papel fundamental de la producción de cemento en la fabricación de concreto como un contribuyente sustancial al cambio climático. Este sector es responsable de aproximadamente el 8.6% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) [8], subrayando su profundo impacto ambiental.

Simultáneamente, la industria minera como entidad integral emerge como un considerable contribuyente global a las emisiones de CO₂, constituyendo un estimado del 10% de las emisiones totales [2]. Esta proporción significativa se debe en gran medida a la generación prolífica de materiales de desecho durante el proceso de extracción de minerales, exacerbando así la carga ambiental.

Dentro del ámbito de la minería del cobre, es relevante destacar que solo entre el 20% y el 30% de la roca extraída tiene un valor económico inmediato [11], mientras que la porción residual, designada como "relaves", se categoriza como desecho y se destina posteriormente a repositorios de relaves en superficie. Esta subutilización de recursos y la consiguiente acumulación de desechos generan una presión ambiental aumentada, culminando en resultados potencialmente perjudiciales a largo plazo.

Desde el punto de vista de la composición química, el uso de relaves de minería de cobre para la fabricación de materiales derivados del concreto es una opción atractiva. Dependiendo de su origen específico, los relaves estarán compuestos por minerales con alta resistencia química y mecánica que pueden proporcionar fuerza y durabilidad al mortero y al concreto. Entre sus componentes principales se encuentran el cuarzo, silicatos y aluminosilicatos, que

son componentes comunes en los materiales derivados del cemento. Es importante resaltar la significativa presencia de cuarzo y micas en la composición. El cuarzo, conocido por su dureza, tiene el potencial de mejorar la resistencia del concreto. La inclusión de micas en mezclas de concreto está vinculada a una disminución en la resistencia a la compresión [5].

Las micas pueden ser más frágiles en comparación con el cuarzo y otros silicatos no lamelares presentes en los relaves de cobre debido a su estructura lamelar [14]. Esta estructura en capas está unida por interacciones intermoleculares débiles que le confieren una estructura cristalina suelta que tiende a separarse en láminas bajo estrés mecánico. Si estos tipos de minerales están presentes en los relaves en alta proporción, pueden afectar el rendimiento del mortero, haciéndolo más frágil. Gracias a esta propiedad, una alternativa para aprovechar mejor los relaves podría ser separar fracciones por tamaño de partícula y utilizar aquellas que son pobres en micas, que probablemente, debido a su fragilidad y baja resistencia mecánica, se encuentren en mayor proporción en las partículas más pequeñas de los relaves en su conjunto. Además, la presencia de micas conduce a un aumento en el consumo de agua dentro de la mezcla de concreto. A pesar de su hidrofobicidad, las micas pueden absorber agua entre sus capas, hinchándose y modificando sus propiedades físicas y mecánicas. Estos resultados subrayan el impacto perjudicial de las micas en el concreto, lo que resulta en una resistencia comprometida y una mayor absorción de agua.

Otro mineral interesante que se encuentra comúnmente en los relaves de minería de cobre es la plagioclase. La incorporación de agregados ricos en este mineral en las mezclas de concreto a menudo disminuye la trabajabilidad de la mezcla debido a una mayor porosidad [10]. El aumento en la resistencia a la compresión probablemente se debe a un incremento en el área superficial disponible para formar nuevas fases

cementicias durante la reacción de hidratación en el proceso de curado.

Otros componentes que suelen estar presentes en menores proporciones en los relaves de cobre chilenos son la pirita y la calcopirita que contienen azufre. Dependiendo de las condiciones ambientales, estos minerales podrían promover una reacción interna de ataque por sulfatos que afectaría negativamente la resistencia de los especímenes de mortero. Además, Dobiszewska y Beycioğlu 2020 [3] examinaron las propiedades físicas y la microestructura de concretos con la adición de polvo de basalto que contenía un alto contenido de plagioclasa como parte de sus agregados. Obtuvieron resultados similares a los de Petrounias [10].

En el caso de Chile, una nación sinónimo de una prominente industria minera, se genera un volumen anual de aproximadamente 537 millones de toneladas de relaves [11]. Lamentablemente, estos materiales residuales se acumulan sin ningún propósito definido ni una estrategia meticulosamente delineada para su gestión sostenible. Este creciente repositorio de relaves presenta así un desafío ambiental y económico multifacético, que requiere estrategias de mitigación sostenibles y adecuadas. Para abordar estos desafíos, este estudio lleva a cabo un análisis del potencial de uso de los relaves de cobre chilenos en la fabricación de mortero de cemento.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Se realizaron pruebas de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de dispersión de energía (EDS), difracción de rayos X (XRD) y fluorescencia de rayos X (XRF) en todos los materiales utilizados en la mezcla. Estas analíticas se llevaron a cabo con el propósito de obtener una caracterización detallada de estos materiales y comprender su influencia en la mezcla a través de su composición química.

2.1.1. Relave de cobre

Los relaves utilizados en este estudio se obtuvieron de una mina de cobre ubicada en la región norte de Chile. La mineralogía semicuantitativa de los relaves de cobre se determinó mediante análisis de difracción de rayos X (XRD). La Tabla 1 ilustra la composición mineralógica de los relaves, obtenida a través del análisis de difracción de rayos X (XRD).

Tabla 1. Composición mineralógica del relave de cobre chileno.

Mineralogía semicuantitativa (%)

Plagioclasas	Cuarzo	Micas	Calcopirita	Pirita	K Feldespatos	Cloritas
12.4	43.3	20.3	1.4	5.9	4.8	1.9

Se anticipa que los relaves de cobre podrían mejorar la resistencia del concreto. Además, los análisis de SEM, como se muestra en la Figura 1, demuestran que las partículas de los relaves de cobre tienen una forma angular debido al alto contenido de SiO₂ en forma de cuarzo. Esta angularidad se conoce por aumentar la resistencia del concreto en comparación con partículas más redondeadas, como las que se encuentran en la arena de río; sin embargo, también presenta algunas desventajas, ya que tiende a requerir dosis más altas de aditivos para superar los efectos negativos de su forma. También se pueden observar los agregados laminares de micas, cuya forma y propiedades afectan la resistencia del mortero.

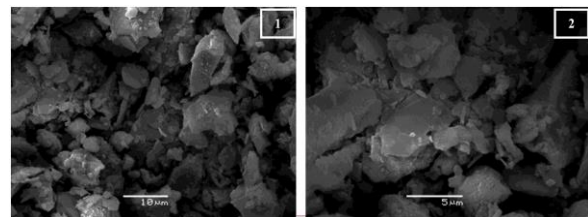


Figura 1. Imágenes SEM 1 y 2 del relave de cobre chileno.

2.1.2. Agregado fino (arena) y cemento

Se realizaron pruebas de caracterización similares para evaluar las propiedades de los agregados y el cemento comúnmente utilizados en la composición de una mezcla de mortero estándar.

La Tabla 2 muestra que el cemento está compuesto principalmente de hatrurita y cuarzo, mientras que el agregado fino está formado predominantemente por plagioclasa y piroxeno.

Tabla 2. Composición mineralógica del cemento y el agregado fino (arena) utilizado.

Mineralogía semicuantitativa (%)

Mate- rial	Plagioclasas	Piroxeno	Cuarzo	Olivino	Granate	Hatrurita	Akermanita
Ce- mento	10.2	-	14.5	-	-	68.7	6.7
Arena	64.9	13.0	11.8	8.5	1.7	-	-

En la Figura 2 se representa la morfología de los agregados finos, resaltando su angularidad e irregularidades entre las partículas.

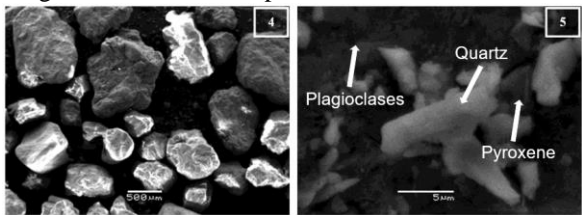


Figura 2. Imagen SEM 4 y 5 del agregado fino (arena).

Por otro lado, la Figura 3 ilustra la estructura del cemento, caracterizada por partículas más redondeadas y de menor tamaño en comparación con la arena.

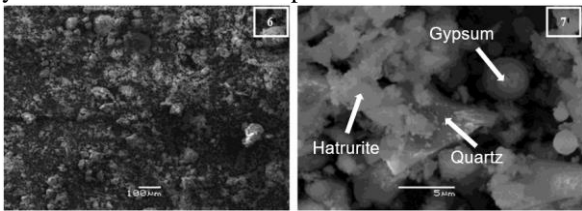


Figura 3. Imagen SEM 6 y 7 del cemento.

Las figuras 4 y 5 que se muestran a continuación, dan a conocer los patrones de difracción de rayos X obtenidos para el agregado fino (arena) y para el cemento. Se observa la presencia de cuarzo como fase mineral predominante tanto en la arena como el cemento, además de fases características del cemento como la hatrurita y algunos aluminosilicato de calcio.

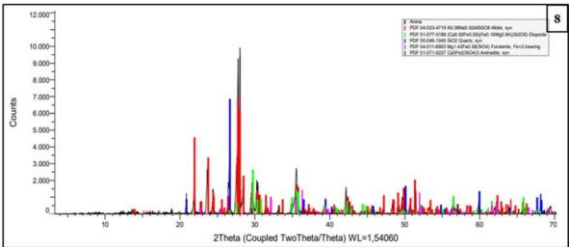


Figura 4. Patrón de difracción de rayos X (XRD) del

agregado fino (Rojo: albita, Azul: cuarzo, Verde: diópsido de calcio y hierro).

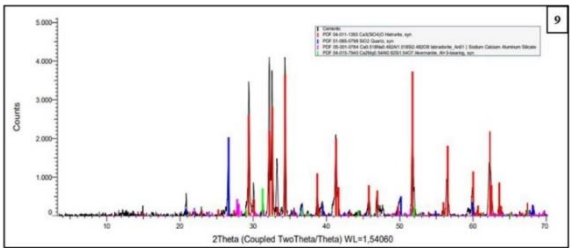


Figura 5. Patrón de difracción de rayos X (XRD) del cemento (Rojo: hatrurita, Azul: cuarzo, Rosa: labradorita y silicato de sodio, calcio y aluminio).

La Tabla 3 y la Figura 6 presentan los porcentajes de retención obtenidos de un análisis granulométrico de ambos tipos de agregados utilizados en la composición del mortero. Se observa que los relaves de cobre exhiben un mayor porcentaje de material fino en comparación con la arena. Esto sugiere que, al sustituir pequeñas cantidades de relave por arena, se podría mejorar la trabajabilidad y la resistencia del mortero [12].

Tabla 3. Distribución de tamaño de partículas de relaves de minería de cobre y agregado fino.

Tamaño del tamiz (mm).	Agregado fino retenido (%).	Relaves de cobre retenido (%).
1.18	0.00	0.00
0.85	4.08	16.72
0.6	16.08	10.21
0.3	69.00	42.67
0.15	9.07	19.28
0.075	1.09	8.90
<0.075	0.68	2.22

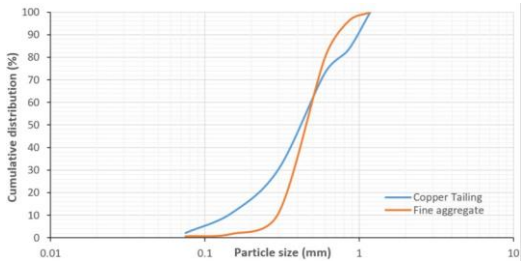


Figura 6. Distribución de tamaño de partículas del agregado fino y los relaves de cobre.

2.1.3. Proporciones de mezclas utilizadas

La Tabla 4 muestra la dosificación de las mezclas de mortero. En este estudio, la relación agua-cemento y la cantidad de cemento se mantuvieron constantes. Además, el tiempo de mezclado fue de 4 ± 0.02 minutos.

Tabla 4. Proporciones de la mezcla de mortero con relaves de cobre.

Mezclas	Control	10RS90	20RS80	30RS70	40RS60	50RS50
Relación agua/cemento	0.40	0.4	0.40	0.40	0.40	0.40
Cemento (kg/m ³)	975	975	975	975	975	975
Arena (kg/m ³)	1300	1170	1040	910	780	650
Relave de cobre (kg/m ³)	0	130	260	390	520	650

2.2. Métodos de ensayo

Los ensayos mecánicos realizados en estos morteros se llevaron a cabo de acuerdo con las especificaciones establecidas en la norma chilena NCh158. Esta norma estipula que las dimensiones de las muestras utilizadas en la prueba de flexión deben ser de $160 \times 40 \times 40$ mm³. Estas muestras son sometidas a una carga central con dos puntos de apoyo separados por 100 mm. La carga se aplica a una velocidad de 5 kg/s. La Figura 7 muestra algunas de las pruebas realizadas como parte de este estudio, demostrando el procedimiento llevado a cabo de acuerdo con la norma mencionada.

Las pruebas de compresión se llevaron a cabo siguiendo las directrices establecidas en la norma chilena NCh158. Esta norma especifica que las pruebas de compresión pueden realizarse utilizando un cubo con dimensiones de $50 \times 50 \times 50$ mm³ o con la mitad más corta de las muestras obtenidas después de la prueba de flexión, como se ilustra en la Figura 8. La tasa de carga durante la prueba debe estar dentro del rango de 10 a 20 kg/cm²/s, de acuerdo con las disposiciones de la norma mencionada.

3. Resultados y análisis

3.1. Resistencia mecánica

Para el análisis de la resistencia mecánica, se prepararon un total de tres muestras prismáticas y tres muestras cúbicas para cada mezcla con el fin de obtener datos representativos. En consecuencia, se realizaron tres pruebas de flexión, tres pruebas de compresión cúbica y tres pruebas de compresión después de la carga de flexión para cada mezcla.

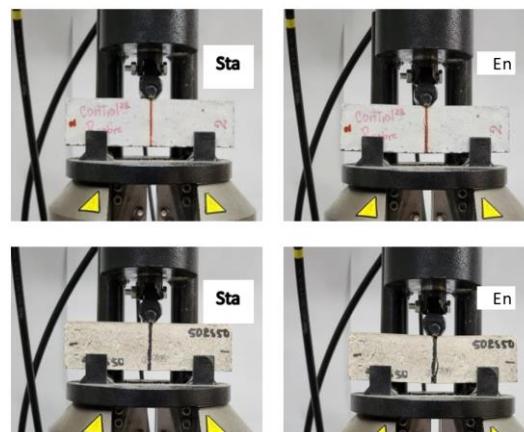


Figura 7. Prueba de flexión de muestras mortero de cemento al inicio (izquierda) y al final del experimento (derecha).

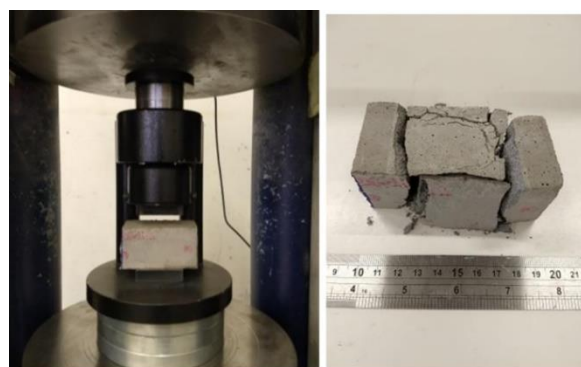


Figura 8. Prueba de compresión de muestras mortero antes y después de la prueba.

Las mezclas utilizadas en este estudio incluyen una mezcla de control (sin relaves) y cinco mezclas con diferentes porcentajes de relaves como reemplazo del agregado fino: 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de relaves de cobre, denominadas 10RS90, 20RS80, 30RS70, 40RS60 y 50RS50, respectivamente.

La incorporación de relaves de cobre en la mezcla de mortero resultó inicialmente en un aumento en la resistencia a la compresión; sin embargo, este aumento disminuyó a medida que se incrementaba la sustitución del agregado fino. Esta tendencia se observó tanto en las pruebas de compresión después de la carga de flexión (Figura 9) como en las pruebas de compresión

cúbica (Figura 10). Este hallazgo se alinea con un estudio previo [12].

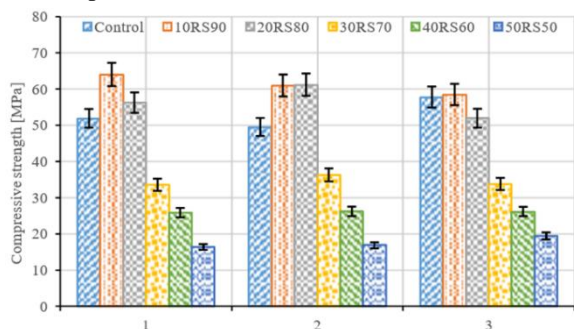


Figura 9. Resultados de resistencia a la compresión después de haber realizado la resistencia a la flexión del mortero con relaves de minería de cobre (28 días de curado).

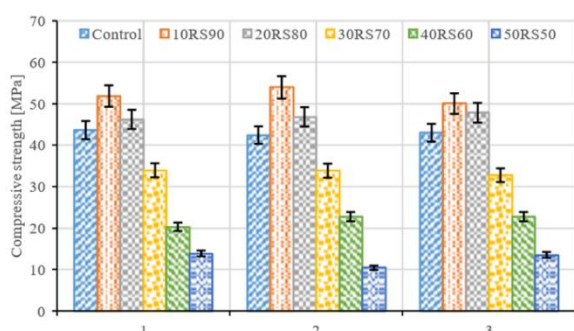


Figura 10. Resultados de resistencia a la compresión del mortero con relaves de minería de cobre (28 días de curado).

En las pruebas de flexión (Figura 11), se observa un comportamiento similar al de las pruebas de compresión. A porcentajes de sustitución más bajos, hay un aumento en la resistencia; sin embargo, esta tendencia comienza a disminuir a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo. A diferencia de las pruebas de compresión, la disminución de la resistencia es mucho más pronunciada en porcentajes más altos, como se evidencia en la Figura 11.

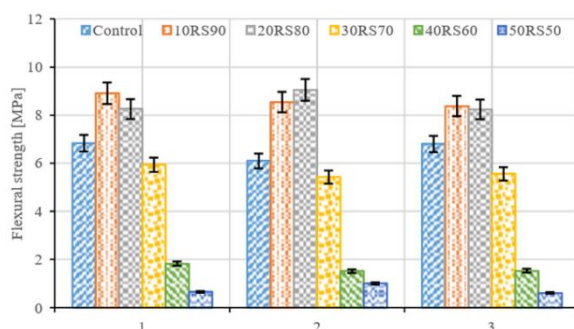


Figura 11. Resultados de resistencia a la flexión del mortero con relaves de minería de cobre (28 días de curado).

3.2. Absorción de agua, densidad y porosidad total.

La densidad, la absorción de agua y porosidad total se calcularon de acuerdo con la norma ASTM C 39/C39M-05e2. La densidad del mortero muestra una correlación directa con la resistencia a la compresión, ya que densidades más altas corresponden a una mayor resistencia. La Tabla 5 ilustra que, inicialmente, la densidad de los morteros aumenta con porcentajes de reemplazo más bajos. Sin embargo, a medida que estos porcentajes aumentan, la densidad tiende a disminuir.

A medida que se incrementa la proporción de relaves de cobre en la mezcla, se observa un aumento correspondiente en el contenido total de vacíos y en la capacidad de absorción de agua. Este fenómeno se atribuye al aumento de partículas finas, que, en cantidades elevadas, afectan negativamente la trabajabilidad de la mezcla, lo que lleva a una mayor retención de burbujas de aire, aumentando no solo el contenido total de vacíos, sino también el tamaño de los mismos [1,6]. Además, la presencia de silicatos laminares como las micas en los relaves puede afectar la mezcla, aumentando la absorción de agua.







Tabla 5. Propiedades del mortero con relaves de cobre (Rilem).

Mezcla	Control	10RS90	20RS80	30RS70	40RS60	50RS50
Densidad neta (g/cm³)	1.984 ± 0.025	2.043 ± 0.020	1.985 ± 0.022	1.895 ± 0.014	1.842 ± 0.013	1.801 ± 0.023
Densidad aparente (g/cm³)	2.879 ± 0.037	2.740 ± 0.010	2.734 ± 0.052	2.696 ± 0.011	2.752 ± 0.041	2.633 ± 0.03
Porosidad total (kg/m³)	25.36 ± 0.704	17.539 ± 0.687	21.629 ± 2.357	25.354 ± 2.051	32.185 ± 2.133	31.832 ± 0.608
Absorción de agua (%)	9.659 ± 0.218	6.841 ± 0.310	8.584 ± 0.835	10.384 ± 0.885	13.241 ± 0.794	13.752 ± 0.177

Dado que la presencia de contenido fino afecta negativamente la trabajabilidad de la mezcla, esto también se observa durante la prueba de flujo. Los resultados de la prueba de flujo se detallan en la Tabla 6. Aquí se observa que, a medida que aumenta la proporción de relaves en la mezcla, la trabajabilidad tiende a disminuir significativamente. Esta reducción se evidencia por una disminución del flujo original de

79.44 mm en comparación con la mezcla que contiene la mayor proporción de relaves reemplazando a la arena.

Tabla 6. Propiedades del flujo (trabajabilidad) de las mezclas mortero con relaves de cobre incorporados.

Mezclas	Flujo (mm)	Imagen
Control	119.75	
10RS90	102.40	
20RS80	98.46	
30RS70	90.98	
40RS60	62.76	
50RS50	40.31	

3.3. Análisis microestructural

La Figura 12 muestra la influencia de la adición de relaves a nivel microestructural. En la muestra de control, se observan partículas bien formadas, características de las fases cementosas hidratadas (Fig. 12 A y B). Al agregar porcentajes de reemplazo del 10 y 20% (Fig. 12 C, D, E y F), se pueden ver partículas más pequeñas, que, con un área superficial específica mayor, contribuyen a aumentar la resistencia del mortero tanto en las pruebas de compresión como en las de flexión. Sin embargo, al utilizar un porcentaje de

reemplazo más alto del 30%, se observan aglomeraciones significativas de material, lo que genera vacíos que impactan negativamente la resistencia de las muestras. También se puede observar que, en las muestras con reemplazos del 30, 40 y 50% (Figura 12 I, J, K y L) las fases de silicatos laminares están presentes en una proporción significativa, lo que se refleja en una menor resistencia mecánica para esas muestras.

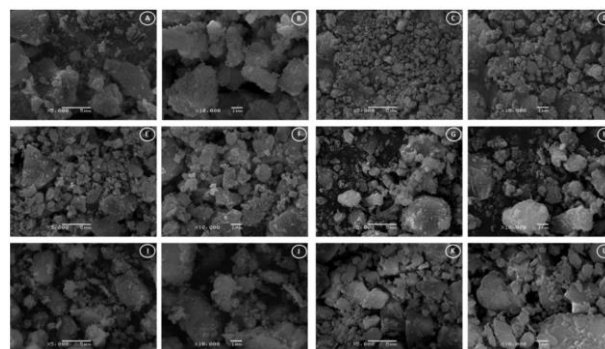


Figura 12. Imagen SEM del mortero con relave de cobre: (A-B-izquierda superior) Control, (C-D-derecha superior) 10RS90, (E-F-centro izquierda) 20RS80, (G-H- centro derecha) 30RS70, (I-J-izquierda inferior) 40RS60, (K-L derecha inferior) 50RS50.

En la Tabla 7, el análisis elemental revela variaciones notables en los contenidos elementales. Se observa una disminución significativa de alrededor del 10% en el contenido de oxígeno, mientras que el carbono experimenta un aumento considerable. Este incremento podría estar asociado con la presencia de carbono introducido durante el proceso de flotación y espesamiento de los relaves, que implica el uso de reactivos orgánicos. La presencia de relaves de agentes de flotación en los relaves podría afectar su desempeño como reemplazo de la arena en la preparación del mortero. Estas sustancias son normalmente hidrofóbicas, por lo que podrían limitar la reacción de hidratación al estar en la mezcla junto con el cemento y el agregado fino. Las posibles consecuencias de la presencia de este interferente podrían ser una disminución en la resistencia del mortero preparado con adiciones significativas de relaves o la necesidad de un tiempo de fraguado y/o curado más prolongado.

Se esperaba un aumento en el contenido de sílice, ya que los relaves de cobre suelen contener una gran cantidad de este elemento (Ma et al. 2018). Sin embargo, se observa que el contenido de sílice se mantiene relativamente similar e incluso disminuye ligeramente. Esto se debe a la composición multicomponente de los relaves mineros. Aunque su componente principal es SiO_2 presente como cuarzo, este material se diluye en una mezcla de diferentes fases minerales residuales del proceso de flotación.

4. Discusión

Tabla 7. Contenido de elementos en cada mortero (porcentaje atómico %).

Elemento	Control	10RS90	20RS80	30RS70	40RS60	50RS50
O	60.37	53.81	51.69	50.13	52.68	51.31
C	28.97	36.57	41.64	44.06	38.48	42.81
Si	4.03	3.87	2.67	2.37	3.47	2.32
Ca	2.84	2.54	1.56	1.27	1.91	1.31
Al	1.87	1.75	1.42	1.05	1.63	1.03
Na	0.58	0.45	0.26	0.31	0.46	0.21
Mg	0.52	0.46	0.37	0.34	0.30	0.28
Fe	0.47	0.36	0.25	0.20	0.39	0.25

La investigación sobre la utilización de relaves de cobre como reemplazo de la arena en morteros tiene una significativa relevancia en múltiples aspectos. En primer lugar, aborda la necesidad de una utilización sostenible de recursos, especialmente en el contexto de la minería del cobre, donde solo una fracción del valor económico del mineral extraído se aprovecha. Al explorar la viabilidad de incorporar estos relaves en formulaciones de mortero, la investigación contribuye a un enfoque más sostenible y ambientalmente responsable, al reducir relaves y potencialmente crear una aplicación innovadora para materiales que de otro modo serían desechados.

En segundo lugar, ofrece el potencial de reducir el impacto ambiental asociado con la extracción de arena y las actividades mineras. La minería y la producción de concreto son conocidas por sus efectos adversos en el medio ambiente, incluidas las emisiones de dióxido de carbono. Utilizar relaves de cobre en morteros podría mitigar el daño ecológico causado por la extracción de arena en lechos de ríos y áreas costeras.

Estos datos también muestran una disminución en el contenido porcentual de calcio, silicio y aluminio, lo que puede estar relacionado con un menor número de fases cementosas que proporcionan resistencia mecánica al mortero. El aumento en la proporción de relaves en la mezcla incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión en las muestras estudiadas, pero solo hasta un 10% de reemplazo. Esto se puede atribuir al contenido de fases cristalinas como el cuarzo y la plagioclasa. Sin embargo, un porcentaje de reemplazo más alto también aumentará el contenido de silicatos laminares quebradizos, como las micas, junto con los relaves de surfactantes que quedan del proceso de flotación, los cuales competirán por el agua con el Clínker.

Como se puede ver en la Tabla 5, el porcentaje de absorción de agua en las mezclas que superan el 20% de reemplazo alcanza valores más altos que el del control sin reemplazo. El porcentaje de absorción está relacionado con el rendimiento mecánico del material, ya que un cambio en la relación agua-cemento puede tener consecuencias negativas para la formación de fases cementosas durante la reacción de hidratación en el proceso de curado. Sin embargo, el contenido químico de los relaves está influenciado por diversos factores, como la ubicación de la extracción del mineral y los procesos involucrados en su extracción. A pesar de estas diferencias químicas, se observa que la variación en el comportamiento mecánico es insignificante [13].

En tercer lugar, las implicaciones económicas son significativas. Si la investigación demuestra que los relaves de cobre pueden sustituir eficazmente a la arena en la producción de mortero, podría resultar en ahorros de costos para proyectos de construcción, convirtiéndose en una alternativa económicamente viable y atractiva tanto para la industria de la construcción como para las empresas mineras.

Por último, esta investigación se alinea con el movimiento más amplio hacia prácticas de construcción sostenibles. Contribuye a la promoción de técnicas y materiales de construcción ecológicos, que son cada vez más relevantes en la industria moderna de la construcción. En esencia, investigar el uso de relaves de cobre en morteros tiene el potencial de abordar preocupaciones ambientales, económicas y de sostenibilidad, impulsando la innovación y el progreso en el sector de la construcción.

5. Conclusiones

El estudio y análisis exhaustivo de las propiedades del mortero al introducir relaves de cobre ha revelado varios hallazgos significativos. A lo largo de esta investigación, se exploraron los efectos de aumentar la proporción de relaves en la composición del mortero, así como su comportamiento físico y químico. Se observaron cambios notables en la trabajabilidad, densidad y resistencia mecánica del material en relación con la cantidad de relaves. Estos resultados, junto con el análisis detallado de la composición elemental de los relaves, proporcionan una visión

integral de los impactos de este componente en las propiedades del mortero.

Dentro de este contexto más amplio, se extraen conclusiones clave que iluminan la relación entre la composición de los relaves de cobre y las propiedades finales del mortero. La influencia de los relaves de cobre en las propiedades del mortero se hace evidente a medida que su proporción en la mezcla aumenta, lo que resulta en un impacto adverso en sus características. Esta relación se demuestra a través de una correlación directa entre el aumento de los relaves y la reducción de la resistencia mecánica, así como un efecto negativo tanto en la trabajabilidad como en la densidad del mortero.

La presencia de partículas finas en los relaves de cobre afecta significativamente la trabajabilidad de la mezcla, como lo evidencia la disminución del flujo original. Además, se observan cambios notables en la composición elemental del mortero, con una disminución en el contenido de oxígeno y variaciones en otros elementos, como el carbono y la sílice, que podrían atribuirse a los procesos de extracción y tratamiento mineral.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) que financió este artículo a través de su proyecto Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef), ID23I10183, que se ejecuta en la Universidad de Concepción, Concepción, Chile. R. Gómez agradece FONDECYT Regular 1230749.

7. Referencias

- [1] Arunachalam, K. P., Avudaiappan, S., Maureira, N., Da Costa Garcia Filho, F., Monteiro, S. N., Bista, I. D., & de Azevedo, A. R. G. (2023). Innovative use of copper mine tailing as an additive in cement mortar. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 25, pp. 2261–2274). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.066>.
- [2] Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H., & Edraki, M. (2020). Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. In *Nature Geoscience* (Vol. 13, Issue 2, pp. 100–104). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>.
- [3] Dobiszewska, M., & Beycioğlu, A. (2020). Physical properties and microstructure of concrete with waste basalt powder addition. *Materials*, 13(16), 3503. <https://doi.org/10.3390/ma13163503>.
- [4] Donza, H., Cabrera, O., & Irassar, E. F. (2002). High-strength concrete with different fine aggregate. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 32, Issue 11, pp. 1755–1761). Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00860-8](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00860-8).
- [5] Leemann, A., Lothenbach, B., Münch, B., Campbell, T., & Dunlop, P. (2023). The “mica crisis” in Donegal, Ireland—A case of internal sulfate attack?. *Cement and Concrete Research*, 168, 107149.
- [6] Lyu, K., Garboczi, E. J., Gao, Y., Miao, C., & Liu, X. (2022). Relationship between fine aggregate size and the air void system of six mortars: I. Air void content and diameter distribution. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 131, p. 104599). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104599>.
- [7] Ma, G., Li, Z., & Wang, L. (2018). Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. In *Construction and Building Materials* (Vol. 162, pp. 613–627). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051>.
- [8] Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2016). Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. In *Environmental Research Letters* (Vol. 11, Issue 7, p. 074029). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>.
- [9] Othman, R., Jaya, R. P., Muthusamy, K., Sulaiman, M., Duraisamy, Y., Abdullah, M. M. A. B., Przybył, A., Sochacki, W., Skrzypczak, T., Vizureanu, P., & Sandu, A. V. (2021). Relation between Density and Compressive Strength of Foamed Concrete. In *Materials* (Vol. 14, Issue 11, p. 2967). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14112967>.
- [10] Petrounias, P., Giannakopoulou, P., Rogkala, A., Stamatis, P., Lampropoulou, P., Tsikouras, B., & Hatzipanagiotou, K. (2018). The Effect of Petrographic Characteristics and Physico-Mechanical Properties of Aggregates on the Quality of Concrete. In *Minerals* (Vol. 8, Issue 12, p. 577). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/min8120577>.
- [11] SERNAGEOMIN. (2016). Relaves. Sernageomin.cl
- [12] Vandhiyan, R., Vijay, T. J., & Manoj, M. K. (2021). Effect of Fine Aggregate Properties on Cement Mortar Strength. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 37, pp. 2019–2026). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.498>.
- [13] Wang, C., Harbottle, D., Liu, Q., & Xu, Z. (2014). Current state of fine mineral tailings treatment: A

critical review on theory and practice. In *Minerals Engineering* (Vol. 58, pp. 113–131). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.018>.

- [14] White, S. (2001). Textural and microstructural evidence for semi-brittle flow in natural fault rocks with varied mica contents. *International Journal of Earth Sciences*, 90, 14-27.