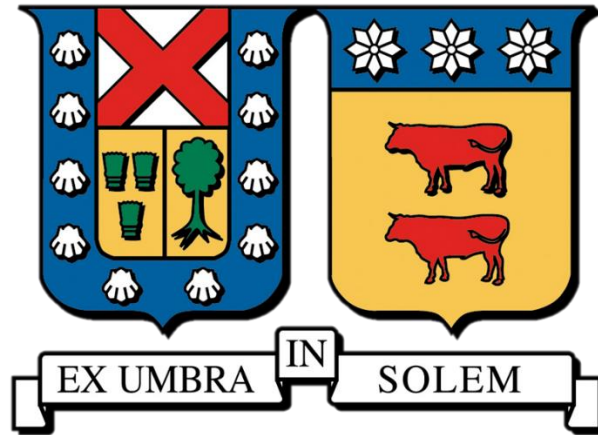


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y MATERIALES**



**HORMIGÓN CON RELAVE Y FIBRAS DE ACERO: ANÁLISIS DE RESISTENCIA
Y RIGIDEZ PARA APLICACIONES DE REFUERZO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CRISTOPHER ALEJANDRO MONSALVE HERNÁNDEZ

POFESORA GUÍA:

Dra. María Belén Barraza Sandoval

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

Dr. René Gomes Puigpinos

SANTIAGO DE CHILE

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: HORMIGÓN CON RELAVE Y FIBRAS DE ACERO: ANÁLISIS DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ PARA APLICACIONES DE REFUERZO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA.

Nombre del candidato(a): Christopher Alejandro Monsalve Hernandez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas / Licenciado en Ciencias de la Ingeniería de Minas

Campus: Santiago San Joaquin; **Departamento:** Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, María Belén Barraza Sandoval, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 25/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/06/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedicado a mi madre y mi padre.

Agradecimientos

Gracias a todas las personas que me apoyaron en este proceso. A los amigos que hice en el camino. A los docentes y funcionarios de la Universidad Técnica Federico Santa María que día a día se esfuerzan para crear una casa de estudio especial. A la Dra. Belén Barraza por su consejos y apoyo y al Dr. Rene Gómez por su guía llena de sabiduría. Gracias, mamá y papá, ustedes permitieron que esto fuese posible.

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen.....	1
2. Introducción.....	2
2.1. Planteamiento del problema	2
2.2. Hipótesis	5
2.3. Objetivos	5
2.3.1 Objetivo General.....	5
2.3.2 Objetivos específicos	5
2.4. Alcances	6
3. Antecedentes	7
3.1 Mecanismos de refuerzo en minería subterránea	7
3.2 Estudio de parámetros mecánicos relevantes	8
4. Metodología experimental.....	11
4.1 Campaña experimental.....	11
4.2 Medición de parámetros clave.....	12
4.3 Materiales	12
4.4 Proporciones de la mezcla.....	15
4.5 Construcción de muestras.....	15
4.6 Curado de Muestras	16
4.7 Acondicionamiento de muestras.....	17
4.8 Ensayo de compresión uniaxial	17
5. Resultados y discusiones.....	19
5.1 Resistencia a la compresión uniaxial	19
5.1.1 Efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión	21
5.1.2 Efecto del relave en la resistencia a la compresión.....	22
5.1.3 Efecto de las fibras de acero en la resistencia a la compresión	23
5.2 Módulo de deformación	23
5.2.1 Efecto de las fibras de acero en el módulo de deformación	25
5.3 Variabilidad de los resultados	26
5.4 Viabilidad económica	28
5.5 Limitaciones metodológicas	33
6. Conclusiones y recomendaciones	34

7. Referencias.....	35
8. Anexos.....	39
8.1. Anexos 1: Resultados.....	39
8.2. Anexos 2: Suposiciones	41

Índice de Tablas

Tabla 1: Límites granulométricos para áridos en hormigón según norma NCh163 (Árido fino, grueso y total).	13
Tabla 2: Dosificación de mezclas de hormigón: Composición porcentual de cemento, agua, áridos, relave y fibras de acero.....	15
Tabla 3: Parámetros de ensayo de compresión uniaxial según Guía Chilena del Hormigón Proyectado (velocidad, carga inicial/máxima).	18
Tabla 4: Costos de mecanismo de refuerzo shotcrete.	31
Tabla 5: Costos de mecanismo de refuerzo shotcrete con relave.	31
Tabla 6: Costos de mecanismo de refuerzo shotcrete con relave reforzado con fibras de acero. .	32
Tabla 7: Datos brutos de ensayos: Esfuerzo, módulo de deformación y área ensayada por muestra (identificación R0FA00C007E1 a R1FA12C100E3).....	39
Tabla 8: Resultados de resistencia a la compresión uniaxial y módulo de deformación por tipo de muestra y tiempo de curado (7-100 días).	40

Índice de Figuras

Figura 1: Usos del cobre en la producción de energías renovables (International Copper association, 2023).....	2
Figura 2: a) Evolución de la producción y ley promedio de cobre en Chile (2000-2023) (Comisión Chilena del Cobre, 2025). b) Mineral de ganga asociado a la producción de cobre en Chile (2000-2023) (Comisión Chilena del Cobre, 2024).	3
Figura 3: Depósito de relave en torta abandonado en Andacollo, Región de Coquimbo, Chile (El andacollino, 2021).....	4
Figura 4: Sistemas de soporte superficial en minería subterránea (Rahimi et al., 2020).....	7
Figura 5: Curva esfuerzo-deformación registrada en el sistema Advantest 9.	9
Figura 6: Proceso de hidratación, fraguado y curado en el hormigón.	10
Figura 7: Composición y proceso de fabricación del cemento Transex Plus.	13
Figura 8: Granulometría y características de áridos marca Áridos Figueroa.	13
Figura 9: Curva granulométrica de áridos para hormigón (Norma NCh163).	14
Figura 10: Fibras de acero DRAMIX 45/50BL.	14
Figura 11: Esquema del equipo de mezcla para preparación de muestras de hormigón.....	16
Figura 12: Proceso de curado por inmersión en agua saturada de cal (Norma ASTM C192).	17
Figura 13: Pulidora circular Minitech 265 utilizada para acondicionar muestras.	17
Figura 14: Configuración de equipos utilizada para el ensayo de compresión uniaxial, en donde: a) Prensa, b) Sistema servo-hidráulico y c) sensor LVDT.	18
Figura 15: Interfaz del software Advantest 9 para control de ensayos de compresión.	18
Figura 16: Resistencia a la compresión uniaxial del hormigón en función del tiempo de curado.	19
Figura 17: Comparación de la resistencia a la compresión uniaxial por tipo de muestra.	21
Figura 18: Módulo de deformación del hormigón en función del tiempo de curado.	24
Figura 19: Relación entre el módulo de deformación y la concentración de fibras de acero.....	26

Capítulo 1

1. Resumen

La creciente generación de residuos mineros y los desafíos de estabilidad en excavaciones profundas han impulsado el análisis de soluciones sostenibles. Esta investigación evalúa el comportamiento de parámetros mecánicos para aplicaciones de hormigón modificado con relave de cobre (8% de sustitución) y reforzado con fibras de acero (0.4% y 1.2% en peso), proponiendo un modelo de economía circular que transforma pasivos ambientales en materiales de refuerzo minero.

Mediante una campaña experimental estandarizada, se fabricaron probetas cúbicas (102 mm) con cuatro configuraciones: hormigón, hormigón con sustitución parcial de áridos por relave minero y hormigón con relave reforzadas con dos porcentajes de fibras de acero (0.4% y 1.2%). Las muestras fueron sometidas a ensayos de compresión uniaxial a 7, 14, 28 y 100 días de curado por inmersión en agua. Se midieron los parámetros mecánicos relevantes resistencia a la compresión uniaxial y módulo de deformación, analizando su evolución temporal y la influencia sinérgica de los aditivos. El estudio de estos parámetros mecánicos permite evaluar la resistencia ante esfuerzos y la capacidad de deformarse, aspectos clave para entornos mineros subterráneos donde la estabilidad estructural es prioritaria.

Los resultados demostraron que la incorporación de relave mejora el desempeño significativamente a largo plazo. A los 100 días de curado, el hormigón con relave alcanzó una resistencia de 41.6 MPa (± 4.51), superando en un 5% al hormigón convencional. Por otro lado, la adición de fibras de acero mostró un comportamiento diferente. Se redujo la resistencia inicial (31.2 MPa a 7 días vs. 33.1 MPa del convencional), debido a posibles discontinuidades en la zona de unión entre fibras de acero y la matriz de hormigón. La adición de fibras redujo la rigidez inicial en un 27%, pero a los 100 días de curado la diferencia fue del 15% (12,500 MPa vs 14,685 MPa), conservando el 85% de la rigidez del hormigón convencional. El análisis económico demuestra que la incorporación de relave incrementa los costos de materiales en un 1% debido al procesamiento del residuo y la adición de fibras de acero con relave aumenta el costo de los materiales en un 19%

Estos hallazgos se alinean con estudios previos que destacan el potencial de pasivos mineros como material de construcción de alto desempeño en mezclas de hormigón y amplían el conocimiento al cuantificar su interacción con refuerzos metálicos en condiciones extendidas de curado. Este trabajo no solo valida la viabilidad técnica del hormigón con relave y fibras, sino que aporta un marco metodológico replicable para futuras investigaciones.

Capítulo 2

2. Introducción

2.1. Planteamiento del problema

La transición energética se basa en gran parte en la generación de energías renovables y la electrificación del uso final de la energía. Estos procesos se caracterizan por usar cantidades considerables de cobre (Figura 1). Además, el cobre, permite aumentar la eficiencia del sistema energético generando una disminución en las emisiones de carbono. De esta forma, el cobre se posiciona como una materia prima esencial para los desafíos que está enfrentando la sociedad. Se espera que la demanda de cobre a nivel mundial aumente desde 25 Mt en 2020 a 50 Mt en 2050 (International Copper association, 2023).

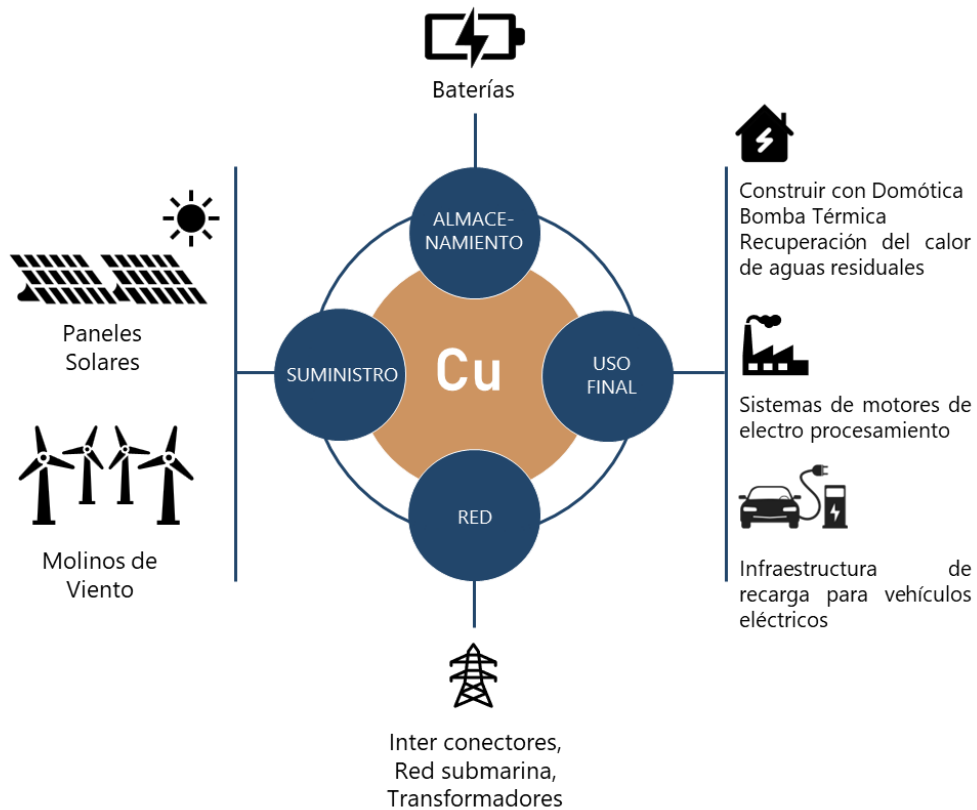


Figura 1: Usos del cobre en la producción de energías renovables (International Copper association, 2023).

Chile, como principal productor de cobre a nivel mundial, tiene un rol fundamental dentro de la transición energética. Su producción de cobre en las últimas décadas ha aumentado desde 4.6 Mt en el año 2000 a 5.5 Mt en el año 2024 (Comisión Chilena del Cobre, 2025). Sin embargo, se ha observado una disminución de la ley promedio de mineral de cobre en las operaciones mineras en Chile desde 1.29 % en el año 2000 a 0.58% en el año 2023 (Comisión Chilena del Cobre,

2024)(Figura 2.). En la industria minera, la mena corresponde a la porción del yacimiento con concentración económicamente viable del metal de interés económico (ejemplo: cobre, oro, plata, etc.), la ganga representa los minerales que acompañan al metal de interés dentro de la mena que son separados durante la recuperación metalúrgica y el material estéril comprende la roca sin mineralización significativa que se remueve para acceder al depósito. El mineral estéril no entra en el proceso de recuperación metalúrgica y se dispone en botaderos de estéril mientras que la mena y ganga son llevadas a procesos de recuperación metalúrgica donde se recupera el metal objetivo. La combinación de los minerales de ganga, agua y reactivos químicos utilizados en el procesamiento se denomina relave. Su granulometría es fina (generalmente $< 200 \mu\text{m}$) ya que el mineral se muele intensamente durante el procesamiento para liberar el metal de interés económico y facilitar su recuperación en las etapas metalúrgicas posteriores. Los relaves mineros se almacenan en depósitos específicamente diseñados (tranques de relaves) para garantizar su contención segura. El aumento en la producción de cobre de Chile combinado con la disminución de ley de cobre ha provocado un aumento significativo en la cantidad de mineral de ganga (Figura 2).

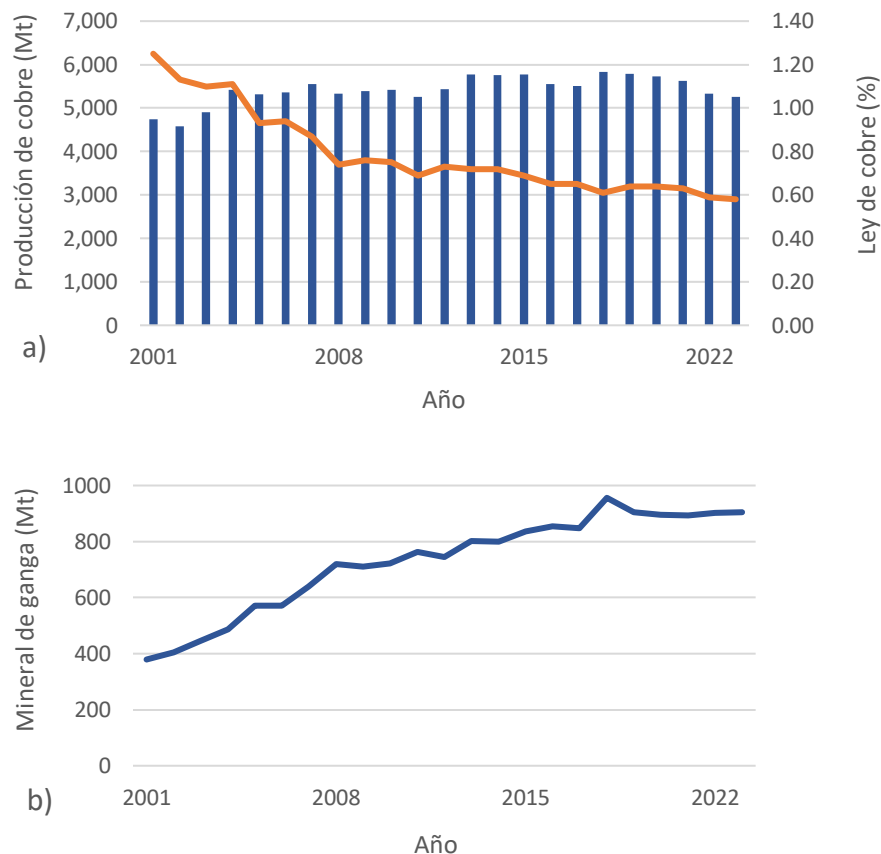


Figura 2: a) Evolución de la producción y ley promedio de cobre en Chile (2000-2023) (Comisión Chilena del Cobre, 2025).
b) Mineral de ganga asociado a la producción de cobre en Chile (2000-2023) (Comisión Chilena del Cobre, 2024).

Sin embargo, los desechos mineros no son solo una problemática del futuro. La ley chilena N°20.551 sobre “Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras” regula desde el 2001 los desechos mineros (Diario Oficial, 2011). Previo a esta fecha hubo cese de operaciones mineras las cuales

no contaron con un cierre adecuado. Muchos de estos cierres no cumplen con la normativa vigente. Según el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves publicado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2025), en Chile existen 21 depósitos de relaves clasificados como abandonados al 1 de mayo de 2025. Estos representan un total de 1.4 Mton autorizadas que interactúan sin monitoreo y en ocasiones de forma indebida con la población y el medio ambiente (Figura 3).

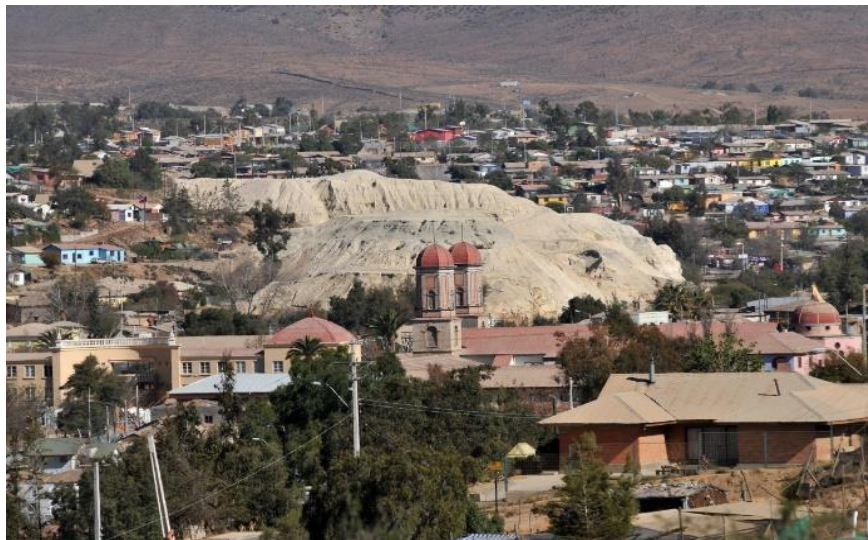


Figura 3: Depósito de relave en torta abandonado en Andacollo, Región de Coquimbo, Chile (El andacollino, 2021).

El aumento de generación de residuos mineros ha sido identificado por diferentes organismos y se han llevado a cabo diversas acciones. El ministerio de minería chileno estableció en su plan nacional de depósitos de relaves directrices para abordar las problemáticas del pasado y los nuevos desafíos de la minería (Ministerio de Minería de Chile, 2021). Buscando avanzar hacia una industria más segura y sostenible respecto a los residuos mineros. Se considera dentro del desarrollo de la industria no solo aspectos económicos y técnicos, sino también aspectos sociales y medioambientales. Una de las directrices de este plan es la “Economía Circular e Innovación”. En donde se busca promover la innovación y desarrollo de nuevas ideas relacionadas con la remediación de pasivos, el reprocesamiento y nuevos usos de depósitos de relaves (Ministerio de Minería de Chile, 2021). Esto ha propiciado que instituciones públicas y privadas apoyen y promuevan estos objetivos (Fundación Chile, 2016). Por su parte, la academia ha estudiado el uso de relave como materia prima para la construcción. Estudios demuestran su viabilidad en aplicaciones como subbases de caminos (Ally et al., 2021), ladrillos cocidos (Benahsina et al., 2022) y sustitución parcial de arena por relave en hormigón (Vo et al., 2022) y escoria en hormigón proyectado (Widojoko et al., 2014). El hormigón proyectado (o *shotcrete*) se ha convertido en el principal medio técnico de control de la estabilidad de roca en la ingeniería geotécnica, especialmente en entornos complejos (Zhang et al., 2025). Este método de refuerzo hoy en día juega un rol fundamental en la industria de la construcción minera. Esto se debe a su alta resistencia, durabilidad, baja permeabilidad, buena adherencia, posibilidades de forma ilimitada y su facilidad de manipulación en zonas de peligroso o difícil acceso (NSW Government, 2023). Estas cualidades son especialmente beneficiosas en labores mineras subterráneas, las cuales han

aumentado su nivel de participación debido al agotamiento gradual de los yacimientos superficiales.

La economía circular, entendida como un modelo de producción y consumo regenerativo que busca minimizar los residuos mediante el rediseño de procesos y la revalorización de materiales en ciclos técnicos o biológicos (Kirchherr et al., 2017) , ofrece un marco estratégico para transformar los pasivos mineros en recursos. En Chile, si bien se reconoce el potencial de los relaves para impulsar una economía circular (Comisión Chilena del Cobre, 2021) persisten vacíos críticos: (1) la mayoría de las investigaciones se centran en aplicaciones superficiales, sin abordar su uso en soportes mineros subterráneos; y (2) no existen estudios que evalúen la sinergia entre relave y fibras de acero en hormigón, a pesar de que este refuerzo es clave para mitigar riesgos en excavaciones profundas (Hoek, 2023).

La presente investigación busca cerrar esta brecha identificada al analizar el comportamiento de parámetros clave de muestra de hormigón con relave y fibras de acero. Su relevancia radica en proponer un método sostenible para convertir un pasivo ambiental (relaves) en un material de refuerzo activo. Se busca utilizar los desechos mineros como mecanismos de refuerzo en la misma mina que los generó. El desarrollo de este ejercicio está alineado con las directrices de economía circular del Plan Nacional de Depósitos de Relaves (Ministerio de Minería de Chile, 2021). Proponiendo una solución a la remediación de pasivos ambientales mineros.

2.2. Hipótesis

A partir de la problemática identificada, surge una interrogante que no ha sido desarrollada en la literatura: ¿Es viable técnicamente la reutilización de relaves mineros de la minería del cobre como material de construcción para labores de refuerzo en minería subterránea, específicamente en *shotcrete* reforzado con fibras de acero? Esta pregunta motivó la formulación de la siguiente hipótesis:

La adición de relave minero y fibras de acero modifica procesos fisicoquímicos del hormigón, mejorando sus propiedades mecánicas y permitiendo su uso como material de refuerzo en aplicaciones mineras.

2.3. Objetivos

2.3.1 Objetivo General

Determinar, a través de ensayos de compresión uniaxial, el efecto del tiempo de curado y de la adición de fibras de acero en muestras de hormigón con relave, mediante el análisis de parámetros mecánicos relevantes, para evaluar la posible reutilización de relaves mineros dentro de la misma mina que los generó.

2.3.2 Objetivos específicos

- **Definir una metodología experimental** que permita realizar estudios comparativos de parámetros mecánicos relevantes en muestras de hormigón con diferentes composiciones,

incluyendo sustitución parcial de áridos por relaves mineros y la incorporación de fibras de acero.

- **Diseñar, fabricar y caracterizar experimentalmente** muestras de *hormigón* convencional, hormigón con sustitución parcial de áridos por relave minero, y mezclas reforzadas con fibras de acero en proporciones de 0.4% y 1.2% evaluadas en cuatro tiempos de curado: 7, 14, 28 y 100 días.
- **Analizar comparativamente la evolución temporal** de la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de deformación de los distintos tipos de *hormigón* desarrollados, considerando su composición y tiempo de curado como variables experimentales.

2.4. Alcances

El presente estudio se limita al análisis de la resistencia máxima a la compresión uniaxial y el módulo de deformación, considerando composición y tiempo de curado como variables experimentales, por ser parámetros mecánicos clave en el diseño de soportes mineros. Permitiendo evaluar de manera directa la capacidad estructural del hormigón y su interacción con el relave y las fibras de acero bajo condiciones de carga estática. Por otro lado, para las muestras con relave en su composición se utilizó relave minero proveniente de Pucobre. Debido a esto, el estudio de otros parámetros y el comportamiento de hormigón con relaves mineros de otras procedencias, quedan fuera del alcance de esta memoria y pueden ser abordados en una continuación del ejercicio o un estudio posterior.

Capítulo 3

3. Antecedentes

3.1 Mecanismos de refuerzo en minería subterránea

La estabilidad en ambientes subterráneos requiere el diseño de sistemas de soporte y refuerzo adecuados (Masoudi & Sharifzadeh, 2018), fundamentales para garantizar la seguridad del personal, la protección de equipos y la integridad de las estructuras mineras. Actualmente, los métodos más utilizados son (Figura 4): pernos de roca (mecánicos, cementados o resinados) para anclar capas inestables a estratos estables mediante tensión; pernos de cable que brindan soporte en zonas de alto estrés o roca gruesa; hormigón proyectado para estabilizar superficies y evitar el desprendimiento; malla metálica con bandas de acero que retienen fragmentos y distribuyen cargas; arcos o marcos de acero como soporte estructural en túneles; inyecciones de cemento que consolidan roca fracturada; pernos de fricción (como los *Split Sets*) que generan confinamiento radial; pernos pasivos (*dowel*) que resisten cortante en fracturas; soportes hidráulicos temporales para estabilización durante excavación; pilares reforzados con cables o pernos para aumentar capacidad de carga; soportes deformables que absorben energía en áreas propensas a estallido de roca; y barreras o mallas anti desprendimientos para capturar desechos (Hoek, 2023). Además, estos sistemas se combinan estratégicamente (por ejemplo: pernos, *shotcrete* y malla), adaptándose a la calidad del macizo rocoso (clasificaciones RMR/Q) y comportamientos como deformación o estallidos, priorizando un enfoque integral de diseño geotécnico. Sin embargo, su eficacia depende de su adaptación continua a las condiciones específicas del macizo rocoso y a la geometría de la excavación durante todas las etapas de su vida útil (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2018). Este enfoque dinámico es esencial para responder a cambios en las tensiones geomecánicas y mantener la seguridad operativa en entornos mineros complejos.

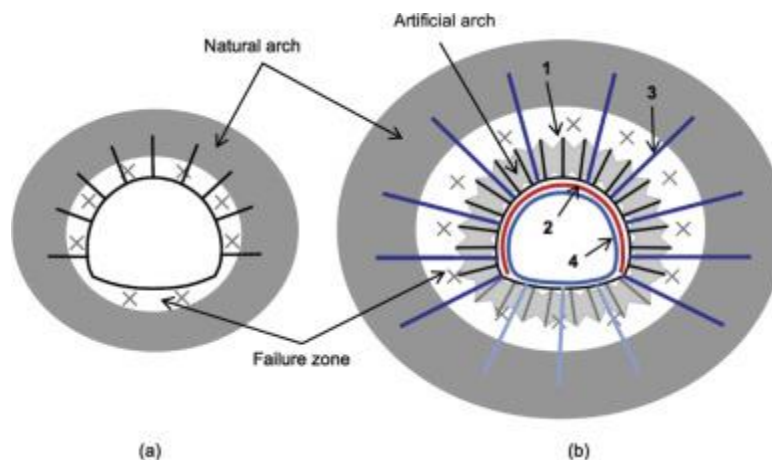


Figura 4: Sistemas de soporte superficial en minería subterránea (Rahimi et al., 2020).

Complementando estos desafíos, se han desarrollado avances tecnológicos clave en minería subterránea, los cuales están transformando el diseño y gestión de soportes mediante sistemas de monitoreo inteligente. Estos incluyen sensores embebidos (piezoeléctricos) que detectan microfisuras en *shotcrete* con una precisión mayor al 90% mediante cambios en impedancia eléctrica (Gomasa et al., 2023); modelos predictivos de IA – redes neuronales recurrentes- que anticipan tensiones geomecánicas con un error menor al 15% (Zhang et al., 2024); algoritmos de aprendizaje automático para predecir propiedades de rocas sin ensayos destructivos (Lei et al., 2025); y técnicas acústicas validadas para monitoreo de *shotcrete* en terreno (Yasuda, 2023). Estas tecnologías permiten crear sistemas autónomos que combinan alertas tempranas con acciones de refuerzo, permitiendo validar el desempeño de materiales innovadores -como relaves mineros- mediante monitoreo en tiempo real bajo condiciones operativas, lo que reduce riesgos en excavaciones profundas.

3.2 Estudio de parámetros mecánicos relevantes

La combinación de datos experimentales y propiedades mecánicas intrínsecas proporciona una base para el estudio de materiales como soporte y refuerzo en minería subterránea. La resistencia a la compresión uniaxial es un parámetro mecánico relevante para evaluar el desempeño del hormigón, ya que representa la carga máxima que el material puede soportar antes de colapsar. Este parámetro se obtiene mediante ensayos estandarizados donde se aplica una carga gradual a una muestra hasta su fallo. Durante este tipo de ensayos, es posible conectar sensores para medir distintos parámetros físicos. Al conectar un sensor del tipo transformador diferencial de variación lineal (*LVDT*), se puede medir la deformación que sufre una muestra al ser sometida a esfuerzo (Choun & Park, 2015). La medición de esta variable durante el ensayo permite construir una curva de esfuerzo-deformación de la muestra. Esta curva permite estudiar el comportamiento mecánico del material estudiado. En general, el comportamiento inicial de la curva esfuerzo-deformación se rige por una fase elástica, la cual establece una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria dentro del límite elástico. Superado este límite, el material experimenta deformaciones plásticas irreversibles, culminando en su fractura (Figura 5). El módulo de deformación relaciona el esfuerzo aplicado sobre la muestra y la deformación unitaria generada (ecuación (1)), definido dentro de la fase elástica del material (Czajkowska et al., 2023). Este parámetro clave representa una medida intrínseca de la rigidez de un material, lo cual permite comparar el comportamiento elástico de sistemas heterogéneos como el hormigón reforzado con fibras.

En minería subterránea, el módulo de deformación del hormigón no solo cuantifica la rigidez del material, sino que también orienta la selección de sistemas de soporte capaces de equilibrar esta rigidez con una respuesta controlada ante cargas dinámicas, como impactos o vibraciones (Masoudi & Sharifzadeh, 2018).

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (1)$$

Donde;

E: Módulo de deformación MPa

σ : Esfuerzo MPa

ϵ : Deformación unitaria

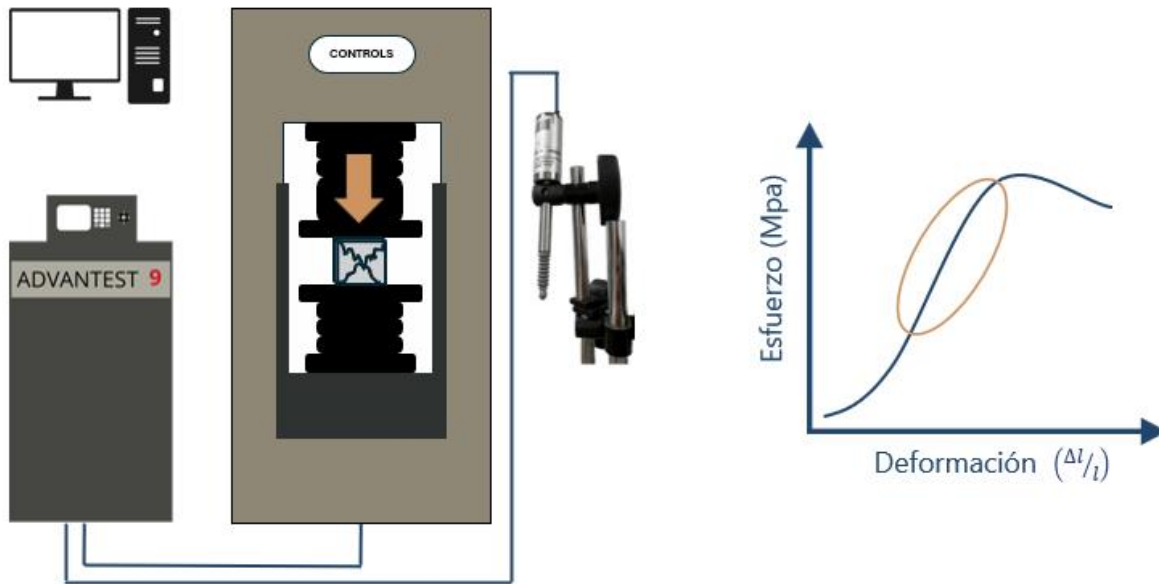


Figura 5: Curva esfuerzo-deformación registrada en el sistema Advantest 9.

Además, el hormigón al ser una mezcla que contiene cemento dentro de su composición puede aumentar su resistencia y rigidez a través del tiempo (Figura 6). Esto se explica debido a la reacción química, denominada hidratación del cemento, responsable del endurecimiento de mezclas cementosas (James & Ivan, 2019). La hidratación del cemento es un proceso químico que ocurre cuando las partículas del cemento entran en contacto con agua. En este proceso el cemento adquiere propiedades aglutinantes, fijadoras y endurecedoras. Los productos generados en ese proceso químico se denominan productos de hidratación. Los productos de hidratación son responsables del fraguado y curado de la mezcla cementosa (Behera et al., 2021). El fraguado es el proceso químico mediante el cual una mezcla cementosa recién preparada se solidifica (American Concrete Institute, 2013). Pasando desde una mezcla tipo pasta hasta una estructura sólida resistente, capaz de soportar cargas y presiones. Este proceso se divide en dos etapas principales: fraguado inicial y fraguado final. El fraguado inicial consta de la pérdida de plasticidad de la mezcla y el inicio del endurecimiento. Toma lugar entre los primeros 30 a 120 min desde que el cemento entra en contacto con el agua. El fraguado final se produce cuando la mezcla alcanza una consistencia sólida y resistente. Posterior al proceso de fraguado, las muestras cementosas pueden continuar con el proceso de hidratación del cemento. Al continuar con el proceso de hidratación, también continúa el proceso de endurecimiento. Este proceso se llevará a cabo siempre y cuando se mantengan las condiciones de humedad necesarias. El curado cesa cuando la humedad relativa es menor al 80%. Con agua insuficiente, la mezcla detiene su proceso de aumento de resistencia. El tiempo de curado es un proceso esencial para lograr una resistencia y durabilidad óptima (Idowu & Black, 2018), por este motivo se define como parámetro clave para el presente ejercicio.

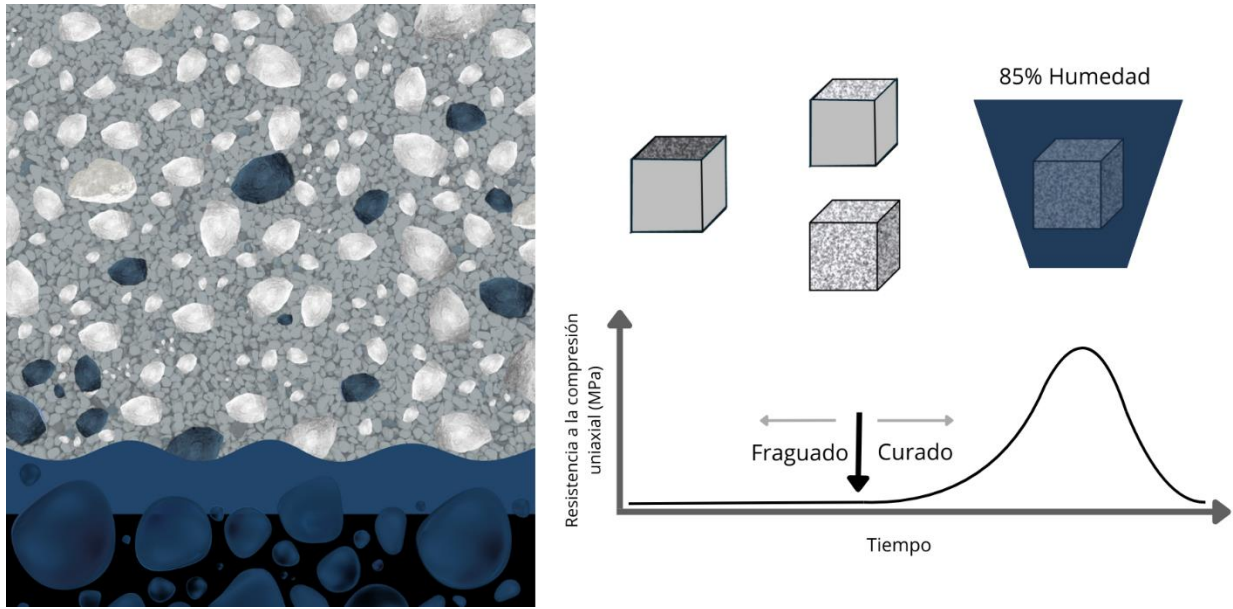


Figura 6: Proceso de hidratación, fraguado y curado en el hormigón.

Capítulo 4

4. Metodología experimental

Esta memoria de título estudiará la sinergia entre relave de cobre y fibras de acero en muestras de hormigón, a través de los parámetros mecánicos relevantes: resistencia a la compresión uniaxial y módulo de deformación. Para esto, se definieron cuatro tipos de muestras comparativas que permiten aislar las variables experimentales: (1) hormigón convencional (control sin modificaciones), (2) hormigón con relave (sustitución del 8% de áridos por relave minero), (3) hormigón con relave reforzado con fibras de acero (0.4%) y (4) hormigón con relave reforzado con fibras de acero (1.2%).

Los materiales utilizados son: cemento, áridos, agua, relave y fibras de acero en distintas proporciones dependiendo del tipo de muestra. La mezcla base contiene áridos, cemento y agua. En las mezclas con relave, se reemplazó una fracción de los áridos con relave y para las muestras con fibras de acero, se incorporaron fibras en dos proporciones distintas. La elaboración se realizó mediante la adición secuencial de los componentes, comenzando con una mezcla parcial de agua y áridos, seguida de la incorporación del cemento y el resto de los áridos, y finalizando con el agua restante, homogeneizando en cada paso. Para las muestras con fibras de acero, estas se añadieron después de completar la mezcla base de hormigón.

Para el estudio de los parámetros mecánicos relevantes definidos, se escogió el ensayo de compresión uniaxial porque permite evaluar de manera directa y estandarizada el comportamiento del hormigón frente a esfuerzos compresivos. Se llevó a cabo en utilizando la prensa Controls (modelo 50-C56Z00), equipada con un sensor *LVDT* para medir desplazamiento. El sistema Advantest 9 registró fuerza y deformación en tiempo real, siguiendo parámetros estandarizados: velocidad de carga, carga inicial y carga máxima. El *software* Advantest 9 Program controló el ensayo, generando curvas esfuerzo-deformación utilizados para calcular la resistencia máxima a la compresión uniaxial y el módulo de deformación.

Cada muestra se ensayó hasta su fallo, determinado por una caída en la carga máxima. Durante el experimento se midieron las variables: fuerza, desplazamiento lineal de la prensa. A partir de estas variables se obtuvo la magnitud de los parámetros clave de todas las muestras construidas. Para obtener resultados confiables y representativos desde el ensayo de compresión uniaxial, se realizaron procesos de acondicionamiento. Se llevó a cabo el pulido de las superficies de la muestra que entraron en contacto con la prensa, para obtener superficies lisas y planas. Posterior a esto, se secaron las muestras a una temperatura de 80°C durante 48 horas. Finalmente, las muestras se llevaron a temperatura ambiente para ser ensayadas.

4.1 Campaña experimental

La construcción de las muestras de hormigón estudiadas fue realizada en condiciones de laboratorio, específicamente en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM) dentro del campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa

María. Las muestras estudiadas tienen una geometría cúbica de 102 mm de sección. Las composiciones estudiadas corresponden a: hormigón, hormigón con relave en su composición de áridos y hormigón con relave en su composición de áridos reforzado con fibras de acero en dos proporciones: 0.4% y 1.2% en peso.

Se estableció la evaluación de 4 tiempos de curado para los 4 tipos de muestra propuestos: 7, 14, 28 y 100 días. Además, debido a la heterogeneidad del hormigón y a la variabilidad que representa en términos de resultado, se requiere de múltiples especímenes para determinar la compresión uniaxial promedio (Yankelevsky, 2024). Por este motivo, para cada una de las 16 configuraciones planteadas se realizaron 3 réplicas.

4.2 Medición de parámetros clave

El presente documento estudió los parámetros clave resistencia a la compresión uniaxial, módulo deformación y tiempo de curado, de las muestras de hormigón. Estas variables fueron calculadas a partir de las variables fuerza y desplazamiento lineal de la prensa. Su medición se llevó a cabo a través del sistema servo-hidráulico para ensayos estáticos y dinámicos Advantest 9 marca Controls. A partir de las variables fuerza ejercida por la prensa y la superficie de la muestra que entró en contacto con esta, se calculó la variable esfuerzo. La medición de la variable esfuerzo permitió conocer la variable resistencia máxima a la compresión uniaxial de cada una de las muestras.

A través de las variables desplazamiento lineal de la prensa y la longitud inicial de la muestra, se calculó la variable deformación unitaria. Las variables calculadas esfuerzo y deformación unitaria se relacionan a través de la ecuación (1). Esta ecuación permitió conocer el módulo de deformación de cada una de las muestras.

4.3 Materiales

Las componentes del hormigón son: cemento, agua, árido fino (arena) y árido grueso (hasta 10mm). De forma adicional y dependiendo de los requerimientos específicos, el hormigón puede ser reforzado por aditivos (reductores de agua, acelerantes, sílice) y fibras (acero, polímeros y vegetales). Los materiales utilizados para el presente ejercicio fueron:

Cemento

El cemento utilizado corresponde al Transex Plus (Figura 7), clasificado como cemento puzolánico según la norma chilena NCh148. La norma establece las materias primas y un procedimiento para su creación. Dentro de las materias primas se encuentra el cemento portland (óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro, óxido de magnesio y otros), puzolana (roca basáltica muy fragmentada) y yeso.

El proceso de fabricación consiste en la conminución de todas las materias en donde se mezclan (a excepción del yeso) y se prepara una mezcla cruda. Posteriormente se introducen en hornos donde son llevados a 1450°C entre 1 a 2 horas. Finalmente se deja enfriar la mezcla producida (Clinker) y llevar a un nuevo proceso de conminución en donde se mezcla con yeso. La mezcla final (cemento) tiene una resistencia nominal de 44 MPa.



Figura 7: Composición y proceso de fabricación del cemento Transex Plus.

Áridos

Los áridos utilizados son de la marca Áridos Figueroa y se utilizó el modelo Arena Guesa (Figura 8). Esta materia prima cumple con la norma “NCh163: Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales y antecedentes técnicos proporcionados por el comité técnico”.



Figura 8: Granulometría y características de áridos marca Áridos Figueroa.

La norma establece definiciones y requisitos para los áridos constituyentes de hormigones utilizados en obras de construcción. También se establece la granulometría del árido fino, árido grueso y árido total, siendo este último la combinación de los dos primeros (Tabla 1). El árido total es el utilizado para crear hormigón.

Tabla 1: Límites granulométricos para áridos en hormigón según norma NCh163 (Árido fino, grueso y total).

Identificación Test	Tamaño 0% Retenido mm	Tamaño 100% Retenido mm
Árido Grueso	75	4.75
Árido Fino	4.75	0.075
Árido Total	75	0.075

Se determinó la curva granulométrica de los áridos utilizados (Figura 9), la cual se encuentra dentro de los rangos establecidos por la normativa para áridos destinados a hormigón. Los resultados muestran que la distribución de tamaños de partícula cumple con los límites inferior y superior especificados en la norma NCh163, ubicándose en la zona óptima para aplicaciones de hormigón estructural (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2018). Se obtuvo un tamaño efectivo (d_{10}) de 0.32 mm y un diámetro medio (d_{50}) de 4.85 mm, con un coeficiente de uniformidad

($C_u = d_{60}/d_{10}$) de 22.3 que indica una amplia distribución de tamaños. Si bien el coeficiente de curvatura ($C_c = 0.63$) indica una ligera discontinuidad en la fracción intermedia (1-5 mm), la curva cumple con los requerimientos para hormigón estructural.

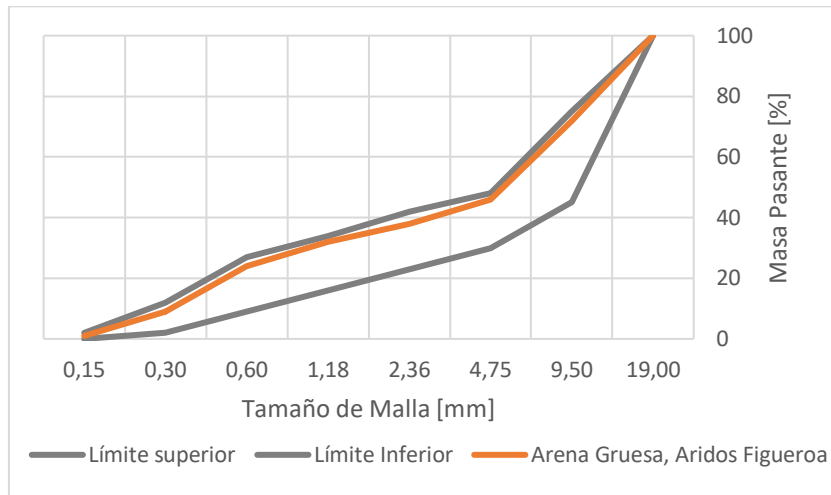


Figura 9: Curva granulométrica de áridos para hormigón (Norma NCh163).

Relave

El relave utilizado en este estudio proviene de la mina Pucobre, un residuo del proceso de hidrometalurgia. Su granulometría fina es crucial para el estudio, ya que permite una correcta interacción con el resto de los materiales. No se entregaron mayores detalles del relave.

Agua

El agua cumplió con la norma chilena NCh1498.Of2018: Agua para amasado de hormigones – Requisitos.

Fibras de Acero

El refuerzo se realizó con fibras de acero DRAMIX® 45/50BL, un tipo de fibra de acero de bajo contenido de carbono, no texturizada, estirada en frío y de sección circular, que presenta ganchos en sus extremos para mejorar el anclaje (Figura 10). Sus características son: diámetro de 1.05 mm, longitud de 50 mm, resistencia nominal a la tracción de 1115 MPa y módulo de Young de 200 GPa.



Figura 10: Fibras de acero DRAMIX 45/50BL.

4.4 Proporciones de la mezcla

La dosificación de la mezcla base consistió en: 72.4% de áridos, 17.5% de cemento y 10.1% de agua (Polpaico, 2020). Se utilizó una mezcla con una relación agua/cemento (a/c) de 0.56. En la elaboración de las muestras con relave, se reemplazó un 10.1% de los áridos por relave. Lo que modificó la composición de la mezcla a 64.6% de áridos, 17.5% de cemento, 10.1% de agua y 8.0% de relave. Las fibras de acero se añadieron en dos porcentajes distintos, 0.4% y 1.2% (en peso) y se incorporaron a la mezcla una vez finalizada la mezcla base o mezcla con relave

Tabla 2: Dosificación de mezclas de hormigón: Composición porcentual de cemento, agua, áridos, relave y fibras de acero.

Identificación Test	Cemento	Agua	Áridos	Relave (%)	Fibras (%)
Hormigón	17.5 %	10.1 %	72.4 %	0.0 %	0.0 %
Hormigón con relave	17.5 %	10.1 %	64.4 %	8.0 %	0.0 %
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (0.4%)	17.5 %	10.1 %	64.0 %	8.0 %	0.4 %
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (1.2%)	17.5 %	10.1 %	63.2 %	8.0 %	1.2 %

4.5 Construcción de muestras

El proceso de elaboración de las muestras de hormigón siguió los lineamientos establecidos en la *Guía Chilena del Hormigón Proyectado* (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2018), adaptando las proporciones de mezcla y secuencia de incorporación de materiales para integrar el relave y las fibras de acero. Se fabricaron especímenes cúbicos de 102 mm de lado (± 2 mm), agrupados en tres unidades idénticas por cada configuración (convencional, con relave y con relave reforzado). El proceso de construcción de muestras se llevó a cabo en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM) dentro del campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María.

La mezcla se preparó en un recipiente de 20 L utilizando una mezcladora mecánica de paletas (Figura 11), siguiendo una secuencia estandarizada para garantizar la homogeneidad:

1. **Hidratación inicial:** Se vertió el 70% del agua total (10.1% en peso) en el recipiente.
2. **Incorporación de áridos:** Se añadió el 50% de la fracción de áridos (72.4% en peso para mezcla base o 64.4% para mezcla con relave).
3. **Adición de cemento:** Se incorporó la totalidad del cemento Transex Plus (17.5% en peso) y se mezcló durante 7 minutos a velocidad constante (30 rpm).
4. **Completar áridos:** Se agregó el 50% restante de áridos, seguido de 7 minutos adicionales de mezcla.
5. **Agua restante:** Se incorporó el 30% restante del agua, prolongando la mezcla por 7 minutos.

6. **Refuerzo con fibras:** Para las muestras reforzadas, se añadieron fibras DRAMIX® 45/50BL (0.4% o 1.2% en peso) y se mezclaron durante 7 minutos para evitar aglomeraciones.



Figura 11: Esquema del equipo de mezcla para preparación de muestras de hormigón.

La mezcla homogénea se vertió en moldes metálicos previamente lubricados con aceite mineral, compactándose manualmente con una varilla ASTM C31 para eliminar burbujas de aire. Los moldes se almacenaron a temperatura ambiente (15–25°C) durante 24 horas para facilitar el fraguado inicial, cumpliendo con la norma ASTM C192/C192M.

Tras el fraguado, las muestras se retiraron de los moldes y se etiquetaron según su composición (ej: *R1FA04C028E1* = Relave al 8%, Fibras al 0.4%, Curado a 28 días, espécimen 1). Posteriormente, se trasladaron al sistema de curado por inmersión en agua saturada de cal.

4.6 Curado de Muestras

Existen diversas técnicas de curado, adaptándose a las condiciones específicas de cada obra o laboratorio. En laboratorio, se utilizan cámaras de curado que permiten controlar parámetros relevantes como la temperatura y la humedad, garantizando condiciones estandarizadas para el proceso. Un ejemplo de esto es la inmersión en agua saturada en cal, método que asegura una hidratación continua del cemento y evitar la lixiviación de uno de los productos de hidratación. El proceso de curado utilizado para el presente ejercicio es la inmersión en agua saturada con cal (Figura 12). Durante el tiempo de curado, las muestras permanecieron en las dependencias del laboratorio del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM) dentro del campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura 12: Proceso de curado por inmersión en agua saturada de cal (Norma ASTM C192).

4.7 Acondicionamiento de muestras

Para garantizar resultados confiables y reproducibles en los ensayos de compresión uniaxial, las superficies de contacto entre la muestra y la prensa deben presentar un acabado liso y plano. Esto minimiza irregularidades que podrían generar concentraciones de esfuerzos locales y afectar la distribución uniforme de la carga durante el ensayo. Por este motivo, se realizó un proceso de pulido en una pulidora circular al agua (Figura 13) a una velocidad promedio de 120 revoluciones por minuto. El pulido de las muestras se llevó a cabo una vez finalizado el proceso de curado.



Figura 13: Pulidora circular Minitex 265 utilizada para acondicionar muestras.

Posteriormente, se secaron las muestras en un horno a 80°C durante 24 horas para homogeneizar la humedad. Una vez finalizado el secado, se dejaron enfriar a temperatura ambiente antes de realizar los ensayos.

4.8 Ensayo de compresión uniaxial

Las muestras fueron ensayadas en la Prensa 50-C56Z00 marca Controls. Además, se utilizó el sistema servo-hidráulico para ensayos estáticos y dinámicos Advantest 9 marca Controls. Este

sistema permite controlar, visualizar y variar configuraciones de las variables a tiempo real. A este sistema se conectó un sensor de desplazamiento de tipo transformador diferencial de variación lineal (LVDT por sus siglas en inglés). Con esta configuración, se estudiaron las variables fuerza aplicada por la prensa y su desplazamiento (Figura 14).



Figura 14: Configuración de equipos utilizada para el ensayo de compresión uniaxial, en donde: a) Prensa, b) Sistema servo-hidráulico y c) sensor LVDT.

El equipo Advantest 9 utiliza el software Advantest 9 Program (Figura 15) para el control remoto del sistema. Este software gestiona la visualización gráfica y numérica de datos, permitiendo la programación de ciclos de carga/esfuerzo en desplazamiento/deformación, procedimientos de ensayo, y la variación en tiempo real de los parámetros del ensayo.

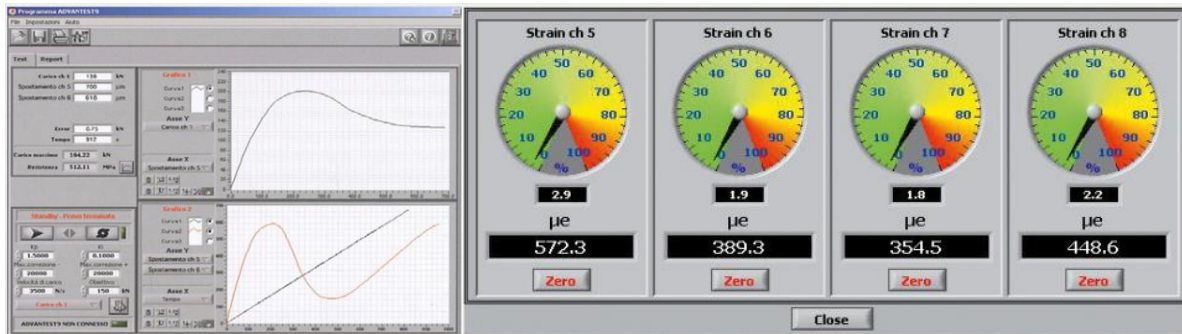


Figura 15: Interfaz del software Advantest 9 para control de ensayos de compresión.

Dentro del *software* se establecieron los valores para las variables de testeo (Tabla 3): velocidad de testeo, carga inicial, carga máxima, sensibilidad máxima* y área ensayada. A excepción del área ensayada, calculada para cada muestra, estos parámetros se mantuvieron constantes durante todos los testeos realizados. La velocidad de testeo se estableció en ese valor para cumplir con el tiempo de ensayo recomendado en “Guía chilena del hormigón proyectado”.

Tabla 3: Parámetros de ensayo de compresión uniaxial según Guía Chilena del Hormigón Proyectado (velocidad, carga inicial/máxima).

	Valor
Velocidad de testeo MPa/s	0.055
Carga inicial kN	5
Carga máxima kN	800
Sensibilidad máxima kN	35

Capítulo 5

5. Resultados y discusiones

La metodología experimental propuesta en el Metodología experimental permitió fabricar 48 muestras cúbicas de hormigón (102 mm), distribuidas en cuatro configuraciones: convencional, con relave (8% sustitución de áridos), y con relave reforzado con fibras de acero (0.4% y 1.2%). Cada combinación fue evaluada a 7, 14, 28 y 100 días de curado por inmersión, con tres réplicas por grupo para garantizar representatividad estadística. El proceso de mezcla, curado y acondicionamiento siguió los protocolos descritos en el Capítulo 4, obteniendo probetas homogéneas con superficies pulidas para ensayos de compresión uniaxial.

A continuación, se muestran los resultados de resistencia a la compresión uniaxial y módulo de deformación, analizando su evolución temporal y el efecto sinérgico del relave y las fibras de aceros. El detalle de cómo se obtuvieron estos datos se muestra en Anexos 1: Resultados. Las figuras 16 a 19 presentan gráficamente la relación entre propiedades mecánicas y las variables experimentales tiempo de curado y composición de la mezcla, permitiendo identificar patrones de comportamiento.

5.1 Resistencia a la compresión uniaxial

La resistencia a la compresión uniaxial es una de las propiedades más importantes en el diseño de estructuras de hormigón. En la siguiente sección se analiza la evolución de la resistencia máxima a la compresión uniaxial en las cuatro configuraciones de mezcla propuestas (hormigón convencional, con relave, y con relave reforzado con fibras al 0.4% y 1.2%), durante los periodos de curado estudiados (7, 14, 28 y 100 días) y se presentan gráficamente en la Figura 16.

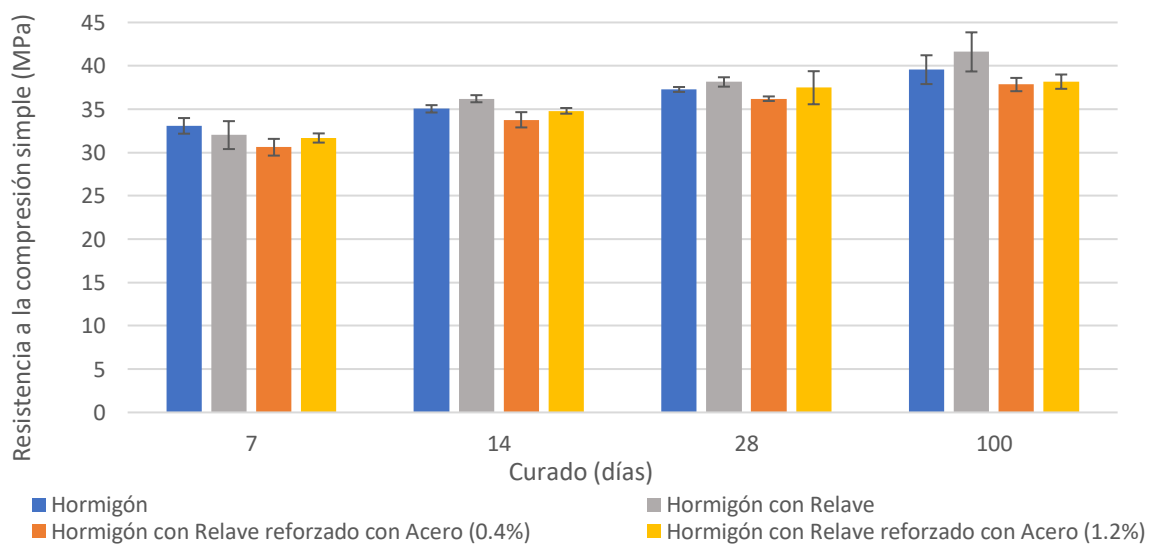


Figura 16: Resistencia a la compresión uniaxial del hormigón en función del tiempo de curado.

A continuación, se describen los resultados por tiempo de curado:

Muestras curadas durante 7 días

- Hormigón convencional: 33.1 ± 1.8 MPa
- Hormigón con relave: 32.0 ± 3.2 MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): 30.6 ± 1.9 MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): 31.7 ± 1.1 MPa

El hormigón convencional mostró la mayor resistencia, seguido por el hormigón con relave. Las muestras reforzadas con fibras de acero presentaron una ligera disminución en la resistencia, especialmente en las muestras con 0.4% de fibras. Esta reducción inicial podría estar relacionada con la interferencia de las fibras en la distribución homogénea de la matriz cementosa durante las primeras etapas de curado.

Muestras curadas durante 14 días

- Hormigón convencional: 35.0 ± 0.9 MPa
- Hormigón con relave: 36.2 ± 0.8 MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): 33.8 ± 1.8 MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): 34.8 ± 0.7 MPa

En este período, el hormigón con relave superó ligeramente al hormigón convencional en resistencia. Las muestras reforzadas con fibras de acero mostraron una resistencia menor comparado con las muestras con relave. Exhibieron una mayor variabilidad las muestras con 0.4% de fibras, este comportamiento puede sugerir que el relave actúa como un material puzolánico, contribuyendo a la formación de productos de hidratación adicionales.

Muestras curadas durante 28 días

- Hormigón convencional: 37.3 ± 0.6 MPa
- Hormigón con relave: 38.1 ± 1.1 MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): 36.2 ± 0.5 MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): 36.6 ± 3.8 MPa

El hormigón con relave continuó mostrando una resistencia ligeramente superior al hormigón convencional. Las muestras con fibras de acero presentaron una resistencia similar, aunque con mayor variabilidad en las muestras con 1.2% de fibras. Esta variabilidad podría deberse a la dificultad de distribuir uniformemente las fibras en la mezcla.

Muestras curadas durante 100 días

- Hormigón convencional: 39.6 ± 3.3 MPa
- Hormigón con relave: 41.6 ± 4.5 MPa

- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): 37.8 ± 1.5 MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): 38.2 ± 2.3 MPa

A los 100 días, el hormigón con relave alcanzó la mayor resistencia, seguido por el hormigón convencional. Las muestras con fibras de acero mostraron una resistencia ligeramente menor, pero con una variabilidad reducida en comparación con los períodos anteriores. Este comportamiento indica que, a largo plazo, las fibras de acero no afectan significativamente la resistencia final del material.

5.1.1 Efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión

Como se observa en la Figura 17, la resistencia a la compresión uniaxial de todas las mezclas de hormigón aumenta con el tiempo de curado, siguiendo una tendencia logarítmica. Este comportamiento es consistente con lo esperado en materiales cementosos, donde la hidratación del cemento es un proceso continuo que se extiende más allá de los 28 días iniciales (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2018).

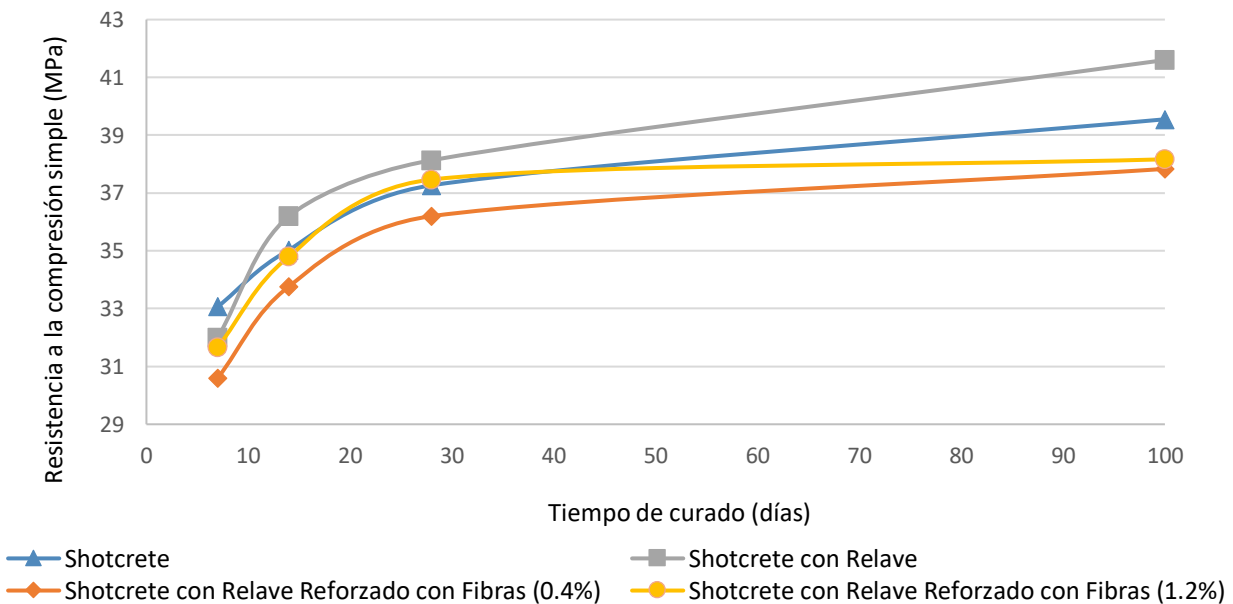


Figura 17: Comparación de la resistencia a la compresión uniaxial por tipo de muestra.

En los primeros 28 días, la resistencia aumenta significativamente. Esto se debe a la rápida formación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H). Estos compuestos densifican la matriz cementosa. Pasado este período, la tasa de ganancia de resistencia disminuye. El material sigue fortaleciéndose, pero a un ritmo más lento.

La reducción se explica por la menor disponibilidad de compuestos reactivos. Óxidos de calcio y silicio participan activamente en las reacciones iniciales (Zhao et al., 2021). Su agotamiento progresivo limita la formación de nuevos productos de hidratación. Incluso a 100 días, persiste una hidratación residual. Esta contribuye a mejoras marginales en la resistencia final.

Es importante notar que el hormigón con relave experimentó un aumento del 9.2% desde los 28 días a los 100 días (aumento desde 38.1 a 41.6 MPa) superando significativamente al hormigón convencional, que exhibió un aumento del 6.2% (desde 37.3 MPa a 39.6 MPa). Las mezclas con fibras mostraron incrementos menores en este periodo de tiempo (4.4% para la menor proporción de fibras y 4.5% para la mayor proporción de fibras).

Este hallazgo resalta la importancia de curados prolongados para las muestras de hormigón con relave. En aplicaciones críticas, como soportes mineros, optimizar este factor es clave, ya que permite maximizar el desempeño mecánico ante cargas sostenidas.

5.1.2 Efecto del relave en la resistencia a la compresión

La comparación entre las muestras de hormigón convencional y hormigón con relave sugiere que el relave actúa como material puzolánico, contribuyendo a la formación de productos de hidratación adicionales dentro de la matriz cementosa. Este comportamiento se evidencia en los valores de la resistencia a la compresión uniaxial, donde el hormigón con relave muestra una resistencia ligeramente superior en tres de los cuatro tiempos de curado evaluados (Figura 17). Estudios previos confirman que los relaves mineros, debido a su alto contenido de sílice amorfa (SiO_2) y óxidos de aluminio (Al_2O_3), reaccionan con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado durante la hidratación del cemento, formando silicatos de calcio hidratados (C-S-H) adicionales (Widojoko et al., 2014) (Vo et al., 2022) (Ally et al., 2021) (Behera et al., 2021). Además, este aumento en la resistencia puede explicarse por la presencia de partículas minerales residuales con mayor resistencia mecánica que pueden identificarse mediante análisis XRD. Estos minerales pueden actuar como micro áridos que mejoran la compactación de la matriz de cemento. Sin embargo, su distribución heterogénea puede generar mayor

La granulometría fina del relave permite que este material rellene los espacios intersticiales entre partículas de cemento y áridos. Esto genera una reducción de la porosidad y mejora la compactación de la matriz). La reducción de porosidad no solo mejora los valores de la resistencia a la compresión uniaxial, sino que también puede disminuir la permeabilidad en algunos casos. La permeabilidad es un factor clave para la durabilidad del *shotcrete* en entornos agresivos como la minería subterránea (Masoudi & Sharifzadeh, 2018).

Se recomienda para futuros estudios, evaluar la sustitución de relave por áridos en hasta un 25% en peso. Esta recomendación se sustenta en dos hallazgos: (1) los resultados experimentales del presente estudio mostraron que con una sustitución del 8% de relave por áridos genera mejoras significativas en resistencia (5% en 100 días de curado); y (2) en (Vo et al., 2022) y (Behera et al., 2021) se ha estudiado que un rango de 15 – 25 % de sustitución optimiza el efecto puzolánico de desechos mineros, permitiendo una mayor formación de productos de hidratación sin comprometer la trabajabilidad de la mezcla. De forma complementaria, se debe considerar que el porcentaje óptimo de sustitución puede variar según las características específicas del relave utilizado. Se debe considerar tanto su composición química y su distribución granulométrica, por lo que se recomienda realizar estudios específicos que evalúen el comportamiento mecánico en este rango de sustitución.

5.1.3 Efecto de las fibras de acero en la resistencia a la compresión

La zona de transición interfacial (*ITZ*, por sus siglas en inglés) es la región entre la superficie de la fibra de acero y la pasta de cemento que rodea la fibra. Esta zona tiene características distintas al resto de la matriz (Thong et al., 2016). Esto se explica a través de:

- Efecto de pared: Durante el mezclado, las partículas de cemento y áridos se separan cerca de la fibra, creando una zona de mayor porosidad.
- *Bleeding*: Migración de agua hacia la interfaz durante el fraguado, aumentando localmente la relación agua/cemento.

En (Zhang et al., 2025) se establece que la presencia de partículas de cemento no hidratadas y agregados mal adheridos puede provocar la degradación de las Zonas de Transición Interfacial (*ITZ*). Asimismo, la presencia de relave, que contiene partículas no puzolánicas, puede acentuar la heterogeneidad de estas zonas. La generación de discontinuidades dentro de la *ITZ* puede tener efectos significativos cuando el material se somete a condiciones de esfuerzo, ya que las nuevas condiciones generadas al agregar relave minero pueden promover una distribución no homogénea de tensiones. Esto, a su vez, podría resultar en una menor resistencia a la carga.

La mayor porosidad en la *ITZ* explicaría la reducción inicial de la resistencia (30.6 y 31.7 MPa). No obstante, la actividad puzolánica del relave y la hidratación continua del cemento rellenan progresivamente los microporos generados en las *ITZ*. Esto se evidencia con la recuperación significativa de la resistencia a los 100 días de las muestras reforzadas con fibras de acero (37.8 - 38.2 MPa).

Se sugiere que, a largo plazo, las fibras de acero contribuyen a la resistencia del material al actuar como refuerzo interno, previniendo la propagación de fisuras y aumentando la tenacidad del *shotcrete*. Las fibras, al estar distribuidas en la matriz, actúan como elementos de refuerzo que absorben y redistribuyen las internas (Masoudi & Sharifzadeh, 2018) (Zhang et al., 2024), lo que mejora la capacidad del material para soportar cargas sin fracturarse. Este efecto es particularmente relevante en aplicaciones de minería subterránea, donde el *shotcrete* está sujeto a cargas dinámicas y esfuerzos variables.

Además, la presencia de fibras de acero puede mejorar la resistencia residual del *shotcrete*, es decir, su capacidad para mantener cierta resistencia incluso después de que se hayan formado fisuras. Esto es crucial en entornos mineros, donde el material debe ser capaz de soportar cargas significativas incluso en condiciones de deformación avanzada.

5.2 Módulo de deformación

El módulo de deformación, que mide la rigidez del material, también se evaluó para cada tipo de muestra y tiempo de curado. Los resultados se presentan en la Tabla 8 y se representan gráficamente en la Figura 18.

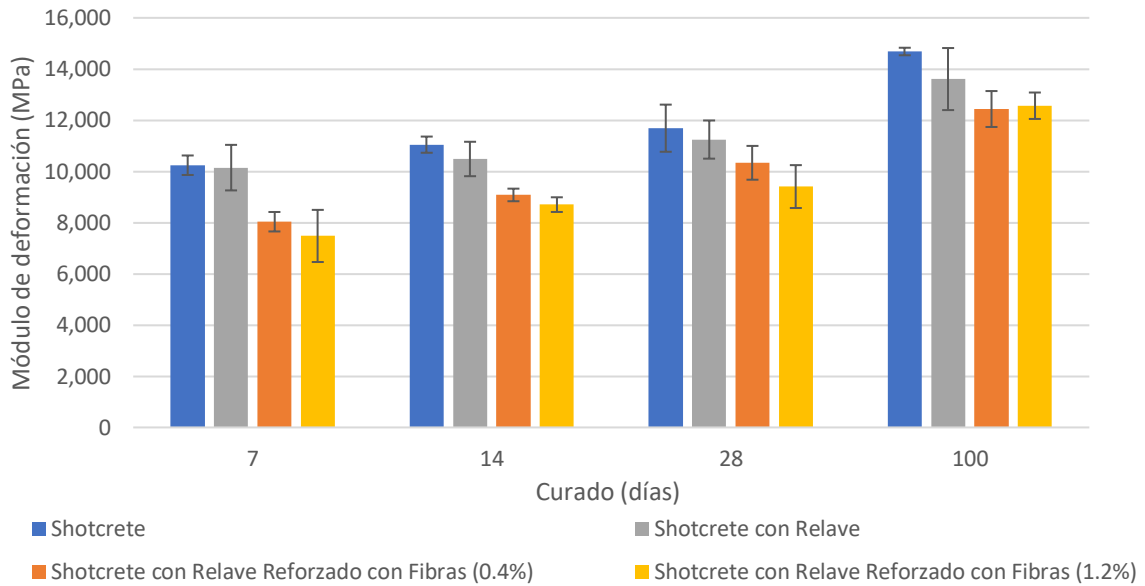


Figura 18: Módulo de deformación del hormigón en función del tiempo de curado.

A continuación, se describen los resultados por tiempo de curado:

Muestras curadas durante 7 días

- Hormigón convencional: $10,242 \pm 762$ MPa
- Hormigón con relave: $10,148 \pm 1,779$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): $8,036 \pm 760$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): $7,480 \pm 2,037$ MPa

El hormigón convencional mostró el mayor módulo de deformación, seguido por el hormigón con relave. Las muestras con fibras de acero presentaron una rigidez menor, especialmente en las muestras con 1.2% de fibras. Esta reducción inicial en la rigidez podría deberse a la interrupción de la matriz cementosa por la presencia de las fibras.

Muestras curadas durante 14 días

- Hormigón convencional: $11,046 \pm 632$ MPa
- Hormigón con relave: $10,486 \pm 1,344$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): $9,082 \pm 492$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): $8,704 \pm 573$ MPa

En este período, el hormigón convencional mantuvo la mayor rigidez, seguido por el hormigón con relave. Las muestras con fibras de acero mostraron una rigidez menor, pero con una variabilidad reducida.

Muestras curadas durante 28 días

- Hormigón convencional: $11,689 \pm 1,842$ MPa
- Hormigón con relave: $11,246 \pm 1,492$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): $10,337 \pm 1,321$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): $9,409 \pm 1,675$ MPa

El hormigón convencional continuó mostrando la mayor rigidez, seguido por el hormigón con relave. Las muestras con fibras de acero presentaron una rigidez intermedia, con una mayor variabilidad en las muestras con 1.2% de fibras.

Muestras curadas durante 100 días

- Hormigón convencional: $14,685 \pm 294$ MPa
- Hormigón con relave: $13,609 \pm 2,424$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (0.4%): $12,439 \pm 1,403$ MPa
- Hormigón con relave y fibras de acero (1.2%): $12,567 \pm 1,032$ MPa

A los 100 días, el hormigón convencional alcanzó la mayor rigidez, seguido por el hormigón con relave. Las muestras con fibras de acero mostraron una rigidez ligeramente menor, pero con una variabilidad reducida en comparación con los períodos anteriores.

5.2.1 Efecto de las fibras de acero en el módulo de deformación

La incorporación de fibras de acero al hormigón con relave introdujo un comportamiento diferencial en el módulo de deformación, reflejando una interacción compleja entre la matriz cementosa, el residuo minero y el refuerzo metálico. Durante las etapas iniciales de curado (7 y 14 días), las muestras reforzadas con 1.2% de fibras exhibieron una rigidez significativamente menor en comparación con el hormigón convencional, mientras que aquellas con 0.4% de fibras presentaron una reducción moderada pero consistente (Figura 19). Este fenómeno se explica por la formación de discontinuidades microscópicas en la interfaz fibra-matriz, las cuales actúan como zonas de debilidad transitoria durante el fraguado. Adicionalmente, la presencia de fibras altera la distribución de esfuerzos internos, generando una redistribución no homogénea que prioriza la absorción de energía sobre la rigidez inmediata.

A medida que avanzó el tiempo de curado (28 a 100 días), el módulo de deformación de las mezclas reforzadas mostró una tendencia convergente hacia los valores del hormigón convencional (Figura 18). Este proceso de recuperación está ligado a dos mecanismos complementarios:

1. Hidratación secundaria del cemento: La reacción prolongada entre el cemento Transex Plus y el agua permitió la formación de nuevos silicatos de calcio hidratados (C-S-H), sellando microgrietas y reduciendo la porosidad interfacial alrededor de las fibras.

2. Sinergia puzolánica del relave: La sílice presente en el relave reaccionó con el hidróxido de calcio residual, generando fases cementicias adicionales que mejoraron la adherencia fibra-matriz y homogenizaron la microestructura.

Si bien la rigidez final de las muestras reforzadas no superó al hormigón convencional, su capacidad para soportar deformaciones post agrietamiento aumentó de manera notable (Figura 19). Este equilibrio entre rigidez moderada y tenacidad elevada es particularmente relevante en minería subterránea, donde los sistemas de soporte deben resistir no solo cargas estáticas, sino también impactos cíclicos y vibraciones asociadas a actividades de perforación y tronadura (Zhang et al., 2024) . La menor rigidez inicial podría interpretarse como una ventaja en ciertos contextos geotécnicos, al permitir una redistribución más gradual de tensiones en macizos rocosos deformables.

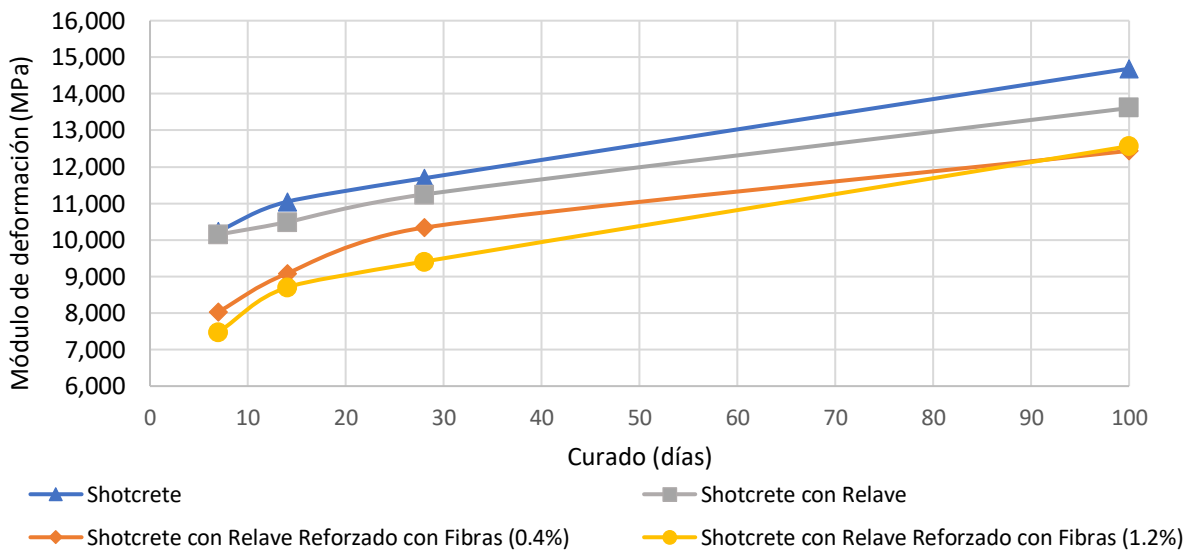


Figura 19: Relación entre el módulo de deformación y la concentración de fibras de acero.

5.3 Variabilidad de los resultados

Durante el análisis de datos de un estudio experimental, es fundamental cuantificar la dispersión de los resultados. Esto permite evaluar su confiabilidad y reproducibilidad. La desviación estándar (DEST) es una medida absoluta de la variabilidad. Expresa cuanto se dispersan los datos alrededor de la media (ASTM International, 2019). Este parámetro proporciona una idea directa de la consistencia de las mediciones. Por otro lado, el coeficiente de variación (CV) se define como el cociente entre la desviación estándar y la media. Se expresa en forma de porcentaje y ofrece una medida relativa de dispersión (ASTM International, 2019). Esto permite comparar la variabilidad entre conjunto de datos con distintas escalas o unidades. A continuación, se analizan estas dos variables. El objetivo de esto es discernir si las variaciones en los resultados se atribuyen a factores inherentes del estudio, a limitaciones metodológicas o a incertidumbres experimentales. Esto permite enriquecer la interpretación de los datos, aportando criterios que permiten validar conclusiones.

Respecto a la resistencia a la compresión uniaxial, se observan coeficientes de variación de entre un 1% y 11%, con una media del 5%. Las muestras de hormigón sin refuerzo obtuvieron la mayor variabilidad respecto a esta variable. Lo cual podría atribuirse a la heterogeneidad en la composición química y granulometría del residuo minero utilizado. Generando una interacción no uniforme entre el relave y la matriz cementosa. En las muestras de hormigón reforzado con fibras de acero, se observan valores de CV cercanos a la media general de la variable resistencia.

El módulo de deformación muestra una mayor variabilidad, respecto a la resistencia a la compresión uniaxial. Se observan un CV promedio del 12%, con máximos del 27% en muestras de hormigón reforzado con fibras 1.2% con 7 días de curado. Este comportamiento podría atribuirse a una distribución no homogénea de las fibras de acero dentro de la matriz de hormigón reforzada. Al haber una concentración de fibras de acero, también una mayor cantidad de ITZ en un punto específico de la muestra. Las ITZ son descritas como regiones críticas de debilidad microestructural entre las fibras y la matriz cementosa, caracterizadas por mayor porosidad, menor densidad y adherencia deficiente (Thong et al., 2016) (Zhang et al., 2025). Si bien el presente estudio no incluyó técnicas de caracterización microestructural para validar la distribución de fibras, la variabilidad experimental observada se explica coherentemente mediante estos mecanismos reportados en la literatura previamente expuesta

La variabilidad observada resalta la importancia de controlar la homogeneidad del relave y optimizar la distribución de las fibras. Además, refuerza la necesidad de realizar múltiples ensayos para obtener valores representativos, especialmente en aplicaciones mineras donde el hormigón debe cumplir con altos estándares de resistencia y durabilidad.

Se propone un protocolo de homogenización en tres etapas:

1. Premezcla seca de relave y cemento: Esto puede optimizar la reactividad puzolánica mediante contacto partícula-partícula entre estas dos materias primas. Esto podría generar una matriz de silicatos de calcio más homogénea.
2. Adición gradual de fibras en fases separadas: Se plantea que, al homogenizar el contenido de fibras se disminuye la concentración de fibras de acero en ciertos puntos de la matriz. Estos puntos de debilidad, al concentrarse en ciertos puntos pueden generar zonas de debilidad de la muestra. Generando mayor variabilidad en los resultados de muestras que son replicas.
3. Uso de superplastificantes: Los superplastificantes permiten disminuir viscosidad y facilitar movilidad de fibras sin alterar relación a/c (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2018). Lo que mejora considerablemente la trabajabilidad del material.

Adicionalmente, se sugiere evaluar geometrías alternativas (paralelepípedos, cilindros) según norma ASTM C39 para minimizar efectos de confinamiento artificial, así como muestras de mayor sección que mejoren la representatividad estadística en materiales heterogéneos."

5.4 Viabilidad económica

La mejora del 5% en resistencia a la compresión uniaxial del hormigón con relave a 100 días de curado respecto al hormigón convencional plantea una oportunidad para convertir a este tipo de mezcla cementosa en un material de refuerzo de labores mineras subterráneas.

Para evaluar la competitividad de la mezcla con relave, se desglosan los costos directos de las materias primas y el procesamiento para un metro cúbico (m^3) de hormigón. Las suposiciones de costos se basan en valores de mercado referenciales y en los costos operativos asociados al tratamiento del relave in situ. En Anexos 2 muestra los detalles de las suposiciones siendo las más relevantes: 1) el costo del relave procesado (0.025 USD/kg) considera clasificación granulométrica (8 USD/ton), homogenización química (12 USD/ton) y secado (5 USD/ton), excluyendo su valor como materia prima por ser un residuo minero; (2) la sustitución del 8% de áridos por relave ($184 \text{ kg}/m^3$) mantiene la densidad del hormigón en $2,300 \text{ kg}/m^3$; (3) el precio del cemento (0.120 USD/kg) corresponde a compras industriales de Transex Plus; (4) las fibras de acero (2.000 USD/kg) incluyen el costo de importación de DRAMIX 45/50BL; y (5) se incorpora un 0.05% de superplastificante (1,500 USD/kg) para compensar el incremento de finos.

El análisis muestra que el costo directo de los materiales del *shotcrete* es 78.46 USD / m^3 (Esta estrategia genera valor estratégico en sostenibilidad mediante un modelo regenerativo que, al evitar nuevos pasivos ambientales, reduce presiones sobre ecosistemas y comunidades, mitiga riesgos de contaminación y fortalece la licencia social para operar.

Tabla 4), el costo del shotcrete con relave es 79.75 USD /m³ (Tabla 5) y el costo del shotcrete con relave y fibras de acero 0.4% 93.04 USD /m³ (

Componente	Proporción	Masa (kg/m ³)	Costo Unitario (USD/kg)	Costo Total (USD)
Cemento	17.5%	402.5	0.120	48.30
Áridos	76.4%	1,666.2	0.018	26.66
Relave Procesado	8.0%	184.0	0.025	4.60
Agua	10.1%	232.3	0.0008	0.19
Total				79.75

Tabla 6). Al incorporar relave dentro de la mezcla los costos de los materiales aumentan un 1%, mientras que al agregar también fibras de acero aumentan los costos de los materiales un 19%.

Es importante notar que el uso de mezclas de *shotcrete* con relave genera un ahorro derivado de la no disposición de relaves. La gestión y el almacenamiento de relaves en depósitos implican costos considerables, estimados entre USD 1 y USD 2 por tonelada. Al reutilizar el relave en el *shotcrete*, este costo se evita, lo que se traduce directamente en un ahorro operacional. Esta estrategia genera valor estratégico en sostenibilidad mediante un modelo regenerativo que, al evitar nuevos pasivos ambientales, reduce presiones sobre ecosistemas y comunidades, mitiga riesgos de contaminación y fortalece la licencia social para operar.

Tabla 4: Costos de mecanismo de refuerzo shotcrete.

Componente	Proporción	Masa (kg/m ³)	Costo Unitario (USD/kg)	Costo Total (USD)
Cemento	17.5%	402.5	0.120	48.39
Áridos	72.4%	1,666.2	0.018	29.97
Agua	10.1%	232.3	0.0008	0.19
Total				78.46

Tabla 5: Costos de mecanismo de refuerzo shotcrete con relave.

Componente	Proporción	Masa (kg/m ³)	Costo Unitario (USD/kg)	Costo Total (USD)
Cemento	17.5%	402.5	0.120	48.30
Áridos	76.4%	1,666.2	0.018	26.66
Relave Procesado	8.0%	184.0	0.025	4.60
Agua	10.1%	232.3	0.0008	0.19
Total				79.75

Tabla 6: Costos de mecanismo de refuerzo *shotcrete* con relave reforzado con fibras de acero.

Componente	Proporción	Masa (kg/m ³)	Costo Unitario (USD/kg)	Costo Total (USD)
Cemento	17.3%	397.7	0.120	47.72
Áridos	63.6%	1,463.4	0.018	26.34
Relave Procesado	7.9%	181.8	0.025	4.55
Agua	10.0%	232.3	0.0008	0.15
Fibras de Acero	0.4%	9.2	2.000	18.40
Aditivo Superplastificante	0.05	1.19	1500	1.79
Disposición Relave	-	(181.8)	0.0015	(1.36)
Total				93.04

Si bien en análisis de costos realizado en este estudio revela un incremento en el costo de materiales al incorporar relave y fibras de acero al *shotcrete*, existe evidencia en la industria que al reemplazar el sistema combinado de *shotcrete* y mallas metálicas por *shotcrete* reforzado con fibras de acero reduce los tiempos de construcción en un 22% y disminuye el costo total en un 14% (Naml, 2021). Esto sugiere que el *shotcrete* con relave y fibras de acero podría ser económicamente viable como mecanismo de refuerzo, ya que los ahorros operacionales asociados a su implementación podrían compensar el mayor costo de los materiales. Al integrar todos los costos operativos en la construcción de túneles, el mayor costo de materiales podría amortiguarse, posicionando esta solución como competitiva frente al *shotcrete* con mallas de acero.

Además, el uso de relaves generados in situ reduce las distancias de transporte comparado con el abastecimiento de áridos desde canteras externas, generando ahorros significativos en combustible y emisiones de CO₂, lo que fortalece la sostenibilidad de la operación. Esta propuesta se alinea directamente con las directrices de la Política Nacional Minera 2050 y el Plan Nacional de Depósitos de Relaves. Esta alineación puede facilitar el acceso a subsidios estatales para proyectos de economía circular sostenible, que fomentan la inversión en tecnologías de remediación y valorización. Este enfoque proactivo mejora la licencia social para operar, fortalece la resiliencia de la cadena de suministro al reducir la dependencia de proveedores externos de áridos y genera un considerable valor reputacional.

Los ahorros operativos derivados de la eliminación de costos de disposición de pasivos, la optimización logística por uso in situ de relaves, y el acceso a incentivos fiscales, transforman la sustitución parcial de áridos por relave en mezclas de *shotcrete* en una inversión estratégica. Este modelo no solo se alinea con los esfuerzos globales por desarrollar industrias sostenibles, sino que

convierte un costo operativo y un riesgo ambiental en una fuente de valor tangible. Así, se demuestra que la economía circular aplicada a la minería puede trascender la sostenibilidad para consolidarse como un modelo de negocio rentable.

5.5 Limitaciones metodológicas

El estudio presenta limitaciones metodológicas que deben considerarse al interpretar los resultados.

La homogeneidad de los materiales pudo afectar la reproducibilidad, dado que el relave utilizado provino exclusivamente del depósito de Pucobre. Esto introduce sesgos al no contemplar variaciones granulométricas y geoquímicas de otros yacimientos.

La denominada "*resistencia a la compresión uniaxial*" obtenida para las muestras de hormigón corresponde a valores medidos en probetas cúbicas (102 mm), lo que no refleja la resistencia real del hormigón proyectado (*shotcrete*) en condiciones operativas. Las muestras de hormigón ensayadas no

Esta discrepancia se explica por el efecto de confinamiento generado en las caras de contacto con la prensa, que altera el estado triaxial de tensiones y sobreestima los resultados comparados con probetas cilíndricas estandarizadas. Por ejemplo, la norma ASTM C39/C39M-20 (ASTM International, 2020) exige el uso de cilindros para ensayos de compresión uniaxial. Si bien los datos obtenidos permiten comparaciones internas entre mezclas, no son válidos para modelamiento estructural, que requiere parámetros derivados de geometrías normalizadas (American Concrete Institute, 2024). Adicionalmente, las condiciones de carga estática (0.055 MPa/s) no replican escenarios dinámicos de minería subterránea, por lo que se recomienda complementar el estudio con ensayos cíclicos que evalúen vibraciones o impactos.

La ausencia de normativa chilena específica para ensayos de *shotcrete* obligó a adoptar estándares internacionales, lo que introduce incertidumbre en la comparabilidad de resultados. Diferencias metodológicas, como velocidades de carga, dimensiones de probetas o tiempos de curado, pueden generar discrepancias significativas al contrastar datos (Juhász et al., 2020).

El proceso de pulido generó irregularidades superficiales menores (< 0.1 mm). En materiales heterogéneos como el hormigón, estas variaciones alteran la distribución de carga y reducen la precisión en la medición del desplazamiento. Como consecuencia, se incrementa la incertidumbre durante el cálculo del módulo de deformación.

Capítulo 6

6. Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación evaluó experimentalmente la viabilidad técnica de incorporar relaves de cobre y fibras de acero en mezclas de *shotcrete*, analizando su impacto en parámetros mecánicos relevantes para aplicaciones de refuerzo en minería subterránea. Los hallazgos confirman que la sinergia entre estos componentes modifica significativamente las propiedades mecánicas estudiadas del material.

El estudio demostró que la sustitución parcial de áridos por relave minero (8% en peso) tiene un efecto puzolánico beneficioso. A los 100 días de curado, el *shotcrete* con relave alcanzó una resistencia a la compresión de 41.6 MPa, un 5% superior a la del *shotcrete* convencional. Esta mejora en la resistencia y durabilidad es el pilar de la viabilidad económica del proyecto. Aunque el costo directo inicial del *shotcrete* con relave es marginalmente superior (~1%) debido al procesamiento del residuo, este sobrecosto se compensa integralmente por los ahorros operacionales en disposición de relaves, optimización logística y acceso a incentivos para economía circular.

La adición de fibras de acero redujo inicialmente la resistencia en un 7.5% y la rigidez en un 27%, sin embargo, tras 100 días de curado esta diferencia se redujo a 4.5% para la resistencia y a 15% para la rigidez. Los valores finales no superaron al hormigón convencional. No obstante, la literatura sugiere que las fibras aportan una mejora en la resistencia post agrietamiento, parámetro que debe ser evaluado experimentalmente para determinar su real aporte en condiciones de alta exigencia como la minería subterránea.

La propuesta transforma un pasivo ambiental en un activo productivo. El análisis económico revela que el ahorro por la no disposición de relaves y la optimización logística al aprovechar residuos in situ, son ventajas económicas inmediatas. Estratégicamente, este proyecto alinea la operación minera con la Política Nacional Minera 2050 y el Plan Nacional de Depósitos de Relaves, facilitando el acceso a incentivos fiscales. En conjunto, la incorporación de un 8% de relave en el *shotcrete* no solo es técnicamente viable, sino una iniciativa rentable que mitiga riesgos ambientales fortalece la licencia social para operar y genera valor reputacional.

Para futuras investigaciones, se recomienda implementar protocolos avanzados de homogenización que complementen la metodología estandarizada utilizada en este estudio. Esto incluye la premezcla de cemento y relave, la adición gradual de fibras de acero y el uso de aditivos superplastificantes que reduzcan la tensión superficial fibra-matriz. Adicionalmente, se recomienda la utilización de técnicas de caracterización microestructural no destructiva (ej. tomografía de rayos X), que permitan cuantificar objetivamente la distribución de fibras y validar su correlación con la variabilidad mecánica observada de forma experimental.

7. Referencias

- Ally, A. N., Blance, M. M., Nana, U. J., Grâce, M. M., François, N., & Pettang, C. (2021). Recovery of Mining Wastes in Building Materials: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 379-397. <https://doi.org/10.4236/ojce.2021.114022>
- American Concrete Institute. (2013). *ACI CT-13 ACI Concrete Terminology*. https://www.concrete.org/portals/0/files/pdf/aci_concrete_terminology.pdf
- American Concrete Institute. (2024, 11 21). *Building Code Requeriments for Structur/al Concrete (ACI 318-19) Commentary on Building Code Requeriments for Structural Concrete (ACI 318R-19)*. American Concrete Institute. <https://doi.org/10.14359/51716937>
- ASTM International. (2019). *Standard Practice for Calculating and Using Basic Statistics*. <https://doi.org/10.1520/E2586-19>
- ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Norma Internacional. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-20
- Behera, S. K., Mishra, D. P., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S. K., Ghosh, C. N., . . . Mandal, P. K. (2021, 11 22). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, 309, 120-125. <https://doi.org/Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material>
- Benahsina, A., El Haloui, Y., Taha, Y., Elomari, M., & Bennouna, M. A. (2022). Substitution of natural clay by Moroccan solid mining wastes to manufacture fired bricks. *Materials Today: Proceedings*, 1324-1330. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.211>
- Choun, Y.-S., & Park, H.-K. (2015, 12 01). Containment performance evaluation of prestressed concrete containment vessels with fiber reinforcement. *Nuclear Engineering and Technology*, 884-894. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.07.003>
- Comisión Chilena del Cobre. (2021, 10). Identificación de oportunidades mediante la implementación de la Economía Circular en minería secundaria del Cobre.
- Comisión Chilena del Cobre. (2024). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 2004-2023*. <https://www.cochilco.cl/web/anuario-de-estadisticas-del-cobre-y-otros-minerales/>
- Comisión Chilena del Cobre. (2025). *Histórico producción de cobre y molibdeno*. Producción de Cobre mina por Empresa Anual: <https://www.cochilco.cl/web/historico-produccion-de-cobre-y-molibdeno/>
- Czajkowska, A., Raczkiwicz, W., & Ingaldi, M. (2023, 08). Determination of the linear correlation coefficient between Young's modulus and the compressive strength in fibre-reinforced concrete based on experimental studies. *Production Engineering Archives*, 288-297. <https://doi.org/10.30657/pea.2023.29.33>

Diario Oficial. (2011). Ley 20551 Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras. *Diario Oficial de la Federación*.

El andacollino. (2021, 02 18). *elandacollino.cl*. <https://www.elandacollino.cl/2021/02/18/andacollo-lidera-60-de-relaves-abandonados-en-chile-esta-en-nuestra-region-vacio-legal-impide-fiscalizacion-del-sernageomin/>

Fundación Chile. (2016). *Casos de Innovación de proveedores en la Minería Chilena*. Fundación Chile: <https://fch.cl/publicaciones/>

Gomasa, R., Talakokula, V., Kalyana Rama Jyosyula, S., & Bansal, T. (2023, 11 17). A review on health monitoring of concrete structures using embedded piezoelectric sensor. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133-179. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133179>

Hoek, E. (2023). *Practica Rock Engineering*. <https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-E.Hoek-2023.pdf>

Idowu, O., & Black, L. (2018, 06). The effect of improper curing on properties that may affect concrete durability. *Magazine of Concrete Research*, 70(12), 633-647. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00148>

Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2018, 07 13). *Guía Chilena de Hormigón Proyectado*. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile: <https://ich.cl/2da-edicion-guia-chilena-de-hormigon-proyectado/>

International Copper association. (2023). *Copper - The Pathway to Net Zero*. <https://internationalcopper.org/>

James, B., & Ivan, O. (2019). 5 - Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. (C. Peter, C. Hewlett, & L. Martin, Edits.) *Butterworth-Heinemann*(9780081007730), 157-250. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00005-8>

Juhász, K., Schaul, P., & Winterberg, R. (2020, 10). Influence of test methodology on the applicability of test results of fibre reinforced concrete for design. *Design to Structural Applications*, 50-59. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0095.Ch06>

Khandani, F. S., Ataopur, H., Rad, M. Y., & Khosh, B. (2023, 07 01). An experimental study on the mechanical properties of underground mining backfill materials obtained from recycling of construction and demolition waste. *Case Studies in Construction Materials*, e02046. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02046>

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Lei, D., Zhang, Y., Lu, Z., Wang, G., Lai, Z., Lin, M., & Chen, Y. (2025, 03 13). A machine learning framework for predicting shear strength properties of rock materials. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91436-8>

Masoudi, R., & Sharifzadeh, M. (2018, 07 01). Reinforcement selection for deep and high-stress tunnels at preliminary design stages using ground demand and support capacity approach. *International Journal of Mining Science and Technology*, 573-582. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.01.004>

Ministerio de Minería de Chile. (2021). *MINERÍA 2050: Política Nacional Minera*. Chile Agenda 2030: <https://www.chileagenda2030.gob.cl/>

Ministerio de Minería de Chile. (2021). *Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible*. https://www.minmineria.gob.cl/media/2021/05/Plan_Nacional_de_Despositos_de_Relaves_para_una_Mineria_Sostenible_2021.pdf

Naml, M. (2021, 12 01). Evaluation of the effect of using fiber reinforcement in tunnel linings for metro projects. *Underground Space*, 732-750. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.08.002>

NSW Government. (2023). Shotcrete design guideline : design guideline to improve the appearance of shotcrete in NSW.

Polpaico. (2020, 11). *Vivienda Sustentable: Polpaico*. https://www.polpaico.cl/wp-content/uploads/2023/05/vivienda_sustentable.pdf

Prajapati, G. N., Chen, W., & Mitri, H. S. (2025, 05 21). Fiber-reinforced polymer (FRP) rockbolts and their potential application in low pH mines: A state-of-the-art literature review. *Journal of Industrial Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.jinse.2025.05.001>

Rahimi, B., Sharifzadeh, M., & Feng, X.-T. (2020). Ground behaviour analysis, support system design and construction strategies in deep hard rock mining – Justified in Western Australian's mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.01.006>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2025, Mayo 1). *Catastro de Depósito de Relaves en Chile 2024*. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

Thong, C. C., Teo, D., & Ng, C. (2016, 03). Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. *Construction and Building Materials*, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.188>

Thyni, F. (2014). *Design of shotcrete for dynamic rock support by static testing*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1907809/FULLTEXT01.pdf>

Unsihuay Asto, D. R. (2018). *Implementación del Shotcrete reforzado con fibra de acero, comparado con el sostenimiento estructural en labores mineras subterráneas, Up- San Cristobal*,

Volcan Cia Minera SAA. Universidad Nacional del Centro del Perú.
<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5317>

Vo, T. L., Nash, W., Del Galdo, M., Rezania, M., Crane, R., Mousavi Nezhad, M., & Ferrara, L. (2022, 02 15). Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130213>

Widjojoko, L., Hardjasaputra, H., & Susilawati. (2014). Study of Gold Mine Tailings Utilization as Fine Aggregate Material for Producing Shotcrete Based on Concept of Green Technology. *International Conference on Engineering and Technology Development (ICETD)*. <http://artikel.ubl.ac.id/index.php/icetd/article/view/349>

Yankelevsky, D. Z. (2024, 07 12). The uniaxial compressive strength of concrete: revisited. *Materials and Structures*, 57(6), 144. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02422-x>

Yasuda, N. (2023, 01 01). Hammering sound of concrete with defects and spalling risk. *Tunnelling and Underground Space Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104789>

Zhang, M., Fan, J., Li, Z., Jiang, D., Chen, J., & Nelias, D. (2025, 01 31). Failure analysis and enhancement measures of wet shotcrete support during cold periods in mining. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139769>

Zhang, X., Ma, C., Liu, C., Zhang, K., Lu, J., & Liu, C. (2024, 01 12). Uniaxial tensile properties of steel fiber-reinforced recycled coarse aggregate shotcrete: Test and constitutive relationship. *Construction and Building Materials*, 411, 134-202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134202>

Zhang, Z., Wang, Z. Z., Goh, S. H., & Ji, J. (2024, 08 01). Deep Learning–Based Prediction of Tunnel Face Stability in Layered Soils Using Images of Random Fields. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 150(8). <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-12109>

Zhao, K., Zhang, P., Xue, S., Han, S., Müller, H. S., Xiao, Y., . . . Li, Q. (2021, 02 01). Quasi-elastic neutron scattering (QENS) and its application for investigating the hydration of cement-based materials: State of the art. *Materials Characterization*. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110890>

Capítulo 8

8. Anexos

8.1. Anexos 1: Resultados

Tabla 7: Datos brutos de ensayos: Esfuerzo, módulo de deformación y área ensayada por muestra (identificación R0FA00C007E1 a R1FA12C100E3).

Tipo	Área Ensayada mm ²	Esfuerzo Mpa	Módulo de deformación MPa
R0FA00C007E1	10434.6	31.0	-
R0FA00C007E2	10636.1	33.9	9,704
R0FA00C007E3	10342.5	34.3	10,781
R0FA00C014E1	10200.4	34.7	11,749
R0FA00C014E2	10230.4	36.0	10,524
R0FA00C014E3	10433.7	34.4	10,866
R0FA00C028E1	10402.8	37.2	11,053
R0FA00C028E2	10301.9	38.0	13,764
R0FA00C028E3	10373.2	36.6	10,250
R0FA00C100E1	10030.0	37.2	14,316
R0FA00C100E2	10170.4	36.6	15,007
R0FA00C100E3	10320.9	41.9	14,732
R1FA00C007E1	10505.9	33.5	8,891
R1FA00C007E2	10382.6	28.3	5,584
R1FA00C007E3	10260.5	34.2	11,406
R1FA00C014E1	10413.5	36.0	9,893
R1FA00C014E2	10220.2	35.5	9,541
R1FA00C014E3	10567.7	37.1	12,025
R1FA00C028E1	10373.4	36.9	12,918
R1FA00C028E2	10433.5	38.9	10,051
R1FA00C028E3	10342.6	38.6	10,768
R1FA00C100E1	10332.4	41.2	14,163
R1FA00C100E2	10302.2	46.3	15,707
R1FA00C100E3	10281.9	37.3	10,956
R1FA04C007E1	10424.3	32.0	7,498
R1FA04C007E2	10363.1	31.4	6,668
R1FA04C007E3	10536.7	28.4	8,573
R1FA04C014E1	10475.2	31.8	9,029
R1FA04C014E2	10373.3	34.3	8,619
R1FA04C014E3	10332.0	35.2	9,598

R1FA04C028E1	10383.3	36.6	11,822
R1FA04C028E2	10348.4	35.6	9,291
R1FA04C028E3	10516.1	36.4	9,899
R1FA04C100E1	10342.7	39.0	13,865
R1FA04C100E2	10373.0	38.4	12,392
R1FA04C100E3	10393.4	36.1	11,060
R1FA12C007E1	10300.6	31.5	8,921
R1FA12C007E2	10628.6	30.7	6,040
R1FA12C007E3	10475.0	32.8	5,494
R1FA12C014E1	10516.3	34.1	8,171
R1FA12C014E2	10322.3	34.9	9,310
R1FA12C014E3	10495.6	35.4	8,631
R1FA12C028E1	10382.6	41.6	10,593
R1FA12C028E2	10393.5	39.8	8,224
R1FA12C028E3	10362.9	34.4	5,232
R1FA12C100E1	10526.7	38.2	13,410
R1FA12C100E2	10371.6	36.5	11,417
R1FA12C100E3	10383.4	39.8	12,874

Tabla 8: Resultados de resistencia a la compresión uniaxial y módulo de deformación por tipo de muestra y tiempo de curado (7-100 días).

Tipo de muestra	Tiempo de Curado	Resistencia a la compresión uniaxial			Módulo de deformación		
		MPa	DEST	CV (%)	MPa	DEST	CV (%)
Hormigón	7	33.1	1.80	5%	10,242	762	7%
Hormigón	14	35.0	0.85	2%	11,046	632	6%
Hormigón	28	37.3	0.57	2%	11,689	1842	16%
Hormigón	100	39.6	3.32	8%	14,685	294	2%
Hormigón con relave	7	32.0	3.22	10%	10,148	1779	18%
Hormigón con relave	14	36.2	0.82	2%	10,486	1344	13%
Hormigón con relave	28	38.1	1.08	3%	11,246	1492	13%
Hormigón con relave	100	41.6	4.51	11%	13,609	2424	18%

Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (0.4%)	7	30.6	1.93	6%	8,036	760	9%
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (0.4%)	14	33.8	1.76	5%	9,082	492	5%
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (0.4%)	28	36.2	0.53	1%	10,337	1321	13%
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (0.4%)	100	37.8	1.53	4%	12,439	1403	11%
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (1.2%)	7	31.7	1.06	3%	7,480	2037	27%
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (1.2%)	14	34.8	0.66	2%	8,704	573	7%
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (1.2%)	28	36.6	3.82	10%	9,409	1675	18%
Hormigón con relave reforzado con fibras de acero (1.2%)	100	38.2	2.25	4%	12,567	1032	8%

8.2. Anexos 2: Suposiciones

Basado en los resultados de búsqueda, la cantidad de malla de acero utilizada por m³ de *shotcrete* y las consideraciones de costos asociadas se determinan de la siguiente manera:

1. Cemento Transex Plus (USD 0.120/kg):

- Precio referencial para compras industriales.

2. Áridos Figueroa (USD 0.018/kg):

- Arena gruesa conforme a NCh163 (cotización para 10,000+ toneladas).

3. Relave procesado (USD 0.025/kg):

- Costo de procesamiento:
 - Clasificación granulométrica (USD 8/ton).
 - Homogenización química (USD 12/ton).
 - Secado (USD 5/ton).
- No incluye valor de "materia prima" (residuo minero = USD 0) *

4. Aditivo fluidificante (USD 1.500/kg):

- Superplastificante tipo PCE para mantener trabajabilidad (dosificación: 0.3% peso cemento).