



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

SEDE VALLENAR

COMO SE PUEDE REUTILIZAR EL RELAVE EN EL SHOTCRETE PARA SU USO EN AMBIENTES MINEROS

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Técnico Universitario en Minas.

Profesor Guía: Enrique Andrés Veragua Guerra

Yenifer Salinas González

Manuel Acosta Marcoleta

Ignacio Araya Roja

Romina Morales Lagües

Vallenar, 2025

Dedicatoria.

Familia

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, quienes han sido nuestro sustento y nos han brindado todo su apoyo durante esta etapa de nuestras vidas. Cada sacrificio, palabra de alientos, paciencia y gestos de apoyo nos han permitido llegar hasta aquí. Gracias por creer en nuestras capacidades incluso en los momentos más difíciles donde uno no tenía tiempo para otras cosas que no fueran los estudios, donde muchas veces uno agachaba la cabeza, por impulsarnos a seguir adelante y por recordarme que los sueños sí se pueden volver realidad con mucho esfuerzo y perseverancia. Este logro también se lo dedicamos a nuestras familias porque nada de esto habría sido posible sin el apoyo de ellos y gracias por confianza incondicionalmente con nosotros.

Profesor Guía.

Agradecemos profundamente su disposición para enseñar, sus excelentes métodos de enseñanzas, su compromiso con cada uno de nosotros y con su paciencia, ya que explicaba cada vez que uno no entendía se tomaba el tiempo hasta que uno llegaba a comprender la bien la materia y siempre lo hacía con una amabilidad. Su apoyo ha sido más allá de lo académico, nos ha brindado motivación, de que no nos tenemos que conformar con poco, que tenemos que seguir adelante a pesar de todo y ha acompañado este proceso con un interés sincero por nuestro aprendizaje. Gracias por ayudarnos a transformar cada avance en un paso seguro y por aportar de manera tan significativa a nuestra formación.

Agradecimiento

Se agradece a la empresa Planta Pellets de Huasco quienes nos facilitó el relave de hierro con sus respectivos análisis y Planta Enami Taltal quien nos facilitó el relave de cobre con sus respectivos análisis, cuya participación fue importante para poder desarrollar esta investigación. Su disposición para colaborar en este trabajo nos permitió acceder a información de gran relevancia para la investigación, la cual sin sus colaboraciones nos hubiera hecho más complicado desarrollar este trabajo, gracias por su compromiso con el desarrollo de proyectos orientados a la innovación, sin su apoyo este trabajo no habría alcanzado el nivel de detalle ni la calidad técnica que lo caracteriza.

Índice

CAPÍTULO 1: MARCO INTRODUCTORIO.....	11
1.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 Antecedentes.....	12
1.4 Justificación.	12
1.5 Alcance.	13
1.6 Planteamiento del problema.....	13
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	15
2.1 Fortificación.	15
2.2 Tipo de fortificación.....	16
2.3 Shotcrete.	16
2.3.1 Componentes.	17
2.3.2 Aditivos Químicos.....	17
2.3.3 Fibras de Refuerzo.....	17
2.3.4 Medidas del shotcrete normal.	17
2.4 Proyección de shotcrete.	18
2.5 Proyección con equipos robotizados.....	18
2.6 Proyección Manual.....	19
2.7 Máquinas y Equipos para Shotcrete.	20
2.7.1 Equipo para mezcla seca.	21
2.7.2 Máquinas de cámara simple o doble.	21
2.8 Equipo para mezcla húmeda.	24
2.9 Propiedades / Variables del shotcrete.....	26
2.9.1 Dureza.	26
2.9.2 Resistencia a la compresión.	27
2.9.3 Densidad.....	29
2.9.4 Retracción por secado.	29
2.9.5 Adherencia.	30
2.10 Relaves.....	30
2.11 Tipos de depósitos de relaves.	31
2.11.1 Tranque de Relave.....	31

2.11.2 Embalse de relave.	31
2.11.3 Relave Espesado.	31
2.11.4 Relave Filtrado.	32
2.12 Estudios previos.	32
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.	33
3.1 Tipo y enfoque de investigación.	33
3.2 Diseño investigación.	33
3.3 Materiales y equipos utilizados.	33
3.4 Objetivo 1: Caracterizar un shotcrete común para determinar las variables a analizar.	34
3.5 Objetivo 2: Crear shotcrete con relave a escala piloto para determinar su aplicabilidad en minería.	35
3.5.1 Obtención de relave.	35
3.5.2 Creación de shotcrete.	36
3.5.4 Creación de probetas	38
3.5.5 Pruebas realizadas con probetas.	39
3.6 Objetivo 3: Aplicar shotcrete con relave recreando una caja de galería para determinar si es factible en un ambiente minero.	44
3.6.1 Diseño de caja minera.	44
3.6.2 Recopilación de materiales.	44
3.6.3 Construcción de la caja.	44
3.6.4 Creación de equipo proyección.	45
3.6.5 Aplicación del shotcrete.	46
3.6.6 Prueba adherencia.	47
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS.	51
4.1 Objetivo 1: Caracterizar un shotcrete común para determinar las variables a analizar.	51
4.2 Objetivo 2: Crear shotcrete con relave a escala piloto para determinar su aplicabilidad en minería.	52
4.2.1 Obtención de relave.	52
4.2.2 Creación de shotcrete	56
4.2.3 Pruebas realizadas con las probetas.	58
4.2.4 Características luego de la retracción por secado.	62
4.3 Objetivo 3: Aplicar shotcrete con relave recreando una caja de galería para determinar si es factible en un ambiente minero.	65

4.3.1 Análisis adherencia de shotcrete normal	65
4.3.2 Análisis de adherencia de shotcrete con 25% de relave de cobre	66
4.3.3 Análisis de adherencia de shotcrete con 50% de relave de cobre	67
4.3.4 Análisis adherencia de shotcrete de 50% de relave de hierro	68
4.3.5 Análisis adherencia de shotcrete de 65% de relave de hierro	68
4.4 Objetivo 4: Evaluar características del shotcrete con relave aplicado para compararlo con el shotcrete normal.	68
4.4.1 Análisis de las pruebas realizadas.	69
CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN	71
Bibliografía.....	73

Índice de tablas.

Tabla 1: Escala de Mohs. _____	26
Tabla 2: Resistencia recomendadas a los 28 días. _____	27
Tabla 3: Ensayo de compresión simple. _____	28
Tabla 4: Organización de información. _____	34
Tabla 5: Shotcrete normal. _____	35
Tabla 6: Shotcrete con 50% Relave de Cobre. _____	36
Tabla 7: Shotcrete con 65% Relave de Hierro. _____	36
Tabla 8: Shotcrete con 50% Relave de Hierro. _____	36
Tabla 9: Shotcrete con 25% Relave de Cobre. _____	37
Tabla 10: Resistencia a la compresión _____	40
Tabla 11: Dureza. _____	41
Tabla 12: Retracción por secado. _____	41
Tabla 13: Densidad. _____	42
Tabla 14: Tabla comparativa shotcrete convencional y con relaves. _____	47
Tabla 15: Designación de colores y puntos. _____	48
Tabla 16: Análisis del relave de cobre. _____	50
Tabla 17: Análisis relave de hierro. _____	51
Tabla 18: Shotcrete normal a escala piloto. _____	53
Tabla 19: Shotcrete con un 25% Relave de Cobre a escala piloto. _____	53
Tabla 20: Shotcrete con un 50% de Relave de Cobre a escala piloto. _____	54
Tabla 21: Shotcrete con un 50% de Relave de Hierro a escala piloto _____	54
Tabla 22: Shotcrete con un 65% de Relave de Hierro a escala piloto _____	55
Tabla 23: Resultado de la Resistencia a la compresión. _____	55
Tabla 24: resultado de dureza de shotcrete convencional y con relave. _____	56
Tabla 25: resultados de la densidad. _____	57
Tabla 26: Retracción de secado por hora. _____	58
Tabla 27: Comparación de pruebas. _____	66

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Equipo robotizado por vía húmeda. _____	18
Ilustración 2: equipo robotizado por vía seca. _____	19
Ilustración 3: Proyección manual por vía húmeda. _____	19
Ilustración 4: Proyección manual por vía seca. _____	20
Ilustración 5: Vía seca de una cámara. _____	21
Ilustración 6: vía seca de doble cámara. _____	22
Ilustración 7: Rotor. _____	23
Ilustración 8: Plato rotatorio. _____	23
Ilustración 9: Plato rotatorio. _____	24
Ilustración 10: Detalle de bombeo para mezcla húmeda con desplazamiento positivo por pistón. _____	25
Ilustración 11: Detalle vía húmeda de tornillo sin fin. _____	25
Ilustración 12: Probeta de 15 cm. _____	39
Ilustración 13: Probeta de 5 cm. _____	40
Ilustración 14: Recreación de caja _____	43
Ilustración 15: Creación equipo de proyección. _____	44
Ilustración 16: Proyección recreada. _____	45
Ilustración 17: Prueba adherencia. _____	46
Ilustración 18 _____	52
Ilustración 19: Relave de cobre Enami Taltal. _____	52
Ilustración 20: Shotcrete normal seco. _____	59
Ilustración 21: Probeta shotcrete 25% relave cobre seca. _____	60
Ilustración 22: Shotcrete 50% relave cobre seco. _____	60
Ilustración 23: Shotcrete 50% relave hierro seco. _____	61
Ilustración 24: Shotcrete 65% Relave Hierro. _____	61
Ilustración 25: Caja minera Shotcrete Normal. _____	62
Ilustración 26: Caja minera 25% Relave Cobre. _____	63
Ilustración 27: Caja minera 50% Relave Cobre. _____	64
Ilustración 28: Caja minera 50% Hierro. _____	64
Ilustración 29: Caja minera 65% Hierro. _____	65

Resumen

El propósito de este estudio tiene como objetivo evaluar la posibilidad de utilizar el relave minero como sustituto parcial de los agregados finos en el shotcrete, con el fin de obtener una alternativa para su uso en minería.

Para esto, se estudió el shotcrete tradicional, analizando sus componentes fundamentales, su método de aplicación y sus variables, tales como la dureza, la resistencia, la densidad, la adherencia y la retracción por secado. Después, se elaboraron varias mezclas de shotcrete con variadas cantidades de relave, que fueron analizadas mediante diferentes pruebas.

Se diseñaron taludes a escala para tratar de recrear condiciones mineras y creando un sistema de proyección casero por vía húmeda. Las mezclas creadas fueron sometidas a diversos análisis de sus variables como la de dureza, resistencia a la compresión, densidad, adherencia y retracción por secado, para esto se utilizaron lápiz rayador, martillo geológico, pesa y probetas para luego introducirlas al horno.

Los resultados mostraron que se pueden incorporar relaves en la mezcla de shotcrete sin alterar de manera influyente sus propiedades e incluso mejorando las. Las mezclas con relave de cobre mostraron un mejor tiempo de secado que las demás muestras creadas, mientras que la mezcla con 50% de relave de cobre destacó por su resistencia, retracción de secado, adherencia, alta densidad y tiempo de secado.

La investigación muestra que los relaves mineros poseen el potencial de ser utilizados como sustituto parcial en la producción de shotcrete, lo que representa una alternativa técnica viable y con alternativas de utilización en circunstancias reales de minería subterránea. Los resultados posibilitan que se lleven a cabo investigaciones futuras con el propósito de mejorar las mezclas, aumentar su durabilidad y analizar su funcionamiento en condiciones a mayor escala.

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the possibility of using mine tailings as a partial substitute for fine aggregates in shotcrete, in order to obtain an alternative material for use in mining.

To achieve this, traditional shotcrete was studied, analyzing its fundamental components, application methods, and variables such as hardness, strength, density, adhesion, and drying shrinkage. Afterwards, several shotcrete mixtures with different amounts of tailings were prepared and analyzed through various tests.

Scaled slopes were designed to recreate mining conditions, along with a homemade wet-mix spraying system. The created mixtures were subjected to diverse analyses of their variables, such as hardness, compressive strength, density, adhesion, and drying shrinkage. For these tests, a scratch pencil, geological hammer, scale, and sample molds were used, and later the specimens were placed in the oven.

The results showed that tailings can be incorporated into the shotcrete mixture without significantly altering its properties and even improving them. The mixtures with copper tailings presented a better drying time than the other samples, while the mixture with 65% iron tailings stood out for its strength, hardness, adhesion, and high density.

In conclusion, the research shows that mine tailings have the potential to be used as a partial substitute in the production of shotcrete, representing a technically viable alternative with potential applications in real underground mining conditions. The results enable future research aimed at improving the mixtures, increasing their durability, and analyzing their performance on a larger scale.

CAPÍTULO 1: MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Introducción.

La minería es una de las actividades económicas más importantes de Chile, está presente a lo largo de nuestro país, en esta actividad se realizan inversiones de gran magnitud, para ello se deben hacer estudios de diversos tipos para tratar de abaratar los costos de la inversión, el uso del shotcrete es fundamental para dicha actividad debido a que ayuda al sostenimiento y fortificación de las obras realizadas, pero este producto utiliza recursos naturales como el agua y la arena, estos recursos son los más utilizados en el mundo por lo que en el siguiente proyecto se estudiará el uso de relaves para crear shotcrete y poder utilizarlo en minería, para ello se analizará a fondo las propiedades de estos residuos minerales con el fin de saber cuál de los shotcrete a realizar es más conveniente.

1.1 Objetivo general.

- Estudiar el uso del relave en la creación del shotcrete para ser utilizado en minería, con el fin de reutilizar el relave como un agregado.

1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar un shotcrete común para determinar las variables a analizar.
- Crear shotcrete con relave a escala piloto para determinar su aplicabilidad en minería.
- Aplicar shotcrete con relave recreando una caja de galería para determinar si es factible en un ambiente minero.
- Evaluar características del shotcrete con relave aplicado para compararlo con el shotcrete normal.

1.3 Antecedentes.

Actualmente, Chile se encuentra en el tercer lugar del ranking de naciones con mayor número de depósitos de relaves en el mundo, solo superado por China y Estados Unidos. Estos depósitos representan un desafío ambiental y social, con muchos activos y abandonados cerca de zonas pobladas.

De acuerdo con el último catastro del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), publicado el 24 de enero 2025 Actualmente, el país cuenta con un total de 795 depósitos de relaves, distribuidos de la siguiente manera: 53 en estado de abandono, 128 activos, 12 en construcción, 1 en revisión y 601 inactivos.

Un grupo de investigadores de Minería, Ingeniería y Gestión de la Construcción, y Estructural y Geotécnica de la Universidad Católica (UC), lograron transformar los relaves del cobre en materiales para construcción, a partir de innovadores procesos de fabricación.

Los residuos de la actividad minera contribuyen al desarrollo sustentable de la industria de la construcción. “Un aspecto central de la propuesta creada es la integración de tecnologías para transformar los relaves en materiales de construcción seguros y sostenibles. La idea es reducir drásticamente el volumen de estos residuos en el medioambiente “profesor de Ingeniería UC.

1.4 Justificación.

Se eligió el tema del shotcrete con relave porque se considera que el tema es importante al investigar alternativas que permitan avanzar en la minería. Los relaves mineros, al acumularse en grandes depósitos, generan un impacto relevante en el manejo y control de grandes volúmenes de material, lo que implica desafíos operativos asociados a la estabilidad y al monitoreo permanente de estas áreas. Estos desafíos no solo incluyen el almacenamiento y la gestión de los relaves, sino que también los riesgos asociados con la seguridad y la responsabilidad asociada. Frente a este escenario, utilizar el relave como parte de la mezcla del shotcrete representa una oportunidad de darle valor agregado a un

residuo que habitualmente se considera como desecho, transformándolo en un recurso útil para el sostenimiento de túneles y labores mineras.

1.5 Alcance.

La utilización de relaves mineros como material de construcción busca utilizar nuevos agregados. Este trabajo analiza relaves de cobre y hierro para evaluar su aplicación en shotcrete. Los relaves provienen de:

- Planta de Pellets de Huasco: Ubicada en Huasco, región de Atacama, produce pellets de hierro.
- Planta Arcadio Copiapó.

El objetivo de este proyecto es determinar el tipo de shotcrete más adecuado para incorporar distintos tipos de relave en los shotcrete convencional. Analizando su comportamiento como lo son la durabilidad, resistencia y dureza. Para esto se busca realizar comparaciones entre el shotcrete convencional y shotcrete con incorporación de relave, así identificando el comportamiento de cada uno frente a condiciones similares en minería.

La investigación pretende entregar resultados técnicos y prácticos que aporten al desarrollo de nuevas alternativas de fortificación en minería, y así aprovechando el material desperdiciado para la construcción de shotcrete con relave en mineras como refuerzo en minería.

1.6 Planteamiento del problema

En el sector minero, uno de los mayores retos ecológicos es la administración eficiente de los desechos minerales, también llamados relaves, los cuales se generan durante las distintas etapas de extracción y procesamiento del mineral. Estos residuos, al acumularse en grandes volúmenes, son depositados en instalaciones especialmente habilitadas para su contención, debido a que pueden representar un riesgo para el entorno si no se manejan de manera adecuada. En este contexto, la gestión de relaves exige un

control permanente, monitoreo constante y la aplicación de medidas que aseguren la estabilidad y seguridad de los depósitos a largo plazo.

Por otra parte, en la estabilización de túneles y obras subterráneas, el hormigón proyectado, comúnmente conocido como shotcrete, corresponde a una de las técnicas más utilizadas dentro de la minería. Este material es fundamental para otorgar soporte, reducir desprendimientos y reforzar superficies irregulares o fracturadas. Sin embargo, su elaboración depende de componentes como el cemento, el agua y los agregados naturales, los cuales presentan una alta demanda dentro del rubro minero y requieren una extracción continua para satisfacer las necesidades de fortificación. Debido a esto, se ha vuelto necesario explorar alternativas que permitan diversificar los materiales utilizados, incorporando opciones que puedan disminuir la presión sobre los recursos naturales y, al mismo tiempo, mantener la calidad y el rendimiento estructural del shotcrete en condiciones subterráneas.

Frente a esta circunstancia, se planteó la siguiente cuestión:

¿De qué forma se puede aprovechar el relave minero como un componente alternativo o suplementario en la composición de shotcrete, sin afectar negativamente las características mecánicas, la resistencia ni la estabilidad estructural de la mezcla?

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Fortificación.

La fortificación es clave en minería porque permite estabilizar y, con ello, lograr el acceso seguro a las excavaciones subterráneas. Es, sin duda, una actividad obligatoria del ciclo minero, ya que solo una vez concretada es posible acceder al mineral de forma segura. En este contexto, la fortificación es una operación unitaria que forma parte esencial del ciclo minero subterráneo, y es la encargada de asegurar la estabilidad de las infraestructuras mineras subterráneas, tales como galerías, cavernas y túneles, entre otros.

(el mercurio, 2023)

La fortificación se realiza para evitar derrumbes no planificados, existen diversos tipos de fortificación, ellos se pueden clasificar:

1.- Fortificaciones rígidas. Qué son las que se sostienen sin permitir ningún movimiento de la roca y deben ser lo bastante resistentes para sujetar los bloques que puedan caerse. En la actualidad solo se usan en las bocas de las minas o sectores donde por razones tectónicas, de mala calidad de la roca o explotaciones hundidas antiguas se ha perdido totalmente las propiedades resistentes de la roca. (Sernageomin, 2010)

Los sistemas más usados para estas fortificaciones son los marcos que pueden ser de madera o acero.

2.- Fortificaciones flexibles. Son fortificaciones que permiten deformaciones de la roca con lo que se alivian los esfuerzos y al deformarse mejoran sus propiedades resistentes. Son la mayoría de las fortificaciones modernas como: marcos deslizantes, cintas, marcos noruegos, y la mayor parte, pernos de anclajes y cables. (Sernageomin, 2010)

3. Fortificación con pernos y cables. Los pernos pueden ser de anclaje puntual o de anclaje repartido. En el primer caso los pernos se sujetan en el fondo de la perforación mediante cabezas expansibles o cemento o resina. En el segundo caso pueden ser pernos de fricción, pernos con inyecciones de cemento o inyecciones de resinas a lo largo de todo el perno. (Sernageomin, 2010)

El perno resiste el peso de un bloque, ya sea por adherencia de su cabeza o por la adherencia a lo largo de todo el perno cuando es de anclaje repartido. (Sernageomin, 2010)

Cuando el perno está bien adherido a la roca, el perno puede sufrir un alargamiento, lo que mejora su resistencia hasta límite de fluencia. Lo mismo pasa con los cables. (Sernageomin, 2010)

También se usan pernos y cables en forma activa o sea se tensa para producir un alargamiento, lo que produce una fuerza con la roca por medio de la placa, que la une a la roca. El cable pos tensado se tensa con el movimiento de la roca y generalmente se ponen de gran longitud. (Sernageomin, 2010)

2.2 Tipo de fortificación.

Existen tres tipos de fortificación: de refuerzo, de retención y de soporte. La fortificación de refuerzo se usa para evitar la separación y el deslizamiento de bloques en el macizo rocoso. Un ejemplo de estos son los pernos y cables.

La fortificación de retención, por su parte, se utiliza para mantener confinados los elementos de roca fracturada; estas pueden ser mallas, cintas de acero (straps) y shotcrete.

Por último, la fortificación de soporte se usa para soportar cargas o bloques individuales, como lo son los arcos rígidos, arcos deslizantes y rellenos. (el mercurio, 2023)

2.3 Shotcrete.

El shotcrete es fundamental en la minería subterránea debido a su capacidad para proporcionar un soporte estructural duradero y eficiente. Su uso permite una mayor resistencia y menor espesor del muro lo que resulta una impermeabilización óptima gracias a la baja porosidad del concreto proyectado. Además, el shotcrete es un método de sostenimiento temporal adecuado para las dinámicas de trabajo en minas y es útil para proteger la destrucción o erosión de los recursos. Su aplicación es flexible y puede ser realizada a cualquier altura, lo que la convierte en una herramienta indispensable para la construcción de túneles, estabilización de minas y galerías, y soporte de suelo en minería subterránea. (ICH, 2014)

2.3.1 Componentes.

El shotcrete consiste en hormigón o mortero colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla. Sus componentes son áridos, cemento y agua, y se puede complementar con materiales finos, aditivos químicos y fibras de refuerzo. (Putzmeister, 2015)

2.3.2 Aditivos Químicos.

- Acelerantes: Aceleran el fraguado de la mezcla y el desarrollo de la resistencia temprana. Al contrario de los demás aditivos, se añaden a la mezcla inmediatamente antes de la proyección.
 - Plastificantes y superplastificantes: Aumentan la fluidez de la mezcla sin pérdidas de resistencia.
 - Retardantes (controladores de hidratación): Sirven para mantener la consistencia de la mezcla durante su transporte.
 - Estabilizantes de mezcla: Aumenta la cohesión interna de las partículas, evitando su segregación, para asegurar la bombeabilidad de la mezcla.
- (Putzmeister, 2015)

2.3.3 Fibras de Refuerzo.

Se puede utilizar fibras sintéticas o de acero, una de sus funciones es aumentar el refuerzo estructural. El hormigón proyectado reforzado con fibras se utiliza sobre todo para soportes de roca en minería subterránea y estabilización de taludes. (Putzmeister, 2015)

2.3.4 Medidas del shotcrete normal.

En áridos se utiliza un 75% del peso del shotcrete y el 65% de su volumen, en agua y cemento se utiliza una fórmula la cual consiste en la relación agua y cemento:

Fórmula: Agua / Cemento

Esta relación comprende generalmente entre el 0,40 y el 0,50 de la mezcla. En adiciones se le puede agregar entre 1% - 4% todo depende de la superficie a añadir. (Putzmeister, 2015)

El shotcrete se puede realizar con equipos robotizados o manualmente, por el método de vía húmeda o vía seca. (Putzmeister, 2015)

2.4 Proyección de shotcrete.

El shotcrete se puede realizar con equipos robotizados o manual, por el método de vía húmeda o vía seca. (Putzmeister, 2015)

Por vía húmeda: se mezclan los ingredientes en una planta dosificadora de concreto y se llevan al sitio de aplicación. Allí se introduce en una bomba shotcrete que lo impulsa a la superficie. (Conarsac, 2023)

Por vía seca: se mezclan los áridos, materiales finos y el cemento, y se mantienen en la obra en sacos. Luego, se introducen en una máquina de shotcrete de distribución que los impulsa por una manguera. Mientras tanto, el agua se agrega en la boquilla de la manguera para su mezcla y proyección. (Conarsac, 2023)

2.5 Proyección con equipos robotizados.

Por vía húmeda: Es el método más eficiente en proyectos con altos niveles de producción. Los equipos robotizados se utilizan sobre todo en aplicaciones subterráneas, para acortar los ciclos de trabajo y aumentar la seguridad del operador, controlando el brazo proyector en remoto fuera de la zona de peligro. (Putzmeister, 2015)

Figura 2.1 Equipo robotizado por vía húmeda.

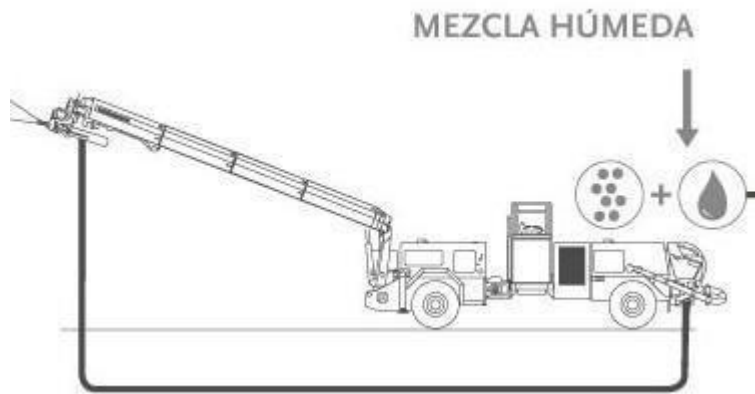


Ilustración 1: Equipo robotizado por vía húmeda.

(Putzmeister, 2015)

Por vía Seca: Se suele utilizar cuando se requiere un rendimiento más alto en comparación con la proyección manual, pero las circunstancias logísticas no facilitan la aplicación de la vía húmeda. El suministro del material seco es más flexible, dado que permite un tiempo de almacenado casi limitado y puede ser transportado sobre largas distancias. (Putzmeister, 2015)

Figura 2.2 equipo robotizado por vía seca.



Ilustración 2 : equipo robotizado por vía seca.
(Putzmeister, 2015)

2.6 Proyección Manual.

Por vía Húmeda: Se utiliza en espacios donde no cabe un equipo robotizado. Las bombas para la proyección por vía húmeda también están disponibles con sistema de dosificación de aditivos. (Putzmeister, 2015)

Figura 2.3 Proyección manual por vía húmeda.

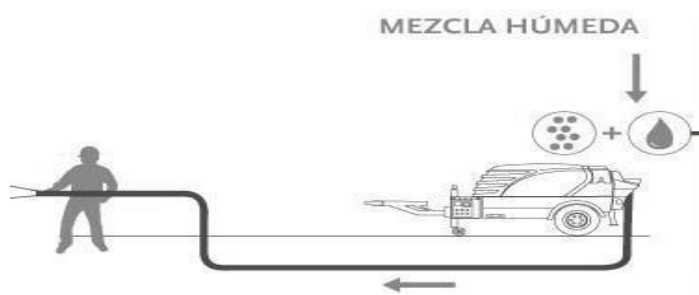
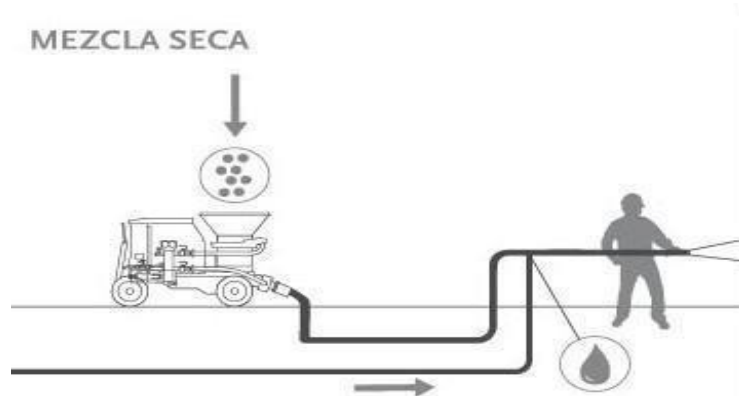


Ilustración 3 :Proyección manual por vía húmeda.

(Putzmeister, 2015)

Por vía seca: Con este método se suele aplicar pequeñas cantidades de shotcrete, por ejemplo, para reparaciones o en espacio restringidos. (Putzmeister, 2015)

Figura 2.4 Proyección manual por vía seca.



4: Proyección manual por vía seca.

Ilustración

(Putzmeister, 2015)

2.7 Máquinas y Equipos para Shotcrete.

Una disposición básica de equipos para la proyección de hormigón por vía húmeda por lo general consiste en una bomba de hormigón, compresor, boquilla y la línea de descarga. Para la proyección de hormigón por vía seca el equipamiento básico incluye una cámara de presión, compresor, boquilla y la línea de descarga. En los últimos años la tecnología en equipos de hormigón proyectado ha avanzado hasta un nivel que ahora incluye proyección vía control remoto, bombas dosificadoras de acelerantes de fraguado

integradas, compresores a bordo del equipo de proyección, instalaciones de hidrolavado, etc. (ICH, 2015)

2.7.1 Equipo para mezcla seca.

Los equipos para hormigón proyectado de mezcla en seco se pueden dividir en dos tipos, ya sean máquinas de cámara simple o doble y máquinas de alimentación continua, generalmente llamadas máquinas rotatorias. (ICH, 2015)

2.7.2 Máquinas de cámara simple o doble.

Las máquinas de una sola cámara tienen un funcionamiento intermitente, operan colocando el material en la cámara, esta se cierra y se presuriza con aire haciendo que el material se introduzca en el tubo de descarga. Cuando la cámara está vacía se despresuriza, se rellena y se repite la operación. Las máquinas de doble cámara permiten una operación más continua mediante el uso de la cámara superior como una compuerta de aire durante el ciclo de alimentación de material. (ICH, 2015)

Figura 2.5 Vía seca de una cámara.

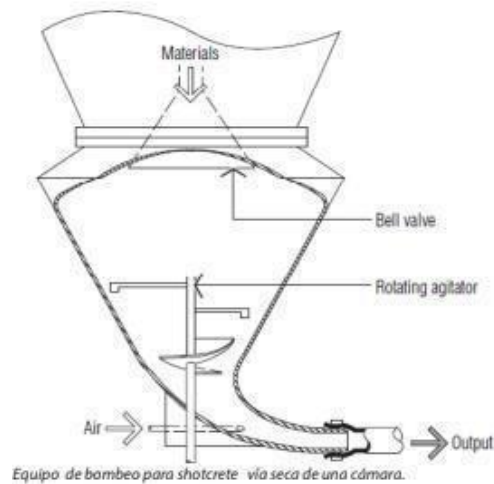
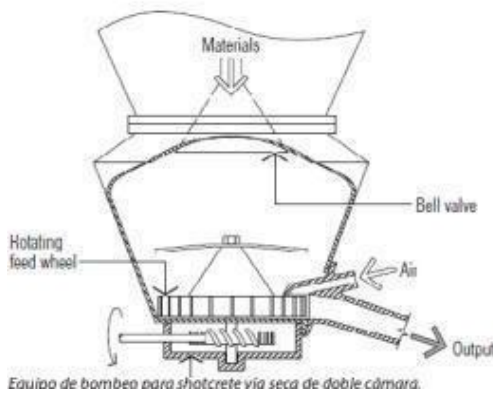


Ilustración 5 : Vía seca de una cámara.

(ICH, 2015)

Figura 2.6 vía seca de doble cámara.



6 :vía seca de doble cámara.

Ilustración

(ICH, 2015)

2.7.3 Máquinas rotatorias.

En general, existen dos tipos de máquina rotatoria disponibles. La máquina de rotor o revolver utiliza discos de sellado en la parte superior e inferior del elemento giratorio. El material es alimentado por gravedad desde la tolva dentro de las cavidades del rotor en un área de su plano de rotación y se descarga hacia

abajo desde estas cavidades con la presión de aire en el punto opuesto en su rotación. Se introduce aire adicional en el cuello de salida para lograr un adecuado volumen y presión de suministro de material hacia la tubería de salida. (ICH, 2015)

Figura 2.7 Rotor.

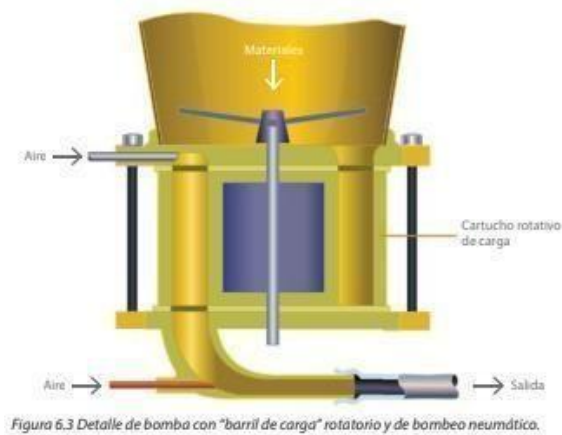


Ilustración 7 :Rotor.

(ICH, 2015)

La máquina de plato rotatorio utiliza un segmento de sellado en la superficie superior del elemento giratorio. El material es alimentado por gravedad desde la tolva en la parte superior hacia las cavidades en forma de U del rotor y descargado en el cuello de salida cuando esa cavidad en particular está alineada bajo el segmento sellado, se inyecta aire hacia abajo conduciendo el material a la manguera. (ICH, 2015)

Figura 2.8 Plato rotatorio.

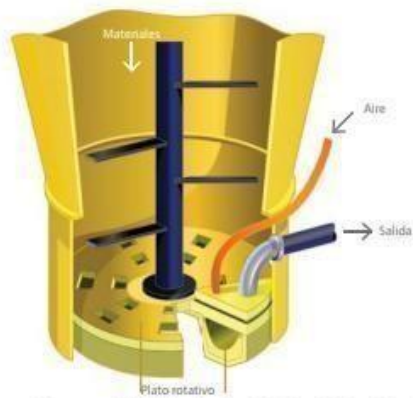


Figura 6.4 detalle operación y composición del equipo de shotcrete con "plato rotatorio" para vía seca.

Ilustración 8 : Plato rotatorio.

(ICH, 2015)

Figura 2.9 Plato rotatorio.



Figura 6.5 Equipo de shotcrete vía seca con "plato rotatorio"

Ilustración 9: Plato rotatorio.

(ICH, 2015)

2.8 Equipo para mezcla húmeda.

Los equipos de hormigón proyectado para mezcla húmeda se pueden definir como un equipo de desplazamiento positivo o máquinas neumáticas. Las máquinas de desplazamiento positivo constituyen la mayor parte del mercado y pueden ser de pistones propulsados hidráulica o mecánicamente con una variedad de válvulas de ciclos y dispositivos reductores de movimiento de los líquidos (figura 2.6) o pueden ser bombas de

compresión de tipo peristáltico mediante rodillos mecánicos para arrastrar el hormigón a través de un tubo de impulsión (figura 2.7). (ICH, 2015)

Además, se usan bombas de tornillo sin fin (bombas de rotor / estator) que utilizan piezas metálicas conocidas como “cuchillas” que obligan a la mezcla a salir a través de un tubo. Este tipo de bomba se utiliza principalmente para la aplicación de mezclas de estuco o yeso incorporando agregados finos generalmente hasta 4 mm, pero puede permitir hasta 8 mm con una apropiada configuración de la bomba. (ICH, 2015)

Todas estas máquinas de desplazamiento positivo incorporan aire comprimido en la boquilla para aplicar el hormigón neumáticamente.

Un aspecto fundamental de las bombas de hormigón, es que permiten realizar el transporte de la mezcla con bajas pulsaciones, desde la bomba a la boquilla. En la actualidad existen máquinas que cuentan con sistemas controlados mediante PLC que minimizan las pulsaciones o compensan (ICH, 2015)

Figura 2.10 Detalle de bombeo para mezcla húmeda con desplazamiento positivo por pistón.



Figura 6.6a y 6.6b Detalle de bombeo para mezcla húmeda con desplazamiento positivo por pistón.

Ilustración 10: Detalle de bombeo para mezcla húmeda con desplazamiento positivo por pistón.

(ICH, 2015)

Figura 2.11 Detalle vía húmeda de tornillo sin fin.

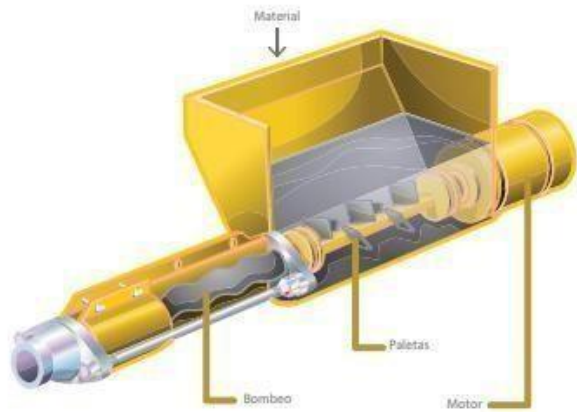


Figura 6.7 Detalle de equipo para vía húmeda de tornillo sin fin (del tipo "mono").

Ilustración 11: Detalle vía húmeda de tornillo sin fin.

(ICH, 2015)

2.9 Propiedades / Variables del shotcrete.

2.9.1 Dureza.

La dureza es una de las características físicas críticas de los minerales y las rocas, que indica su resistencia a la penetración, el rayado o la deformación permanente. Como concepto básico, la dureza de la roca desempeña un papel fundamental en la mecánica de rocas y la ingeniería geológica, y constituye una herramienta de diagnóstico adecuada para la clasificación de minerales y rocas. (springer nature, 2022)

Para determinar la dureza del shotcrete se utilizará un lápiz rayador. Este insumo se utiliza para determinar la dureza de los minerales. La dureza es la resistencia que opone un material a dejarse rayar por otro. Para medir la dureza de un material se utiliza la escala de Mohs, escala de 1 a 10, correspondiendo la dureza 10 al material más duro, que según esta escala es el diamante. La dureza al rayado mide que tan resistente es una muestra a la fractura o deformación plástica permanente debido a la fricción entre un objeto afilado. (Geopixeles, 2025).

Tabla 2.1 Escala de Mohs.

Escala de Mohs		
Dureza	Mineral	Prueba
1	Talco	Friable bajo la uña
2	Yeso	Rayado por la uña
3	Calcita	Rayado por una pieza de moneda
4	Fluorita	Se puede fácilmente rayar con un cuchillo
5	Apatito	Rayado con un cuchillo
6	Ortosa	Rayado con una lima
7	Cuarzo	Raya un cristal
8	Topacio	Rayado por herramientas con tungsteno
9	Corindón	Rayado por el carburo de silicio
10	Diamante	Rayado por otro diamante

Tabla 1: Escala de Mohs.

(siaguanta, 2019)

2.9.2 Resistencia a la compresión.

La principal propiedad especificada para el hormigón proyectado es la resistencia a la compresión, que mide la capacidad del material frente a una fuerza de aplastamiento axial, esta propiedad es un indicador de la calidad del hormigón. Es importante distinguir entre la resistencia antes y después de la colocación. La resistencia puede verse afectada por variables como temperatura, adición de acelerantes, técnica de proyección y curado. (ICH, 2014)

La resistencia a la compresión del hormigón es altamente dependiente de la relación agua/cemento. La relación agua/cemento para hormigón proyectado por vía húmeda normalmente oscila entre 0.4 para la aplicación civil y subterránea, rango. La relación de contenido de agua/cemento está dentro del rango de 0.3 a 0.5 para hormigón proyectado en seco, pero puede variar ampliamente debido a la incertidumbre en el control del agua por parte del pionero. Para hormigón proyectado de mezcla húmeda, la resistencia a la compresión (sin acelerador)

puede oscilar entre 20 y 70 MPa a los 28 días. Los proyectos de infraestructura normalmente especifican una resistencia mínima sobre 30 MPa a los 28 días. (ICH, 2014)

Tabla 2.2 Resistencia recomendadas a los 28 días.

Tabla 3.1 Resistencias recomendadas por aplicaciones (medidas en cilindros a los 28d)

Aplicación	Rango de resistencia
Piscinas	25-30 MPa
Subterráneos y Bodegas	30-40 MPa
Revestimiento de Túnel	30-50 MPa

Tabla

2: Resistencia recomendadas a los 28 días.

(ICH, 2014)

Para determinar la Resistencia del shotcrete se utilizará un martillo geológico, esto consiste en la compresión uniaxial de la roca y esto se estima mediante golpes de un martillo geológico a una roca o al área en la que se va a trabajar. Se observa como la roca responde al impacto y se le asigna un índice de resistencia en MPA, los criterios para la asignación de dichos índices, se encuentran en la siguiente tabla llamada “ensayo de compresión simple”.

Tabla 2.3 Ensayo de compresión simple.

Grado	Descripción	Valor aproximado de UCS (MPa)	Identificación de campo
R1	Roca muy débil	1,0 - 5,0	Deleznable bajo golpes fuertes con la parte puntiaguda del martillo geológico; puede desconcharse con una navaja
R2	Roca débil	5,0 - 25	Puede desconcharse con dificultad con una navaja; se puede hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo
R3	Roca media	25 - 50	No se puede rayar o desconchar con una navaja; las muestras se pueden romper con un golpe firme con el martillo
R4	Roca dura	50 - 100	Se necesita más de un golpe con el martillo geológico para romper la muestra
R5	Roca muy dura	100 - 250	Se necesita muchos golpes con el martillo geológico para romper la muestra

Tabla 3:

Ensayo de compresión simple.

(escrib, 2024)

Otro método para calcular la Resistencia del shotcrete sería ocupando la siguiente fórmula:

Resistencia a la compresión (F)= Carga máxima (P) / Área de sección (A)

2.9.3 Densidad.

La densidad es un indicador de la calidad del hormigón proyectado, normalmente entre 2,20 y 2,40 kg/m³. Sin embargo, no es un buen indicador del nivel de compactación. La variación relativa entre la densidad del hormigón proyectado y la de probetas moldeadas indica la calidad de la proyección, una compactación insuficiente reduce significativamente la resistencia. (ICH, 2014) Para determinar la densidad se tiene que pesar la mezcla a utilizar y a su vez tener en cuenta el volumen del recipiente donde irá la mezcla, para luego utilizar la siguiente fórmula: (ICH, 2014)

$$\text{Densidad} = \text{Masa} / \text{Volumen}$$

2.9.4 Retracción por secado.

La retracción por secado es la reducción en longitud del hormigón al perder humedad. Depende del contenido de agua, tipo y tamaño de los agregados y proporciones de la mezcla. El hormigón proyectado suele tener mayor retracción

que el hormigón convencional, lo que puede requerir juntas de control más cercanas. (ICH, 2014)

En este caso la mezcla se vierte en un recipiente para luego ser pesada, una vez pesada se introduce al horno con una temperatura igual al de una mina subterránea, una vez teniendo la mezcla en el horno se calcula el tiempo de endurecimiento de la mezcla, luego de ya tener la mezcla lista se vuelve a pesar el recipiente para ver cuánto disminuyó su peso sin el agua.

2.9.5 Adherencia.

El hormigón proyectado se aplica generalmente en capas de aproximadamente 25 mm para evitar el desprendimiento de material, especialmente en aplicaciones sobre cabeza. El operador debe esperar al menos unos diez minutos entre capas para asegurar que el hormigón fragüe y permita una adherencia que pueda sostener la segunda capa. La mayoría de las aplicaciones de minería requieren un espesor de hormigón proyectado de entre 50 mm y 100 mm y las aplicaciones civiles requieren normalmente un espesor superior a 100 mm. (ICH, 2015)

Lo más importante es que todos los sustratos o superficies deben estar limpias, libres de polvo, aceite, agua excesiva y otros contaminantes que puedan interferir en la adherencia del shotcrete. (ICH, 2015).

2.10 Relaves.

Los relaves son un residuo masivo que genera la minería al obtener el mineral de las rocas. Este residuo se genera específicamente en el proceso de concentración de minerales por flotación. (Consejo minero, 2023)

La minería extrae grandes cantidades de material del yacimiento, pero sólo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar. Una vez que la roca ha sido finalmente molida y concentrada por procesos de flotación, se obtiene un material (el concentrado) con una concentración alta, que se puede vender como

concentrado. El resto del material es fundamentalmente roca molida, sustancias químicas y agua, muy pobre, y se denomina “relave”. El relave no es considerado un residuo peligroso. El artículo 23 del Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos señala que los residuos masivos que provengan de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales, no serán considerados peligrosos. Menciona específicamente a los relaves. (Consejo minero, 2023).

2.11 Tipos de depósitos de relaves.

Existen diversos tipos de depósitos de relaves, según la densidad del relave, y según la forma de contener el material. Los principales tipos de depósitos de relaves son:

2.11.1 Tranque de Relave.

Depósito en el cual el muro es construido por la fracción más gruesa del relave, compactado, proveniente de un hidrociclón (operación que separa sólidos gruesos de sólidos más finos, mediante impulsión por flujo de agua). La parte final, denominada lama, se deposita en la cubeta del depósito. (Consejo minero, 2023)

2.11.2 Embalse de relave.

Es aquel depósito donde el muro de contención está construido de material de empréstito (tierra y rocas aledañas o estériles de la mina). También se llaman embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere la construcción de un muro de contención. (Consejo minero, 2023)

2.11.3 Relave Espesado.

Depósitos en el que el relave es previamente sometido a un proceso de sedimentación, en un equipo denominado espesador, con el objetivo de retirar parte importante del agua contenida, la que puede ser reutilizada para reducir el consumo hídrico de fuentes de agua limpia. Este tipo de depósitos requiere de equipos para espesar de gran tamaño y bombas especiales. (Consejo minero, 2023)

2.11.4 Relave Filtrado.

Es similar al espesado, pero en que el material contiene aún menos agua, gracias al proceso de filtrado. Implica un alto consumo de energía. - Relave en pasta: Corresponden a una mezcla de agua con sólido, que contiene abundantes partículas finas y bajo contenido de agua, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad. (Consejo minero, 2023)

2.12 Estudios previos.

La Universidad de Concepción está liderando un ambicioso proyecto enfocado en la economía circular en minería. Desde 2023, la Facultad de Ingeniería ha estado trabajando en la incorporación de relaves de cobre como reemplazo de áridos y cemento en mezclas de hormigón, hasta un 50% y 30% de reemplazo respectivamente. (Reporte minero & energético, 2024)

Uno de los objetivos principales del proyecto es poder utilizar estos hormigones con relaves en el hormigón proyectado (shotcrete) utilizado en fortificación en minería y obras civiles. (Reporte minero & energético, 2024)

El proyecto ha alcanzado un avance significativo al reemplazar hasta un 50% de la arena convencional con relaves de cobre, mejorando notablemente la resistencia mecánica del shotcrete para reemplazos entre el 20 y 40%, logrando incrementos de hasta un 33% en la resistencia a la compresión, en comparación con las mezclas sin relaves. (Reporte minero & energético, 2024)

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Tipo y enfoque de investigación.

El presente estudio de investigación es de tipo experimental aplicada, dado que se busca evaluar la viabilidad técnica del uso de relaves mineros como un sustituto parcial de los componentes normales del shotcrete. El enfoque adaptado sería cuantitativo, ya que se analizaron variables como lo son físicas y mecánicas mediante a experimentos a escala piloto con shotcrete con relave, así comparando los resultados obtenidos con el shotcrete convencional y el shotcrete con relave.

3.2 Diseño investigación.

El estudio se desarrolló en la Universidad de Atacama Sede Vallenar. Lo primero que se realizó fue plantear una problemática en la minería, una vez obtenida la problemática se comenzó a buscar información más a fondo sobre el problema planteado, también se solicitó muestras de relave con sus respectivos análisis a empresas, en las cual se obtuvo muestras de relave de cobre y hierro, una vez con los relaves obtenidos se recreó un tipo de proyección del shotcrete con relave a escala piloto.

3.3 Materiales y equipos utilizados.

Para la realización del shotcrete convencional y shotcrete con relave se utilizaron los siguientes materiales y los siguientes equipos:

- Cemento melón (el más usado generalmente)
- Arena natural tamizada, como agregado fino de referencia.
- Relave de hierro y relave de cobre, obtenido de depósitos mineros locales.
- Agua potable, libre de impurezas.

Equipos utilizados:

- Espátula para mezcla manual.
- Moldes plásticos de 30x40 cm.

- Balanza de precisión.
- Sopladora de aire marca Black & Decker
- Manguera de plástico.
- Baldes de metal.
- Talud a escala con materiales reutilizados.
- Horno eléctrico.

Materiales utilizados para la recreación del talud.

- Plumavit
- Pernos esparrago
- Malla metálica galvanizada de media pulgada
- Alambre

Equipo de protección personal.

- Guantes.
- Chaleco.
- Trompa.
- Lentes.

3.4 Objetivo 1: Caracterizar un shotcrete común para determinar las variables a analizar.

Para comenzar con la realización de este objetivo se realizó una búsqueda con distintos sitios web tanto académicos como especializados en mezclas/shotcrete. Para ello se definieron palabras claves que están relacionadas con el tema como lo son:

- Componentes del shotcrete.
- Shotcrete en minería.
- Aditivos del shotcrete.
- Características del shotcrete convencional.
- Shotcrete normal o convencional.

Con el uso de estas palabras clave permitió identificar la información que era necesaria e importante como lo eran documentos, informes, noticias y en algunos casos se obtuvo información mediante libros digitales.

Una vez que se obtuvo la información se aplicaron criterios como lo fueron que cada información que se estuviera recopilando contará con autor y con fecha de publicación, con este criterio se confirma que la información que se estuviera extrayendo fuera legítima. La siguiente tabla fue creada con el fin de organizar la información recabada sobre el shotcrete normal, en esta se incluye tanto su composición, como también su forma de aplicación.

Tabla 3.1 Organización de información.

Documento	Título	Fuente
Infografía	¿Qué es el shotcrete?	Putzmeister
Sitio web	¿Qué es el shotcrete y para que se usa?	Conarsac
Pdf	Guía chilena hormigón proyectado	Conarsac

Tabla 4: Organización de información.

(Fuente: elaboración propia)

3.5 Objetivo 2: Crear shotcrete con relave a escala piloto para determinar su aplicabilidad en minería.

3.5.1 Obtención de relave.

Para comenzar con el desarrollo de este objetivo, se procede a contactar a varias empresas del rubro minero mediante correo electrónico que cuentan con

distintos tipos de relaves, con el propósito de obtener información y muestras representativas de relaves.

A través de este proceso, se logró obtener relaves de hierro de la empresa Planta Pellets de Huasco y de Cobre de la empresa Enami Taltal. Una vez ya en contacto con las empresas, se solicita la posibilidad de acceder a las propiedades de leyes de cada relave, la cual se les denomina “Análisis de las leyes”.

En respuesta a la solicitud, las empresas se pusieron a disposición para realizar los estudios pertinentes de cada relave, enviando así los estudios correspondientes de cada uno de ellos y enviar los datos mediante una tabla en la que contenía lo solicitado.

3.5.2 Creación de shotcrete.

Ya con el relave obtenido, se procede a crear los shotcrete tanto como el normal y con relaves.

Para realizar el shotcrete normal, se basó en la recopilación de datos del objetivo 1, en los cuales se determinó que los siguientes componentes son los necesarios para recrear la mezcla.

Tabla N° 3.2 Shotcrete normal.

Arena
Agua
Cemento
Gravilla

Tabla

5: Shotcrete normal.

(Fuente: elaboración propia)

Posteriormente, los siguientes componentes de las mezclas realizadas fueron similares a la del shotcrete normal, pero se disminuyó la cantidad de arena utilizada debido a que el propósito de este estudio es disminuir este agregado y reemplazarlo por diversas cantidades de relave, en las siguientes tablas se observan

los distintos componentes de los shotcretes creados con su porcentaje de relave utilizado.

Tabla N° 3.3 Shotcrete con 50% Relave de Cobre.

Arena
Agua
Relave
Cemento

Tabla 6: Shotcrete con 50% Relave de Cobre.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla N° 3.4 Shotcrete con 65% Relave de Hierro.

Arena
Agua
Relave
Cemento

Tabla 7: Shotcrete con 65% Relave de Hierro.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla N° 3.5 Shotcrete con 50% Relave de Hierro.

Arena
Agua
Relave
Cemento

Tabla 8: Shotcrete con 50% Relave de Hierro.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla N° 3.6 Shotcrete con 25% Relave de Cobre.

Arena
Agua
Relave
Cemento

Tabla 9: Shotcrete con 25% Relave de Cobre.

(Fuente: elaboración propia)

Para recrear las mezclas se realizó una medición por cada material utilizado en cada shotcrete, para esto se utilizó una pesa que nos entregaba las medidas en gramos y una fuente limpia evitando contaminación de otros materiales que pueden afectar en la medición de mezcla, los siguientes pasos para poder realizar la medición fueron los siguientes:

1. Primero pesar la fuente en una pesa para tarar el equipo.
2. Pesar cada ingrediente de la mezcla.

Una vez ya obtenidas las mediciones se procede a verter cada material correspondiente a cada shotcrete en un bowl, para comenzar con la mezcla manual de los materiales, lo cual se utilizó una espátula y se mezcló por alrededor de 5 a 10 minutos aproximadamente hasta poder observar que no tenían grumos.

3.5.4 Creación de probetas

Se crearon 2 tipos de probetas de tubo de PVC una de una altura de 15 cm con un diámetro de 11 cm en la cual en una de las caras se les puso una tapa de pvc, para poder desarrollar las pruebas de resistencias y dureza, el otro tipo de probeta consta del mismo diámetro, pero con una altura 5 cm y también se le puso una tapa de PVC, para poder realizar la prueba de retracción por secado.

3.5.5 Pruebas realizadas con probetas

La probeta de 15 cm de alto se utilizó para realizar las pruebas anteriormente mencionadas, donde para determinar la resistencia a la compresión esta probeta es la más adecuada para realizar esta prueba, ya que se realizaron consultas a personas que determinan la resistencia del shotcrete con máquinas y se recomendó que de 15 cm es más eficiente el resultado al recibir los martillazos, una vez obtenida las probetas con el shotcrete totalmente seco se procedió a romper el tubo de PVC con cuidado para obtener solamente el shotcrete y poder realizar la prueba de la resistencia a la compresión con el martillo geólogo y así poder completar la prueba de “Ensayo compresión simple” la cual se encuentra presente en el marco teórico.

Figura 3.1 Probeta de 15 cm.



Ilustración

12: Probeta de 15 cm.

(Fuente: elaboración propia)

La probeta de 5 cm como se dijo anteriormente se utilizó para la retracción de secado, la cual se realizó principalmente pesando la probeta con el shotcrete para calcular su densidad y luego introduciendo las probetas a un horno y ver cuánto se tarda en absorber el agua, teniendo en cuenta que el horno utilizado cuenta con un termómetro y un temporizador. Para desarrollar esta prueba se

colocó por 1 hora a 32° grados recreando la temperatura en una minería subterránea, cada 10 minutos se realizaba una inspección de las probetas para determinar cómo transcurría la retracción de secado, ya una vez las probetas secas se procede a volver a pesarlas para ver cuántos gramos absorbió de agua.

Figura 3.2 Probeta de 5 cm.



Ilustración 13:

Probeta de 5 cm.

(Fuente: elaboración propia)

Tras finalizar la creación de las probetas, se elaboraron tablas para anotar los resultados de cada ensayo realizado mediante un método ordenado. Estas tablas fueron creadas teniendo en cuenta las características que se evaluaron en cada ensayo, lo que facilita un control minucioso de los datos, su análisis posterior y la comparación entre las distintas pruebas realizadas, a continuación, se muestran las tablas elaboradas.

Tabla 3.7 Resistencia a la compresión.

Ensayo de compresión simple					
tipo de shotcrete	composicion	cantidad de golpes con martillo geologico	descripcion	identificacion de campo	mpa
Shotcrete normal	-				
Shotcrete con relave cobre	25% cobre				
Shotcrete con relave cobre	50% cobre				
Shotcrete con relave hierro	50% hierro				
Shotcrete con relave hierro	65% hierro				

Tabla 10: Resistencia a la compresión
(Fuente: elaboración propia)

Tabla 3.8 Dureza.

Tipo de Shotcrete	Composición	Dureza (Mohs)	Observaciones
Shotcrete normal	-		
Shotcrete con relave cobre	25% cobre		
Shotcrete con relave cobre	50% cobre		
Shotcrete con relave hierro	50% hierro		
Shotcrete con relave hierro	65% hierro		

Tabla
11: Dureza.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 3.9 Retracción por secado.

Tiempo de secado	1Hrs	2Hrs	3Hrs	4Hrs	5hrs	porcentaje total absorbido
Shotcrete normal						
Shotcrete 25% relave cobre						
Shotcrete 50% cobre						

Shotcrete hierro 50% relave						
Shotcrete hierro 65% relave						

Tabla 12: Retracción por secado.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 3.10 Densidad.

shotcrete	Masa	Volumen	Densidad obtenida
Shotcrete normal			
Shotcrete cobre 25% relave			

Shotcrete cobre 50% relave			
Shotcrete hierro 50% relave			
Shotcrete hierro 65% relave			

Tabla 13: Densidad.

(Fuente: elaboración propia)

3.6 Objetivo 3: Aplicar shotcrete con relave recreando una caja de galería para determinar si es factible en un ambiente minero.

3.6.1 Diseño de caja minera.

Se recreó una caja minera para tratar de crear un área de una galería, en la cual se trató de sustituir la roca por plumavit, además se le instaló un método de fortificación en lo que se utilizó una malla y pernos para recrear lo más posible a un ambiente minero

3.6.2 Recopilación de materiales.

Se utilizó un plumavit con un espesor de 5 centímetros con el fin que aguantara la proyección de shotcrete y resistiera el peso de la mezcla, también que fue capaz de resistir el método de fortificación que se le añadió.

Se ocupó una malla metálica galvanizada de ½ pulgada para recrear las mallas en ambiente minero, también se utilizó pernos espárragos de 60 cm y alambres para poder reforzar la malla al plumavit.

3.6.3 Construcción de la caja.

Se crearon 5 representaciones de caja, ocupando unas dimensiones de 50 cm de largo x 45 cm de ancho de plumavit, luego se le añadió la malla, los pernos

y alambre en cada dimensión del plumavit, en la cual cada caja se creó para cada una de las mezclas recreadas.

Figura 3.3 Recreación de caja.



Ilustración

14: Recreación de caja

(Fuente: elaboración propia)

3.6.4 Creación de equipo proyección.

Gracias a la recopilación de datos del objetivo 1, es necesario contar con un equipo que cuente con una potencia capaz de proyectar y también es necesario tener conocimiento de la mezcla a utilizar. Para ello se realizó combinación de un soplador de la marca Black & Decker de 600 W con una potencia de aire de 16.000 rpm (revoluciones por minuto) y a la vez se le añadió una manguera de 50 cm de largo y con un diámetro de 1 pulgada, cabe recalcar que a la manguera se le realizó un orificio para que la mezcla se pueda verter mediante un embudo. La mezcla realizada fue creada por vía húmeda, por lo que la combinación de materiales se realizó previo a la proyección.

Figura 3.4 Creación equipo de proyección.



Ilustración 15: Creación equipo de proyección.

(Fuente: elaboración propia)

3.6.5 Aplicación del shotcrete.

La aplicación se dividió en 5 muestras, en la cual la proyección se realizó por vía húmeda en todas las mezclas creadas, a la primer superficie se le proyecto shotcrete normal donde la masa proyectada era de 1000 g, la segunda superficie se le proyecto shotcrete con un relave de 25% de cobre la cual la masa proyectada pesaba 1.100g, la tercera superficie se le proyecto shotcrete con un relave de 50% de cobre y pesaba 1.050 g , la cuarta superficie se le proyecto shotcrete con un relave de 50% de hierro y pesaba 1.200 g, la quinta superficie se le proyecto shotcrete con un relave de 65% de hierro y pesaba 1.300g.

3.5 Proyección recreada.



Ilustración

16:Proyección recreada.

(Fuente: elaboración propia)

3.6.6 Prueba adherencia.

Ya con las cajas proyectadas de shotcretes se procedió a realizar la prueba de adherencia, donde esta prueba se realizó con los taludes invertidos hacia abajo con la proyección de shotcrete recientemente realizada, el análisis consta de verificar el desprendimiento de partículas de shotcrete, este análisis se fue realizando mediante intervalos de 30 minutos para darle un tiempo de secado a la proyección.

Figura 3.6 Prueba adherencia.



Ilustración 17: Prueba adherencia

(Fuente: elaboración propia)

3.7 Objetivo 4: Evaluar características del shotcrete con relave aplicado para compararlo con el shotcrete normal.

Con los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, se desarrolló una tabla con todas las pruebas realizadas con el fin de comparar los distintos tipos de shotcrete con el shotcrete convencional, la tabla creada se muestra a continuación.

Tabla 3.11 Tabla comparativa shotcrete convencional y con relaves.

Ítems	Shotcret e normal	Shotcrete 25% relave cobre	Shotcrete 50% relave cobre	Shotcrete 50% relave hierro	Shotcrete 65% relave hierro
Retracción por secado					
Dureza (Mohs)					
Resistencia a la					
compresión (Mpa)					
Tiempo de secado caja					
Adherencia					
Densidad					

Tabla 14: Tabla comparativa shotcrete convencional y con relaves.

(Fuente: elaboración propia)

Para determinar cuál shotcrete es mejor se les designó un color a cada casilla con un puntaje en la cual los siguientes colores significan:

- Rojo significa que es un mal resultado obteniendo con un puntaje de 0 y esto se determinara si el resultado obtenido es inferior a la del shotcrete normal.
- Amarillo que es medianamente bueno obteniendo con un puntaje de 5 y esto se determinara si el resultado obtenido es igual a la del shotcrete normal.
- Verde que es bueno obteniendo un puntaje de 10 y esto se determinara si el resultado obtenido es mayo a la del shotcrete normal.

A continuación, se mostrará la tabla creada con los colores y puntajes

Tabla 3.12 Designación de colores y puntos.

Malo	0 puntos	
Medianamente Bueno	5 puntos	
Bueno	10 puntos	

Tabla 15: Designación de colores y puntos.

(Fuente: Elaboración propia)

Una vez obtenida la tabla con todos los colores asignados en cada resultado, se realizó un análisis visual donde el shotcrete con mejores resultados obtenidos mediante la evaluación realizada a partir de los colores y puntaje, sería el mejor catalogado.

Luego de encontrar el shotcrete mejor catalogado se realizó una comparación con el shotcrete convencional, para determinar cuál de los shotcrete es mejor.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la experimentación realizada con los diferentes tipos de mezclas de shotcrete convencional y shotcrete con relave. El propósito fue analizar sus propiedades físicas y mecánicas, tales como dureza, densidad, resistencia a la compresión y retracción por secado, con el fin de reemplazar parcialmente los agregados naturales por relave.

4.1 Objetivo 1: Caracterizar un shotcrete común para determinar las variables a analizar.

Con la búsqueda ya realizada y con la información recopilada, fue posible identificar de manera mucho más clara cuáles eran las variables, características y composición del shotcrete normal. Además, con la información obtenida facilitó la selección ordenada de los aspectos más relevantes.

Los resultados fueron que el shotcrete convencional se puede proyectar por vía húmeda y vía seca, y que este que es proyectado en minería contiene aditivos y acelerantes para una mayor eficiencia. El shotcrete es proyectado con una máquina especial para este tipo de trabajos en minería.

Las características que el shotcrete normal presenta, una buena adherencia así pasando la prueba que se le realizó. Con una dureza de 3 que fue medida con la escala de Mohs y con una resistencia entre 50-100mpa según el ensayo de compresión simple. Para la retracción por secado la mezcla absorbió un total de 84 gramos de agua en un total de 5horas y el shotcrete obtiene una densidad de 1,58g/cm³ en las probetas que se crearon.

4.2 Objetivo 2: Crear shotcrete con relave a escala piloto para determinar su aplicabilidad en minería.

4.2.1 Obtención de relave.

Se solicitó muestras de relave de cobre a la planta Enami taltal e hierro a la planta pellets Huasco, donde cada empresa proporcionó los análisis químicos de cada relave, a continuación, se mostraran tabla de los análisis de las respectivas muestras.

Tabla 4.1 Análisis del relave de cobre.



SERQUIM
SERVICIOS QUIMICOS LTDA.

Fono: 224556226
Ongolmo Nº 295
Antofagasta

INFORME DE ANALISIS				315-24
EMPRESA	ENAMI FOMENTO GEOLOG		FECHA REC	16-04-2024
AT.SR			TIPO MUESTRA	MINERAL
Nº ORDEN	3876		CANTIDAD	

	MUESTRA	Cu T %	Cu Sol %	Cu InSol %	Kg H2SO4 Kg Cu
1	5268	7,90	0,15	7,75	-
2	5269	9,30	0,20	9,10	-
3	5270	4,80	0,12	4,68	-
4	5271	7,60	0,20	7,40	-
5	5272	2,25	0,27	1,98	-
6	5273	4,30	0,13	4,17	-
7	5274	1,23	0,14	1,09	-
8	5275	2,55	0,11	2,44	-
9	5276	1,79	0,68	1,11	-
10	5277	10,30	8,72	-	1,3
11	5278	6,70	6,26	-	1,8
12	5279	1,41	1,35	-	5,4
13	5280	6,00	5,44	-	2,3
14	5281	4,09	3,94	-	2,9
15	5282	7,40	6,74	-	2,0
16	5283	2,89	2,84	-	4,7
17	5284	6,70	5,96	-	2,1
18	5285	0,76	0,69	-	7,1
19	5286	6,80	6,00	-	2,0
20	5287	5,54	5,13	-	2,4
21	5288	11,10	9,72	-	1,5
22	5289	5,50	5,21	-	2,5
23	5290	10,00	8,86	-	1,7
24	5291	8,80	7,76	-	1,8
25	5292	6,60	6,31	-	1,6

Tabla 16: Análisis del relave de cobre.

(Fuente: Tabla entregada en documento por mina enami)

En esta tabla se puede apreciar la concentración de cobre en el relave utilizado, también indica la presencia de cobre soluble y cobre insoluble.

Tabla 4.3 Análisis relave de hierro.

MUESTRA ESPECIAL RELAVE		
KARLA CORTES 19-08- 2025		
AGOSTO DE 2025		
Fe	%	6,34
Fe Mag.	%	2,41
FeO	%	3,77
S		0,789
P	%	0,774
SiO ₂	%	40,45
CaO	%	11,35
MgO	%	15,75
Al ₂ O ₃	%	5,95
V	%	0,00
TiO ₂	%	0,70
Cu	%	0,010
Mn	%	0,36
Cr	%	0,000
Zn		0,018
Ni	%	0,004
Co	%	0,000
Pb	%	0,005
Na ₂ O	%	0,63
K ₂ O	%	0,38

Tabla 17: Análisis relave de hierro.

(Fuente: Tabla entregada en documento por mina tal-tal)

En la tabla de análisis del relave de hierro se aprecian distintas presencias de minerales en el material.

Figura 4.1 Relave de hierro Planta Pellets Huasco.



Ilustración

18

(Fuente: elaboración propia)

Figura 4.2 Relave de cobre Enami Taltal.



Ilustración 19: Relave de cobre Enami Taltal.

(Fuente: elaboración propia)

4.2.2 Creación de shotcrete

Ya con los relaves obtenidos se procedió a crear los cinco mezclas a escala piloto con sus respectivos porcentajes de relave incluyendo la de shotcrete normal, a continuación, se mostrarán las tablas con los materiales y cantidades a utilizar.

Tabla 4.4 Shotcrete normal a escala piloto.

Materiales	Cantidades (g)	Porcentaje (%)
Arena	1.000	38,4
Cemento	1.000	38,4
Agua	600	23,07

Tabla 18: Shotcrete normal a escala piloto.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 4.5 Shotcrete con un 25% Relave de Cobre a escala piloto.

Materiales	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
Arena	750	28,8
Agua	600	23,07
Cemento	1.000	38,3
Relave de cobre	250	9,6

Tabla 19: Shotcrete con un 25% Relave de Cobre a escala piloto.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 4.6 Shotcrete con un 50% de Relave de Cobre a escala piloto.

Materiales	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
Arena	500	19,2
Agua	600	23,07
Cemento	1.000	38,4
Relave de cobre	500	19,2

Tabla 20: Shotcrete con un 50% de Relave de Cobre a escala piloto.

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 4.7 Shotcrete con un 50% de Relave de Hierro a escala piloto

Materiales	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
Arena	500	19,2
Agua	600	23.07
Cemento	1.000	38.4
Relave de Hierro	500	19,2

Tabla 21: Shotcrete con un 50% de Relave de Hierro a escala piloto

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 4.8 Shotcrete con un 65% de Relave de Hierro a escala piloto.

Materiales	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
Arena	425	19,2
Agua	600	23,07
Cemento	1.000	38,3
Relave de Hierro	575	22,1

Tabla 22: Shotcrete con un 65% de Relave de Hierro a escala piloto

(Fuente: elaboración propia)

4.2.3 Pruebas realizadas con las probetas.

Para evaluar la resistencia a la compresión de las distintas mezclas de shotcrete, se utilizaron probetas cilíndricas de 15 cm de altura, a continuación, se mostrará una tabla con los resultados obtenidos de esta prueba.

Tabla 4.9 Resultado de la Resistencia a la compresión.

Ensayo de compresión simple					
tipo de shotcrete	composicion	cantidad de golpes con martillo geologico	descripcion	identificacion de campo	mpa
Shotcrete normal	-	Golpes con martillo geologico 2	roca dura	mas de un golpe de martillo para romper la muestra	50-100
Shotcrete con relave cobre	25% cobre	Golpes con martillo geologico 4	roca muy dura	muchos golpes de martillo para romper la muestra	100-250
Shotcrete con relave cobre	50% cobre	Golpes con martillo geologico 3	roca dura	mas de un golpe de martillo para romper la muestra	50-100
Shotcrete con relave hierro	50% hierro	Golpes con martillo geologico 2	roca dura	mas de un golpe de martillo para romper la muestra	50-100
Shotcrete con relave hierro	65% hierro	Golpes con martillo geologico 6	roca muy dura	muchos golpes de martillo para romper la muestra	100-250

Tabla 23: Resultado de la Resistencia a la compresión.

(Fuente: elaboración propia)

Cómo se logra apreciar en la tabla anterior, los resultados obtenidos demuestran que el relave de 25% cobre y el relave de 65% hierro fueron los que obtuvieron mayor resistencia a la compresión resistiendo de 4-6 golpes lo que equivale a 100-250 mpa, mostrando que al sustituir un porcentaje de la arena con relave es más resistente que el shotcrete convencional.

Para evaluar la dureza, densidad y retracción por secado de las distintas mezclas de shotcrete, se utilizaron las probetas cilíndricas de 5 cm de altura, a continuación, se mostrarán las tablas con los resultados obtenidos de estas pruebas.

Tabla 4.10 resultado de dureza de shotcrete convencional y con relave.

ID	Tipo de Shotcrete	Composición	Dureza (Mohs)	Observaciones
1	Shotcrete normal	-	3 simil calcita	No magnética, rayado por una moneda
2	Shotcrete con relave cobre	25% cobre	4 simil fluorita	No magnético, se raya con un cuchillo
3	Shotcrete con relave cobre	50% cobre	5 simil apatito	Se raya con cuchillo, no magnético
4	Shotcrete con relave hierro	50% hierro	4 simil fluorita	Leve reacción al imán, se raya con un cuchillo
5	Shotcrete con relave hierro	65% hierro	6 simil ortosa	Se raya con lima de acero, reacciona al imán

Tabla

24: resultado de dureza de shotcrete convencional y con relave.

(Fuente: elaboración propia)

En la tabla mostrada anteriormente se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los relaves hechos anteriormente. Como se puede apreciar en la tabla el shotcrete con mayor dureza es el shotcrete con relave con 65% de hierro el cual obtuvo un mayor puntaje sobre todos los demás.

Tabla 4.11 resultados de la densidad.

shotcrete	Masa	Volumen	Densidad obtenida
Shotcrete normal	754g	474,925g/cm ³	1,58 g/cm ³
Shotcrete cobre 25% relave	760g	474,925g/cm ³	1,60 g/cm ³
Shotcrete cobre 50% relave	771g	474,925g/cm ³	1,62 g/cm ³
Shotcrete hierro 50% relave	878g	474,925g/cm ³	1,84 g/cm ³
Shotcrete hierro 65% relave	940g	474,925g/cm ³	1,97 g/cm ³

Tabla 25: resultados de la densidad.

(Fuente: elaboración propia)

Como se observa los resultados el relave que presentó mayor densidad fue el relave con 65% hierro obteniendo un resultado de 1,97 g/cm³, Esta prueba no es muy factible debido a que depende de varios factores como por ejemplo el tamaño de las probetas, por lo que presenta variaciones en sus resultados.

Tabla 4.12 Retracción de secado por hora.

Tiempo de secado	1Hrs	2Hrs	3Hrs	4Hrs	5hrs	porcentaje total de agua absorbido
Shotcrete normal	17 g	18 g	18 g	18 g	13 g	11,7%
Shotcrete 25% relave cobre	22 g	27 g				6,56%
Shotcrete 50% cobre	31 g	35 g				8,76%
Shotcrete hierro 50% relave	17 g	17 g	24 g			6,77%
Shotcrete hierro 65% relave	9 g	10 g	10 g	11 g	10 g	5,49%

Tabla 26: Retracción de secado por hora.

(Fuente: elaboración propia)

Como se puede observar en la tabla. El shotcrete normal absorbió 84 gramos de agua en 5 horas, equivaliendo a un total de 11,7% de agua absorbida. El shotcrete con 25% de relave absorbió 49 gramos de agua en 2 horas, lo que vendría siendo un 6,56% de agua absorbida. El shotcrete con 50% de relave de cobre absorbió 66 gramos, siendo este un 8,76% de agua absorbida. El shotcrete con 50%

de relave de hierro absorbió 58 gramos de agua en 3 horas, por lo que absorbió un 6,77%. Por último, el shotcrete con 65% de relave de hierro absorbió 50 gramos de hierro en 5 horas, por lo que sería un 5,49% de agua absorbida.

El shotcrete que más agua absorbió fue el shotcrete normal con 84 gramos, pero fue uno de los que más tiempo se tardó, el shotcrete 50% de cobre absorbió 66 gramos en 2 horas, por lo que sí se compara con el shotcrete convencional, éste shotcrete tendría un mejor resultado que el convencional.

El shotcrete con 65% de relave de hierro absorbió 50 gramos en 5 horas, siendo este shotcrete el peor catalogado en esta prueba.

4.2.4 Características luego de la retracción por secado

Una vez extraídas las probetas del horno, se analizó las características físicas y se observaron distintas variables.

Figura 4.3 Shotcrete normal seco.



Ilustración 20: Shotcrete normal seco.

(fuente: elaboración propia)

Probeta n°1 shotcrete normal, la mezcla que más se absorbió agua y perdió volumen de acuerdo a su peso inicial cambio de color gris claro sin grietas aparentes.

Figura 4.4 Probeta shotcrete 25% relave cobre seca. (Fuente:
Elaboración propia)



(Fuente: Elaboración propia)

Probeta nº2 shotcrete 25% relave de cobre: absorción muy rápida aumentó levemente su volumen y presentó burbujas de aire en su mezcla presenta un tono gris opaco.

Figura 4.5 Shotcrete 50% relave cobre seco.



(Fuente: Elaboración propia)

Probeta nº3 shotcrete 50% relave cobre: La mezcla que mejor tiempo de secado tuvo su volumen presento pequeñas burbujas en su base no presenta grietas aparentes color gris oscuro

Figura 4.6 Shotcrete 50% relave hierro seco.



Ilustración 23: Shotcrete 50% relave
hierro seco.

(Fuente: elaboración propia)

Probeta n°4 shotcrete 50% relave de hierro: Mezcla muy sólida en su composición sin burbujas aparentes mezcla lisa curada por su alta retención de humedad muy homogénea tono gris opaco brillante.

Figura 4.7 Shotcrete 65% Relave Hierro.



Ilustración

24: Shotcrete 65% Relave Hierro.

(Fuente: elaboración propia)

Probeta n°5 shotcrete 65% relave hierro: Mezcla que demora mucho en su secado por su baja absorción de agua por su alta cantidad de hierro que es hidrofóbico se demora más de 5 horas en su totalidad de secado queda muy lisa con un curado muy alto de su superficie queda lisa con un tono oscuro brillante presenta grietas en sus bordes.

4.3 Objetivo 3: Aplicar shotcrete con relave recreando una caja de galería para determinar si es factible en un ambiente minero.

Luego de realizada la proyección de material, se procedió a analizar la adherencia del material a la superficie de la caja, a continuación, se mostrarán imágenes de las cajas con el shotcrete proyectados y sus respectivos análisis.

Figura 4.8 Caja minera Shotcrete Normal.



Ilustración 25: Caja Shotcrete Normal.

(Fuente: Elaboración propia)

4.3.1 Análisis adherencia de shotcrete normal

El shotcrete normal se tardó 3 horas en secar en la caja minera y no se observó ningún desprendimiento en el lapso de tiempo mencionado, lo cual demostró tener una buena adherencia.

Figura 4.9 Caja Minera 25% Relave Cobre.



Ilustración 26: Talud 25% Relave Cobre.

(Fuente: Elaboración propia)

4.3.2 Análisis de adherencia de shotcrete con 25% de relave de cobre

La caja minera con el shotcrete de 25 % de cobre se tardó 3 horas en secar en el talud, se observó que tuvo un pequeño desprendimiento de material, pero nada que pudiera afectar al proceso, lo cual demostró pequeñas anomalías en la adherencia.

Figura 4. 10 caja minera 50% Relave Cobre.

(Fuente: Elaboración propia)



4.3.3 Análisis de adherencia de shotcrete con 50% de relave de cobre

La caja minera con la proyección de shotcrete con 50% de relave de cobre se tardó 2 horas en secar, se observó que tiene una excelente adherencia a la superficie y no mostró ninguna anomalía.

Figura 4.11 Caja minera 50% Hierro.



(Fuente: Elaboración propia)

4.3.4 Análisis adherencia de shotcrete de 50% de relave de hierro

La caja minera con el shotcrete de 50% de hierro se tardó aproximadamente 3 horas y media en secarse en el talud, no mostró ningún desprendimiento y se observó una buena adherencia.

Figura 4.12 Caja Minera 65% Hierro.



Hierro.

(Fuente: elaboración propia)

4.3.5 Análisis adherencia de shotcrete de 65% de relave de hierro

El shotcrete de un 65% de hierro no mostró ningún desprendimiento y se observó una buena adherencia, aunque este shotcrete se tardó un poco más que los demás en obtener un mejor secado aproximadamente 4 horas.

4.4 Objetivo 4: Evaluar características del shotcrete con relave aplicado para compararlo con el shotcrete normal.

Tabla 4.13 Comparación de pruebas.

Items	Shotcrete normal	Shotcrete 25% relave cobre	Shotcrete 50% relave cobre	Shotcrete 50% relave hierro	Shotcrete 65% relave hierro
Retracción por secado	84g (5 Horas se tardó en el secado total)	49g (2 Horas se tardó en el secado total)	66g (2 Horas se tardó en el secado total)	58g (3 Horas se tardó en el secado total)	50g (5 Horas se tardó en el secado total)
Dureza (mohs)	3	4	3	4	6
Resistencia a la compresión (mpa)	50-100 (2 golpes)	100-250 (4 golpes)	50-100 (3 golpes)	50-100 (2 golpes)	100-250 (6 golpes)
Adherencia	Buena	Medianamente buena	Buena	Buena	Buena
Densidad	1,58 g/cm ³	1,60 g/cm ³	1,62 g/cm ³	1,84 g/cm ³	1,97 g/cm ³
Tiempo secado cajas	3 horas	3 Horas	2 Horas	3 Horas y 30 minutos	4 Horas

Tabla 27: Comparación de pruebas.

(Fuente: Elaboración propia)

4.4.1 Análisis de las pruebas realizadas.

Realizada la tabla de comparación se logró observar de una manera más clara los resultados obtenidos de las distintas pruebas, en la cual se determinó que el shotcrete con un 50% de relave de cobre es más eficiente en cinco pruebas las cuales consisten en la resistencia a la compresión, densidad, adherencia, tiempo de

secado en la caja minera y en retracción por secado, aunque en la dureza estaba igual que el shotcrete normal.

En comparación con el shotcrete normal, el shotcrete con 50% de relave de cobre mostró mejores resultados que las del shotcrete normal, el punto débil de la mezcla de 50% es su dureza, aunque no es que demuestre una mala dureza, sino que es la misma que la del shotcrete convencional.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN

La caracterización del shotcrete convencional permitió establecer un punto de referencia técnico para comparar posteriormente las mezclas con relave. A partir de la revisión bibliográfica y del análisis experimental.

Se identificaron sus principales componentes los cuales serían arena, cemento y agua, aditivos y componentes, el shotcrete convencional tiene 2 métodos de proyección los cuales pueden ser por vía húmeda o vía seca. En minería el shotcrete normal tarda aproximadamente 28 días para un secado completo.

Las variables a analizar serán retracción por secado, adherencia, dureza, resistencia a la compresión y densidad.

Las cinco mezclas realizadas mostraron conductas distintas, las cuales cambiaron en función del tipo y la cantidad de relave. Específicamente, las probetas indicaron que el shotcrete con un 25 % de relave de cobre y el que incluía un 65 % de relave de hierro tuvieron valores más altos de resistencia a la compresión comparado con el shotcrete convencional. Además, se demostró que las mezclas con relave muestran variaciones en la dureza, retracción por secado y densidad, lo cual señala que el reemplazo de los agregados modifica las propiedades originales del shotcrete, no influyen en su rendimiento general.

La evaluación de la adherencia y comportamiento del shotcrete en un ambiente más similar a la realidad fue posible mediante las mezclas proyectadas en cajas que simulaban una galería. Casi todas las mezclas se lograron proyectar de forma adecuada a través del equipo de proyección diseñado, excepto el shotcrete con 25% de relave de cobre que tuvo unos pequeños desprendimientos de partículas. El shotcrete con un 50% de relave de cobre destacó por obtener una adherencia muy buena y un secado más rápido. Las mezclas que incluyen relave de hierro, especialmente la del 65%, mostraron buena fijación, aunque el secado se prolongó más debido a sus partículas hidrofóbicas. En general, se comprobó que los relaves no impiden la correcta implementación del shotcrete y que las mezclas tienen un rendimiento adecuado en el interior de la caja minera.

La comparación mostró que algunas mezclas con relave pueden igualar o superar el shotcrete convencional en ciertas propiedades. El shotcrete con 50% de relave de cobre fue el que mejor resultado obtuvo de manera general, resaltando en densidad, tiempo de secado, adherencia, resistencia a la compresión y retracción por secado. Aunque el shotcrete con 65% de relave de hierro obtuvo mayor dureza, se secó más lento y presentó algunas grietas. Los resultados muestran que se puede usar relave y que algunas cantidades, como 50% de relave de cobre, mejoran el funcionamiento del shotcrete convencional, resultando potencialmente utilizable en el futuro en trabajos de fortificación minera.

La investigación mostró que el relave puede utilizarse de forma eficiente como agregado para la elaboración de shotcrete para usos mineros. Los resultados obtenidos muestran que es posible incorporar relaves en cantidades variables sin perjudicar de forma considerable el rendimiento del shotcrete. En particular, la mezcla que incorpora un 50% de relave de cobre mostró una buena reacción respecto a retracción por secado, densidad, resistencia a la compresión y tiempo de secado en caja, hasta superando en ocasiones al shotcrete convencional, esto indica su potencial real para su uso en circunstancias mineras. Estos hallazgos confirman que el uso del relave como agregado es posible a partir de un punto de vista técnico, lo que brinda una alternativa útil para elaborar shotcrete para usos de fortificación minera. Los resultados contribuyen a continuar investigando sobre la mezcla, para realizar mejoras en igualdad de los materiales, y para evaluar con mayor precisión la resistencia y durabilidad de las mezclas con relave bajo condiciones más controladas.

Bibliografía

el mercurio . (2023). Obtenido de <https://minas.uchile.cl/dam/jcr:011a1952-d530-4085-b77a09c8911f49f4/Especial%20Minero.pdf>

Conarsac. (2023). Obtenido de

<https://conarsac.com/blog/shotcrete/#:~:text=Proceso%20de%20elaboraci%C3%B3n&text=Por%20v%C3%ADa%20seca:%20se%20mezclan,para%20su%20mezcla%20y%20proyecci%C3%B3n>

Consejo minero. (2023). Obtenido de

[https://consejominero.cl/wpcontent/uploads/2023/04/CapituloRelaves-Mineria-en-mas-de-](https://consejominero.cl/wpcontent/uploads/2023/04/CapituloRelaves-Mineria-en-mas-de-280caracteres.pdf)

280caracteres.pdf

escrib. (2024). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/637590043/Untitled>

Geopixeles. (2025). Obtenido de <https://geopixeles.com/producto/lapiz-rayador-geologicomoody-tools/>

ICH. (2014). Obtenido de <https://ich.cl/documentos-sobre-shotcrete/>

ICH. (2015). Obtenido de SHOTCRETE - GUÍA CHILENA DEL HORMIGÓN PROYECTADO.pdf - Google Drive

Putzmeister. (2015). Obtenido de <https://bestsupportunderground.com/que-es-el-shotcrete/>

Reporte minero & energetico. (2024). Obtenido de

<https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2024/08/udec-reutiliza-relaves-cobre-hormigon#:~:text=Nuevas%20Aplicaciones%20y%20Desarrollo,son%20Sika%20y%20Cementos%20Mel%C3%B3n>

Sernageomin . (2010). Obtenido de

<https://www.sernageomin.cl/wpcontent/uploads/2018/12/GUIASISTEMASDEFORTIFICACION>

YACUNADURA.pdf

siaguanta. (2019). Obtenido de

<https://siaguanta.com/ctecnologia/escalade-mohs/>

springer nature . (2022). Obtenido de

[https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-022-](https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-022-02690-3#:~:text=La%20dureza%20es%20una%20de,rayado%20o%20la%20deformaci%C3%B3n%20permanente)

02690-

[3#:~:text=La%20dureza%20es%20una%20de,rayado%20o%20la%20deformaci%C3%B3n%20permanente](https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-022-02690-3#:~:text=La%20dureza%20es%20una%20de,rayado%20o%20la%20deformaci%C3%B3n%20permanente)

