



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**Evaluación experimental de la influencia de la razón roca–relave y
del contenido de cemento en la resistencia de mezclas cementadas
para relleno estructural en minería subterránea.**

Memoria de Título presentada por

Benjamín Samuel Caniulao Quiroz

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gonzalo Hernán Suazo Fuentealba

JUNIO, 2026



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: “Evaluación experimental de la influencia de la razón roca-relave y del contenido de cemento en la resistencia de mezclas cementadas para relleno estructural en minería subterránea”.

Nombre del candidato(a): Benjamín Samuel Caniulao Quiroz

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Obras Civiles-Ingeniería Civil

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gonzalo Hernán Suazo Fuentealba, 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 (marcar una opción)

☒ 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 (**marcar una opción**):

☐ 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: 15/07/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15/07/2026

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.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE LA RAZÓN ROCA–RELAVE Y DEL CONTENIDO DE CEMENTO EN LA RESISTENCIA DE MEZCLAS CEMENTADAS PARA RELLENO ESTRUCTURAL EN MINERÍA SUBTERRÁNEA.

Benjamín Samuel Caniulao Quiroz¹.

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

El relleno de agregados cementados (CAF) combina roca estéril, relave, cemento y agua para proporcionar soporte estructural en caserones subterráneos. Su desempeño mecánico depende de la interacción entre sus componentes, sin embargo, existe escasa evidencia sobre cómo la razón roca-relave y el contenido de cemento interactúan en su resistencia. Este estudio evalúa experimentalmente la influencia de ambas variables en la resistencia a compresión no confinada (UCS) de mezclas CAF. Para ello, se confeccionaron 24 probetas cilíndricas de 10×20 cm considerando cuatro razones roca-relave ($R = 1,9; 2,0; 2,1$ y $2,2$), dos contenidos de cemento (3% y 7%) y tres edades de curado (7, 14 y 28 días), empleando relave, grava y cemento. Los resultados muestran que el contenido de cemento es la variable de mayor influencia, con mezclas de 7% alcanzando valores superiores en todas las combinaciones. El efecto de la razón roca-relave no es independiente del contenido de cemento: para 3%, las mayores resistencias se obtuvieron en $R = 1,9$, mientras que para 7% el mejor desempeño se desplazó hacia $R = 2,2$. Esto confirma que, dentro de las combinaciones evaluadas, no se identificó una razón roca-relave única con el mejor desempeño para ambos contenidos de cemento, ya que esta varió según la dosificación cementante. Un índice de conveniencia identificó que, bajo los criterios de ponderación adoptados, la mezcla con 3% de contenido de cemento, $R = 1,9$ a 28 días presentó la mayor eficiencia relativa, considerando resistencia, consumo de cemento y edad de curado. No obstante, esta selección depende del criterio de diseño adoptado para el relleno, por lo que se recomienda que futuras investigaciones evalúen contenidos intermedios de cemento, un rango más amplio de razones roca-relave y condiciones de confinamiento representativas de caserones reales.

Palabras clave: relleno de agregados cementados, razón roca-relave, contenido de cemento, resistencia a compresión no confinada, minería subterránea.

Índice

1. Introducción	4
1.1. Minería en Chile	4
1.2. Minería subterránea	4
1.3. Tipos de relleno estructural	5
2. Marco teórico	6
2.1. Explotación subterránea y relleno estructural	6
2.2. Estado del arte sobre rellenos cementados en minería subterránea	6
2.2.1. Rellenos estructurales en minería subterránea	6
2.2.2. Tipos de relleno estructural	7
2.2.2.1. Relleno hidráulico cementado (CHF)	7
2.2.2.2. Relleno de pasta cementada (CPB)	7
2.2.2.3. Relleno de roca cementada (CRF)	7
2.2.2.4. Relleno de agregados cementados (CAF)	8
2.3. Relleno de agregados cementados	8
2.3.1. Definición y componentes del CAF	8
2.3.2. Comportamiento mecánico del CAF	8
2.3.3. Diferencias entre CAF, CPB y CRF	9
2.4. Variables que controlan la resistencia del CAF	9
2.4.1. Razón roca-relave	9
2.4.2. Contenido de cemento	10
2.4.3. Relación agua-cemento	10
2.4.4. Granulometría y empaquetamiento	10
2.4.5. Edad de curado	10
2.5. Ensayos mecánicos y parámetros resistentes	10
2.6. Brecha de investigación	11
3. Objetivos del estudio	12
3.1. Objetivo general	12
3.2. Objetivos específicos	12
4. Metodología	12
4.1. Estructura general de la metodología	12
4.1.1. Etapa 1: Revisión de literatura y caracterización de materiales	12
4.1.2. Etapa 2: Fase experimental	13
4.1.3. Etapa 3: Análisis de resultados y propuesta de criterios	13
4.2. Diseño experimental y justificación metodológica	14
4.3. Preparación de mezclas y confección de probetas	16
4.4. Ensayo de compresión no confinada	17
5. Resultados	18
5.1. Granulometría	18
5.2. Gravedad específica (Gs)	19
5.3. Densidad mínima y máxima	19
5.3.1. Relave	19

5.3.2. Grava/Estéril	20
5.4. Estimación teórica de la densidad seca de mezcla en función de R	20
5.5. Agente cementante	21
5.6. Identificación de probetas	21
5.7. Curvas esfuerzo-deformación de las mezclas CAF	22
5.8. Resistencia máxima obtenida a partir de las curvas esfuerzo-deformación	23
5.9. Efecto de la edad de curado en la resistencia del CAF	24
5.10. Efecto del contenido de cemento en la resistencia del CAF	26
5.11. Efecto de la razón roca-relave en la resistencia del CAF	27
5.12. Efecto conjunto de la edad de curado, del contenido de cemento y de la razón roca-relave	28
6. Discusión de resultados	32
6.1. Interpretación de los mecanismos resistentes del CAF	32
6.2. Interacción entre razón roca-relave y contenido de cemento en el desempeño resistente	33
6.3. Eficiencia del uso del cemento en las mezclas evaluadas	34
6.4. Alcances y limitaciones del estudio experimental	35
7. Conclusiones	36
8. Referencias	37

1. Introducción

1.1. Minería en Chile

La minería en Chile constituye uno de los pilares económicos del país y ha presentado un desarrollo de gran escala, con operaciones distribuidas desde el norte hasta la cordillera. Sin embargo, el progresivo agotamiento de los yacimientos superficiales tanto a nivel nacional como global, ha impulsado una transición hacia métodos de explotación subterráneos. Esta transición ha motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a mejorar estos métodos, con el fin de hacer explotables yacimientos que en el pasado simplemente podían ser descartados por altos costos operacionales y de inversión o por problemas de estabilidad mecánica (Vives Ávila, 2015).

1.2. Minería subterránea

La minería subterránea permite acceder a cuerpos con minerales a una mayor profundidad, optimizando el uso del territorio y reduciendo el impacto superficial. Este tipo de minería reúne una gran variedad de métodos de explotación, los cuales dependen de la geometría del yacimiento, la resistencia del macizo rocoso, el nivel de selectividad requerido y de las restricciones operacionales. Entre los métodos de explotación más comunes se encuentran:

- Métodos de hundimiento como Block Caving y Sublevel Caving están orientados a la explotación de grandes volúmenes de mineral y una continuidad operativa.
- Cámaras y pilares o "Room and pillar", más típico en cuerpos horizontales y macizos competentes.
- Explotación por caserones o "Stope Mining", puede desarrollarse en modalidad descendente (Top-Down), en la cual la extracción del material se inicia en los niveles superiores hacia los inferiores. Esta variante permite un mayor control del proceso y una mejor precisión en la explotación.

En Chile, el método de Block Caving es ampliamente utilizado debido a su alta productividad en depósitos masivos y de buena fragmentación natural. Sin embargo, existen numerosos escenarios en los que se buscan métodos más selectivos o con mayor control geomecánico. Allí toma más relevancia el método de explotación por caserones, donde la extracción del mineral entre niveles genera vacíos controlados denominados caserones. Mantener estos vacíos sin un soporte adecuado puede provocar inestabilidad e infiltración de aguas, lo que puede comprometer la continuidad productiva. Dentro de este método, existen diversas variantes operativas que se aplican en función de las condiciones geológicas, geomecánicas y económicas del yacimiento, entre las que se destaca el Caseroneo por subniveles o Sublevel Stoping, el corte y relleno o Cut and Fill, y el realce por contracción o Shrinkage.

La lógica Top-Down de muchos de estos métodos permite avanzar por etapas, pero plantea un desafío relevante: recuperar los pilares sin comprometer estabilidad. Dejar grandes vacíos abiertos incrementa el riesgo de inestabilidad y de formación de rutas de infiltración, además, condiciona la continuidad operativa en caserones vecinos. Por eso, el relleno del caserón se integra al diseño y a la secuencia de explotación. El material de relleno aporta soporte al macizo, limita deformaciones, habilita la minería contigua y facilita la recuperación de pilares, mejorando el rendimiento económico del sector explotado. Bajo esta lógica, existen varias técnicas de relleno, cada una con distintos compromisos hidráulicos, mecánicos y logísticos, cuya aplicación depende de las condiciones del macizo rocoso, del método de explotación y de los requerimientos operacionales de la faena minera.

1.3. Tipos de relleno estructural

Las principales alternativas de relleno que se utilizan en minería subterránea incluyen el relleno hidráulico de relaves, la pasta cementada, el relleno de roca cementada y el relleno de agregados cementados. Estas técnicas se diferencian principalmente por los materiales empleados, la forma de transporte, la capacidad resistente y el nivel de control requerido durante su preparación y colocación.

Dentro de estas alternativas, el presente estudio se enfoca en el relleno de agregados cementados, conocido como *Cemented Aggregate Fill* (CAF). Este material combina roca estéril, relave, cemento y agua, formando una matriz cementada capaz de aportar soporte al macizo rocoso y favorecer la estabilidad de caserones subterráneos. Además, permite reutilizar materiales generados por la propia operación minera, reduciendo la disposición superficial de residuos. Su desempeño mecánico depende principalmente de la proporción entre roca y relave, así como del contenido de cemento incorporado en la mezcla. Sin embargo, en Chile el CAF no se utiliza de manera amplia y su investigación es limitada, pese a que podría constituir una alternativa relevante para la gestión y reutilización de residuos gruesos y relaves, así como para la estabilización de espacios subterráneos generados durante la explotación minera.

Desde el punto de vista del diseño geotécnico, el desempeño de los rellenos cementados depende de variables de mezcla y fabricación, como la relación agua-cemento (W/C), el contenido de cemento, la distribución granulométrica y la edad de curado. Estos factores controlan la porosidad, el empaquetamiento de partículas y el grado de hidratación, incidiendo directamente en la resistencia y rigidez del material (Benzaazoua et al., 2004).

En mezclas tipo CAF, la respuesta resistente no depende solo de la dosificación de cemento, sino también de la interacción entre la fracción gruesa y la matriz fina cementada. En particular, la razón roca-relave influye en el empaquetamiento, la continuidad de la matriz cementante y la transferencia de esfuerzos dentro del relleno. Por ello, bajo condiciones controladas de preparación, moldeo y curado, el control experimental resulta fundamental para obtener resultados representativos y comparables en laboratorio (Villaescusa, 2014).

En este contexto, el presente trabajo evalúa experimentalmente cómo la razón roca-relave y el contenido de cemento influyen en la resistencia de mezclas cementadas tipo CAF para relleno estructural en minería subterránea. En particular, se busca analizar si la proporción roca-relave más favorable se mantiene constante o varía según la cantidad de cemento disponible en la mezcla, con el fin de identificar combinaciones que presenten un desempeño mecánico adecuado para su aplicación en caserones subterráneos.

2. Marco teórico

2.1. Explotación subterránea y relleno estructural

En minería subterránea, la selección del método de explotación condiciona el tipo de excavación, el modo de extracción y los requerimientos de soporte asociados al diseño minero. Métodos como room and pillar, sublevel stoping, cut and fill, sublevel caving y block caving responden a condiciones particulares del yacimiento, del macizo rocoso y de los objetivos operacionales de la faena (Okubo y Yamatomi, 2009).

A partir de esta relación entre métodos de explotación, diseño de las excavaciones y estabilidad, el relleno minero puede entenderse como parte del sistema geotécnico de la mina cuando participa en el control de las condiciones posteriores de la extracción. Bajo este enfoque, el uso del relleno permite mejorar la estabilidad del terreno, aumentar la recuperación del mineral, reducir la dilución y disminuir la disposición superficial de residuos mineros (L. Li, 2014).

Por lo tanto, el estudio del relleno estructural requiere relacionar las exigencias de la explotación con las propiedades mecánicas del material colocado. Bajo esta lógica, se revisarán los principales antecedentes sobre rellenos cementados en minería subterránea.

2.2. Estado del arte sobre rellenos cementados en minería subterránea

2.2.1. Rellenos estructurales en minería subterránea

La extracción del mineral en métodos de minería subterránea como el Sublevel Stopping y el Cut and Fill genera cavidades denominadas caserones o stopes. Estas cavidades implican un desafío geomecánico, ya que la presencia de grandes vacíos provoca redistribución de esfuerzos, inestabilidad de paredes, caída de bloques y subsidencia superficial (Villaescusa, 2014). Para mitigar estos riesgos, los caserones son rellenos una vez concluida la extracción del mineral.

El relleno minero cumple tres funciones fundamentales:

1. Proporcionar soporte al macizo rocoso, reduciendo la deformación de las paredes y disminuyendo el riesgo de colapso.
2. Permitir la continuidad operacional al servir como plataforma de trabajo para sectores adyacentes.
3. Gestionar los residuos mineros como relaves y roca estéril, reduciendo la necesidad de depósitos superficiales (Sivakugan et al., 2015).

En el contexto minero chileno, la profundización de las operaciones y la necesidad de maximizar la recuperación de mineral ha incrementado el uso de rellenos estructurales cementados (Minería Chilena, 2023).

2.2.2. Tipos de relleno estructural

Existen una gran cantidad de distintos tipos de relleno, pero la literatura distingue cuatro tipos principales de rellenos estructurales cementados, los cuales se diferencian por su composición, propiedades mecánicas y métodos de colocación (Sivakugan et al., 2015; Jiang et al., 2019).

A continuación, se presentan ejemplos de rellenos cementados utilizados en minería subterránea. La Figura 1 muestra: (a) una barricada proyectada con shotcrete para un caserón con relleno en pasta; (b) una barricada de ladrillos porosos para un caserón con relleno hidráulico; y (c) una exposición vertical inicial de relleno de roca cementada.

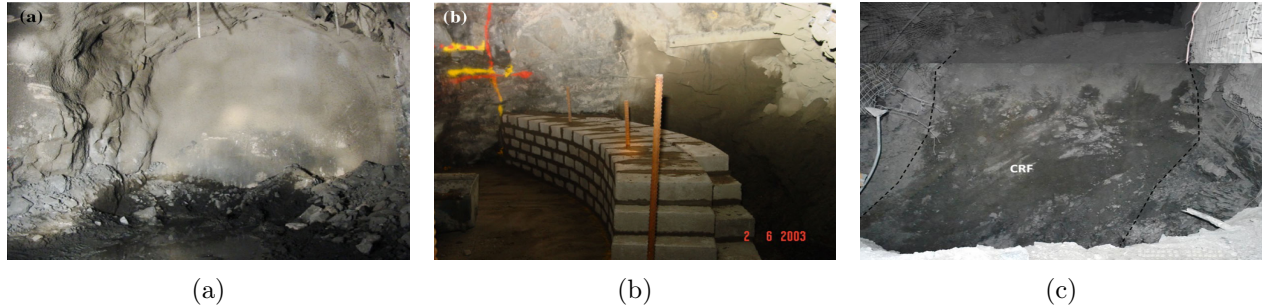


Figura 1: Ejemplos de rellenos cementados en minería subterránea: (a) relleno en pasta; (b) relleno hidráulico; (c) relleno de roca cementada (CRF). Fuentes: (a) y (b) Sivakugan et al., 2015; (c) Sainsbury y Sainsbury, 2014.

2.2.2.1. Relleno hidráulico cementado (CHF)

El relleno hidráulico cementado, o *cemented hydraulic fill*, corresponde a un material de relleno transportado en forma de pulpa hacia zonas subterráneas, al cual se le incorpora cemento Portland u otro agente cementante para mejorar su resistencia mecánica. Este tipo de relleno puede cumplir funciones estructurales, por ejemplo como soporte de cavidades, pilar artificial o base para niveles posteriores de explotación. Sin embargo, sus principales limitaciones son el elevado contenido de agua requerido para el transporte, la posible pérdida de aglomerante durante el drenaje, la heterogeneidad de las propiedades del material colocado (Sivakugan et al., 2015) y el aumento de costos asociado al uso de cemento.

2.2.2.2. Relleno de pasta cementada (CPB)

El *Cemented Paste Backfill* (CPB) es el tipo de relleno más utilizado en la actualidad. Se elabora a partir de relaves de proceso previamente espesados, los cuales conservan tanto partículas gruesas como finas, sin eliminación significativa de la fracción fina, y requieren comúnmente un mínimo del 15 % de partículas menores a $20\ \mu\text{m}$. Esta granulometría confiere al material una consistencia pastosa. Incorpora entre 2 y 10 % de aglomerante, con una resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS) típica a 28 días entre 0.3 y 3 MPa. Su ventaja principal respecto al CHF es la reducción de los riesgos asociados a la presión hidrostática y la homogeneidad de las propiedades del relleno colocado. Sin embargo, como señalan Benzaazoua et al., 2004, requiere sistemas de bombeo de alta presión y mayor procesamiento del material.

2.2.2.3. Relleno de roca cementada (CRF)

El *Cemented Rock Fill* (CRF) se obtiene mezclando roca de desecho triturada con agua y cemento o algún aglomerante, sin incorporar relaves como fracción fina. El agregado varía entre pocos

milímetros y varios centímetros. Con la misma dosificación de aglomerante, el CRF presenta propiedades mecánicas superiores al CPB y al CHF, gracias al esqueleto granular grueso que lo constituye, lo que genera una estructura de alta rigidez y resistencia, aunque con mayores costos asociados a la manipulación de materiales gruesos y equipos de colocación (Bloss, 1996).

2.2.2.4. Relleno de agregados cementados (CAF)

El *Cemented Aggregate Fill* (CAF) incorpora tanto agregados gruesos de roca como relaves de proceso, cemento y agua. La fracción fina de relave ocupa los espacios intergranulares entre los agregados, reduciendo el índice de vacíos y mejorando la eficiencia del cemento. Esta combinación le confiere propiedades mecánicas superiores al CPB con igual dosificación de aglomerante y mayor facilidad de colocación que el CRF puro. Al igual que este último, el CAF es susceptible a segregación durante la deposición, lo que puede producir variabilidad espacial en las propiedades mecánicas del relleno colocado (Wang y Villaescusa, 2001; Bloss, 1996)

2.3. Relleno de agregados cementados

2.3.1. Definición y componentes del CAF

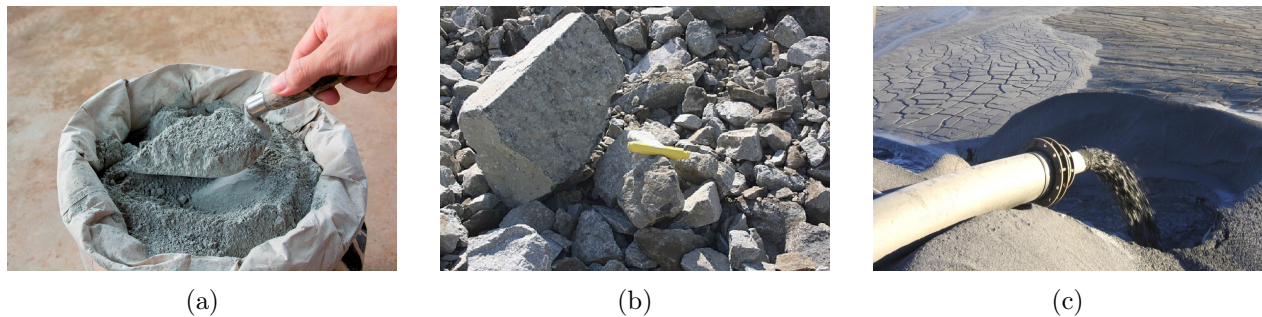


Figura 2: Materiales utilizados: (a) cemento; (b) material rocoso grueso utilizado en relleno minero, adaptado de Sivakugan et al., 2015; (c) relave.

El CAF se compone de cuatro elementos: los agregados gruesos que forman el esqueleto estructural que transmiten los esfuerzos a través de los contactos intergranulares, el relave que actúa como fracción fina llenando los vacíos entre partículas gruesas y reduciendo la porosidad, el agente cementante que genera cohesión durante la hidratación y por último, el agua que activa la hidratación y otorga trabajabilidad a la mezcla, la cantidad de agua puede afectar significativamente el desarrollo de resistencia (Villaescusa, 2001; Benzaazoua et al., 2004). En este estudio se empleó Cemento Melón Especial, correspondiente a un cemento de clase puzolánica grado corriente, según la norma NCh 148 de 1968 (Instituto Nacional de Normalización, 1968), equivalente al tipo P de la clasificación ASTM C595.

2.3.2. Comportamiento mecánico del CAF

El CAF obtiene su resistencia por la combinación entre el contacto y roce de sus partículas, y la unión que produce el cemento entre ellas. Bajo condiciones de compresión, su respuesta depende principalmente del contenido de cemento, la edad de curado y las características granulométricas del agregado. En general, mezclas con mayor cementación y mayor tiempo de curado tienden a

desarrollar una respuesta más rígida y frágil, mientras que aquellas con menor contenido de cemento o en edades tempranas presentan un comportamiento más dúctil (Jiang et al., 2019).

Bajo estados triaxiales, la resistencia del CAF puede interpretarse mediante el criterio de Mohr-Coulomb, especialmente cuando se evalúa su respuesta frente a distintos niveles de confinamiento. En este contexto, la cohesión aparente se relaciona principalmente con el aporte de la matriz cementada, por lo que es sensible al contenido de cemento y a la edad de curado. Por su parte, el ángulo de fricción interna se asocia en mayor medida al contacto entre partículas, la granulometría y la estructura del esqueleto granular (Fall et al., 2007).

El análisis de la curva esfuerzo-deformación permite evaluar la resistencia del material a partir del esfuerzo máximo alcanzado, la deformación asociada a la falla y el tipo de respuesta mecánica desarrollada. Asimismo, la segregación durante la colocación del CAF puede generar heterogeneidad vertical en las propiedades resistentes dentro del caserón, lo que puede reflejarse en variaciones de resistencia en los valores de UCS reportados para este tipo de relleno (Bloss, 1996).

2.3.3. Diferencias entre CAF, CPB y CRF

Las diferencias fundamentales entre los tres tipos de relleno radican netamente en su composición y en la magnitud de sus propiedades mecánicas. El CPB no incorpora agregados gruesos, lo que garantiza ausencia de segregación y homogeneidad, pero limita su resistencia máxima. El CRF omite los relaves, generando un esqueleto granular de alta resistencia pero con mayor índice de vacíos. El CAF combina ambos componentes, buscando maximizar el empaquetamiento granular mediante la incorporación de los relaves como fracción fina, lo que le permite alcanzar resistencias superiores al CPB con igual dosificación de cemento.

2.4. Variables que controlan la resistencia del CAF

Benzaazoua et al., 2004 destacan que el comportamiento geotécnico de los rellenos cementados está controlado por la interacción entre la fase granular y la matriz cementante. En mezclas tipo CAF, esta respuesta depende principalmente de variables como la relación agua-cemento (W/C), el contenido de cemento, la distribución granulométrica y la edad de curado.

2.4.1. Razón roca-relave

La razón roca-relave controla la proporción entre el esqueleto granular grueso y la fracción fina, influyendo directamente sobre el índice de vacíos y la eficiencia del cemento. Una proporción óptima permite que los relaves ocupen los espacios intergranulares, maximizando la densidad de empaquetamiento y reduciendo la cantidad de cemento necesaria para alcanzar una resistencia objetivo.

Desde esta perspectiva, la razón roca-relave puede asociarse a una condición óptima de empaquetamiento ($R_{\text{óptimo}}$), vinculada al concepto de *just fill*, en la cual la fracción fina y la pasta cementante rellenan adecuadamente los vacíos entre las partículas gruesas. Una razón demasiado alta puede generar déficit de pasta cementante y menor cohesión, mientras que una razón demasiado baja aumenta la proporción de finos y puede incrementar la demanda de agua y cemento. En esta investigación se analizan razones de 1,9; 2,0; 2,1 y 2,2, cercanas a la proporción 2:1 reportada como favorable para un esqueleto granular estable (Wang y Villaescusa, 2001).

2.4.2. Contenido de cemento

El contenido de cemento es la variable de mayor influencia sobre la cohesión y la resistencia del CAF. La literatura establece de manera consistente que la UCS aumenta en proporción directa con el contenido de cemento. El cemento es además el componente de mayor costo de la mezcla: una empresa minera puede consumir hasta 100.000 toneladas por año, haciendo que cada reducción del 1 % en su dosificación sea económicamente relevante (Benzaazoua et al., 2004). En este estudio se evalúan contenidos de 3 % y 7 % en peso respecto al total de sólidos.

2.4.3. Relación agua-cemento

La relación agua-cemento (w/c) es una de las variables más importantes en el comportamiento mecánico del CAF, debido a que pequeñas variaciones en el contenido de agua pueden generar diferencias significativas en la resistencia final del material. Esta relación controla la hidratación del cemento, la porosidad y la resistencia del relleno. Un exceso de agua genera poros capilares al evaporarse, debilitando la matriz cementante; por ello, relaciones w/c más bajas tienden a aumentar la resistencia, siempre que no comprometan la fluidez necesaria para el transporte y la colocación (Benzaazoua et al., 2004).

2.4.4. Granulometría y empaquetamiento

La distribución granulométrica del agregado controla la densidad de empaquetamiento y el índice de vacíos del material. Una distribución adecuada de tamaños, con valores de D_{10} , D_{50} y D_{max} que estén bien escalonados, favorece el desarrollo de una estructura granular más densa, es decir, una mejora en el acomodo entre partículas, lo que reduce la proporción de vacíos y permite disminuir la demanda de cemento para alcanzar una misma resistencia.

2.4.5. Edad de curado

La edad de curado influye directamente en el grado de hidratación del cemento, incrementando progresivamente la resistencia del material a medida que pasa el tiempo (Suazo et al., 2015). En mezclas tipo CAF, la resistencia evoluciona durante el curado debido al avance de los procesos de hidratación y al desarrollo gradual de enlaces cementantes entre las partículas. Estudios sobre rellenos cementados han demostrado que el tiempo de curado puede tener una influencia significativa sobre la resistencia a compresión no confinada, especialmente durante los primeros 28 días, período en el que comúnmente se evalúan edades de 7, 14 y 28 días (Jiang et al., 2019).

2.5. Ensayos mecánicos y parámetros resistentes

Los ensayos de laboratorio son esenciales para el diseño geotécnico de los rellenos. Los más comunes son la compresión simple (UCS) y los triaxiales de corte. El ensayo UCS es ampliamente utilizado por su simplicidad y bajo costo. Entrega la resistencia máxima del material sin confinamiento lateral y permite evaluar el efecto del curado o del contenido de cemento. Sin embargo, al no replicar las condiciones de esfuerzo reales dentro del caserón, puede sobreestimar o subestimar la resistencia efectiva del relleno.

El ensayo triaxial, por otro lado, permite determinar los parámetros de resistencia al corte bajo confinamiento controlado. A partir de las envolventes de falla se obtienen los valores de c' y φ' , representativos del comportamiento del material bajo condiciones más realistas de carga. Los resultados de ambos ensayos dependen no sólo de las condiciones de curado y mezcla, sino también

de las dimensiones y método de confección de las probetas, los cuales influyen en la homogeneidad interna, la densidad y la orientación de las fisuras al momento de la falla (Yilmaz et al., 2015). En los ensayos de laboratorio se recomienda mantener una relación altura/diámetro (L/D) = 2, con tamaños de probeta que aseguren una representación adecuada del material. No obstante, en rellenos heterogéneos como el CAF, las variaciones en la granulometría y tamaño máximo de partícula hacen que la resistencia medida dependa de la escala de la muestra.

2.6. Brecha de investigación

La revisión de la literatura permite identificar los siguientes vacíos de conocimiento que justifican la investigación:

- En primer lugar, la mayoría de los estudios sobre rellenos cementados con agregados gruesos se han centrado en el CRF, o en el CPB (sin agregados gruesos). Los estudios específicos sobre el CAF como sistema combinado son escasos, y los disponibles corresponden a condiciones mineralógicas y operacionales de Australia y Norteamérica. Si bien la aplicabilidad del CAF en Chile es acotada, dado que los métodos de extracción predominantes en la minería chilena no siempre son compatibles con este tipo de relleno, existen casos particulares en que su uso resulta viable y técnicamente pertinente, lo que justifica contar con datos experimentales propios adaptados a las características de los relaves y los agregados (Wang y Villaescusa, 2001; Bloss, 1996)
- En segundo lugar, si bien la influencia del contenido de cemento, la edad de curado, la granulometría y la incorporación de agregados gruesos ha sido ampliamente estudiada en rellenos cementados, existe menor información experimental respecto de la interacción específica entre la razón roca-relave y el contenido de cemento en mezclas tipo CAF. En particular, no se dispone de suficiente evidencia que permita establecer si una razón roca-relave cercana a 2:1 mantiene el mismo desempeño resistente bajo distintos contenidos de cemento, o si la proporción más favorable cambia según la cantidad de matriz cementante disponible.
- Por último, el rango de razones roca-relave entre $R = 1,9$ y $R = 2,2$ no ha sido analizado con la resolución necesaria para identificar el efecto de variaciones incrementales en esta proporción y su interacción con la dosificación de cemento. Por ello, evaluar experimentalmente este intervalo permite aportar antecedentes comparativos sobre el comportamiento resistente del CAF y sobre la posible dependencia entre la proporción granular y el contenido de cemento.

A partir de los vacíos identificados, la presente investigación aporta evidencia experimental sobre la influencia conjunta del contenido de cemento y de la razón roca-relave en la resistencia del CAF, a partir de ensayos de compresión no confinada realizados a edades de curado de 7, 14 y 28 días. Con ello, se busca contribuir al análisis comparativo de mezclas CAF para relleno estructural en caserones subterráneos.

3. Objetivos del estudio

3.1. Objetivo general

Analizar experimentalmente la influencia de la razón roca-relave y del contenido de cemento en la resistencia mecánica de mezclas cementadas tipo CAF, orientadas a su uso como relleno estructural en minería subterránea, con el propósito de identificar las combinaciones que presenten el mejor desempeño mecánico.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar antecedentes sobre rellenos de agregados cementados y materiales afines, con el fin de reconocer los factores que controlan su respuesta mecánica.
- Definir, confeccionar y ensayar mezclas cementadas con diferentes relaciones de roca-relave y contenido de cemento, evaluando su resistencia mecánica.
- Analizar y comparar el efecto de la dosificación de las mezclas en la resistencia del CAF, con el fin de identificar la combinación que presente el mejor desempeño mecánico.

4. Metodología

La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental, orientado a evaluar la influencia de la razón roca-relave y del contenido de cemento en la resistencia a compresión no confinada de mezclas de relleno de agregados cementados. Para ello, el trabajo se organizó en tres etapas principales: revisión de literatura y caracterización de materiales, desarrollo experimental y análisis comparativo de resultados.

4.1. Estructura general de la metodología

4.1.1. Etapa 1: Revisión de literatura y caracterización de materiales

Esta fase tiene por objetivo establecer el marco conceptual y técnico del estudio mediante la revisión de antecedentes sobre rellenos de agregados cementados y materiales afines. A partir de esta revisión se identifican las variables principales que controlan la resistencia del CAF, tales como la razón roca-relave, el contenido de cemento, la granulometría, la relación agua/cemento y la edad de curado. Además, se recopila información de trabajos previos de la misma línea de investigación, con el fin de verificar la compatibilidad metodológica y facilitar la comparación de los resultados obtenidos.

Actividades:

- Revisión bibliográfica de antecedentes sobre rellenos de agregados cementados (CAF).
- Identificación de vacíos y oportunidades de investigación relacionados con la influencia de la razón roca-relave y el contenido de cemento en la resistencia del CAF.
- Selección de materiales a utilizar en la investigación: relave, estéril o roca y cemento Portland.

4.1.2. Etapa 2: Fase experimental

Esta fase constituye el desarrollo experimental del estudio y tiene por objetivo evaluar la influencia de la razón roca-relave y del contenido de cemento en la resistencia mecánica de mezclas cementadas tipo CAF. Para ello, se consideran materiales como relave M4-R1, grava o estéril, cemento Portland y agua, los cuales son previamente caracterizados para asegurar condiciones de preparación controladas y comparables.

En primer lugar, se realiza la caracterización física de los materiales mediante ensayos de granulometría, gravedad específica de los sólidos (G_s), densidad mínima y densidad máxima. A partir de estos antecedentes se definen las proporciones de mezcla a evaluar, considerando cuatro razones de roca-relave ($R = 1,9; 2,0; 2,1$ y $2,2$), dos contenidos de cemento (3% y 7%) y un ajuste de agua orientado a obtener una trabajabilidad similar durante la preparación y compactación de las probetas.

Las mezclas se confeccionan en probetas cilíndricas de 10×20 cm, manteniendo una relación altura/diámetro (L/D) cercana a 2. La fabricación se realiza mediante compactación manual por apisonamiento con varilla, con el fin de obtener probetas homogéneas y comparables. Posteriormente, las probetas son curadas a 7, 14 y 28 días, y ensayadas mediante compresión no confinada (UCS), registrando la resistencia máxima alcanzada para comparar el desempeño mecánico de las distintas combinaciones evaluadas.

Actividades:

- Caracterización física del relave y del material grueso mediante ensayos de granulometría, gravedad específica, densidad mínima y densidad máxima.
- Definición y preparación de las combinaciones experimentales, considerando cuatro razones de roca-relave, dos contenidos de cemento y relaciones agua-cemento efectivas ajustadas según la trabajabilidad requerida.
- Confección, curado y ensayo de probetas cilíndricas de 10×20 cm mediante compresión no confinada (UCS), registrando la resistencia máxima alcanzada.

4.1.3. Etapa 3: Análisis de resultados y propuesta de criterios

Esta etapa considera el análisis de los resultados obtenidos en la fase experimental, con el propósito de evaluar el efecto de la razón roca-relave, el contenido de cemento y la edad de curado sobre la resistencia a compresión no confinada de las mezclas CAF. Para ello, los resultados se organizan según la combinación experimental evaluada, permitiendo comparar los valores representativos de resistencia e identificar tendencias asociadas a la variación de las variables de mezcla.

El análisis busca reconocer las combinaciones con mejor desempeño mecánico, considerando no solo la resistencia alcanzada, sino también la eficiencia en el uso de cemento. A partir de estos resultados, se proponen criterios técnicos preliminares para la selección de mezclas CAF orientadas al diseño y control de calidad de rellenos estructurales en minería subterránea.

Actividades:

- Organización y análisis de los resultados según razón roca-relave, contenido de cemento y edad de curado.
- Comparación de la resistencia obtenida e identificación de las combinaciones con mejor desempeño mecánico y mayor eficiencia relativa en el uso de cemento.

-
- Propuesta de criterios técnicos preliminares para la selección, diseño y control de calidad de mezclas CAF.

4.2. Diseño experimental y justificación metodológica

Con el fin de dar mayor detalle al desarrollo experimental y metodología del estudio, a continuación se presenta una ampliación metodológica que detalla las pruebas aplicadas, la definición de variables y procesos de análisis de datos.

La investigación se basa en un enfoque cuantitativo y experimental, orientado a determinar cómo la razón roca-relave (R) y el contenido de cemento influyen en la resistencia a compresión no confinada (UCS) de mezclas CAF elaboradas con materiales representativos de faenas mineras. Este enfoque permite establecer comparaciones controladas entre las variables consideradas y analizar el efecto relativo de la razón roca-relave, el contenido de cemento y la edad de curado sobre la resistencia de las mezclas evaluadas.

En este estudio, la razón R se define como la masa seca de roca o grava dividida por la masa seca de relave. Bajo esta definición, un aumento de R implica una mayor proporción de fracción gruesa y una menor cantidad de relave disponible para ocupar los espacios intergranulares. Las razones seleccionadas fueron $R=1,9$; $2,0$; $2,1$; $2,2$. Para escoger este intervalo se consideraron antecedentes bibliográficos que reportan razones cercanas a 2:1 como favorables para el empaquetamiento granular, junto con una estimación teórica de densidad seca que indicó una zona de mayor compacidad cercana a $R \approx 2,2$. Además, se realizó una observación visual preliminar de mezclas roca-relave sin cemento, entre $R=1,8$ y $R=2,2$, con el fin de evaluar cualitativamente el acomodo de la matriz granular y la continuidad de la fracción fina antes de definir el intervalo experimental definitivo.



(a) $R = 1,8$



(b) $R = 1,9$



(c) $R = 2,0$



(d) $R = 2,1$



(e) $R = 2,2$

Figura 3: Comparación visual de probetas para distintas relaciones roca-relave.

A partir de esta observación se decidió concentrar la campaña experimental en el intervalo $R = 1,9$ a $R = 2,2$, descartando $R = 1,8$ por presentar una mayor cantidad de vacíos en la mezcla.

En este trabajo se utiliza “Cemento Melón Especial”, correspondiente a un cemento de clase puzolánica grado corriente (Instituto Nacional de Normalización, 1968), con porcentajes de contenido de cemento de 3 % y 7 %, definidos respecto de la masa seca conjunta de roca y relave. Esta selección se definió a partir de antecedentes de la literatura, donde se han empleado distintas dosificaciones en mezclas cementadas, tales como 3 %, 5 %, 7 % y 9 % (Hou et al., 2022); 1 %, 3 %, 5 %, 7 % y 10 % (Huang et al., 2011); 4.2 %, 6.9 % y 9.7 % (Pan y Grabinsky, 2023); 5 %, 10 % y 25 % (J. Li et al., 2020); 7.55 % (Xiu et al., 2021); combinaciones entre 3 % y 7 % (Kesimal et al., 2004); 5 %, 6 % y 7 % (Ercikdi et al., 2014); 5 % (Yilmaz et al., 2013); 5 %, 10 % y 15 % (Al-Bakri et al., 2023); y rangos entre 3 % y 7.5 % (Jafari et al., 2021). A partir de estos antecedentes, se seleccionaron 3 % y 7 % como niveles representativos de baja y mayor dosificación, permitiendo evaluar tanto el incremento de resistencia asociado al aumento del cemento como la eficiencia en su uso, considerando que este material corresponde a uno de los componentes de mayor costo en los rellenos cementados.

La cantidad de agua fue ajustada en cada serie para obtener una trabajabilidad similar durante la preparación y compactación de las probetas, criterio utilizado en estudios previos sobre rellenos cementados (Benzaazoua et al., 2004). Las relaciones agua-cemento efectivas resultantes fueron aproximadamente $a/c = 1,9$ para las mezclas con 3 % de cemento y $a/c = 1,6$ para las mezclas con 7 % de cemento.

Las probetas se confeccionaron con geometría cilíndrica de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, manteniendo una relación altura/diámetro cercana a 2. Esta dimensión corresponde a una configuración habitual para ensayos de compresión, facilita la manipulación de las muestras y reduce la cantidad de material requerido. Además, se verificó la compatibilidad entre el tamaño máximo de partícula y el diámetro del molde, con el fin de disminuir problemas de segregación, vacíos internos o falta de homogeneidad.

Las edades de curado seleccionadas fueron 7, 14 y 28 días, ya que permiten evaluar distintas etapas del desarrollo resistente de las mezclas cementadas. Yilmaz et al. (Yilmaz et al., 2014) emplearon edades de 7, 14, 28 y 56 días para evaluar la evolución de la resistencia en rellenos cementados, reportando que la UCS aumenta con el tiempo de curado, pero que la tasa de incremento tiende a disminuir después de las primeras edades. De forma similar, Hu et al. (Hu et al., 2023) analizaron mezclas cementadas a 3, 7, 14 y 28 días, señalando que el aumento de resistencia es más acelerado entre 3 y 14 días que entre 14 y 28 días, debido al avance progresivo de la hidratación del cemento y a la formación de productos cementantes que reducen la porosidad y aumentan la rigidez de la matriz. Asimismo, Hou et al., 2022, identificaron que el tiempo de curado es un factor relevante en el desarrollo de la UCS, indicando que la resistencia aumenta rápidamente en edades tempranas y luego presenta una tasa de crecimiento menor.

En este contexto, los 7 días representan una condición de resistencia temprana, los 14 días una etapa intermedia de desarrollo resistente y los 28 días una edad de referencia para comparar el desempeño mecánico de las mezclas cementadas. El ensayo de compresión no confinada fue definido como prueba mecánica principal, debido a que permite determinar directamente la resistencia máxima de las mezclas bajo condiciones controladas de laboratorio.

Finalmente, los resultados se analizan mediante valores representativos de resistencia, con el fin de comparar el desempeño mecánico de las distintas combinaciones e identificar aquellas con resistencia adecuada y uso eficiente de cemento.

4.3. Preparación de mezclas y confección de probetas

La confección de las mezclas y probetas se realizó mediante un procedimiento estandarizado, con el fin de asegurar condiciones comparables entre las combinaciones experimentales. Se trabajó con contenidos de cemento de 3 % y 7 % respecto de la masa seca total conjunta de roca y relave, y con cuatro razones roca-relave definidas como:

$$R = \frac{M_{\text{roca}}}{M_{\text{relave}}} = 1,9; 2,0; 2,1; 2,2$$

Para cada combinación se confeccionaron probetas cilíndricas de 10×20 cm, obteniéndose un total de 24 probetas.

El procedimiento de elaboración fue el siguiente:

1. Pesado de materiales secos

Se determinaron las masas de roca y relave en función de la razón R correspondiente a cada mezcla. El cemento se pesó de manera independiente, manteniendo constante el 3 % y el 7 % en masa respecto al total de sólidos.

2. Mezclado en seco

El material granular (roca + relave) se colocó en un recipiente y se mezcló manualmente hasta obtener una distribución homogénea. Posteriormente se incorporó el cemento y se mezcló nuevamente para asegurar su dispersión uniforme en la fase sólida.

3. Adición controlada de agua

El agua se agregó de manera gradual, revolviendo el material de forma continua hasta alcanzar una consistencia trabajable y uniforme. La cantidad de agua fue ajustada en cada serie según el contenido de cemento, obteniéndose relaciones agua-cemento efectivas de aproximadamente $a/c = 1,9$ para las mezclas con 3 % de cemento y $a/c = 1,6$ para las mezclas con 7 % de cemento. Una vez alcanzada la consistencia requerida, la mezcla se trasladó a una revolvedora para reforzar la homogeneización.

4. Moldeo de probetas

Las probetas se confeccionaron en moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, previamente lubricados con desmoldante. La mezcla se vertió en tres capas, aplicando compactación ligera mediante apisonamiento con varilla, con el fin de evitar la formación de vacíos de aire y asegurar un llenado uniforme del molde.

5. Curado

Las probetas se trasladaron a la cámara húmeda del laboratorio, donde se mantuvieron en condiciones de alta humedad relativa ($\approx 95\%$) y temperatura controlada cercana a 22 °C.

6. Identificación de probetas

Cada probeta fue identificada según la razón roca-relave utilizada y la cantidad de días de curado correspondiente.

4.4. Ensayo de compresión no confinada

Los ensayos de compresión no confinada se realizaron en laboratorio utilizando el sistema de adquisición y control GDSLab. Cada probeta fue instalada en la cámara de ensayo, procurando que quedara centrada y en contacto uniforme con los platos de carga, con el fin de evitar excentricidades durante la aplicación del esfuerzo axial.

Una vez posicionada la muestra, se inició el ensayo mediante la aplicación de carga axial monotónica hasta alcanzar la falla o el valor máximo de resistencia registrado. Durante el procedimiento, el programa GDSLab permitió registrar la evolución de la carga aplicada y el desplazamiento axial de la probeta. A partir de estos datos se calcularon el esfuerzo de compresión y la deformación axial correspondiente.

La Figura 4 presenta las probetas CAF antes del ensayo de compresión no confinada, correspondientes a mezclas con 7% de contenido de cemento a 28 días de curado. En ambas imágenes, las probetas se ordenan de izquierda a derecha con valores crecientes de razón roca-relave.



Figura 4: Probetas CAF con 7% de contenido de cemento a 28 días antes del ensayo: (a) $R = 1,9$ y $R = 2,0$; (b) $R = 2,1$ y $R = 2,2$.

Posteriormente, las probetas fueron instaladas en la cámara de ensayo GDSLab para la aplicación de carga axial monotónica hasta alcanzar la falla o el valor máximo de resistencia registrado. La Figura 5 presenta el estado final de las probetas luego del ensayo de compresión no confinada, ordenadas de izquierda a derecha según el aumento de la razón roca-relave, desde $R = 1,9$ hasta $R = 2,2$.



Figura 5: Falla de probetas CAF tras el ensayo de compresión no confinada.

5. Resultados

5.1. Granulometría

El relave M4-R1 corresponde a un material fino con un 42,3 % bajo el tamiz N°200, de naturaleza arenosa-limosa típica de relaves de flotación, cuyo elevado contenido de finos incrementa la demanda de agua para una trabajabilidad adecuada, con $D_{10} = 0,074$ mm, $D_{30} = 0,074$ mm, $D_{60} = 0,125$ mm, $D_{\text{máx}} = 2,0$ mm, $C_u = 1,69$ y $C_c = 0,59$. Por su parte, el material grueso presenta una gradación concentrada entre 4,8 y 19,0 mm para la fracción utilizada en probetas, con $D_{10} = 4,8$ mm, $D_{30} = 11,0$ mm, $D_{60} = 12,7$ mm, $C_u = 2,65$ y $C_c = 1,98$, confirmando su aptitud como agregado grueso para rellenos estructurales (Bloss, 1996; Villaescusa, 2014), complementando la fracción fina del relave y favoreciendo un mejor empaquetamiento granulométrico.

Durante la confección de probetas, se observó que parte del material grueso presentaba tamaños superiores al máximo recomendado para probetas cilíndricas de 10×20 cm, donde el criterio habitual de diseño establece $D'_{\text{máx}} \leq \frac{1}{5} D_{\text{molde}} \approx 20$ mm. Esto generó obstrucciones, vacíos internos y falta de homogeneidad en las probetas. El corte del material se realizó por una razón práctica de equipamiento, ya que los moldes cilíndricos disponibles en laboratorio no son compatibles con partículas de gran tamaño, lo que comprometería la integridad y representatividad de las muestras.

Por ello, si bien la curva granulométrica original del agregado grueso no se modificó, para la confección de probetas se procedió a seleccionar únicamente la fracción compatible con el diámetro del molde. Este procedimiento consistió en:

- Retirar la fracción > 20 mm.
- Homogeneizar nuevamente el material.
- Emplear solo la fracción útil para las mezclas CAF.

Las curvas presentadas corresponden al material original caracterizado, mientras que la fracción empleada en laboratorio considera solo el material compatible con probetas 10×20 cm. A continuación se presentan las curvas granulométricas del relave, la roca/estéril y la mezcla combinada roca-relave en razón 1:1, elaboradas a partir de los datos obtenidos en laboratorio.

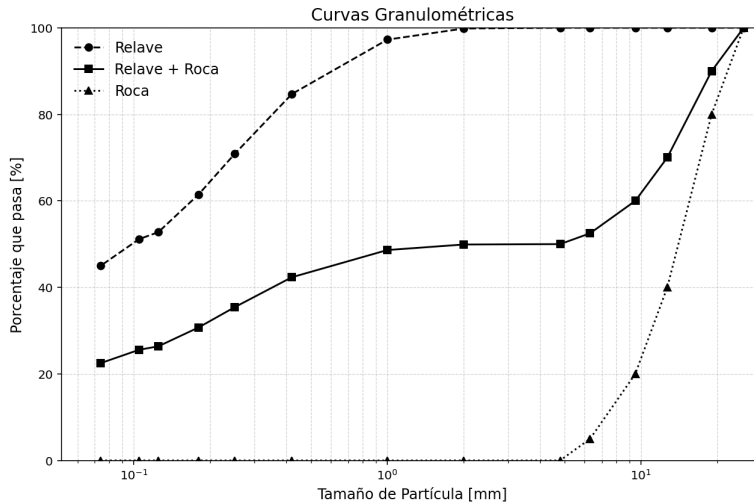


Figura 6: Curvas Granulométricas.

Además, se incluyen las curvas granulométricas correspondientes a diferentes razones roca-relave (2:1, 3:1), que representan variaciones en la proporción de fracción gruesa y fina. Dichas curvas permiten observar cómo cambia la distribución de tamaños de partícula según la relación de mezcla considerada, información que será utilizada en el análisis posterior para evaluar el comportamiento del material frente a distintas proporciones.

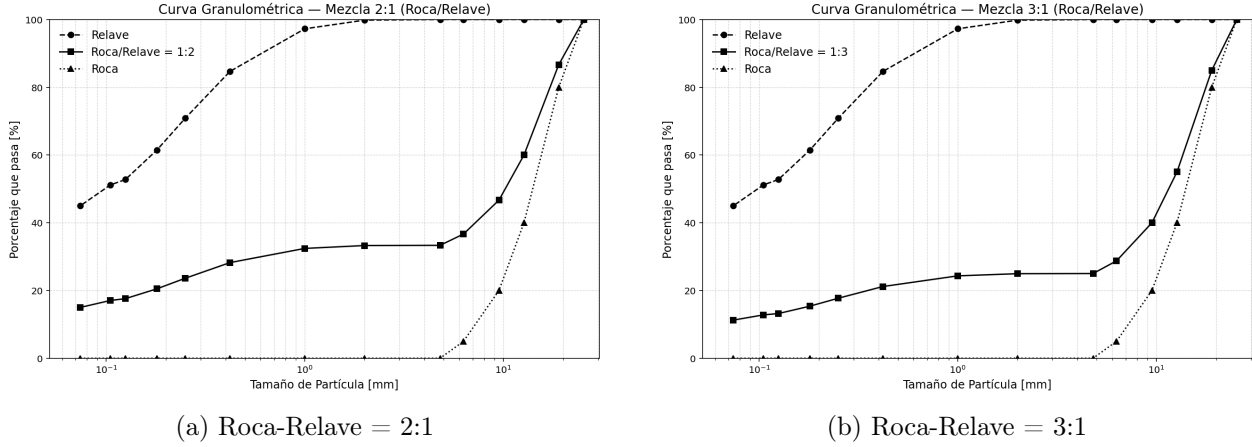


Figura 7: Curvas Granulométricas para distintas razones Roca/Relave.

5.2. Gravedad específica (Gs)

El ensayo de gravedad específica se realizó sobre la muestra de relave M4-R1 y la grava, conforme a los procedimientos establecidos en el Manual de Carreteras, Volumen 8: Ensayos de Materiales (Ministerio de Obras Públicas – Dirección de Vialidad, 2018). El método empleado corresponde al del picnómetro, utilizando una temperatura de referencia de 20 °C. Se efectuaron dos determinaciones independientes para verificar la repetibilidad del procedimiento en el relave, obteniéndose valores de 2,933 y 3,006. De forma análoga, se efectuó el ensayo de gravedad específica sobre el material de roca, obteniéndose un valor de 2,697. El valor elevado de G_s del relave, entre 2,93 y 3,01, es atribuible a la presencia de minerales pesados típicos de relaves de flotación de sulfuros metálicos, los cuales presentan gravedades específicas significativamente mayores a las de los minerales comunes.

5.3. Densidad mínima y máxima

5.3.1. Relave

El ensayo de densidad mínima del relave se realizó mediante el método de vertido libre, utilizando un molde de volumen conocido. Se efectuaron tres mediciones consecutivas y se calculó la densidad seca mínima según la relación entre la masa seca y el volumen del molde. Los valores obtenidos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1: Resultados del ensayo de densidad mínima.

Medición	$W_{\text{molde} + \text{material}}$ (kg)	W_{material} (kg)	ρ_d (g/cm ³)
1	8,392	4,692	1,652
2	8,382	4,682	1,649
3	8,396	4,696	1,654

El valor promedio de densidad mínima seca corresponde a:

$$\bar{\rho}_d = 1651 \text{ kg/m}^3$$

La densidad máxima del relave se determinó mediante el método de mesa vibratoria. A partir de la masa seca y del volumen compactado se calculó la densidad seca máxima, cuyo resultado es:

$$\rho_{d,\text{relave}} = 1854 \text{ kg/m}^3$$

5.3.2. Grava/Estéril

Para el material grueso se aplicó el mismo procedimiento utilizado en el relave, realizando ensayos de densidad mínima y máxima en un molde de volumen conocido. A partir de las masas medidas y de los volúmenes correspondientes se obtuvieron los siguientes valores:

$$\rho_{d,\text{mín,grava}} = 1517 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{d,\text{máx,grava}} = 1687 \text{ kg/m}^3$$

5.4. Estimación teórica de la densidad seca de mezcla en función de R

Con base en los resultados de densidad mínima y máxima obtenidos para el relave y la grava, se realizó una estimación teórica de la densidad seca de la mezcla en función de la razón roca-relave. Para ello se utilizó un modelo de empaquetamiento que combina ambos materiales según su proporción másica, generando una curva continua de densidad de mezcla para distintos valores de R .

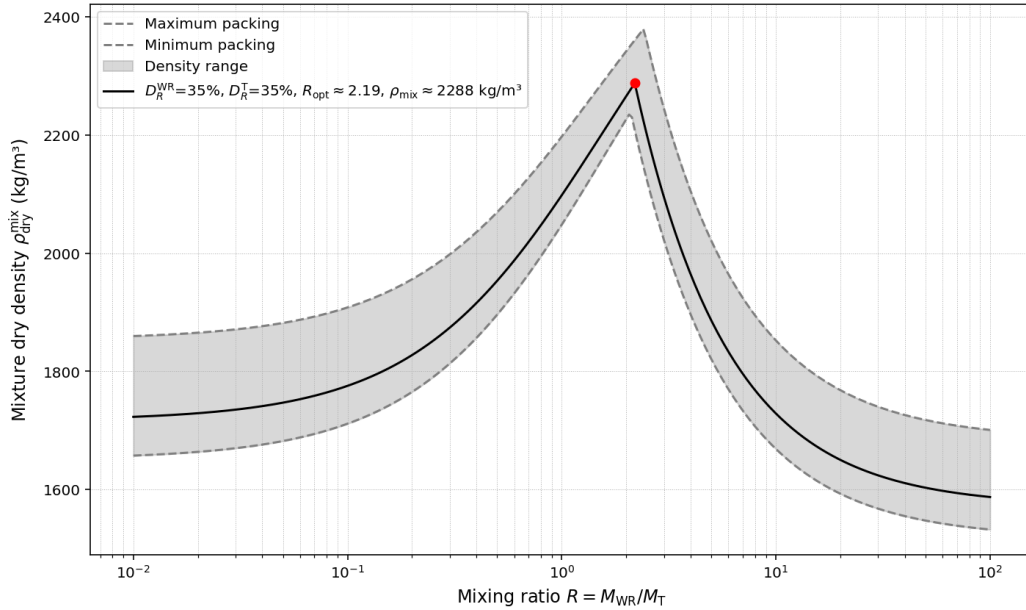


Figura 8: Estimación teórica de densidad seca de mezcla en función de la razón roca/relave.

La Figura 8 presenta la curva teórica de densidad seca de mezcla para un amplio rango de valores de R , incluyendo las condiciones de empaquetamiento máximo y mínimo. La zona sombreada representa el rango posible de densidades según los límites obtenidos experimentalmente para la grava y el relave, y la curva negra corresponde a la densidad estimada adoptando $D_R = 35\%$ como condición moderada de compactación, valor consistente con una compactación por varillado manual. El punto máximo de esta curva, denominado punto de llenado justo o *just fill*, indica la razón roca-relave teórica en la cual la fracción fina ocupa exactamente los vacíos intergranulares de la fracción gruesa, obteniéndose $R \approx 2,19$. Esta figura debe interpretarse de forma cualitativa y orientativa, ya que no se midió la densidad seca real de cada probeta para contrastar este valor teórico.

5.5. Agente cementante

En este estudio se empleó Cemento Melón Especial como agente cementante para la elaboración de las mezclas cementadas, correspondiente a una clase puzolánica grado corriente según la norma NCh148 de 1968 (Instituto Nacional de Normalización, 1968), equivalente al Tipo P de la clasificación ASTM C595. El programa experimental completo contempla la utilización de dos contenidos de cemento: 3 % y 7 % respecto al peso seco total de la mezcla (roca + relave).

5.6. Identificación de probetas

En la Figura 9 se presenta el conjunto de probetas confeccionadas con un contenido de cemento de un 7 %. En la rotulación de los moldes se indicó la razón roca-relave, denotada como R , junto con el tiempo de curado y el porcentaje de cemento empleado en la mezcla. Esta identificación permitió diferenciar cada probeta. Además, se realizó la misma identificación para las otras doce probetas de un contenido de cemento del 3 % con diferentes edades de curado y razones de R .



Figura 9: Identificación de probetas de estudio, correspondientes a 7 % de contenido de cemento.

5.7. Curvas esfuerzo-deformación de las mezclas CAF

En esta sección se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en los ensayos de compresión no confinada realizados sobre mezclas CAF. Los resultados se organizan según el contenido de cemento utilizado, diferenciando las edades de curado seleccionadas y las razones de roca-relave evaluadas. Las curvas muestran la evolución del esfuerzo axial en función de la deformación axial registrada durante el ensayo.

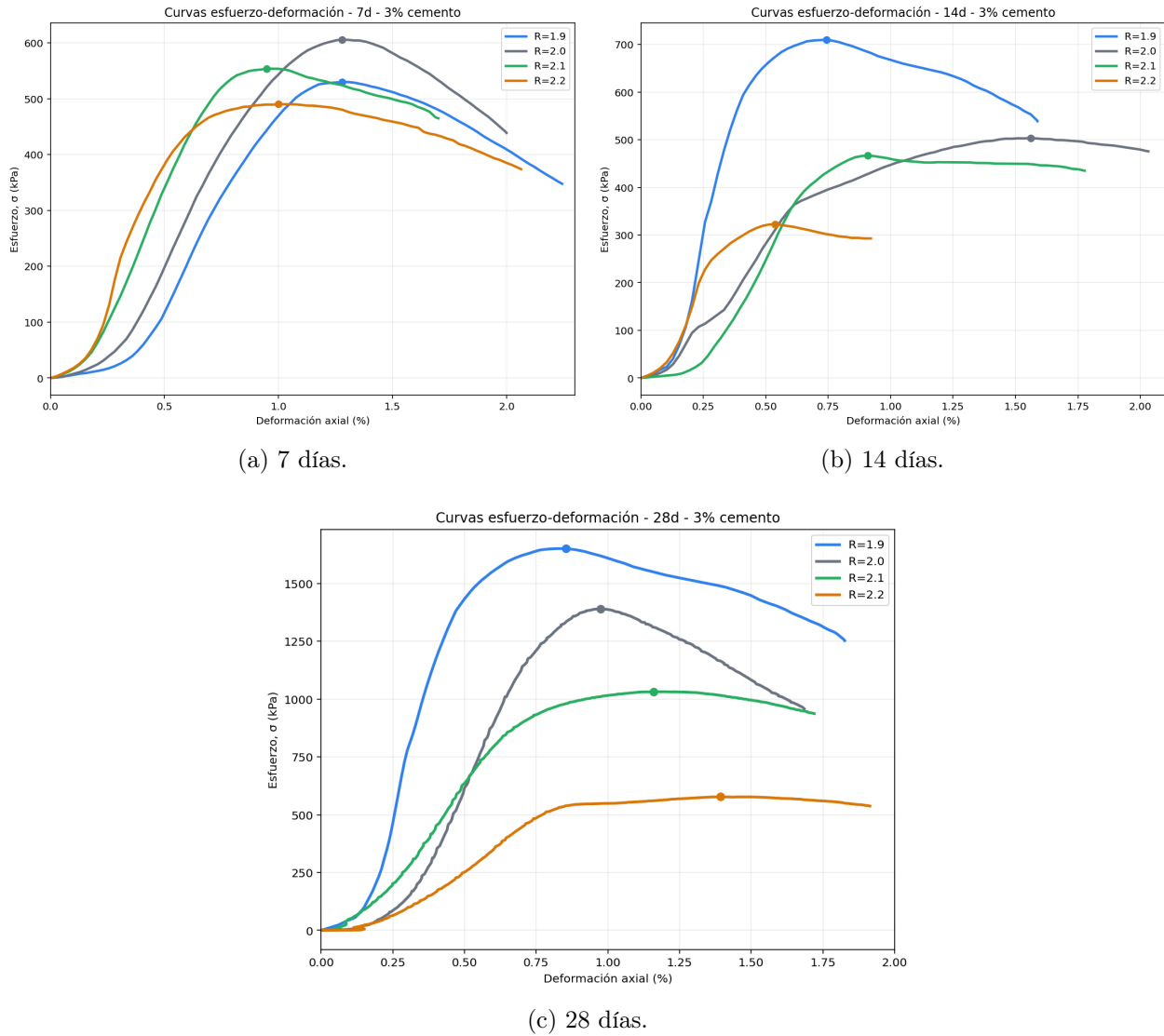


Figura 10: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para mezclas CAF con 3 % de cemento.

Para las mezclas con 3 % de contenido de cemento, las curvas presentan diferentes resultados de esfuerzos axiales máximos según la razón R , y la edad de curado. En la figura 10a, los esfuerzos se encuentran dentro de un rango relativamente cercano, en cambio a medida que aumentan los días, como se puede apreciar en la figura 10b, se observa una mayor diferencia entre curvas, mientras que en la figura 10c se registra una diferencia más marcada entre los valores de esfuerzo.

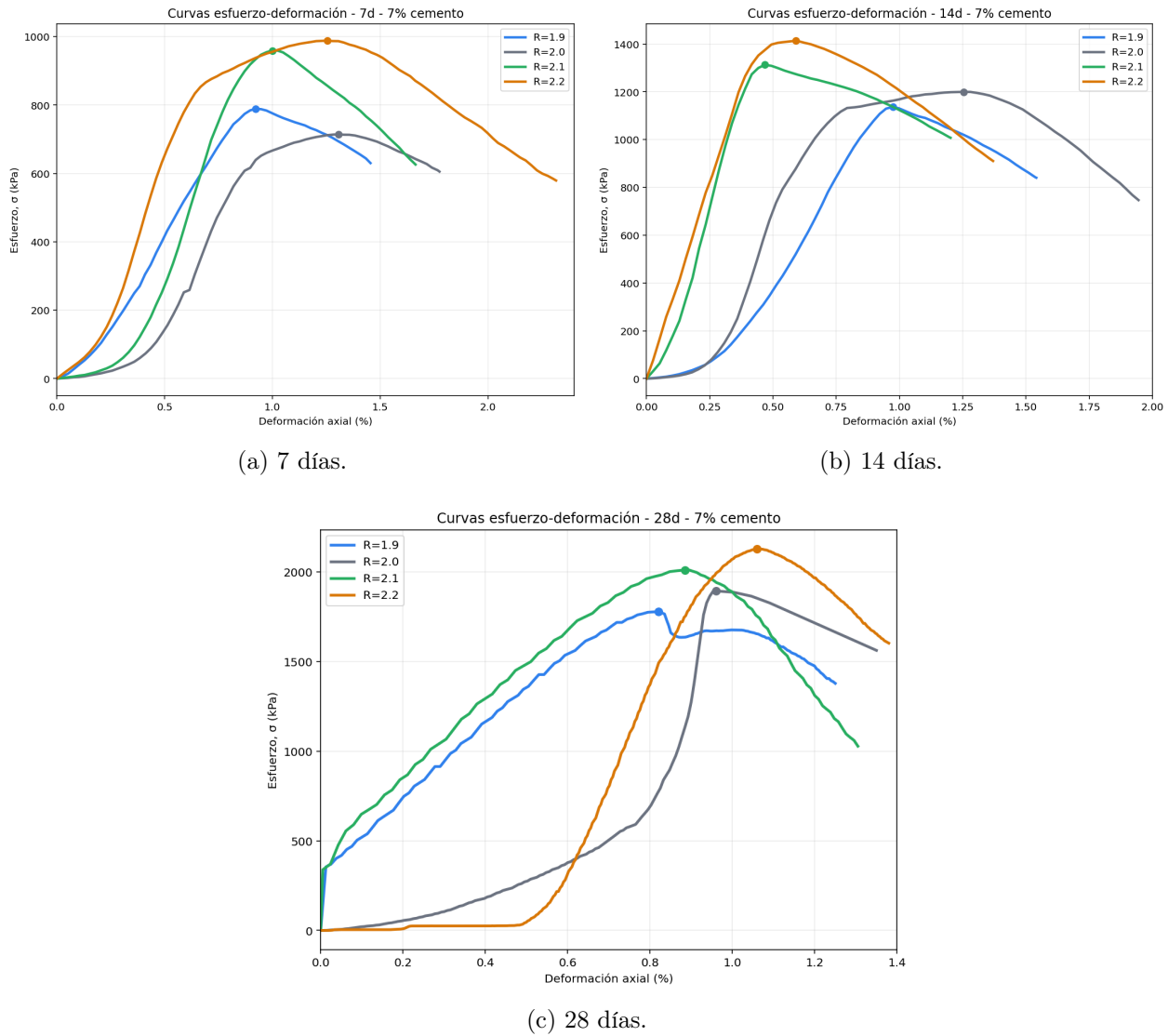


Figura 11: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas para mezclas CAF con 7 % de contenido de cemento.

Para las mezclas con 7 % de contenido de cemento, las curvas alcanzan mayores niveles de esfuerzo axial que las mezclas con 3 % de contenido de cemento. En los resultados de 7, 14 y 28 días se observan diferencias entre las razones roca-relieve evaluadas, las cuales se hacen más evidentes en las edades de curado mayores.

5.8. Resistencia máxima obtenida a partir de las curvas esfuerzo-deformación

A partir de las curvas esfuerzo-deformación se determinaron los valores máximos de resistencia a compresión no confinada para cada combinación experimental. Cabe destacar que cada valor reportado corresponde a una probeta individual, por lo que los resultados deben interpretarse como valores indicativos de tendencia y no como estimaciones estadísticamente representativas. La ausencia de réplicas impide cuantificar la dispersión asociada a cada combinación, aspecto que debe

considerarse al interpretar las diferencias entre dosificaciones. Las Tablas 2 y 3 presentan los valores registrados para las mezclas con 3 % y 7 % de cemento, respectivamente.

Tabla 2: Resistencia máxima con 3 % de contenido de cemento.

R (roca-relave)	UCS 7 días [kPa]	UCS 14 días [kPa]	UCS 28 días [kPa]
1,9	530,0	709,8	1651,1
2,0	605,5	503,6	1389,8
2,1	553,8	466,7	1031,6
2,2	490,2	322,9	577,7

Tabla 3: Resistencia máxima con 7 % de contenido de cemento.

R (roca-relave)	UCS 7 días [kPa]	UCS 14 días [kPa]	UCS 28 días [kPa]
1,9	789,2	1137,1	1777,3
2,0	714,4	1199,9	1893,3
2,1	959,3	1313,0	2010,5
2,2	988,4	1414,2	2127,9

Para las mezclas con 3 % de cemento, el mayor valor registrado fue de 1651,1 [kPa], el cual corresponde a un R de 1,9 a 28 días de curado. Por otro lado, para las mezclas con 7 % de cemento el mayor valor correspondió a un R de 2,2 a los 28 días, con una resistencia máxima de 2127,9 [kPa].

5.9. Efecto de la edad de curado en la resistencia del CAF

Los días de curado son de suma importancia en la resistencia a la compresión de las mezclas en estudio. Esto es debido al proceso de hidratación del cemento, ya que una mayor hidratación resulta en una resistencia mayor. A continuación, se presentan los valores de resistencia máxima a compresión no confinada, en función de la edad de curado para mezclas con 3 % y 7 % de cemento, considerando las razones de R evaluadas.

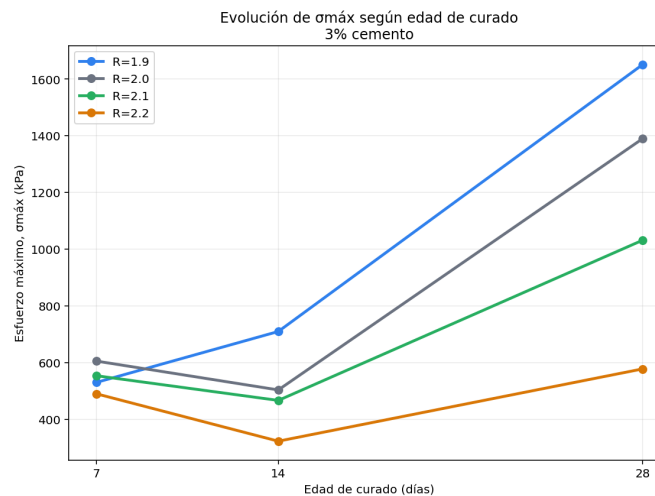


Figura 12: Efecto de los días de curado en la resistencia a la compresión, con 3 % de contenido de cemento

En las mezclas con 3% de cemento, el comportamiento no fue completamente monótono para todas las razones roca-relave. La mezcla con $R = 1,9$ presentó un aumento progresivo de resistencia entre 7, 14 y 28 días, alcanzando 1651,1 kPa a los 28 días. En cambio, para $R = 2,0$, $R = 2,1$ y $R = 2,2$ se observó una disminución de resistencia entre 7 y 14 días, seguida de un aumento a los 28 días, por lo que la tendencia de ganancia resistente con la edad de curado no fue uniforme en todas las combinaciones evaluadas. Esta variación se interpreta como una anomalía atribuible a la variabilidad de confección y no como un mecanismo físico establecido, dado que la ausencia de réplicas impide distinguir tendencia real de dispersión. Este aspecto se discute en la Sección de Discusión de resultados.

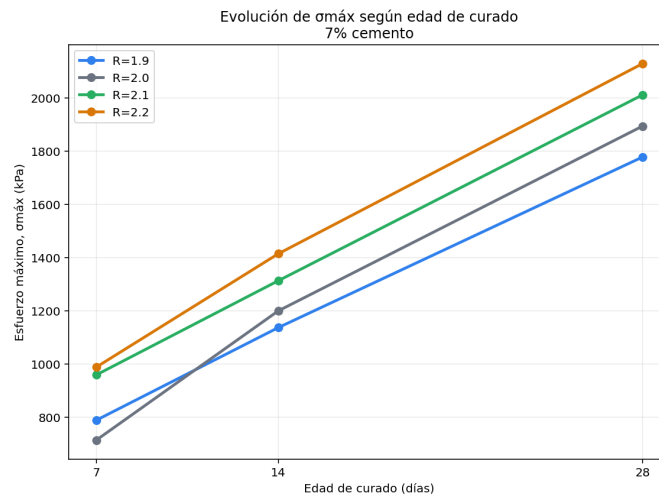


Figura 13: Efecto de los días de curado en la resistencia a la compresión, con 7% de contenido de cemento.

Para las mezclas con 7% de cemento, la resistencia máxima aumentó progresivamente con la edad de curado en todas las razones roca-relave evaluadas.

5.10. Efecto del contenido de cemento en la resistencia del CAF

El contenido de cemento es una de las variables principales en la ganancia de resistencia de las mezclas CAF, ya que define la cantidad de material cementante disponible dentro de la matriz granular.

Se presentan los resultados obtenidos al comparar las mezclas elaboradas con 3 % y 7 % de contenido de cemento, manteniendo separadas las diferentes razones de roca-relave.

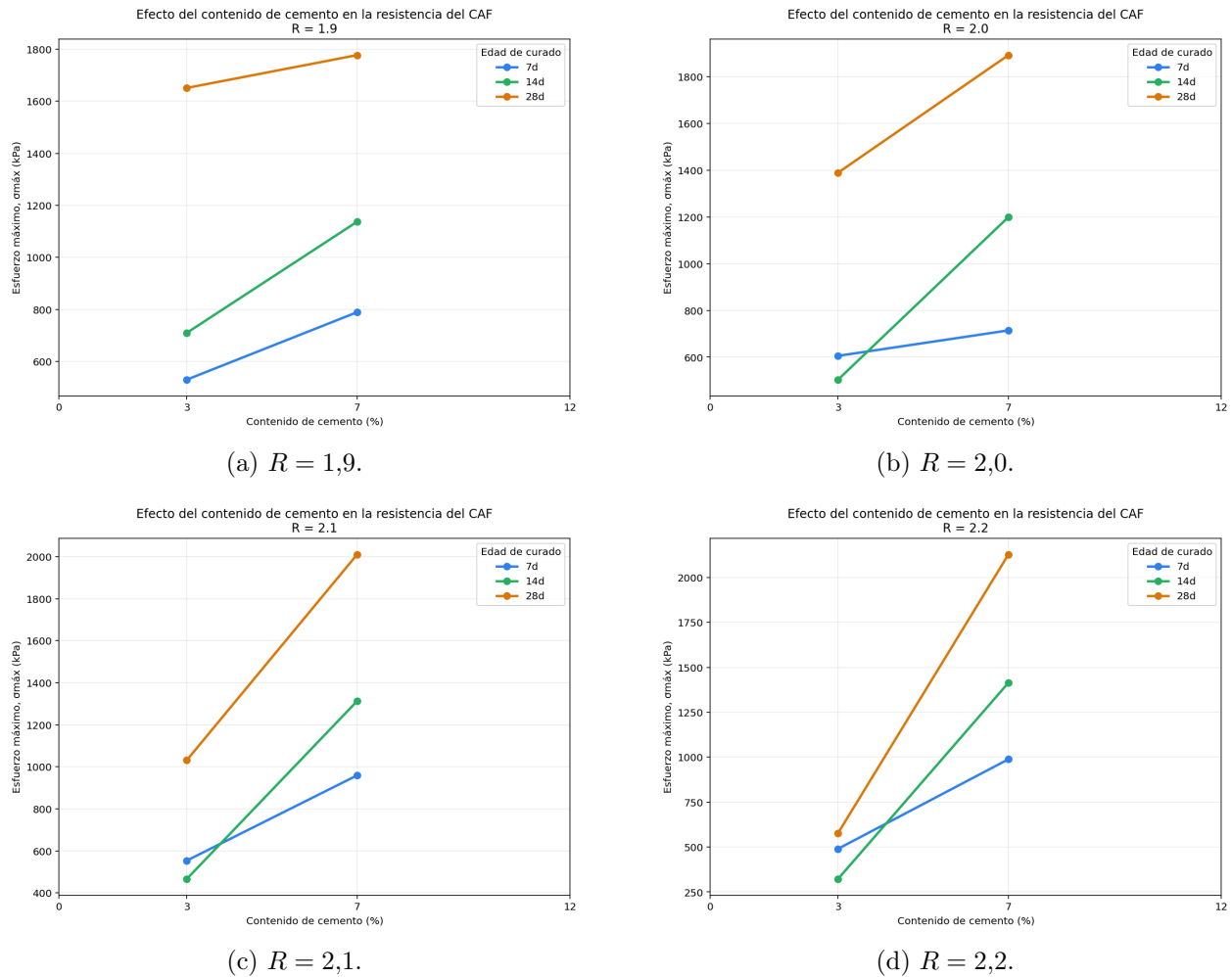


Figura 14: Efecto del contenido de cemento en la resistencia máxima del CAF para las distintas razones roca-relave evaluadas.

Las mezclas con 7 % de contenido de cemento presentan mayores valores de resistencia que las mezclas con 3 %, especialmente a los 14 y 28 días de curado. Esta tendencia se observa para todas las razones roca-relave evaluadas, aunque la diferencia entre ambos contenidos de cemento varía según el valor de R y la edad de curado.

5.11. Efecto de la razón roca-relave en la resistencia del CAF

La razón roca-relave permite evaluar cómo cambia la resistencia del CAF al modificar la proporción entre material grueso y relave dentro de la mezcla. Para ello, a continuación, se graficaron los valores de resistencia máxima en función de la razón roca-relave para las edades de curado ya mencionadas, diferenciando los contenidos de cemento.

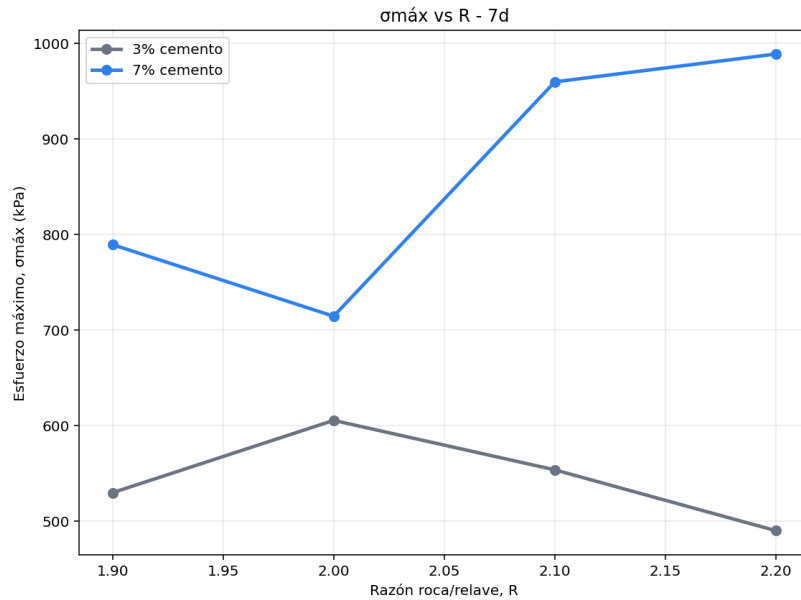


Figura 15: Resistencia máxima en función de la razón roca-relave a 7 días de curado.

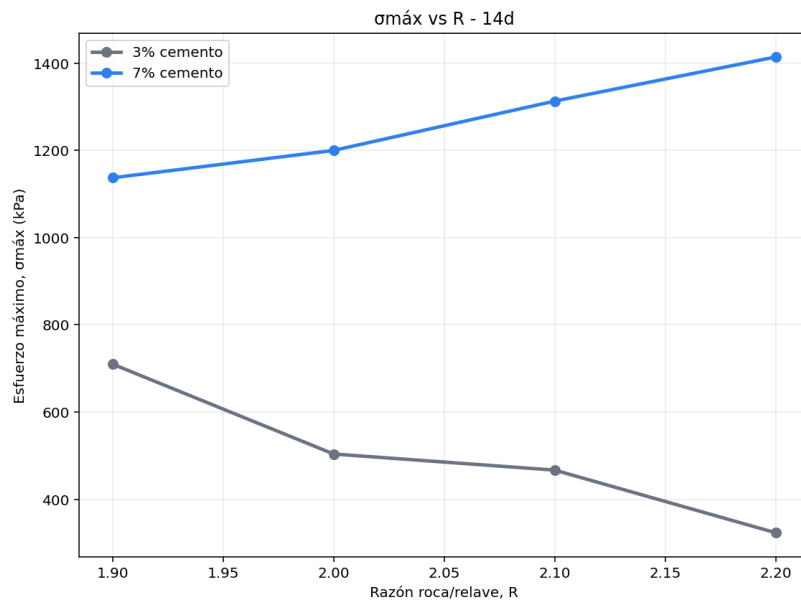


Figura 16: Resistencia máxima en función de la razón roca-relave a 14 días de curado.

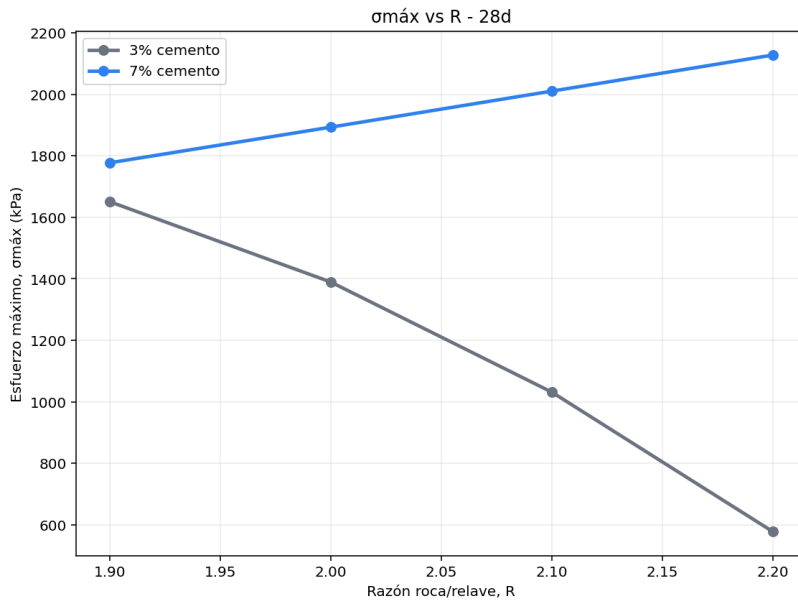


Figura 17: Resistencia máxima en función de la razón roca-relave a 28 días de curado.

Se evidencia que la variación de la resistencia máxima con la razón R no fue igual para ambos contenidos de cemento. Para 3 % de cemento, los valores mayores a 14 y 28 días se registraron en las razones menores, mientras que para 7 % de cemento los valores se concentraron en las razones mayores.

5.12. Efecto conjunto de la edad de curado, del contenido de cemento y de la razón roca-relave

Para visualizar de mejor manera la influencia de la edad de curado, el contenido de cemento y la razón roca-relave, se elaboraron mapas de calor a partir de los valores de resistencia máxima obtenidos en los ensayos de compresión no confinada. En estos gráficos, cada celda representa una combinación experimental específica, diferenciada por la razón R y la edad de curado correspondiente.

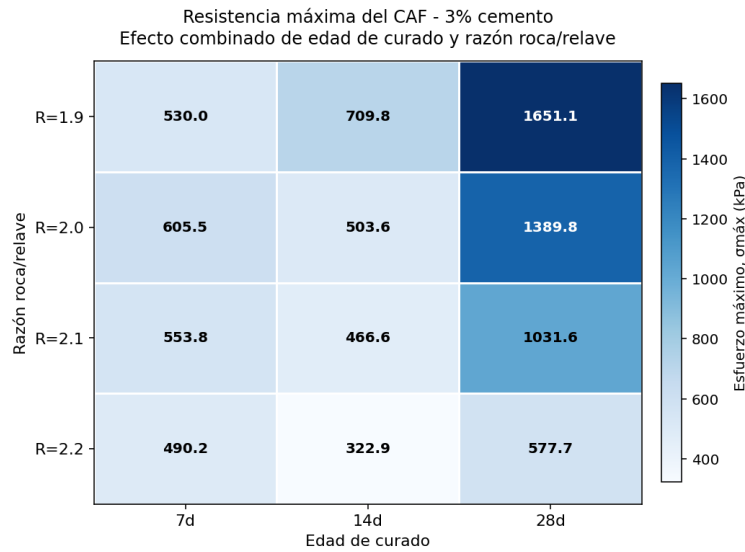


Figura 18: Resistencia máxima efecto combinado de edad de curado, contenido de cemento y razón R para 3% de contenido de cemento.

Para las mezclas con 3% de cemento, la mayor resistencia se obtuvo para $R = 1,9$ a los 28 días de curado, alcanzando un valor de 1651,1 kPa. En general, se observa que los mayores valores de resistencia se concentran en las razones roca-relave menores, mientras que las menores resistencias se registran para $R = 2,2$, especialmente a 14 y 28 días.

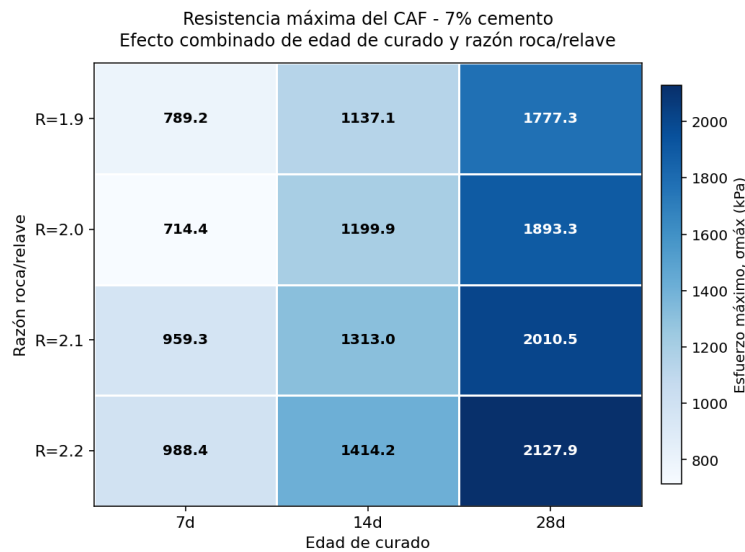


Figura 19: Resistencia máxima efecto combinado de edad de curado, contenido de cemento y razón R para 7% de contenido de cemento.

Para las mezclas con 7% de cemento, los mayores valores de resistencia se concentran a los 28 días de curado y en las razones roca-relave mayores. La máxima resistencia registrada corresponde a $R = 2,2$ a los 28 días, con un valor de 2127,9 kPa.

Además del análisis basado en la resistencia máxima, se calculó un índice de conveniencia con el propósito de comparar las combinaciones experimentales considerando simultáneamente resistencia, contenido de cemento y edad de curado, permitiendo identificar mezclas eficientes que no necesariamente presentan la mayor resistencia absoluta.

El índice se construyó mediante tres puntajes parciales normalizados entre 0 y 100. El puntaje R_q representa el aporte de la resistencia y se considera un criterio favorable. Desde un enfoque ingenieril, lo ideal es calcularlo respecto a una resistencia objetivo UCS_{obj} :

$$R_{q,i} = \min \left(\frac{UCS_i}{UCS_{obj}} \cdot 100, 100 \right) \quad (1)$$

Sin embargo, dado que este estudio tiene carácter experimental comparativo y no se dispone de una resistencia objetivo definida, R_q se calculó mediante normalización min-max:

$$R_{q,i} = \frac{UCS_i - UCS_{\min}}{UCS_{\max} - UCS_{\min}} \cdot 100 \quad (2)$$

donde $UCS_{\min} = 322,9$ kPa ($R = 2,2$; 3 % cemento; 14 días) y $UCS_{\max} = 2127,9$ kPa ($R = 2,2$; 7 % cemento; 28 días).

El puntaje R_c incorpora una penalización por consumo de cemento. Se adoptó una referencia superior $C_{ref} = 8$ %, valor definido como un punto límite ligeramente por sobre el mayor contenido ensayado (7 %), de modo que ninguna dosificación evaluada quede descartada y que la penalización sea progresiva entre ambos contenidos. Este valor corresponde a una referencia metodológica ligeramente superior al mayor contenido ensayado y se encuentra dentro del rango de dosificaciones reportadas en la literatura (Hou et al., 2022; Huang et al., 2011; Jafari et al., 2021; Xiu et al., 2021). Su cálculo corresponde a:

$$R_{c,i} = \frac{C_{ref} - C_i}{C_{ref} - C_{\min}} \cdot 100 \quad (3)$$

donde $C_{\min} = 3$ % y $C_{ref} = 8$ %. Así, una mezcla con 3 % obtiene $R_c = 100$ y una con 7 % obtiene $R_c = 20$, penalizándola de forma importante sin descartarla.

El puntaje R_t representa el aporte de la edad de curado como criterio operativo. Dado que en minería subterránea la secuencia operacional puede permitir esperar más tiempo, este criterio se incorpora con bajo peso:

$$R_{t,i} = \frac{t_{\max} - t_i}{t_{\max} - t_{\min}} \cdot 100 \quad (4)$$

donde $t_{\min} = 7$ días y $t_{\max} = 28$ días.

El índice de conveniencia se obtiene mediante:

$$IC = 0,40 \cdot R_q + 0,50 \cdot R_c + 0,10 \cdot R_t \quad (5)$$

Los pesos fueron asignados según criterios ingenieriles explícitos: se otorgó mayor ponderación al cemento (50 %) por ser el componente de mayor costo en mezclas cementadas (Benzaazoua et al., 2004), una ponderación relevante a la resistencia (40 %) dado que el relleno debe cumplir una función estructural mínima, pero en diseño minero el costo operacional prima sobre maximizar resistencia, por lo que este criterio actúa como secundario al costo cementante, y menor peso al tiempo de curado (10 %) dado que la secuencia operacional en minería subterránea generalmente permite esperar tiempos de curado mayores sin comprometer la continuidad productiva, por lo que no constituye una restricción crítica. El índice no representa una optimización absoluta sino

una herramienta comparativa: si dos mezclas alcanzan resistencias similares, será más conveniente aquella con menor contenido de cemento.

Como análisis de sensibilidad, se evaluó el efecto de modificar razonablemente los pesos considerando dos escenarios alternativos: uno que prioriza la resistencia ($w_{R_q} = 0,60$; $w_{R_c} = 0,30$; $w_{R_t} = 0,10$) y otro que prioriza la eficiencia cementante ($w_{R_q} = 0,20$; $w_{R_c} = 0,70$; $w_{R_t} = 0,10$). En ambos casos, la combinación con mayor índice se mantuvo en $R = 1,9$ a 28 días para 3% de cemento y en $R = 2,2$ a 28 días para 7% de cemento, confirmando que las conclusiones del índice son robustas frente a variaciones razonables en la ponderación adoptada.

A partir de este criterio, se obtuvieron los mapas de conveniencia presentados en la Figura 20.

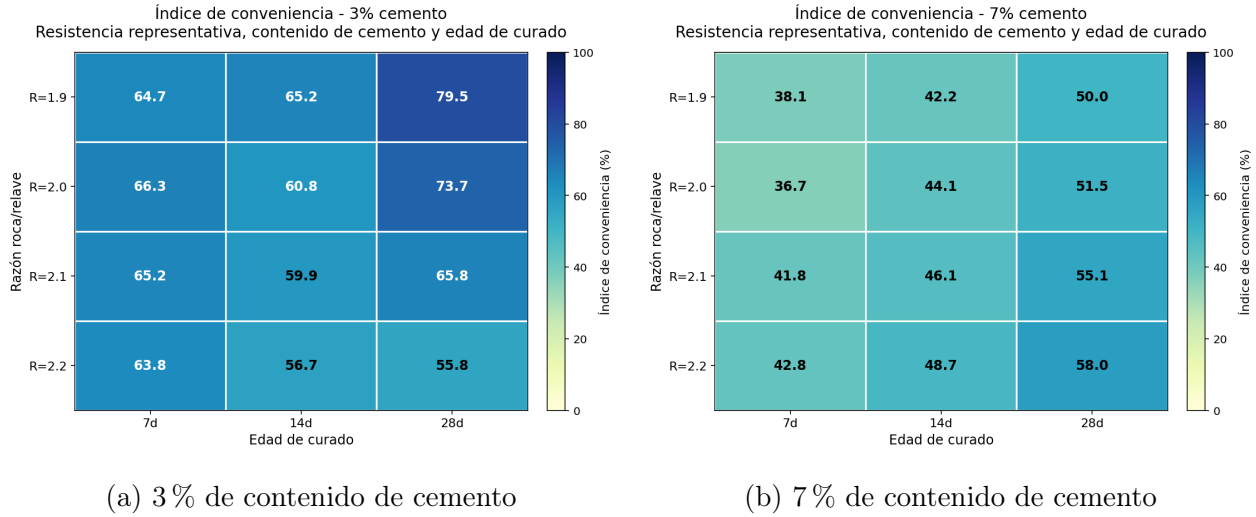


Figura 20: Índice de conveniencia para mezclas CAF considerando resistencia representativa, contenido de cemento y edad de curado.

Los mayores valores del índice se concentran en las mezclas con 3% de contenido de cemento, debido a la penalización aplicada al mayor consumo de cementante. Para este contenido de cemento, el mayor índice se obtuvo en ($R=1,9$) a los 28 días de curado. En las mezclas con 7% de contenido de cemento, el mayor índice correspondió a ($R=2,2$) a los 28 días, aunque con valores menores que los obtenidos para las mezclas con 3%.

Desde una perspectiva práctica e ingenieril, la razón roca-relave más conveniente depende del contenido de cemento considerado. Para baja dosificación cementante, las razones cercanas a ($R=1,9$)–($2,0$) favorecen el llenado de vacíos y el aprovechamiento del cemento disponible. En cambio, para 7% de contenido de cemento, el mejor resultado dentro de este grupo se desplaza hacia ($R=2,2$), donde la mayor disponibilidad de cementante permite vincular eficientemente el esqueleto granular grueso. Por lo tanto, no existe una razón roca-relave óptima única, sino que esta debe definirse en función de la resistencia objetivo, la dosificación cementante y el criterio de diseño adoptado para el relleno.

6. Discusión de resultados

6.1. Interpretación de los mecanismos resistentes del CAF

El comportamiento resistente observado en las mezclas CAF puede interpretarse como la respuesta de un material granular cementado, en el cual la resistencia se desarrolla por la interacción del esqueleto de roca, la fracción fina de relave y la matriz cementante generada durante el curado.

En este sistema, la grava o roca aporta una estructura de contactos entre las partículas gruesas, el relave llena los vacíos intergranulares y el cemento genera enlaces que aumentan la cohesión entre los componentes y permiten transferir los esfuerzos dentro de la mezcla.

Los resultados obtenidos son consistentes con el proceso de hidratación del cemento, observándose en la totalidad de las combinaciones ensayadas un incremento en la resistencia entre los 7 y 28 días de curado. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Benzaazoua et al., 2004 y Jiang et al., 2019 para rellenos cementados, confirmando que el avance de la hidratación constituye el mecanismo dominante en el desarrollo resistente de este tipo de material.

Sin embargo, para las mezclas con 3 % de cemento y razones $R = 2,0$, $R = 2,1$ y $R = 2,2$, se registró una disminución de resistencia entre los 7 y 14 días, seguida de una recuperación a los 28 días. Esta variación no es consistente con la tendencia esperada por el avance de la hidratación del cemento, por lo que se interpreta como una anomalía experimental asociada a la variabilidad de confección de probetas individuales sin réplicas. Esta interpretación es consistente con lo señalado por Bloss, 1996, quien indica que la heterogeneidad interna del CAF puede generar dispersión en sus propiedades resistentes. Si bien una posible explicación podría relacionarse con diferencias locales de compactación, presencia de vacíos o distribución espacial de la pasta cementante dentro de la probeta, su verificación excede el alcance del presente estudio.

Respecto a las curvas esfuerzo-deformación se evidencia que el contenido de cemento no solo modifica la resistencia máxima alcanzada, sino también la forma en que la mezcla moviliza dicha resistencia durante la carga. Las mezclas con mayor contenido de cemento tienden a desarrollar una matriz cementante más resistente y con mayor capacidad de unión entre partículas. No obstante, esta matriz solo resulta efectiva si logra conectarse adecuadamente con el arreglo granular existente, por lo que el efecto del cemento debe entenderse en conjunto con la proporción roca-relave y no como una variable aislada.

En conjunto, los resultados obtenidos son consistentes con la hipótesis general del estudio, al evidenciar que la resistencia del CAF depende de la interacción entre contenido de cemento, edad de curado y razón roca-relave. Por ello, el diseño de mezclas no debe basarse solo en aumentar la dosificación de cemento, sino en lograr una matriz cementante continua y compatible con el empaquetamiento granular del material.

6.2. Interacción entre razón roca-relave y contenido de cemento en el desempeño resistente

Los resultados obtenidos sugieren que el efecto de la razón roca-relave sobre la resistencia del CAF no es independiente del contenido de cemento, sino que ambas variables interactúan directamente en el desempeño mecánico de la mezcla. Este resultado es consistente con la hipótesis general del estudio, sugiriendo que la resistencia no está controlada únicamente por la proporción granular ni por la dosificación cementante de forma aislada, sino por la relación entre ambas.

En primer lugar, las figuras 12 y 13 permiten comparar la evolución de la resistencia con la edad de curado para cada contenido de cemento. En las mezclas con 3 % de cemento, la ganancia resistente no fue uniforme, observándose incluso una disminución entre los 7 y 14 días para $R = 2,0$, $R = 2,1$ y $R = 2,2$. Este comportamiento no se presentó en las mezclas con 7 % de cemento, donde la resistencia aumentó de manera consistente en todas las razones evaluadas. Esto muestra que el efecto del curado depende tanto del contenido de cemento disponible como de la proporción roca-relave utilizada.

La figura 14 complementa este análisis, mostrando que las mezclas con 7 % de cemento alcanzaron mayores resistencias que las mezclas con 3 % en todas las combinaciones evaluadas. Si bien este resultado era esperable debido al mayor aporte cementante, lo más relevante es que el aumento de cemento modifica la forma en que la razón roca-relave influye en el desempeño resistente.

Las figuras 15, 16 y 17 permiten observar con mayor claridad esta interacción. Para las mezclas con 3 % de cemento, los mayores valores de resistencia tienden a concentrarse en razones roca-relave menores, especialmente hacia $R = 1,9$ en edades mayores. En cambio, para las mezclas con 7 % de cemento, los mayores valores se desplazan hacia razones roca-relave mayores, alcanzando el mejor desempeño en $R = 2,2$. Por lo tanto, una misma variación de R no produce el mismo efecto resistente cuando cambia el contenido de cemento.

Una posible interpretación de este comportamiento es que, bajo una baja dosificación cementante, una mayor proporción relativa de relave favorezca el llenado de vacíos y la continuidad de la fase fina cementada. En estas condiciones, al aumentar la fracción gruesa, la matriz disponible podría resultar insuficiente para vincular adecuadamente todas las partículas. Por el contrario, con un mayor contenido de cemento, la mayor disponibilidad de matriz cementante sería compatible con una mejor conexión del esqueleto granular grueso y con las mayores resistencias observadas en razones roca-relave más altas. Sin embargo, este mecanismo no fue verificado directamente en el presente estudio, por lo que debe entenderse como una interpretación de los resultados obtenidos.

Por último, las figuras 18 y 19 refuerzan esta interpretación al integrar simultáneamente la razón roca-relave, la edad de curado y el contenido de cemento. Para 3 % de cemento, la mayor resistencia se obtuvo en $R = 1,9$ a los 28 días, con $1651,1[kPa]$, mientras que para 7 % de cemento se registró en $R = 2,2$ a los 28 días, con $2127,9[kPa]$. Esta comparación sugiere que la combinación con mejor desempeño mecánico no es única, sino que cambia según la dosificación cementante considerada. Por lo tanto, para bajas dosificaciones de cemento, las razones con mejor desempeño se ubicaron en torno a $R = 1,9-2,0$, mientras que para mayores dosificaciones el mejor desempeño se desplazó hacia las razones más altas evaluadas. Esto sugiere que la proporción roca-relave más favorable depende del contenido de cemento y no corresponde a un valor único aplicable a todas las mezclas.

Este resultado permite matizar lo reportado por Wang y Villaescusa, 2001, quienes señalan razones cercanas a 2:1 como favorables para el empaquetamiento granular en mezclas tipo CAF. En el presente estudio, las razones evaluadas se encuentran dentro de un rango cercano a dicha

proporción, sin embargo, los resultados muestran que no existe una razón roca-relave óptima única e independiente del contenido de cemento. Más bien, la razón con mejor desempeño mecánico se desplaza según la cantidad de cemento disponible en la mezcla.

En consecuencia, la pregunta central del estudio puede responderse señalando que la razón roca-relave sí influye en la resistencia del CAF, pero su efecto depende del contenido de cemento. Para una baja dosificación cementante, el mejor desempeño se asoció a una razón menor; mientras que, para una mayor dosificación, se desplazó hacia una razón mayor. Esto es relevante para el diseño de mezclas CAF, ya que demuestra que no basta con adoptar una proporción granular de referencia, sino que esta debe evaluarse junto con el contenido de cemento y el nivel de resistencia requerido para la aplicación estructural.

6.3. Eficiencia del uso del cemento en las mezclas evaluadas

El análisis de la resistencia máxima permite identificar las combinaciones con mayor desempeño mecánico absoluto, sin embargo, en el diseño de rellenos estructurales la selección de una mezcla no depende exclusivamente de este criterio. El contenido de cemento, como componente de mayor costo, y la edad de curado, que condiciona la continuidad operacional, son variables igualmente relevantes al momento de evaluar la conveniencia de una dosificación.

La Figura 20 permite evaluar las mezclas desde un criterio de eficiencia, considerando simultáneamente resistencia, contenido de cemento y edad de curado. Los resultados muestran que la mayor resistencia se obtuvo con 7 % de contenido de cemento, $R = 2,2$ y 28 días, sin embargo, el mayor índice de conveniencia correspondió a 3 % de contenido de cemento, $R = 1,9$ y 28 días, con un valor de 79,5 %, dado que el índice penaliza fuertemente el mayor consumo de cementante. Al analizar por razón roca-relave, $R = 1,9$ presenta el mayor índice promedio para 3 % de contenido de cemento (69,8 %), mientras que para 7 % de contenido de cemento el mejor desempeño promedio se desplaza hacia $R = 2,2$ (49,8 %), lo que sugiere, dentro de las combinaciones evaluadas, que la razón con un mayor valor del índice depende del contenido de cemento disponible. Desde el punto de vista del diseño de mezclas CAF, si el objetivo es maximizar la resistencia, la combinación con mayor resistencia medida corresponde a 7 % de contenido de cemento, $R = 2,2$ y 28 días. En cambio, si se busca eficiencia en el uso de cemento, las mezclas con 3 % y razones cercanas a $R = 1,9$ resultan más convenientes. Finalmente, el índice debe interpretarse como una herramienta comparativa relativa, cuya utilidad radica en complementar el análisis mecánico considerando no solo resistencia sino también eficiencia cementante, aspecto clave en rellenos estructurales donde el cemento representa el componente de mayor costo.

6.4. Alcances y limitaciones del estudio experimental

El alcance de este estudio corresponde a la evaluación experimental de mezclas CAF confeccionadas con los materiales de relave, grava o roca y cemento, considerando razones de roca-relave entre 1,9 y 2,2, con contenidos de cemento de 3% y 7%, edad de curado de 7, 14 y 28 días, ajustando la cantidad de agua en cada serie para obtener una trabajabilidad similar durante la preparación y compactación de las probetas. Bajo estas condiciones, los resultados permiten comparar el efecto de la razón roca-relave, del contenido de cemento y de la edad de curado sobre la resistencia a compresión no confinada de las mezclas, constituyendo una contribución experimental dentro de un rango de proporciones que escasean en la literatura disponible para este tipo de relleno.

Sin embargo, la interpretación de los resultados debe realizarse considerando las condiciones particulares bajo las cuales fue desarrollada la campaña experimental. Por ello, los resultados tienen validez principalmente comparativa dentro del conjunto de mezclas evaluadas y no deben entenderse como una generalización definitiva para cualquier material, faena o condición operacional.

Con respecto a las limitaciones del estudio, una de las principales limitaciones fue la disponibilidad acotada del material para la experimentación. Tanto el relave como la grava disponible fueron limitados, lo que condicionó la cantidad de mezclas y probetas que pudieron confeccionarse. Además, el material grueso debió ser tamizado para retirar partículas incompatibles con el diámetro de las probetas, proceso que requirió un tiempo considerable de preparación y redujo aún más la cantidad de material utilizable.

Debido a esta restricción, no fue posible realizar réplicas para cada combinación experimental, lo que impidió cuantificar estadísticamente la dispersión asociada a la preparación de las probetas. Las mezclas CAF son sensibles a variaciones de compactación, homogeneidad y vacíos internos. Esta limitación adquiere especial relevancia en las mezclas con 3% de contenido de cemento que presentaron una disminución de resistencia entre los 7 y 14 días, lo que se considera una anomalía experimental, ya que no es posible determinar si dicha variación corresponde a una tendencia propia de la dosificación o a la dispersión asociada a la confección de probetas. Además, al no medirse la densidad seca ni el índice de vacíos, no fue posible verificar el empaquetamiento real alcanzado, mientras que la compactación manual por varillado pudo contribuir a la variabilidad observada.

También debe considerarse que el estudio se realizó con materiales específicos, una granulometría definida y una trabajabilidad equivalente entre series como criterio de preparación, obteniéndose relaciones agua-cemento efectivas de aproximadamente $a/c = 1,9$ para las mezclas con 3% de contenido de cemento y $a/c = 1,6$ para las mezclas con 7% de contenido de cemento. Estas decisiones permitieron mantener condiciones de trabajabilidad comparables entre series, sin embargo, las diferencias en las relaciones agua-cemento efectivas limitan la extrapolación directa de los resultados hacia otras condiciones de mezcla.

Finalmente, los ensayos se realizaron bajo condiciones controladas de laboratorio, por lo que la extrapolación a condiciones in situ requiere considerar factores adicionales como el confinamiento lateral, la escala de colocación y las condiciones ambientales de curado.

A partir de estas consideraciones, futuros estudios deberían incorporar un mayor número de réplicas por combinación, un control más detallado de la densidad seca alcanzada en cada probeta al desmolde, la evaluación de otras relaciones agua-cemento y ensayos bajo confinamiento; dado que en el presente estudio no se midió la densidad final de las probetas, no es posible verificar el empaquetamiento logrado experimentalmente. Asimismo, sería conveniente ampliar el rango de razones roca-relave y contenidos de cemento, con el fin de validar las tendencias observadas bajo condiciones más representativas de operación.

7. Conclusiones

La presente investigación permitió evaluar experimentalmente el comportamiento mecánico de mezclas de relleno de agregados cementados confeccionadas con relave, estéril y cemento, considerando como variables principales la razón roca-relave, el contenido de cemento y la edad de curado. A partir de los resultados obtenidos, se comprobó que las variables de estudio influyen en la resistencia a compresión no confinada del CAF. Asimismo, dentro de las combinaciones evaluadas, el efecto de la razón roca-relave varió según el contenido de cemento y la edad de curado, lo que sugiere una respuesta conjunta entre la proporción granular, la dosificación cementante y el tiempo de curado.

Los ensayos realizados confirmaron que el contenido de cemento es una variable determinante en el desempeño resistente del material. En todas las razones roca-relave evaluadas, las mezclas con 7 % de contenido de cemento alcanzaron resistencias superiores a las mezclas con 3 %, especialmente a edades de curado mayores. Asimismo, todas las combinaciones presentaron resistencias superiores a los 28 días respecto de los 7 días, comportamiento consistente con el avance de los procesos de hidratación y endurecimiento de la matriz cementada. No obstante, la evolución de la resistencia fue más regular en las mezclas con 7 % de contenido de cemento, mientras que las mezclas con 3 % presentaron un comportamiento irregular entre los 7 y 14 días, cuya interpretación debe realizarse con cautela debido a la ausencia de réplicas.

Respecto a la razón roca-relave, su efecto observado sobre la resistencia varió según el contenido de cemento. En las mezclas con 3 %, los mayores valores se concentraron en razones menores, mientras que para 7 % se desplazaron hacia razones mayores. Este patrón podría estar asociado a que una mayor proporción de relave favorezca el llenado de vacíos cuando la dosificación cementante es baja, mientras que una mayor disponibilidad de cemento permitiría una mejor vinculación del esqueleto granular grueso. Sin embargo, estos mecanismos no fueron verificados directamente, por lo que su validación queda propuesta como línea de investigación futura.

El índice de conveniencia evidenció que maximizar resistencia y maximizar eficiencia son objetivos distintos. La dosificación con mayor resistencia absoluta no coincide con la más conveniente al incorporar el costo cementante y el tiempo de curado como criterios. La mayor resistencia se obtuvo con 7 % de cemento, $R = 2,2$ y 28 días, mientras que el mayor índice de conveniencia correspondió a 3 % de cemento, $R = 1,9$ y 28 días, con un valor de 79,5 %, donde $R = 1,9$ presentó el mejor desempeño promedio para baja dosificación y $R = 2,2$ para alta dosificación. Esto tiene implicancias directas en el diseño de mezclas CAF para operaciones mineras, donde el cemento representa el componente de mayor costo y el tiempo de curado condiciona la continuidad operacional.

Bajo las condiciones experimentales desarrolladas, los resultados constituyen una base comparativa útil para comprender la interacción entre la razón roca-relave y el contenido de cemento en mezclas CAF orientadas a relleno estructural en minería subterránea. Sin embargo, las conclusiones se restringen a los materiales utilizados, al rango de razones roca-relave evaluado, a los contenidos de cemento seleccionados, a las relaciones agua-cemento efectivas utilizadas en cada serie y a la ausencia de réplicas para cada combinación experimental. Por ello, los resultados no deben generalizarse directamente a otras faenas o condiciones operacionales sin una validación experimental adicional. Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones incorporen contenidos intermedios de cemento, nuevas razones roca-relave, distintas relaciones agua-cemento y ensayos complementarios bajo confinamiento, junto con evaluaciones de deformabilidad y durabilidad, con el fin de avanzar hacia criterios de diseño más robustos para mezclas CAF aplicables a condiciones reales de operación minera.

8. Referencias

- Al-Bakri, A. Y., Ahmed, H. M., & Hefni, M. A. (2023). Eco-sustainable recycling of cement kiln dust (CKD) and copper tailings (CT) in the cemented paste backfill. *Sustainability*, 15. <https://doi.org/10.3390/su15043229>
- Benzaazoua, M., Fall, M., & Belem, T. (2004). A contribution to understanding the hardening process of cemented pastefill. *Minerals Engineering*, 17(2), 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.022>
- Bloss, M. (1996). Engineering design of cemented aggregate fill for underground mine support. *Mining Engineering*, 48(2), 49-53.
- Ercikdi, B., Yilmaz, T., & Külekci, G. (2014). Strength and ultrasonic properties of cemented paste backfill. *Ultrasonics*, 54, 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.04.013>
- Fall, M., Tikou, B., Samb, S., & Benzaazoua, M. (2007). Experimental characterization of the stress-strain behaviour of cemented paste backfill in compression. *Journal of Materials Science*, 42, 3914-3922. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0403-2>
- Hou, C., Yang, L., Li, L., & Yan, B. (2022). Mechanical characteristics and stress evolution of cemented paste backfill: Effect of curing time, solid content, and binder content. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.812402>
- Hu, Y., Li, K., Zhang, B., & Han, B. (2023). Development of Cemented Paste Backfill with Superfine Tailings: Fluidity, Mechanical Properties, and Microstructure Characteristics. *Materials*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/ma16051951>
- Huang, S., Xia, K., & Qiao, L. (2011). Dynamic tests of cemented paste backfill: Effects of strain rate, curing time, and cement content on compressive strength. *Journal of Materials Science*, 46, 5165-5170. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5449-0>
- Instituto Nacional de Normalización. (1968). NCh148.Of68: Cementos — Terminología, clasificación y especificaciones generales [INN, Chile].
- Jafari, M., Shahsavari, M., & Grabinsky, M. (2021). Drained triaxial compressive shear response of cemented paste backfill (CPB). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 3309-3325. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02464-5>
- Jiang, H., Fall, M., Li, Y., & Han, J. (2019). An experimental study on compressive behaviour of cemented rockfill. *Construction and Building Materials*, 213, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.061>
- Kesimal, A., Yilmaz, E., & Ercikdi, B. (2004). Evaluation of paste backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings and varying cement contents. *Cement and Concrete Research*, 34, 1817-1822. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.018>
- Li, J., Yilmaz, E., & Cao, S. (2020). Influence of solid content, cement/tailings ratio, and curing time on rheology and strength of cemented tailings backfill. *Minerals*, 10, 1-14. <https://doi.org/10.3390/min10100922>
- Li, L. (2014). Generalized solution for mining backfill design. *International Journal of Geomechanics*, 14(3), 04014006.
- Minería Chilena. (2023). *Minería subterránea: En la búsqueda de mayor producción* [Consultado 2025-09-16]. <https://www.mch.cl/>
- Ministerio de Obras Públicas – Dirección de Vialidad. (2018). *Manual de Carreteras — Volumen 8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensayo y Control* [Vigente (consulta 2025)]. Ministerio de Obras Públicas (MOP), Chile.

-
- Okubo, S., & Yamatomi, J. (2009). Underground Mining Methods and Equipment. En *Civil Engineering* (Vol. 2). Encyclopedia of Life Support Systems. <https://www.eolss.net/sample-chapters/c05/E6-37-06-02.pdf>
- Pan, A., & Grabinsky, M. (2023). Mechanical characterization of cemented paste backfill. *Eng*, 4, 738-747. <https://doi.org/10.3390/eng4010044>
- Sainsbury, D. P., & Sainsbury, B. L. (2014). Design and implementation of cemented rockfill at the Ballarat Gold Project. En Y. Potvin & T. Grice (Eds.), *Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill* (pp. 205-216). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1404_15_Sainsbury
- Sivakugan, N., Veenstra, R., & Niroshan, N. (2015). Underground Mine Backfilling in Australia Using Paste Fills and Hydraulic Fills. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1. <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0020-8>
- Suazo, G., Fourie, A., & Hasan, A. (2015). Estudio experimental de la respuesta geomecánica de relaves en pasta cementados utilizados para el relleno de caserones. *Obras y Proyectos*, 17, 6-12.
- Villaescusa, E. (2001). *Factors influencing the strength of cemented aggregate fill* [Western Australian School of Mines, Curtin University].
- Villaescusa, E. (2014). *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. Springer.
- Vives Ávila, A. R. (2015). *Evaluación técnica y económica de una mina subterránea utilizando relleno cementado* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas]. Universidad de Chile.
- Wang, C., & Villaescusa, E. (2001). Factors Influencing the Strength of Cemented Aggregate Fill [Diseño de CAF]. *Proceedings on Mine Backfill*.
- Xiu, Z., Wang, S., Ji, Y., Wang, F., Ren, F., & Nguyen, V. T. (2021). Loading rate effect on the uniaxial compressive strength (UCS) behavior of cemented paste backfill (CPB). *Construction and Building Materials*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121526>
- Yilmaz, E., Belem, T., & Benzaazoua, M. (2015). Strength and microstructural characterization of cemented mine backfills: A review and new insights. *Engineering Geology*, 185, 52-62.
- Yilmaz, E., Tikou, B., Benzaazoua, M., Kesimal, A., & Ercikdi, B. (2013). Evaluation of the strength properties of deslimed tailings paste backfill. *Mineral Resources Engineering*, 12, 129-144.
- Yilmaz, T., Ercikdi, B., Karaman, K., & Külekçi, G. (2014). Assessment of strength properties of cemented paste backfill by ultrasonic pulse velocity test. *Ultrasonics*, 54(5), 1386-1394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.02.012>