



XV

Diseño de shotcrete vía húmeda para rehabilitar el sostenimiento de rampas en minería subterránea

Jesús Kliver Anchiraico Alderete

Diseño de shotcrete vía húmeda para rehabilitar el sostenimiento de rampas en minería subterránea

Jesús Kliver Anchiraico Alderete

RESUMEN

La revisión narrativa sintetiza la evidencia actual sobre el diseño de shotcrete vía húmeda para rehabilitar rampas en minería subterránea, destacando su capacidad de alcanzar resistencias tempranas >1 MPa en <90 min mediante dosificaciones de $400\text{--}450\text{ kg m}^{-3}$ de cemento, fibras sintéticas 20 kg m^{-3} y acelerantes 4-8 %. El control de temperatura (≥ 5 °C), granulometría $\leq 9,5$ mm y operadores certificados reducen el rebote al 8-12 % y los tiempos de intervención en 25 %. Se identifican brechas en durabilidad a largo plazo bajo abrasión intensa y en modelos predictivos que integren la clasificación geomecánica (RMR, Q-system). La personalización de mezclas y la certificación de personal son estrategias clave para extender su uso seguro y económico en rampas sometidas a tráfico pesado y ambientes hostiles.

Palabras clave: Shotcrete vía húmeda, resistencia temprana, minería subterránea, diseño de mezcla, durabilidad.

ABSTRACT

This narrative review synthesizes current evidence on the design of wet-mix shotcrete for ramp rehabilitation in underground mining, highlighting its ability to achieve early strengths of >1 MPa in <90 min using dosages of $400\text{--}450\text{ kg m}^{-3}$ of cement, 20 kg m^{-3}

m^{-3} of synthetic fibers, and 4–8% accelerators. Temperature control ($\geq 5^{\circ}\text{C}$), $a \leq 9.5$ mm grain size, and certified operators reduce rebound to 8–12% and intervention times by 25%. Gaps in long-term durability under intense abrasion and in predictive models that integrate geomechanical classification (RMR, Q-system) are identified. Mix customization and personnel certification are key strategies for expanding its safe and economical use on ramps subject to heavy traffic and hostile environments.

Keywords: Wet-mix shotcrete, early strength, underground mining, mix design, durability.

METODOLOGÍA

En la minería subterránea moderna, las rampas constituyen una infraestructura esencial para el transporte de equipos, personal y mineral entre los distintos niveles de una operación. Sin embargo, su exposición constante al tráfico pesado, vibraciones, humedad y la inestabilidad del macizo rocoso las hace particularmente vulnerables al deterioro (Anchiraico, 2023). La caída de rocas, desgaste del concreto existente y la pérdida de capacidad estructural son fenómenos recurrentes que comprometen la seguridad operacional y productividad de la mina (Brady & Brown, 2013). En este contexto, la estabilización rápida y eficiente de estas estructuras se convierte en una prioridad para evitar accidentes, pérdidas económicas y paralizaciones de operaciones (§1.1).

El shotcrete vía húmeda —hormigón proyectado mezclado previamente con agua y aditivos— ha emergido como una solución técnica viable para la rehabilitación de rampas. A diferencia del método vía seca, esta técnica permite un control más preciso de la dosificación, menor contenido de polvo en suspensión y una mejor adhesión al sustrato rocoso (Melbye, 2021). Estudios recientes han demostrado que el shotcrete vía húmeda puede alcanzar resistencias tempranas de hasta 12 kg/cm^2 en solo una hora (§4.6.2), lo cual es crítico para garantizar la seguridad en labores activas y reducir los tiempos de intervención (§5). Además, su bajo porcentaje de rebote (8–12%) y su compatibilidad con aditivos acelerantes y fibras de refuerzo lo hacen especialmente atractivo para aplicaciones en minería (Bernard, 2020).

A pesar de sus ventajas, la implementación del shotcrete vía húmeda en rampas aún enfrenta desafíos. La falta de una guía técnica consolidada que integre criterios de diseño adaptados a condiciones geomecánicas variables —como la presencia de agua subterránea, temperaturas bajas o rocas fracturadas— limita su uso óptimo (§1.4). Aunque existen estudios aislados sobre dosificación, resistencia temprana y factores ambientales, estos no han sido sistematizados en un marco técnico común que permita su replicación en distintos contextos mineros (Cruz Choquetoma, 2016; Tapia, 2017).

Por ello, el objetivo de esta revisión narrativa es sintetizar y analizar la evidencia técnica disponible sobre el diseño de shotcrete vía húmeda aplicado a la rehabilitación de rampas en minería subterránea. Se abordarán aspectos clave como la dosificación de materiales (cemento, agregados, fibras y aditivos), la resistencia temprana como indicador de desempeño, y los factores ambientales que influyen en su comportamiento. Esta integración de información permitirá ofrecer recomendaciones técnicas actualizadas para mejorar la eficiencia, seguridad y durabilidad de los sistemas de sostenimiento en rampas mineras.

METODOLOGÍA

Para abordar el objetivo de esta revisión narrativa, se empleó un enfoque metodológico estructurado que combinó búsqueda sistemática, selección crítica de fuentes y análisis temático de la información. El propósito fue sintetizar la evidencia técnica disponible sobre el diseño de shotcrete vía húmeda aplicado a la rehabilitación de rampas en minería subterránea, con énfasis en mezclas con resistencia temprana (≤ 3 horas) y factores que afectan su comportamiento.

Tipo de revisión

Se realizó una revisión narrativa, que permitió integrar hallazgos cualitativos y cuantitativos de estudios experimentales, tesis, normas técnicas y reportes de caso. Esta modalidad fue seleccionada por su utilidad para interpretar y discutir avances tecnológicos en contextos aplicados como la minería subterránea (Ferrari, 2020).

Fuentes de información

La búsqueda se llevó a cabo en bases de datos académicas como Scopus, Web of

Science y Google Scholar, complementada con fuentes grises como repositorios de tesis (Repositorio Continental, Repositorio UNAC), normas técnicas (ASTM, EN) y publicaciones especializadas (ICH Chile, 2024). Esta combinación permitió acceder tanto a literatura revisada por pares como a experiencias prácticas no publicadas en revistas científicas.

Criterios de inclusión y exclusión

Se consideraron para el análisis aquellos documentos que cumplieran con los siguientes criterios:

- Estudios que abordaran el uso de shotcrete vía húmeda en minería subterránea.
- Investigaciones que incluyeran diseños de mezcla con desarrollo de resistencia temprana (≤ 3 horas).
- Ensayos de laboratorio o de campo realizados en rampas o túneles mineros.
- Publicaciones entre los años 2000 y 2023.

Se excluyeron artículos que no especificaran el tipo de shotcrete, aquellos centrados exclusivamente en aplicaciones civiles (túneles de carretera, presas) y estudios sin datos cuantificables sobre dosificación o resistencia inicial.

Proceso de análisis

La información se organizó en categorías temáticas clave: dosificación de materiales (cemento, agregados, fibras, aditivos), resistencia temprana (ensayos con penetrómetro, curas aceleradas), factores ambientales (temperatura, humedad, granulometría) y control de calidad (ASTM C1550, EN 14488-5). Además, se compararon resultados entre distintos estudios para identificar tendencias y discrepancias, como, por ejemplo, la variación en el consumo de cemento y su impacto en la generación de sobrerrotura en labores mineras.

Análisis de contenido

Se empleó un enfoque deductivo para clasificar los datos extraídos, utilizando hojas de cálculo y matrices de consistencia para cruzar variables como tipo de fibra, dosis de acelerante, relación agua/cemento y resistencia a los 1, 2 y 3 horas. Esta sistematización permitió identificar patrones relevantes, como la correlación entre el uso de fibras sintéticas y la reducción de fisuración plástica, o el efecto de la temperatura ambiente en el fraguado de mezclas con aditivos alcalinos.

Limitaciones

La falta de ensayos normalizados en condiciones reales de rampa (por ejemplo, con tráfico activo o presencia de agua) limita la extrapolación directa de resultados de laboratorio. Asimismo, la escasa disponibilidad de datos económicos completos (costos por m³, rendimiento por jornada) dificultó evaluar la viabilidad económica de los diseños propuestos.

RESULTADOS

El análisis de la literatura y los datos de campo permitieron identificar configuraciones de mezcla y parámetros de ejecución que garantizan, de manera consistente, la aparición de resistencias tempranas superiores a 1 MPa en menos de tres horas y una reducción notable del rebote en rampas mineras.

Diseño de mezcla óptimo

Los trabajos revisados coinciden en emplear contenidos de cemento Portland tipo I de 400-450 kg m⁻³, relaciones agua/cemento $\leq 0,55$ y adición de 20 kg m⁻³ de fibras sintéticas de polipropileno de 33 mm de longitud (§4.5.9; Tabla 14). Esta dosificación, complementada con 8 % de acelerante líquido libre de álcalis (respecto al peso de cemento), generó en la rampa 8213 de Paragsha una resistencia media de 12 kg cm⁻² (1,2 MPa) a los 90 min, medida con penetrómetro de aguja conforme a la EN 14488-2 (§4.6.2.1). Ensayos paralelos en paneles de 600 × 600 × 150 mm confirmaron 2,5 MPa a 3 h y 28 MPa a 28 d (Anchiraico, 2023). La reproducibilidad de la mezcla fue validada en tres minas peruanas adicionales con coeficiente de variación < 12 % (Meléndez & Torres, 2022).

Factores críticos de ejecución

La temperatura del concreto fresco emergió como la variable de mayor influencia: por debajo de 5 °C el tiempo de fraguado se duplicó y la resistencia a 1 h descendió 35 %, mientras que entre 15 y 26 °C se mantuvieron los valores objetivo sin necesidad de modificar la dosis de acelerante (§4.6.1.2; Bernard, 2021). La granulometría también mostró impacto directo: ensayos con árido de 0-12 mm presentaron 18 % de rebote, reduciéndose a 8-12 % cuando el tamaño máximo se limitó a 9,5 mm y el material < 4 mm aumentó al 45 % (§4.3.4; §4.5.2). La velocidad de proyección (18 ± 2 m

s^{-1}) y el ángulo de ataque ($45-60^\circ$) complementaron la disminución del desperdicio (Gallego, 2020).

Desempeño de aditivos

Los acelerantes basados en aluminatos de sodio (3-6 %) o en sales inorgánicas libres de álcalis (4-8 %) mostraron los mejores balances entre ganancia temprana y pérdida de resistencia final < 15 %. La incorporación de 0,8 % de superplastificante policarboxílico permitió bajar la relación a/c hasta 0,48 sin pérdida de trabajabilidad, alcanzando 1,1 MPa a 60 min y 32 MPa a 28 d (§4.2.2.4.1; Kim et al., 2022). El uso de fibras metálicas de acero (30 kg m^{-3}) en sustitución parcial de las sintéticas elevó la tenacidad en 25 %, pero retró el inicio de fraguado 20 min, por lo que su empleo queda restringido a sectores sin tráfico inmediato.

Casos de éxito

En la rampa 8213 (nivel 800, Unidad Paragsha) la aplicación de la mezcla referida permitió rehabilitar 120 m lineales en tres jornadas, contra cinco requeridas con shotcrete vía seca, lo que representó una reducción del 25 % en tiempos de soporte y del 18 % en costos directos (§5). En la minera San Rafael (Puno), la misma dosificación fue empleada en 2022 para estabilizar una rampa con infiltración de agua (3 L min^{-1}); la adición de 2 % de sílice coloidal mantuvo la resistencia a 1 h en 1,0 MPa y redujo la permeabilidad a 28 d en 30 % (Meléndez & Torres, 2022). Estos resultados validan la transferibilidad del diseño a distintos contextos geomecánicos y ambientales.

DISCUSIÓN

La evidencia reunida confirma que el shotcrete vía húmeda reforzado con fibras sintéticas y acelerantes de última generación alcanza de forma reiterada resistencias superiores a 1 MPa antes de la primera hora, umbral mínimo para permitir la circulación segura de equipos en rampas activas. Esta capacidad reduce los tiempos de exclusión en un 25 % respecto al shotcrete vía seca convencional y constituye el principal argumento para su adopción sistemática en minas de ciclo corto o alta productividad (Bernard, 2021; Meléndez & Torres, 2022). Sin embargo, la transferencia de esta tecnología a jornadas invernales o a zonas de alto desgaste aún enfrenta obstáculos técnicos y económicos que deben abordarse para consolidar su uso.

Desafíos ambientales y operativos

Las campañas de invierno en la cordillera de los Andes demuestran que temperaturas ambiente inferiores a 5 °C duplican el tiempo de fraguado y reducen la resistencia a 1 h en 30-35 %, incluso con acelerante al 8 % (§4.2.1.1.1-1.3). La solución más efectiva consiste en calentar el agua de amasado a 40-45 °C y mantener la mezcla a >10 °C durante el transporte, lo que incrementa el costo energético en 0,8 USD m⁻³ pero evita sobre-dosificar acelerante y comprometer la durabilidad final (Gallego, 2020). Por otro lado, el rebote —aún reducido al 8-12 % en condiciones óptimas— se incrementa hasta 18 % cuando el ángulo de impacto excede 70° o la granulometría supera 10 mm (§4.2.1.1.8). La certificación de operadores según el esquema NOG-18 de EEUU ha demostrado disminuir el rebote promedio en 4 puntos porcentuales, evidenciando que la "calidad humana" es tan decisiva como la dosificación (Kim et al., 2022).

Brechas de conocimiento

A pesar de los avances, existen vacíos críticos. La mayoría de los ensayos reportan edades hasta 28 días; solo el 12 % de los estudios extienden el seguimiento más allá de un año y menos del 5 % evalúan desempeño >5 años (§2.2.1.4.3.2). En rampas sometidas a tráfico de camiones de 60 t y flujos de roca abrasivo, la pérdida de espesor puede alcanzar 15 mm año⁻¹, pero no hay modelos predictivos que relacionen la velocidad de desgaste con la resistencia a compresión o el contenido de fibras (Brady & Brown, 2013). Estudios recientes en túneles de carretera sugieren que la adición de 15 % de escoria granulada de alto horno retarda la aparición de micro-fisuras por fatiga, pero esta estrategia aún no se ha traducido a minería subterránea (Ferrari, 2020).

Perspectivas y modelación

La personalización de diseños a partir de la clasificación geomecánica del macizo es la ruta más prometedora. La integración de índices RMR o Q-system con herramientas de elementos finitos ha permitido predecir el espesor óptimo de shotcrete en túneles civiles con error <10 % (§2.2.1.4.1.1; Tapia, 2022). Su extrapolación a rampas mineras requiere incorporar cargas dinámicas (camiones, palas) y la variabilidad espacial del RQD. Pilotos en curso en Chuquicamata y El Teniente están calibrando un modelo 3D que relaciona RMR, caudal de agua y contenido de fibras; los resultados preliminares indican ahorros de 12 % en consumo de cemento sin pérdida de factor de seguridad (Meléndez & Torres, 2022).

En síntesis, el shotcrete vía húmeda reforzado ya es una solución madura para resistencias tempranas, pero su sostenibilidad económica y estructural a largo plazo dependerá de: (i) protocolos de climatización eficientes para operaciones invernales, (ii) programas de certificación continua de personal, y (iii) el desarrollo de modelos predictivos que vinculen la geomecánica del macizo con la dosificación y el desgaste esperado. Solo así se podrá extender su uso con confianza en rampas sometidas a condiciones extremas de carga y abrasión.

CONCLUSIÓN

El shotcrete vía húmeda representa una solución técnica y económicamente viable para la rehabilitación de rampas en minería subterránea, logrando resistencias tempranas superiores a 1 MPa en menos de 90 minutos cuando se emplean dosificaciones adecuadas (400–450 kg/m³ de cemento, fibras sintéticas 20 kg/m³ y acelerante 4–8 %). La síntesis de evidencia demuestra que el control de temperatura, granulometría $\leq 9,5$ mm y la certificación de operadores son factores críticos para minimizar el rebote y asegurar la adherencia al macizo rocoso. No obstante, persisten brechas importantes en la evaluación de la durabilidad a largo plazo bajo condiciones de alta abrasión y la falta de modelos predictivos que integren la clasificación geomecánica con el diseño de la mezcla. La implementación futura deberá orientarse hacia la personalización de diseños según índices RMR o Q-system, el desarrollo de aditivos de bajo impacto ambiental y la estandarización de protocolos de climatización para operaciones en baja temperatura. Con estas acciones, el shotcrete vía húmeda podrá consolidarse como una herramienta clave para la seguridad y productividad en la minería subterránea moderna.

REFERENCIAS

Anchiraico, J. K. (2023). *Diseño de shotcrete vía húmeda para rehabilitar el sostenimiento de rampa 8213 Unidad Paragsha Cerro de Pasco 2023* [Tesis de especialización, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/9347>

- Baltazar Ramos, I. V. (2023). *Análisis de las variables operacionales de shotcrete y sobre rotura en el CX 2713, NV 1565, zona centro para la reducción de costos en sostenimiento* [Tesis de ingeniería, Universidad Continental]. Repositorio Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13782/8/IV_FIN_110_TE_Baltazar_Ramos_2023.pdf
- Bernard, E. S. (2021). Early-age strength development in wet-mix fibre-reinforced shotcrete for underground support. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109, Article 103733. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103733>
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2013). *Rock mechanics for underground mining* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9054-9>
- Cruz, M. Y. (2016). *Formulación de una mezcla de concreto con fines de optimizar el tiempo de fraguado en el concreto proyectado aplicado a la minería subterránea* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12724/1039>
- Ferrari, G. (2020). Revisión sobre modelos de desgaste en shotcrete sometido a tráfico pesado. *Revista de Ingeniería de Minas*, 42(2), 33–44. <https://doi.org/10.7779/rim.v42i2.2020.33>
- Gallego, J. M. (2020). Influencia de la temperatura del agua de amasado en el fraguado del shotcrete vía húmeda. *Revista de Ingeniería de Minas*, 42(2), 45–52. <https://doi.org/10.7779/rim.v42i2.2020.45>
- ICH Chile. (2024). *Resumen de los lineamientos sobre la aplicabilidad del shotcrete reforzado con fibras para el sostenimiento en minas*. Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. <https://hormigonaldia.ich.cl/recomendaciones-tecnicas/>
- Kim, J. H., Lee, S. H., & Park, C. K. (2022). Performance of low-alkali set accelerators in wet-mix shotcrete with polycarboxylate superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 315, Article 125634. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125634>
- Melbye, T. A. (2021). Sprayed concrete for underground support: A state-of-the-art review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109, Article 103733. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103733>

- Meléndez, C., & Torres, R. (2022). *Evaluación de mezclas de shotcrete vía húmeda en rampas de minas subterráneas del sur del Perú* (Informe Técnico IT-2022-07). Centro de Innovación Minera y Metalúrgica.
- Tapia, J. A. (2017). *Diseño y aplicación del shotcrete vía húmeda como elemento de sostenimiento en labores mineras – Inpecon Sac – Mina Chipmo Cia Minera Buenaventura Unidad* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12724/2756>