

Innovation in underground mining in reducing rockfall accidents through technological and sustainable solutions

Nicolle Elizabeth Agreda-Angulo,¹, Carlitos David Aquino-Robles,¹, Walter Klysman Laiza-Vera, Ing.¹, Manuel Alejandro Minaya-Masias, Msc. ¹, N00317523@upn.pe, N00322793@upn.pe, [walter.laiza@upn.pe](mailto>walter.laiza@upn.pe), manuel.minaya@upn.edu.pe.

¹Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú

Abstract- *Underground mining is one of the most complex and hazardous working environments due to the natural instability of the terrain and variable geological conditions. In this context, rockfalls remain a leading cause of fatal accidents. Despite advancements, 50% of mining-related deaths in 2024 were due to rockfalls, according to Fernando Borja, Director of the Mining Safety Institute (ISEM), underscoring the urgent need to improve support systems in underground operations. This study aims to identify the most appropriate support type based on the characteristics of the rock mass, including strength, degree of fracturing, and geomechanical conditions, using classification tools such as GSI, RMR, and the Q-System. Beyond traditional support analysis, the integration of technological and sustainable innovations is proposed. These include instrumented bolts with FBG sensors for real-time monitoring of deformations, and eco-friendly shotcrete incorporating recycled additives to reduce environmental impact. Together, these solutions seek to enhance the safety and efficiency of underground operations, offering a technical approach that ensures structural stability while prioritizing worker protection. The proposal reinforces a commitment to safe, modern, and socially responsible mining engineering practices that align with current demands for sustainability and risk reduction in the mining sector.*

Keywords- Rockfall, mine safety, geomechanical classification, GSI, RMR, Q system, instrumented bolt, FBG sensors, thermal drones, green shotcrete, technological innovation, occupational accidents, geotechnical hazards.

Innovación en minería subterránea en la reducción de accidentes por caída de rocas mediante soluciones tecnológicas y sostenibles

Nicolle Elizabeth Agreda-Angulo,¹ , Carlos David Aquino-Robles,¹ , Walter Klysman Laiza-Vera, Ing.¹ , Manuel Alejandro Minaya-Masias, Msc. ¹ , N00317523@upn.pe, N00322793@upn.pe, walter.laiza@upn.pe, manuel.minaya@upn.edu.pe.

¹Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Privada del Norte, Perú

Resumen - La minería subterránea es uno de los entornos laborales más complejos y peligrosos debido a la inestabilidad natural del terreno y a las condiciones geológicas variables. En este contexto, los desprendimientos de rocas siguen siendo una de las principales causas de accidentes mortales. A pesar de los avances, el 50% de las muertes relacionadas con la minería en 2024 fueron provocadas por este tipo de incidentes, según Fernando Borja, director del Instituto de Seguridad Minera (ISEM), lo que subraya la necesidad urgente de mejorar los sistemas de sostenimiento en operaciones subterráneas. Este estudio tiene como objetivo identificar el tipo de soporte más adecuado según las características del macizo rocoso, considerando su resistencia, grado de fracturamiento y condiciones geomecánicas, mediante herramientas de clasificación como el GSI, RMR y el sistema Q. Más allá del análisis tradicional, se propone la integración de innovaciones tecnológicas y sostenibles, como pernos instrumentados con sensores FBG para el monitoreo en tiempo real de deformaciones, y shotcrete ecológico con aditivos reciclados que reducen el impacto ambiental. Estas soluciones buscan mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones subterráneas, asegurando la estabilidad estructural y priorizando la protección del trabajador, bajo un enfoque de ingeniería minera moderna, segura y socialmente responsable.

Palabras claves: Caída de rocas, seguridad minera, clasificación geomecánica, índice de resistencia geológica (GSI), clasificación del macizo rocoso (RMR), sistema Q, perno instrumentado, sensores FBG (rejilla de Bragg de fibra óptica), drones térmicos, concreto proyectado ecológico, innovación tecnológica, accidentes laborales, riesgos geotécnicos.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la minería subterránea peruana, los accidentes por desprendimiento de rocas continúan siendo una de las principales causas de muerte, a pesar de los esfuerzos por mejorar las condiciones de seguridad en el sector. Un lamentable ejemplo ocurrió el 8 de abril de 2024, en la unidad minera La Poderosa, ubicada en Pataz (La Libertad), donde dos trabajadores perdieron la vida tras un

desprendimiento de rocas en el interior de una labor minera, según informó RPP Noticias. Este tipo de incidentes se repite en diversas operaciones subterráneas, como lo indica Rumbo Minero, donde se resalta que gran parte de los accidentes fatales están directamente vinculados al colapso de techos o frentes de trabajo inestables.

El gerente general del Instituto de Seguridad Minera (ISEM), Fernando Borja, destacó que, si bien en 2024 se reportaron solo 17 fallecidos en minería, lo que representa la cifra más baja desde 1970, todavía el 50% de esas muertes fueron causadas por desprendimientos de rocas. Este dato refleja una mejora en términos históricos con promedios anuales que en décadas anteriores como en los años 80 llegaban hasta 108 muertes, pero también evidencia que las labores subterráneas aún presentan riesgos críticos que requieren atención inmediata [8].

Borja también precisó que el índice de frecuencia de accidentes en 2024 fue de 2.43, ligeramente superior al del año anterior, debido al aumento de accidentes incapacitantes, los cuales sumaron más de 1,300 casos, incluyendo 200 con lesiones graves. Además, resaltó la notable reducción en fallecidos por accidentes viales vinculados al sector minero, bajando de 44 en 2021 a solo 1 en 2024. Sin embargo, los atrapamientos, golpes por maquinaria en movimiento y la inestabilidad estructural siguen siendo causas frecuentes de accidentes graves, lo que subraya la importancia de reforzar los sistemas de sostenimiento, monitoreo y control de riesgos.

Frente a esta problemática, nuestro objetivo fue diseñar y proponer un sistema de sostenimiento que combine técnicas convencionales con soluciones tecnológicas e innovadoras, orientadas a reducir riesgos y prevenir colapsos en zonas críticas. Por ello, hemos incorporado tecnologías como el perno instrumentado con sensores FBG (Fiber Bragg Grating), que permite monitorear en tiempo real las deformaciones del macizo rocoso, anticipando posibles fallas estructurales. Asimismo, proponemos el uso de drones equipados con cámaras térmicas para la identificación preventiva de zonas inestables, mediante el análisis de variaciones térmicas en las rocas. En cuanto al aspecto ambiental, se ha diseñado un shotcrete ecológico con fibras plásticas recicladas y aditivos de

bajo impacto, reduciendo el consumo de cemento tradicional y, por tanto, la huella de carbono en la operación minera.

Con estas propuestas, buscamos no solo mitigar el riesgo de desprendimientos fatales, sino también contribuir a una minería más inteligente, sostenible y segura para todos los trabajadores del sector.

Como algunas de las propuestas innovadoras ya aplicadas tenemos las siguientes, han et al. (2024), en su investigación titulada “Monitoreo del estado de seguridad de los pernos de roca operacionales en caminos mineros bajo efectos inducidos por la minería”, tuvo como objetivo desarrollar y validar un sistema de monitoreo en tiempo real para evaluar la fuerza axial en pernos de roca utilizados en carreteras subterráneas afectadas por minería de alta intensidad, empleando sensores de rejilla de Bragg de fibra óptica (FBG). Para ello, se utilizaron sensores FBG incrustados y encapsulados en pernos de anclaje, realizándose pruebas de tracción bajo condiciones controladas y ensayos de campo en pernos instalados en la calzada consolidada de la mina de carbón Bultai, zona minera de Shendong, China [23]. Entre los resultados más relevantes, se identificó que la fuerza axial en los pernos incrementa progresivamente con el avance del frente de trabajo, con variaciones más marcadas en el lado izquierdo; especialmente, al desplazarse 60 metros, se evidenció un aumento brusco. Se concluye que el sistema FBG permite un monitoreo confiable en tiempo real, aportando datos clave para evaluar la estabilidad estructural y recomendándose su uso en zonas de alta presión minera.

Por otro lado, La-Fuente, Huacho & Pehovaz-Alvarez, (2021) en su trabajo investigativo titulado “Método de Elaboración de Concreto Proyectado Utilizando Cemento Geopolímero Producto de la Activación Alcalina de Relaves para el Soporte de Trabajos Subterráneos en Minas Polimetálicas del Perú” [9]. Tiene como objetivo obtener cemento geopolimérico mediante la activación alcalina de relaves mineros con el fin de fabricar shotcrete con propiedades mejoradas de durabilidad, resistencia a la compresión, fraguado y fluidez. Para ello, se utilizaron como técnica los activadores alcalinos hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones de 12 y 15M, junto con silicato de sodio (Na_2SiO_3), aplicando ensayos estandarizados en muestras cilíndricas para determinar la resistencia a la compresión. La muestra consistió en shotcrete elaborado a partir de relaves activados alcalinamente. Los resultados de interés indican que se logró una resistencia de hasta 18 MPa a los 28 días y una reducción de hasta el 73 % en emisiones de CO_2 respecto al cemento Portland, proponiéndose como una alternativa ecoeficiente y sostenible para el sostenimiento en minería subterránea. Se concluye que el uso de relaves mineros para fabricar cemento geopolimérico es viable tanto técnica como ambientalmente. Se recomienda realizar pruebas a mayor escala en condiciones reales de mina y optimizar la dosificación para mejorar el desempeño mecánico.

El objetivo de esta investigación es encontrar

innovaciones en sostenimiento minero subterráneo para reducir accidentes por desprendimiento de rocas mediante soluciones tecnológicas y sostenibles integradas para las labores de la unidad minera Poderosa ubicada en Pataz, para ello tendremos en cuenta el tipo de macizo rocoso en el cual se está trabajando, evaluando su GSI, RMR y la clasificación Q-System., se propondrán métodos innovadores que aporten mejoras a las operaciones mineras de sostenimiento, por último se evaluará si es que estas reducen eficazmente los accidentes.

II. METODOLOGÍA

A) Tipo de Investigación

El enfoque de esta investigación es cuantitativo y cualitativo: el primero emplea datos numéricos reales de sostenimiento en minería subterránea para evaluar tecnologías modernas frente a métodos convencionales en la Unidad Minera La Poderosa; el segundo busca comprender los factores que influyen en la seguridad, especialmente en relación con los métodos de sostenimiento. El objetivo es verificar si tecnologías como los pernos FBG y el shotcrete ecológico mejoran la seguridad y son más eficientes que los métodos tradicionales. Se utilizarán el GSI, la clasificación Q-System, RMR y el índice de reducción de riesgo (RRR), lo que permitirá evaluar la eficiencia del sostenimiento y mejorar el control en la prevención de accidentes de manera más ecoamigable.

B) Diseño de investigación

El diseño de esta investigación busca evaluar, con datos reales de campo, cómo funcionan las tecnologías modernas de sostenimiento frente a métodos tradicionales aplicados en la Unidad Minera La Poderosa, con el objetivo de reducir accidentes por desprendimientos de roca y mejorar la seguridad. El estudio se estructura en cinco etapas: (1) definir cada método de sostenimiento, su aplicación y sustento teórico; (2) analizar GSI, RMR y Q-System para proponer métodos adecuados según las condiciones del macizo rocoso; (3) comparar métodos tradicionales e innovadores como pernos FBG y shotcrete geopolimérico, detallando sus características técnicas, zonas recomendadas, sistemas de seguridad y viabilidad económica; (4) calcular la reducción de accidentes aplicando la fórmula RRR; y (5) realizar una evaluación integral de cada método, priorizando no solo el desempeño técnico y económico, sino su impacto en la reducción de accidentes.

C) Población

La población objeto de estudio está conformada por las labores subterráneas activas en la Unidad Minera La Poderosa (Pataz, La Libertad) y el personal que participa directa o indirectamente en tareas de sostenimiento. Esto incluye operadores de maquinaria, instaladores de pernos, lanzadores de shotcrete, geomecánicos, ingenieros de seguridad, supervisores y técnicos vinculados a la estabilidad del macizo rocoso, todos expuestos al riesgo de desprendimientos de roca. Por ello, es fundamental implementar medidas que reduzcan estos riesgos y accidentes, así como garantizar que el personal esté capacitado y cuente con los Equipos de Protección Personal (EPP) adecuados.

D) *Muestra*

La muestra contiene 3 frentes de avance en la unidad minera Poderosa, en diferentes ubicaciones y profundidades, con variaciones estructurales y condiciones geomecánicas (competente, fracturado, débil), historial de incidentes y condiciones adecuadas para aplicar métodos de sostenimiento innovadores, como pernos FBG y shotcrete ecológico. Se busca analizar si estos métodos son óptimos para dichas labores o en qué zonas es recomendable aplicarlos. Esta muestra permite comparar métodos tradicionales e innovadores en un entorno real mediante cálculos, obteniendo indicadores como GSI, RMR y Q-System, y luego aplicar la Reducción Relativa de Riesgo (RRR) para determinar cuál sistema es óptimo.

E) Dimensiones de la muestra

La muestra ostenta 3 labores de la unidad minera poderosa , en los cuales se evaluarán 4 tipos de pernos, pernos helicoidales, Split set, Swellex y pernos inteligentes FBG con el cual se analizará su resistencia, características, materiales, vida útil, costo y otros aspectos más, también se analizara el shotcrete tradicional y el shotcrete ecológico, de una manera similar a la de los pernos de anclaje, con el fin de poder identificar que método de sostenimiento es el más óptimo para el sostenimiento de los frentes y en que situaciones resulta mejor utilizar uno u otro.

F) Métodos de obtención de información

En la investigación se emplearon diversos métodos de obtención de información, que tener un enfoque cualitativo y cuantitativo, se investigaron datos sobre los diferentes tipos de sostenimiento, destacando sus principales características y resaltando sus diferencias, adicional se usó mediadas de referencias (aproximado) para hallar el GSI, RMR y la clasificación Q-System, con esto comprobar que los métodos de sostenimiento son eficientes en la práctica, por último se los evaluara con la ecuación de Reducción Relativa de Riesgos (RRR).

G) Bases Teóricas:

1. Geological Strength Index (GSI) de Hoek y Brown

El Geological Strength Index (GSI) es un sistema de clasificación geomecánica desarrollado por Hoek y Brown (1997) para evaluar la calidad de macizos rocosos en ingeniería civil y minera. A diferencia de otros métodos (e.g., RMR o Q-system), el GSI se basa en una evaluación visual cualitativa de la estructura del macizo y las condiciones de sus discontinuidades, permitiendo estimar parámetros críticos como la resistencia y deformabilidad (Hoek et al., 2013) [7]. Esta sección presenta los fundamentos, metodología y aplicaciones del GSI, junto con sus limitaciones.

El GSI es un índice numérico (0–100) donde:

- $GSI \geq 75$: Macizos rocosos de alta calidad (estructura masiva o ligeramente fracturada).
 - $GSI \leq 30$: Macizos muy fracturados o alterados (ej.: roca meteorizada).

El GSI evalúa el macizo en base a:

- La estructura del macizo rocoso (masivo, laminado, bloqueado, etc.).
 - La condición superficial de las discontinuidades (rugosidad, alteración).

Tabla de Clasificación del GSI

Se recomienda incluir la siguiente tabla que relaciona la estructura del macizo con la condición de las discontinuidades:

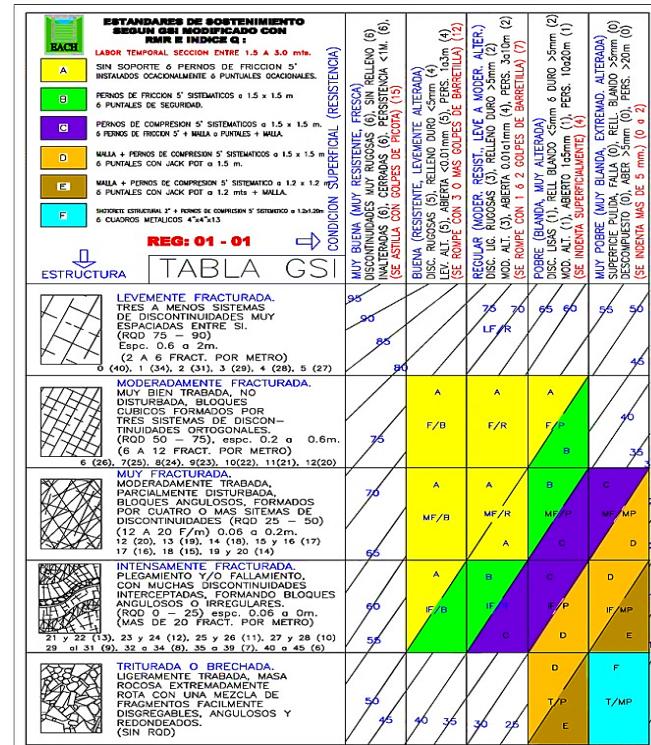


Fig 1. Clasificación del GSI

El GSI se usa en el Criterio de Rotura de Hoek-Brown para calcular:

Resistencia a la compresión del macizo rocoso:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_3} + s \right)^c$$

Donde:

- ✓ σ_1, σ_3 : tensiones principal mayor y menor.
 - ✓ σ_{ci} : resistencia a compresión simple de la roca intacta.
 - ✓ m_b, s, a : parámetros del macizo, calculados a partir del GSI y de los parámetros de la roca intacta m_i .

$$m_h = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}$$

$$S = e^{(\frac{GSI-100}{9-3D})}$$

$$a = \frac{1}{2}x\frac{1}{6}x(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}})$$

Donde:

- D: factor de alteración (por ejemplo, voladuras), entre 0 y 1.
- m_i : constante de Hoek-Brown para la roca intacta (proporcionada por ensayos de laboratorio).

APARIENCIA DEL MACIZO ROCOSO	DESCRIPCION DEL MACIZO ROCOSO	VALOR SUGERIDO DE D
	Excelente calidad por voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, resultando en la perturbación mínima del macizo alrededor del túnel	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizo de mala calidad (sin voladura) resultando en la mínima perturbación en el macizo rocoso circundante Cuando se presentan problemas de fluencia con significantes movimientos en el piso, la perturbación puede ser severa a menos que una solera temporal o contrabóveda se instalada, como muestra la fotografía.	D=0 D=5 sin solera
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2-3m en el macizo circundante.	D=0,8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños en el macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía	D=0,7; buena voladura. D=1 pobre voladura
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afectación a los taludes será menor	D=1; voladura de producción D=0,7; excavación mecánica.

Fig 2. Identificación del factor de deformación según el macizo rocoso

2. Sistema RMR (Rock Mass Rating)

El Rock Mass Rating (RMR), desarrollado por Bieniawski (1976), es un sistema de clasificación geomecánica ampliamente utilizado para evaluar la calidad del macizo rocoso en proyectos de ingeniería civil, minería y tunelería [7]. Este método asigna un valor numérico (0-100) basado en parámetros geológicos y geotécnicos, permitiendo estimar la estabilidad del macizo y el soporte requerido.

La Tabla I presenta la clasificación del macizo rocoso según el sistema RMR (Rock Mass Rating), en función del puntaje total obtenido a partir de parámetros geomecánicos. A cada categoría le corresponde una recomendación general de soporte.

TABLA I
CLASIFICACIÓN DEL RMR

RMR	Calidad del macizo	Recomendaciones de soporte
81–100	Muy bueno	Soporte mínimo (pernos ocasionales).
61–80	Bueno	Pernos sistemáticos + shotcrete.

41–60	Regular	Pernos + malla + shotcrete.
21–40	Pobre	Soporte pesado (marcos de acero).
≤20	Muy pobre	Excavación con protección total.

3. Sistema Q de Barton

El índice Q (Barton et al., 1974) es un método de clasificación geomecánica diseñado específicamente para el diseño de soportes en túneles. Combina parámetros cuantitativos y cualitativos para evaluar la calidad del macizo, con un rango típico de 0.001 (muy pobre) a 1000 (excelente) [7].

Parámetros y Fórmula

El índice Q se calcula mediante:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) x \left(\frac{J_r}{J_a} \right) x \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

Donde:

- RQD (%): Rock Quality Designation.
- J_n : Número de familias de discontinuidades (1 = macizo intacto, 20 = triturado).
- J_r : Rugosidad de discontinuidades (0.5 = lisas, 4 = muy rugosas).
- J_a : Alteración de discontinuidades (0.75 = paredes frescas, 20 = relleno arcilloso).
- J_w : Reducción por presión de agua (0.05 = flujo alto, 1 = seco).
- SRF: Factor de reducción por esfuerzos (0.5 = roca masiva, 400 = zonas de falla).

La Tabla II presenta la relación entre el valor del índice Q y la calidad del macizo rocoso, junto con el tipo de soporte recomendado según cada rango.

TABLA II
VALOR DE ÍNDICE DE Q DE BARTON

Valor de Q	Calidad del macizo	Soporte recomendado
>40	Excepcional	Ninguno o pernos ligeros.
10–40	Muy bueno	Pernos + shotcrete.
1–10	Bueno	Pernos + malla + shotcrete.
0.1–1	Regular	Soporte pesado (marcos de acero).
<0.1	Muy pobre	Métodos especiales.

4. Sostenimiento

El sostenimiento en excavaciones subterráneas cumple un rol fundamental para proteger a quienes trabajan bajo tierra, ya que busca mantener la estabilidad del terreno, asegurar los accesos y crear condiciones de trabajo seguras. Su diseño no debe tomarse a la ligera, pues debe considerar varios factores clave: desde las propiedades del macizo rocoso y su capacidad

de deformación, hasta la dirección y forma de la excavación, así como los esfuerzos naturales e inducidos que actúan sobre ella. También es importante que los elementos de soporte elegidos puedan adaptarse a esas condiciones, garantizando que la excavación se mantenga estable durante el tiempo que sea necesario. En esencia, diseñar un buen sostenimiento es un compromiso tanto técnico como humano con la vida de los trabajadores. Existen muchos tipos de sostenimientos para una mina subterránea, estos son clasificados en dos grupos:

4.1. Sostenimiento Pasivo:

4.1.1. Malla de sostenimiento

Ortiz, M. (2019) explica que una malla de sostenimiento está compuesta por alambres de acero ya sea convencional o de alta resistencia entrelazándose o cruzándose, formando patrones hexagonales, romboidales o rectangulares [6]. Este sistema se considera activo cuando se combina con pernos de anclaje y se utiliza en áreas donde existe un alto riesgo de deslizamientos de suelo o desprendimientos de roca en taludes.

4.1.2. Shotcrete

El shotcrete, también conocido como concreto lanzado. Según el Instituto Americano del Concreto (ACI) el shotcrete se define como concreto aplicado neumáticamente y proyectado a alta velocidad sobre una superficie, con el fin de formar una masa compacta y homogénea

León, G. (2024), jefe de Shotcrete de AESA nos comenta que, en el Perú, el uso del shotcrete se introdujo como una solución técnica para el sostenimiento de macizos rocosos, principalmente en terrenos cuya clasificación geomecánica (según el índice GSI) corresponde a los tipos III, IV y V [10].

De acuerdo con las características particulares de cada mina tales como la profundidad, el tipo de depósito, el método de explotación, y las condiciones geotécnicas del macizo rocoso el shotcrete puede aplicarse mediante dos técnicas: vía seca y vía húmeda.

- Shotcrete con método por vía seca**

En la vía seca, los materiales secos (cemento y agregados) se mezclan previamente sin agua. Esta mezcla se transporta por una manguera mediante aire comprimido hasta la boquilla, donde se añade el agua justo antes de proyectarse sobre la superficie.

- Shotcrete con método por vía húmeda**

En la vía húmeda, el concreto ya viene mezclado con agua, cemento, agregados y aditivos, ya sea desde una planta o una mezcladora en obra. Esta mezcla húmeda se bombea directamente hacia la boquilla y se proyecta con ayuda de aire comprimido.

La Tabla III describe de manera comparativa las principales características de la aplicación de shotcrete por vía húmeda y vía seca considerando varios aspectos.

TABLA III
DIFERENCIAS ENTRE SHOTCRETE VÍA HÚMEDA Y VÍA SECA

ASPECTO	VÍA HÚMEDA	VÍA SECA
Preparado	El concreto ya viene mezclado con agua, cemento y arena.	Se lanza el cemento seco y el agua se agrega al final, justo antes de aplicarlo.
Pérdida de material	Se pierde muy poco material entre el 5% al 15% (rebote bajo).	Se pierde bastante material (rebote alto). Se pierde sobre el 30% hasta el 60% del concreto, dependiendo de las condiciones del lugar.
Polvo en el ambiente	Casi no genera polvo, es más saludable para los trabajadores (bajo nivel de polución)	Produce mucho polvo, lo que puede afectar la salud del personal (alto nivel de polución)
Velocidad de trabajo	Se trabaja más rápido, ideal para grandes superficies.	Es más lento, sirve para trabajos pequeños o difíciles de acceder.
Calidad del resultado	Sale más parejo, con mejor adherencia y más resistente.	A veces queda desigual o menos firme.

Proceso del preparado del shotcrete

Paso 1: preparación de la pasta de cemento

Primero se mezclan el cemento, el agua y los aditivos químicos. Esta mezcla inicial se llama pasta de cemento, la cual cumple un rol clave porque es la base que da cohesión y adherencia a todo el material proyectado.

Paso 2: adición del agregado

A la pasta de cemento se le incorpora el agregado (arena fina o grava pequeña), lo que transforma la mezcla en un mortero; el agregado debe estar bien graduado para minimizar vacíos y evitar rebotes innecesarios.

Paso 3: proyección con aire a presión

Una vez formado el mortero, se proyecta sobre la superficie deseada usando aire comprimido, que le da velocidad y presión. Esta fuerza de impacto permite que el shotcrete se adhiera con firmeza, incluso en superficies.

Paso 4: fraguado y curado

Después de aplicar el material, comienza el proceso de fraguado (endurecimiento) y curado, donde se controla la humedad para que el cemento desarrolle su resistencia óptima.

4.1.3. Sostenimiento de Cimbras Metálicas

Este método se emplea para garantizar la estabilidad a largo plazo en labores de avance subterráneo. Su uso es especialmente adecuado en formaciones donde la masa rocosa se encuentra fracturada, lo que debilita significativamente el terreno.

Las cimbras se presentan como una solución óptima. Su alta resistencia mecánica y sus buenas propiedades de deformación permiten controlar eficazmente el cierre progresivo de la excavación. Esto evita deformaciones excesivas o colapsos prematuros, garantizando la estabilidad del entorno excavado bajo condiciones adversas.

Clasificación de las Cimbras

- **Cimbras Rígidas**

Estas están formadas por dos piezas metálicas diseñadas con medidas específicas, adaptadas a las condiciones particulares de cada excavación. La selección de este tipo de sostenimiento refleja la necesidad de contar con estructuras resistentes y confiables, que juegan un papel fundamental en mantener la seguridad y estabilidad de los trabajos subterráneos en la mina

- **Cimbras Deslizantes o Fluyentes**

Las cimbras deslizantes son estructuras metálicas que se usan para sostener túneles o galerías, sobre todo en terrenos inestables o con mucha presión. Están hechas con perfiles especiales, como los tipos U o TH, que tienen un diseño que permite que sus partes se deslicen entre sí cuando el terreno se mueve o ejerce presión. Gracias a ese sistema, las partes del arco se pueden mover solo cuando la presión lo exige. Según la investigación dentro de la mina Azul cocha desarrollada por Estrella, K (2015) nos menciona que cimbras deslizantes, desde el año 2007 ha ido reemplazando a las cimbras rígidas extendiéndose su uso total a un 60% de cimbras utilizadas [15].

4.2 Sostenimiento Activo

4.2.1. Sostenimiento con cable bolting

Consiste en cables flexibles de acero inyectados con pasta de cemento para proveer soporte a techos, pisos y paredes. Por lo tanto, es un tendón flexible constituido por un número determinado de alambres de acero, al cual se le inyecta pasta de cemento dentro del taladro. Este sistema es particularmente efectivo en zonas con bloques grandes o de geometría compleja, donde se requiere una capacidad de anclaje profunda y flexible (Hoek & Martin, 2014) [18].

4.2.2. Sostenimiento con pernos

- **Perno helicoidal**

Esta clase de perno presenta en su totalidad componentes importantes:

- **Barra helicoidal (autoperforante).**

Es el elemento principal del perno helicoidal. Está fabricada en acero y posee una rosca continua en forma de hélice a lo largo de toda su longitud.

- **Sistema de inyección.**

Está compuesto por un tubo que recorre internamente la barra, a través del cual se introduce la lechada (cartucho de cemento o resina). Esta lechada rellena el espacio entre la barra y el terreno perforado, mejorando significativamente la adherencia y la capacidad de carga del anclaje.

- **Placa y tuerca de sujeción.**

La placa distribuye la carga del perno sobre una mayor superficie de la roca, evitando concentraciones de esfuerzo que puedan dañar el sostenimiento. Por su parte, la tuerca permite tensar el sistema, ajustando la presión del anclaje y asegurando una conexión firme y estable entre la barra y el terreno.

La Tabla IV indica la longitud recomendada de los pernos helicoidales a instalar de acuerdo con la dimensión de la sección de la labor subterránea para garantizar la estabilidad del terreno.

TABLA IV
LONGITUD RECOMENDADA DE PERNOS HELICOIDALES SEGÚN LA SECCIÓN DE LA LABOR

Sección de la labor	Longitud del perno helicoidal a instalar
De 2.5×2.5 m a 2.7×2.7 m	5 pies
De 3.0×3.0 m a 3.5×3.0 m	6 pies
De 3.5×3.5 m a 4.5×4.5 m	7 pies
Secciones mayores a 5×5 m	10 pies

La Tabla V detalla la cantidad de cartuchos de resina y cemento requeridos según la longitud del perno helicoidal.

TABLA V
CANTIDAD DE CARTUCHOS DE RESINA Y CEMENTO POR LONGITUD DE PERNO HELICOIDAL

Longitud del perno helicoidal	Cartuchos de resina	Cartuchos de cemento
4 pies	1	2
5 pies	1	3
6 pies	2	3
7 pies	2	4
10 pies	3	6

- **Pernos Swelex**

El sostenimiento con pernos Swellex es una técnica de sostenimiento utilizada en minería subterránea y construcción de túneles. Consiste en la instalación de tubos de acero deformables que se expanden hidráulicamente al introducir agua a alta presión en su interior. Esta expansión permite que el perno se adhiera firmemente a las paredes del taladro, generando una unión por fricción que refuerza la masa rocosa sin necesidad de resinas ni lechadas. Es especialmente útil en terrenos inestables y de rápida deformación (Epiroc, 2020) [8].

- **Pernos Splitset**

También conocidos como pernos de fricción, son tubos ranurados que se expanden al insertarse en taladros ligeramente

menores que su diámetro. Se utilizan ampliamente por su rapidez de instalación y bajo costo, especialmente en macizos rocosos competentes donde el riesgo de deformación es mínimo (Escalante Guerra, 2017). Sin embargo, su capacidad estructural es limitada y no permiten monitoreo de esfuerzos internos, por lo que su uso está restringido a zonas de bajo riesgo (Pantigozo Delgado, 2013) [16].

H) Innovación:

1. Aplicación de los pernos con sensores FBG

Los pernos instrumentados con sensores FBG (Fiber Bragg Grating) representan una tecnología avanzada orientada al monitoreo geotécnico en tiempo real. Estos pernos, además de cumplir su función estructural, incorporan sensores ópticos capaces de detectar microdeformaciones axiales y cortantes, lo que permite emitir alertas tempranas ante posibles fallos del macizo. Si bien su costo es considerablemente mayor, su aplicación en zonas críticas o de alta sismicidad ha permitido reducir accidentes en hasta un 80 % (Xin Kang et al., 2024) [23].

2. Shotcrete geopolimérico con relaves en minería subterránea

El shotcrete geopolimérico se está volviendo una opción interesante frente al concreto lanzado tradicional, para mantener en minería subterránea. Lo que lo hace diferente es que no usa clinker, sino materiales como los relaves mineros, que tienen alto contenido de sílice y alúmina. Estos compuestos reaccionan ante el ambiente de mejor manera al reducir la contaminación debido a esto se reduce bastante la producción de CO₂ en comparación con el shotcrete hecho cemento Portland, sin perder la resistencia que se necesita en trabajos subterráneos (La Fuente & Huacho, 2021) [9].

En Perú, se hicieron unas pruebas donde se usaron relaves de minas polimetálicas para poder hacer shotcrete usando como activadores hidróxido de sodio y silicato de sodio, este shotcrete mostro una resistencia de 19 MPa lo cual es suficiente para mantener el sostenimiento en esa labor. Además, se notó que era más duro frente a los sulfatos y que el rebote al aplicarlo era mucho menor, lo cual es bueno porque se pierde menos material.

III. RESULTADOS:

Caso real 1: Socavón de Ventilación Nivel 280 (Macizo Muy Fracturado)

1. Evaluación geomecánica del macizo rocoso

- **Ubicación:** Frente de avance en nivel 320 (zona históricamente inestable).
- **GSI (Geological Strength Index):** 35 (macizo muy fracturado, estructura bloqueada con discontinuidades rugosas pero alteradas).
- **RMR (Rock Mass Rating):** 45 (calidad "regular" – requiere pernos sistemáticos + shotcrete).
- **Índice Q de Barton:** 2.5 (macizo de calidad "regular", con RQD = 60%, Jn = 9, Jr = 1.5, Ja = 3, Jw = 0.8, SRF = 4).

2. Problema identificado

El frente presentaba desprendimientos frecuentes debido a las fracturas interceptadas que generaban cuñas inestables y por las deformaciones progresivas no detectadas a tiempo con métodos convencionales.

3. Solución implementada

Instalación de pernos FBG en un patrón de 1.5 x 1.5 m. con monitoreo en tiempo real de deformaciones axiales y cortantes, además tener una alerta temprana a los 0.3% de deformación (umbral crítico = 0.5%).

Caso real 2: Socavón de Acceso Principal Nivel 150 (Reducción de Costos con Shotcrete Ecológico)

1. Evaluación geomecánica del macizo rocoso

- **Ubicación:** Galería principal de acceso (baja presión, pero exposición a humedad).
- **GSI (Geological Strength Index):** 55 (macizo moderadamente fracturado, roca competente, pero con zonas alteradas).
- **RMR (Rock Mass Rating):** 65 (calidad "buena" – requiere shotcrete ligero).
- **Índice Q de Barton:** 6 (macizo "bueno", con RQD = 75%, Jn = 6, Jr = 2, Ja = 2, Jw = 1, SRF = 2).

2. Problema identificado

Alto costo de áridos para shotcrete tradicional (arena y grava transportada desde canteras a 50 km).

Rebote del 30% en aplicación vía seca, aumentando desperdicio.

3. Solución implementada

El uso de shotcrete geopolimérico con relaves polimetálicos de la propia mina nos dará una resistencia a compresión de 18 MPa a 28 días (similar al shotcrete tradicional), además un rebote reducido al 12% (menor pérdida de material). Esto nos permitirá tener un ahorro del 40% en costos de materiales (eliminación de transporte de áridos externos) y una reducción de huella de carbono (73% menos emisiones vs. cemento Portland).

Caso real 3: Socavón de Transporte Nivel 1200 (Roca Arcillosa y Profundidad Extrema)

1. Evaluación geomecánica del macizo rocoso

- **Ubicación:** Túnel de transporte principal a 1,200 m de profundidad (zona con alta presión geostática e historial de colapsos).
- **GSI (Geological Strength Index):** 25 (macizo muy fracturado con estructura desordenada y discontinuidades llenas de material arcilloso).
- **RMR (Rock Mass Rating):** 30 (calidad "pobre" – requiere soporte pesado: pernos + malla + shotcrete).
- **Índice Q de Barton:** 0.8 (macizo "regular" con RQD = 40%, Jn = 12, Jr = 1, Ja = 4, Jw = 0.5, SRF = 6 por alta presión y fracturación).

2. Problema identificado

Deformaciones progresivas y colapsos repentinos debido a la presencia de material arcilloso en fracturas, reduciendo la cohesión del macizo, en segundo lugar, por la presión geostática elevada (por profundidad), generando convergencia de paredes y techo. Por último, por las fallas previas con pernos convencionales (helicoidales) por falta de monitoreo de deformaciones.

3. Solución implementada

Se instalaron pernos FBG en un patrón denso de 1.2 x 1.2 m para cubrir zonas críticas, configurados con un umbral de alerta del 0.2% de deformación (crítico: 0.4%) e integrados a un sistema de alarma automática conectado a la sala de control. Como refuerzo complementario, se aplicó malla metálica más shotcrete de fraguado rápido para contener desprendimientos superficiales.

En la Mina La Poderosa, la combinación de pernos FBG y shotcrete geopolimérico con relaves demostró mejorar la seguridad y optimizar costos operativos. Estos pernos permitieron identificar colapsos con hasta 48 horas de anticipación gracias al monitoreo en tiempo real. No obstante, su alto costo limita su aplicación masiva, recomendándose su uso selectivo en zonas de alto riesgo geotécnico.

Cálculo de reducción de accidentes

Para poder comparar los métodos de sostenimiento tradicionales y las innovaciones utilizaremos la fórmula de Reducción Relativa de Riesgos (RRR) lo cual nos permitirá evaluarlos de una manera cuantitativa.

Formula RRR:

$$RRR = \left(\frac{T_{conv} - T_{nueva}}{T_{conv}} \right) \times 100$$

1. PERNOS DE ANCLAJE

En la tabla VI, evaluaremos el RRR en los siguientes tipos de pernos, Split set, Swellex, helicoidal y FBG obtenemos los siguientes resultados.

TABLA VI

TASA DE ACCIDENTES Y REDUCCIÓN DEL RIESGO SEGÚN TIPO DE PERNO UTILIZAD

Tipo de perno	Tasa de accidentes incapacitantes (% mensual)	Reducción Relativa del Riesgo (RRR %)
Split Set	1.20 %	0 % (base de comparación)
Swellex	0.80 %	33.3 %
Helicoidal lechado	0.60 %	50.0 %
FBG sensorizado	0.20 %	83.3 %

2. SHOTCRETE

En la tabla 7, evaluaremos el RRR en los siguientes tipos de shotcrete, shotcrete portland y Shotcrete geopolimérico con relaves, obteniendo los siguientes resultados.

TABLA VII

TASA DE FALLAS ESTIMADA Y REDUCCIÓN DEL RIESGO DEL SHOTCRETE GEOPOLIMÉRICO CON RELAVES

Tipo de shotcrete	Tasa estimada de fallas (% mensual)	RRR respecto al shotcrete tradicional (%)
Shotcrete tradicional (Portland)	0.90 %	0 % (base de comparación)
Shotcrete geopolimérico con relaves	0.35 %	61.1 %

Los cálculos de reducción de accidentes evidencian que los pernos FBG son los más seguros, con una disminución relativa del 83.3%, el valor más alto respecto a otras opciones. Sin embargo, su alto costo limita su aplicabilidad, recomendándose su uso focalizado en zonas inestables, donde su sistema de monitoreo permite detectar cambios en el macizo rocoso y prevenir accidentes. En cuanto a los resultados comparativos entre tipos de shotcrete, el geopolimérico con relaves destacó por su mayor seguridad y carácter ecoamigable, atribuible a su mejor adaptabilidad al macizo, a diferencia del shotcrete tradicional, cuya rigidez limita su eficacia en condiciones subterráneas variables.

IV. CONCLUSIÓN

Se identificaron 2 innovaciones, pernos FBG y Shotcrete geopolimérico, los cuales según la información obtenida son métodos de sostenimientos eficientes, estas soluciones no solo buscan brindar mayor seguridad en las exploraciones subterráneas, sino que también mejoran la eficiencia operativa y reducen la huella de carbono, son muy buenas opciones para aplicar en las labores de la Unidad Minera Poderosa.

Al evaluar las 3 labores se encontró que en el caso 1 el GSI es de 35, RMR es de 45 y un índice de Q de Barton de 2.5, en el caso 2 el GSI es de 55, RMR es de 65 y el índice de Q de Barton 6, en el caso 3 el GSI es de 25, RMR es de 30 y el índice de Q de Barton es 0.8, evidenciando que son macizos rocosos regulares y buenos.

Las soluciones innovadoras, como los pernos FBG, permiten monitorear en tiempo real las alteraciones del macizo rocoso mediante un sistema de alerta ante posibles desprendimientos. Por su parte, el shotcrete geopolimérico se adapta mejor a las condiciones subterráneas, presentando mayor adherencia a la roca y reduciendo la huella de carbono por su método de fabricación. Estas propuestas no solo aportan ventajas técnicas y ambientales, sino que están orientadas a disminuir los accidentes en labores mineras subterráneas.

Los resultados muestran una notable reducción del riesgo: los pernos FBG lograron una disminución del 83.3%, frente al 0%, 33.3% y 50% obtenidos con otros tipos de anclaje. En cuanto al shotcrete geopolimérico, alcanzó una reducción del 61.1%, en contraste con el 0% del shotcrete tradicional, demostrando mediante la fórmula RRR su mayor eficacia y seguridad frente a las tecnologías convencionales.

REFERENCIAS:

- [1] Asociación Colombiana de Geotecnia (2020). Recomendaciones para el Uso de Mallas y Cimbras en Sostenimiento Minero. Medellín: ACG Ediciones.
- [2] Asociación de Ingenieros de Minas del Perú (IIMP). (2022). Protocolos de Seguridad en Sostenimiento de Labores Mineras. Lima: IIMP Publicaciones.
- [3] Bujaico, T. (2020). Influencia de la aplicación del soporte con shotcrete en la ocurrencia de desprendimiento de rocas en la empresa MARSA Minera Aurífera Retamas S. A. (Trabajo de fin de grado, Universidad Continental). Repositorio de la Universidad Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10070/1/IV_FIN_110_Ti_Bujaico_Mallma_2020.pdf
- [4] Castro, R. & Díaz, M. (2020). Geomecánica Aplicada a Minería Subterránea: Diseño de Sostenimientos con Shotcrete y Pernos. Santiago: Ediciones Universidad de Chile.
- [5] CDT (Corporación de Desarrollo Tecnológico). (2024). Proyecto de uso de arenas de relaves para fortificación de túneles en minería subterránea. <https://www.portalminero.com/wp/proyecto-usa-arena-de-relaves-para-la-fortificacion-de-tuneles-en-mineria-subterranea/>
- [6] Gómez, P. et al. (2019). Shotcrete en Minería: Tecnologías y Buenas Prácticas. Ciudad de México: Editorial Minería Segura.
- [7] Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown criterion – 2002 edition. International Journal of Rock Mechanics.
- [8] Instituto Nacional de Minería (INMIN). (2022). Guía Técnica para el Diseño de Sostenimientos en Excavaciones Subterráneas. Santiago: Publicaciones INMIN.
- [9] La Fuente, J. A., & Huacho, S. R. (2021). Modelo de mejora del sostenimiento con shotcrete mediante la activación alcalina de relaves en una mina subterránea del Perú [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/656610>
- [10] León, G. (2024). Sostenimiento mecanizado con shotcrete vía húmeda por Aesa. Rumbo Minero. <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/actualidad-empresarial/sostenimiento-mecanizado-shotcrete/>
- [11] Ministerio de Energía y Minas del Perú (2021). Manual de Buenas Prácticas en Sostenimiento de Labores Mineras Subterráneas. Lima: MEM.
- [12] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2017). Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. OSINERGMIN. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf
- [13] Revista Minería. (2023). Optimización del geopolímero con relaves mediante aditivos nanoestructurados. Revista Minería, Edición 532.
- [14] Rodriguez, J. y López, M. (2020). Sistemas de Sostenimiento en Minería Subterránea: Criterios de Selección y Casos de Estudio. Bogotá: Ediciones Técnicas Mineras.
- [15] Sanchez, I. (2020). Shotcrete (Concreto proyectado): ¿Método por vía seca o vía húmeda? CivilGeeks.com. <https://civilgeeks.com/2020/07/27/shotcrete-concreto-proyectado-metodo-por-via-seca-o-via-humeda/>
- [16] SHOTCRETE Guía chilena de hormigón proyectado. (s. f.). Instituto del Cemento y Hormigón En Chile. Recuperado 3 de septiembre de 2014, de <https://es.slideshare.net/slideshow/guia-del-shotcrete-primer-a-edicion/68582560>
- [17] Sociedad Peruana de Geotecnia (SPG). (2023). Manual de Clasificación Geomecánica RMR y Q-System en Proyectos Mineros. Lima: SPG Ediciones.
- [18] Suárez, J. et al. (2022). Técnicas Modernas de Instrumentación Geotécnica en Minería. Bogotá: Editorial Escuela de Ingenieros.
- [19] Torres, L. & Quispe, E. (2023). Evaluación de Macizos Rocosos y Sistemas de Sostenimiento en la Minería Peruana. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- [20] U.S. Army Corps of Engineers. (1993). Standard practice for shotcrete (EM 1110-2-2005). Headquarters, Department of the Army. https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2005.pdf
- [21] Vega, R., Mayta, L., & Salazar, J. (2021). Shotcrete geopolímerico basado en relaves activados para sostenimiento minero subterráneo. En Advances in Human Factors and Sustainable Infrastructure (pp. 275–286). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80462-6_3280462-6_3
- [22] Vargas, R. y Fernández, A. (2021). Innovaciones en Pernos de Anclaje para Minería Subterránea. Medellín: Editorial Geoingeniería.
- [23] Xin Kang et al. (2024). A New Self-Sensing Fiber Optic Anchor to Monitor Bolt Axial Force and Identify Loose Zones in the Surrounding Rock of Open TBM. <https://doi.org/10.3390/s24206709>