

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Análisis de la aplicación del concreto lanzado para el sostenimiento de labores subterráneas
según la calidad de roca en la mina Consorcio Minero Horizonte - La Libertad - 2024**

Asesor:

Mg. Ing. Mendoza Nina, Renato Hector

Autor:

Alferes Meza, Frank Anthony

Para optar al Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Cusco – Cusco – Perú

2025



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 010

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 11 días del mes de Diciembre del 2025, siendo las 9:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 534-2025-UTEA-FC-FI-EPIC de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mg. Laime Calvo Edixon
Dictaminante:	Mg. Mendoza Morales German
Replicante :	Mg. Flores Condori Jessica

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Análisis de la aplicación del concreto lanzado para el sostenimiento de labores subterráneas según la calidad de roca en la mina Consorcio Minero Horizonte – La Libertad - 2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Alferes Meza Frank Anthony

(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) **APROBADO (S):**

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Br. Alferes Meza Frank Anthony	Aprobado

Siendo las 11:00 a.m horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mg. Laime Calvo Edixon

(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Dictaminante: Mg. Mendoza Morales German

(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Replicante: Mg. Flores Condori Jessica

(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

(Firma)

(Firma)

(*): **Mayoría:** Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; **Unanimidad:** Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban, Art.18 RGGAT.

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 13%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 11%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y Nombres	:	Alferes Meza, Frank Anthony
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	70377559
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0009-5610-0397
Datos del Asesor		
Apellidos Y Nombres	:	Mg. Ing. Mendoza Nina, Renato Héctor
Tipo de Documento De Identidad	:	DNI
Número de Documento De Identidad	:	44159849
URL ORCID	:	https://Orcid.Org/0000-0002-2454-354x
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea De Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible.
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2024 - 2025
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	17%
URLOCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Dedico la presente tesis de investigación a mi hijo
Adriel, quien es mi fuerza de motivación para
alcanzar mis objetivos y metas.

Agradecimiento

Estoy agradecido con Dios por proteger a mi familia y a mí, a mis padres y hermanos por ser un ejemplo a seguir y por su apoyo sin condiciones, a mi esposa y a mi hijo por orientarme en mi camino y a mi asesor por su ayuda en la investigación de esta tesis.

Resumen

La presente investigación de tipo aplicada tuvo como objetivo examinar el uso del concreto proyectado (shotcrete) en el soporte de estructuras subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte (CMH S.A.), identificando propiedades geomecánicas y estableciendo el diseño de soporte acorde a la calidad de la roca.

El estudio se enfocó en la rampa 2705, un acceso principal en profundización ubicado en la zona balcón de la veta Lourdes. Mediante la evaluación de cinco estaciones, se determinó que el cuerpo rocoso es de calidad muy mala según el RMR, registrando un RQD promedio de 29% y un riesgo considerable de caída de rocas por la formación de cuñas en la caja techo. Para garantizar la protección del personal y de las máquinas, se estableció un diseño de soporte compuesto por concreto proyectado, anclajes y malla de acero soldada, validando su comportamiento con los softwares Rock Data y Phase 2.

Los resultados demostraron un rebote menor al 15%, límite permitido por la compañía, favorecido por el control de la presión de aire y agua, el diseño de la mezcla y la capacitación del personal en el lanzado con equipos robot. Asimismo, a los 28 días se alcanzó una resistencia mayor a 500 kg/cm², superando el estándar mínimo empresarial de 400 kg/cm². Se concluye que este diseño optimiza la adherencia, reduce el rebote y, junto con el software de simulación, constituye un complemento fundamental para conocer el factor de seguridad en la operación.

Palabras clave: Shotcrete, sostenimiento, factor de seguridad, calidad de roca, RMR.

Abstract

This applied research aimed to examine the use of shotcrete in the support of underground structures at the Consorcio Minero Horizonte (CMH S.A.) mine, identifying geomechanical properties and establishing a support design based on rock quality. The study focused on ramp 2705, a main deepening access located in the Balcón zone of the Lourdes vein.

Through the evaluation of five stations, the rock mass was classified as "very poor" according to the RMR index, registering an average RQD of 29% and a significant rockfall risk due to wedge formations in the hanging wall. To ensure the protection of personnel and machinery, a support design composed of shotcrete, rock bolts, and welded wire mesh was established, validating its behavior through RockData and Phase2 software simulations.

The results demonstrated a rebound rate of less than 15%, which is within the company's allowable limit. This success was achieved through the precise control of air and water pressure, an optimized mix design, and personnel training in robotic spraying equipment operation. Furthermore, at 28 days, a compressive strength exceeding 500 kg/cm² was achieved, surpassing the company's minimum standard of 400 kg/cm². It is concluded that this design optimizes adhesion, minimizes rebound, and, combined with simulation software, serves as a fundamental tool to determine the safety factor in the operation.

Keywords: Shotcrete, ground support, safety factor, rock quality, RMR.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice.....	ix
Índice de figuras	xi
Índice de tablas.....	ixv
Índice de anexos	xvii
I. Introducción	19
II. Planteamiento del problema.....	21
2.1 Descripción y formulación del problema	21
2.2 Objetivos	26
2.1.1 Objetivo General	26
2.1.2 Objetivos Específicos.....	26
2.3 justificación e importancia	27
2.4. Limitaciones de estudio.....	28
2.5. Hipótesis.....	28
2.6 Variables.....	29
III. Marco Teórico.....	33
3.1 Antecedentes del problema	33
3.2 Bases teóricas	38
3.3 Definición de términos	48
IV. Metodología	91
4.1 Tipo y nivel de investigación	91
4.2 Ámbito temporal y espacial.....	92

4.3 Población y muestra	93
4.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos.....	94
4.5 Análisis datos	96
V. Resultados y discusion.....	113
VI. Conclusiones	179
VII. Recomendaciones	182
VIII. Referencias bibliográficas	183
IX. Anexos	188

Índice de figuras

Figura 1	Estadística de víctimas mortales por especialidad de supervisión 2024.....	22
Figura 2	Índice de frecuencia y de severidad - Índice de seguridad	23
Figura 3	Empresas mineras con más accidentes mortales por caída de roca (2000 – 2019).	24
Figura 4	Tipificación de accidente mortales en minería (2000 – 2019).	25
Figura 5	Rociado de aire y agua en la superficie antes de aplicar el shotcrete	44
Figura 6	Lanzado del shotcrete a una distancia de 1 a 1.5m.	45
Figura 7	Lanzado del shotcrete a una distancia de manera perpendicular	46
Figura 8	<i>Aliva 252</i>	53
Figura 9	Equipo robotizado de shotcrete vía húmeda.....	55
Figura 10	Equipo de lanzado automático	56
Figura 11	Perno Swellex	70
Figura 12	Sostenimiento según el ábaco de Barton.	71
Figura 13	Pernos de roca no tensionados anclados en la roca del arco natural más shotcrete.....	77
Figura 14	Tensiones naturales e inducidas en el macizo rocoso.....	88
Figura 15	Relación entre las tensiones verticales y la profundidad de la excavación.	89
Figura 16	Cálculo del GSI. (Geological Strength Index).....	90
Figura 17	Gráfico empleado para la estimación del GSI (Geological Strength Index)	98
Figura 18	Rampa negativa 2705	113
Figura 19	Estimación GSI de estación 01	121
Figura 20	Estimación GSI de estación 01	122
Figura 21	Estimación GSI de estación 03	123
Figura 22	Estimación GSI de estación 04	124

Figura 23 Estimación GSI de estación 05	125
Figura 24 Probetas para ensayos	129
Figura 25 Testigos cilíndricos	134
Figura 26 Corte de testigo cilíndrico.....	138
Figura 27 Absorción de energía necesaria para el sostenimiento	140
Figura 28 Diagrama de ensayos con paneles de concreto	142
Figura 29 Enrazado de paneles	143
Figura 30 Rotura de paneles de concreto	144
Figura 31 Elección de tipo de labor subterránea según su calidad de roca.....	146
Figura 32 Ingreso de data en el software RocData.	147
Figura 33 Resultados gráficos obtenidos con el RocData.....	148
Figura 34 Ingreso parámetros tensionales en el software Phase2.	150
Figura 35 Ingreso propiedades del macizo rocoso en el software Phase2.	151
Figura 36 Ingreso propiedades del macizo rocoso en el software Phase2.	152
Figura 37 Desplazamiento por efecto del campo tensional y vectores de deformación.	153
Figura 38 Factor de esfuerzos (FS) alrededor de la excavación.	154
Figura 39 Elección del diseño del sostenimiento según el Abaco de Barton.....	156
Figura 40 Ingreso de propiedades del Swellex con software Phase 2de Barton.	157
Figura 41 Elección del diseño del sostenimiento según el Abaco de Barton.....	158
Figura 42 Elección del diseño del sostenimiento según el Abaco de Barton.....	160
Figura 43 Modelamiento de pernos Swellex set en campo tensional	161
Figura 44 Recomendación geomecánica tipo de roca.....	162
Figura 45 Recomendación geomecánica tipo de sostenimiento	163

Figura 46 Recomendación geomecánica adicionales.....	164
Figura 47 Prueba Slump.....	172
Figura 48 Boletín de correcto lanzado de shotcrete	175
Figura 49 Elemento de control de espesor	177

Índice de tablas

Tabla 1 Variables de investigación	29
Tabla 2 Valores permisibles en sustancias disueltas del agua.....	61
Tabla 3 Tabla resumen de los problemas ocasionados por el uso de mala calidad de agua en el shotcrete	64
Tabla 4 Valores de ESR	71
Tabla 5 Rango de calidad RQD.....	79
Tabla 6 Clasificación de los macizos rocosos según el índice Q.	80
Tabla 7 Valoración del parámetro número de familias de discontinuidades (Jn).	81
Tabla 8 Valoración del parámetro rugosidad de discontinuidades (Jr)	82
Tabla 9 Valoración del parámetro alteración de discontinuidades (Ja).....	83
Tabla 10 Valoración del parámetro presencia de agua (Jw).a.....	84
Tabla 11 Valoración del parámetro condiciones tensionales (SRF).	84
Tabla 12 Sumatoria de puntuación RMR	86
Tabla 13 Sumatoria de puntuación RMR Sumatoria de puntuación RMR	86
Tabla 14 Tabla de puntuación RMR Tabla de puntuación RMR.....	87
Tabla 15 Técnicas e instrumentos utilizados en la presente investigación	94
Tabla 16 Validación y confiabilidad de los instrumentos Validación y confiabilidad de los instrumentos	95
Tabla 17 Matriz de consistencia	109
Tabla 18 Estaciones geomecánicas	114
Tabla 19 Estaciones de estudio Estaciones de estudio	115
Tabla 20 Resultados de cálculo de numero de discontinuidades y RQD.....	116

Tabla 21 Clasificación de la roca según el valor numérico del RQD	116
Tabla 22 Calculo de Q de Barton Cálculo de Q de barton	117
Tabla 23 Calculo de Q de Barton Cálculo de Q de Barton resumen.....	120
Tabla 24 Calculo de Q de Barton	120
Tabla 25 Resumen de estimación de GSI de las 5 estaciones de estudio.....	126
Tabla 26 Resumen de resultados de estimación de GSI con formula	127
Tabla 27 Clasificación de GSI.....	127
Tabla 28 Resumen de resultados de estimación de RMR con formula.....	128
Tabla 29 Sumatoria de puntuación RMR	129
Tabla 30 Resumen de resultados de estimación de GSI con formula	130
Tabla 31 Estándar de resistencia de compresión simple en CMH S.A.	131
Tabla 35 Resultados promedios mensual de ensayos de compresión con el aditivo Sigunit I -30 Y FIBRA Dramix (65/35).).....	137
Tabla 36 Las características del panel según la norma ASTM C1604	142
Tabla 28 Diagrama de ensayos con paneles de concreto	142
Tabla 37 Resultados de resistencia de compresión simple en paneles mensuales	144
Tabla 38 Parámetros del macizo rocoso obtenidos en el software RocData.....	148
Tabla 39 Tabla de descripción de valor ESR	155
Tabla 40 Especificaciones técnicas para el agregado.....	166
Tabla 41 Resumen de diseño de shotcrete para llegar a una resistencia de 400 a 500 kg/cm ² según la norma ACI 506R – Shotcrete.....	166
Tabla 42 Granulometría 01.....	168
Tabla 43 Granulometría 02.....	1703

Tabla 44 Prueba Slump	173
Tabla 45 Resultados de rebote por equipo robot lanzador	174

Índice de anexos

Anexo 1 Trazado de arranque en malla de perforación en labor RP 27052705	189
Anexo 2 Perforación con Jumbo en labor RP 2705	190
Anexo 3 Pintado de malla de perforación en labor RP 2705	191
Anexo 4 Labor RP 2705 recién shotcreteada en proceso de perforación	192
Anexo 5 Operador de Jumbo realizando la perforación con Jumbo en frente de labor RP 2705	193
Anexo 6 Armado de cañas de explosivo para contornos de labor RP2705	194
Anexo 7 Pintado de frente de trabajo para perforación y lanzado de concreto	195
Anexo 8 Barretillas para desatado de rocas.	196
Anexo 9 Robot lanzador realizando shotcreteo de labor RP2705	197
Anexo 10 Labor RP 2705 recién detonada y con filtración excesiva de agua.	198
Anexo 11 Plano de Labor RP 2705.....	199
Anexo 12 Informe de ensayos de laboratorio de rocas	189
Anexo 13 Ensayo de compresión triaxial en el laboratorio de rocas	201
Anexo 14 Gráfico de compresión triaxial en la Cía. Consorcio Minero Horizonte.....	202
Anexo 15 Gráfico de constantes elásticas en la Cía. Consorcio Minero Horizonte	203
Anexo 16 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	204
Anexo 17 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	205
Anexo 18 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	206
Anexo 19 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete.	207
Anexo 20 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete.	208
Anexo 21 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	209
Anexo 22 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	210

Anexo 23 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	211
Anexo 24 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	212
Anexo 25 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	213
Anexo 26 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	214
Anexo 27 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	215
Anexo 28 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	216
Anexo 29 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	217
Anexo 30 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	218
Anexo 31 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	219
Anexo 32 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	220
Anexo 33 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	221
Anexo 34 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	222
Anexo 35 Informe de ensayos de resistencia y tenacidad del shotcrete	223

I. Introducción

La empresa Consorcio Minero Horizonte S. A. se enfoca en la búsqueda, explotación, extracción y avance de recursos minerales de oro. El método utilizado para la explotación subterránea es el corte y relleno ascendente, destacándose entre las características de la mina el fracturamiento y la baja calidad de la roca, que varía entre 20 y 40 en RMR.

Dentro de los trabajos de profundización en la zona norte de la mina Balcón se tienen diferentes deficiencias en los trabajos de sostenimiento, siendo una de las causas el bajo control operacional en esta área, teniendo como resultados el agrietamiento y el excesivo rebote de concreto lanzado en frentes de avance principalmente en bypass, rampas y cruceros, es por ello la importancia de definir y mejorar el diseño de sostenimiento empleado dentro de las labores subterráneas.

Las limitaciones de espacio en el trabajo de investigación fueron entre octubre del 2023 hasta mayo 2024, la delimitación espacial fue la operación de profundización de la zona balcón a una profundidad de 700 metros aproximadamente, específicamente en labores subterráneas del nivel 2705 de la mina Consorcio Minero Horizonte.

Los resultados de la presente tesis son aplicables a proyectos subterráneos con RMR que oscilen entre 30 a 40, con características similares aplicables al tipo de roca encajonante y condiciones climatológicas dentro de la labor (Temperaturas altas 40°C y presencia de filtración de agua).

El estudio se compone de cinco secciones que son: Introducción, definición del problema, Marco teórico, Metodología y análisis de resultados y discusión.

Se tiene como estándar el sostenimiento controlado acorde a la calidad de la roca (RMR), el cual es estudiado acorde a los avances lineales de cada labor.

Dentro de los problemas más significativos dentro de los trabajos subterráneos en labores de avance de la mina CMH es la estabilidad de la roca, para ello se requiere la elección adecuada del sostenimiento y su diseño.

Según Jolin (2015), “El shotcrete ha introducido importantes mejoras en el mercado de construcción y minería por su versatilidad y reducción de costes, pero la aplicación neumática necesaria para proyectar y compactar el hormigón implica desafíos como el rebote” (p. 111).

Para captar los auténticos beneficios del shotcrete, es fundamental, en primer lugar, conocer qué es el hormigón proyectado. Según se especifica en ACI 506R, “Guía del Shotcrete” (2020), “el hormigón proyectado es un mortero u hormigón proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie”. En términos sencillos, el shotcrete no es simplemente un material; debe ser visto como una técnica para la aplicación del concreto. Así, al analizar las ventajas de una reparación del concreto, las mismas características deberían ser pertinentes para cualquier material de reparación, ya sea que se aplique manualmente, se coloque en el lugar o se use de forma rápida con shotcrete o concreto proyectado.

Se lleva a cabo este estudio con el objetivo de determinar el tipo de concreto proyectado que se utilizará para el soporte de las actividades subterráneas, de acuerdo con los requerimientos de la mina, centrándose particularmente en la rampa 2705., lo cual tiene un beneficio operativo para la compañía a consecuencia de su baja calidad de roca, así también para que sirva de referencia para otras obras subterráneas con similares características.

El objetivo de la presente investigación es analizar la aplicación del concreto lanzado en labores subterráneas según la calidad de la roca, determinar las características geomecánicas para la aplicación efectiva del concreto lanzado, determinar el diseño de sostenimiento con concreto lanzado según la calidad de roca y analizar la elección de sostenimiento con concreto lanzado. Todo esto con el fin de tener una operación segura de ciclo de minado en la rampa 2705.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

2.1.1 Descripción del problema

Dentro de los trabajos de profundización en la zona norte de la mina Balcón de la Cia. Minera Consorcio Minero Horizonte, se tienen diferentes deficiencias en el sostenimiento de labores subterráneas, siendo una de las causas el bajo control operacional en esta área, teniendo como resultados el alto riesgo de desprendimiento de rocas que puede ocasionar la mortandad de trabajadores obreros, operarios, supervisores, otros.

En el proyecto se tiene un área de geomecánica donde se estudia constantemente las características del macizo rocoso y según sus resultados la recomendación del tipo de sostenimientos activos o pasivos como: Cimbras, pernos helicoidales o Split set, mallas electrosoldadas, shotcrete o concreto lanzado.

La seguridad de los trabajadores en interior mina depende mucho del sostenimiento de las labores, pues estadísticamente los accidentes fatales dentro de mina se deben a desprendimiento de rocas, a continuación, se muestra las estadísticas de mortalidad en minería de enero a junio del 2024, de 11 son 7 los casos de accidentes por un factor de caída de rocas en labores subterráneas.

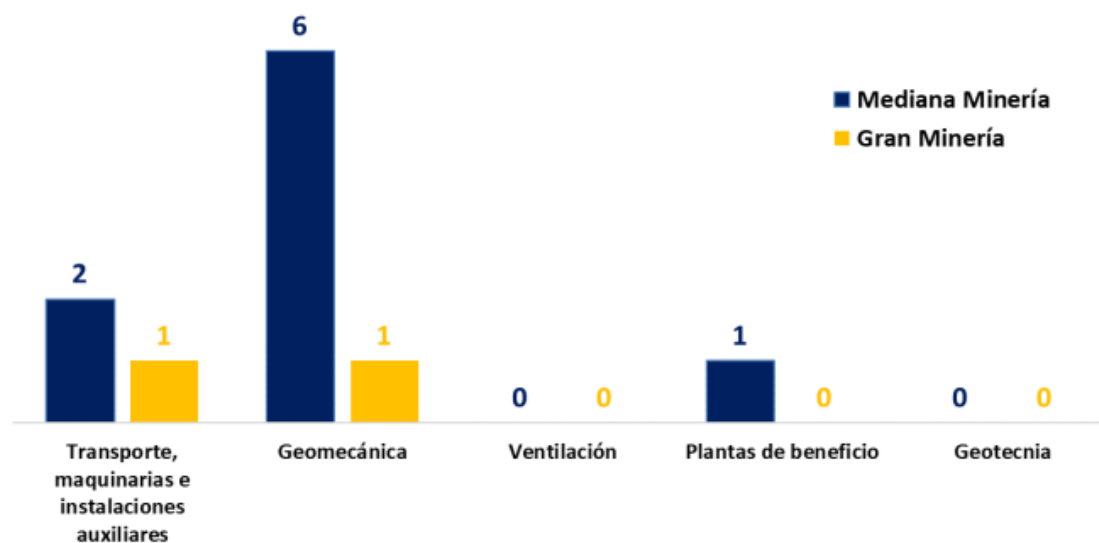
VILLARROEL (2022), en su investigación “Sistema que permite monitorear, reconocer, marcar y registrar visualmente el espesor requerido durante la proyección de hormigón en túneles” para la Universidad de Chile, el problema principal radicaba en la falta de un sistema que facilitara el monitoreo, la identificación, la señalización y el registro visual del grosor que el operador y su equipo necesitan, mientras llevan a cabo el trabajo de proyección de concreto en túneles.

Para CARPIO (2021), en su investigación titulada “Selección de fibras y diseño para shotcrete en la construcción del by pass del nivel 4540 en la U.P. Tambomayo, Arequipa”,

para la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco enfrentó el inconveniente de la inadecuación en el diseño del shotcrete al no utilizar la fibra correcta que cumpla con los requerimientos geomecánicos del By Pass del nivel 4540 en la U. P Tambomayo – Arequipa.

Figura 1

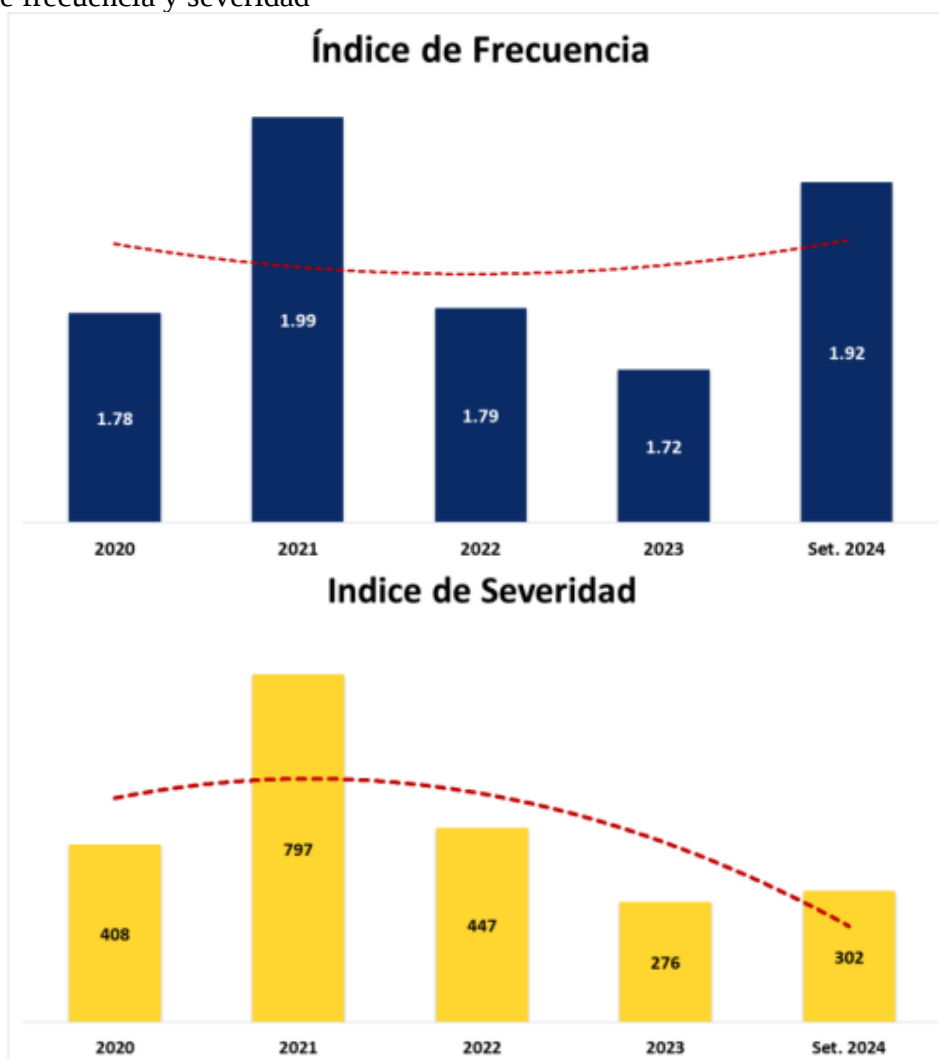
Estadística de mortalidad por especialidad de supervisión 2024



Nota: La figura muestra los indicadores de mortalidad de enero a junio del 2024, el rasgo significativo es de 6 muertes, por temas de geomecánicas, en su mayoría, desprendimiento de roca. Fuente: Osinergmin (2024).

En la figura 01 se muestra que la mediana minería presenta una mayor cantidad de incidencias en áreas clave, especialmente en geomecánica, lo que podría indicar la necesidad de fortalecer las prácticas de seguridad y control en estas operaciones para reducir riesgos. Algunos datos históricos para poder entender mejor la problemática, a continuación, se observa la índice accidentabilidad al cierre de setiembre de 2024.

Figura 2
Índice de frecuencia y severidad

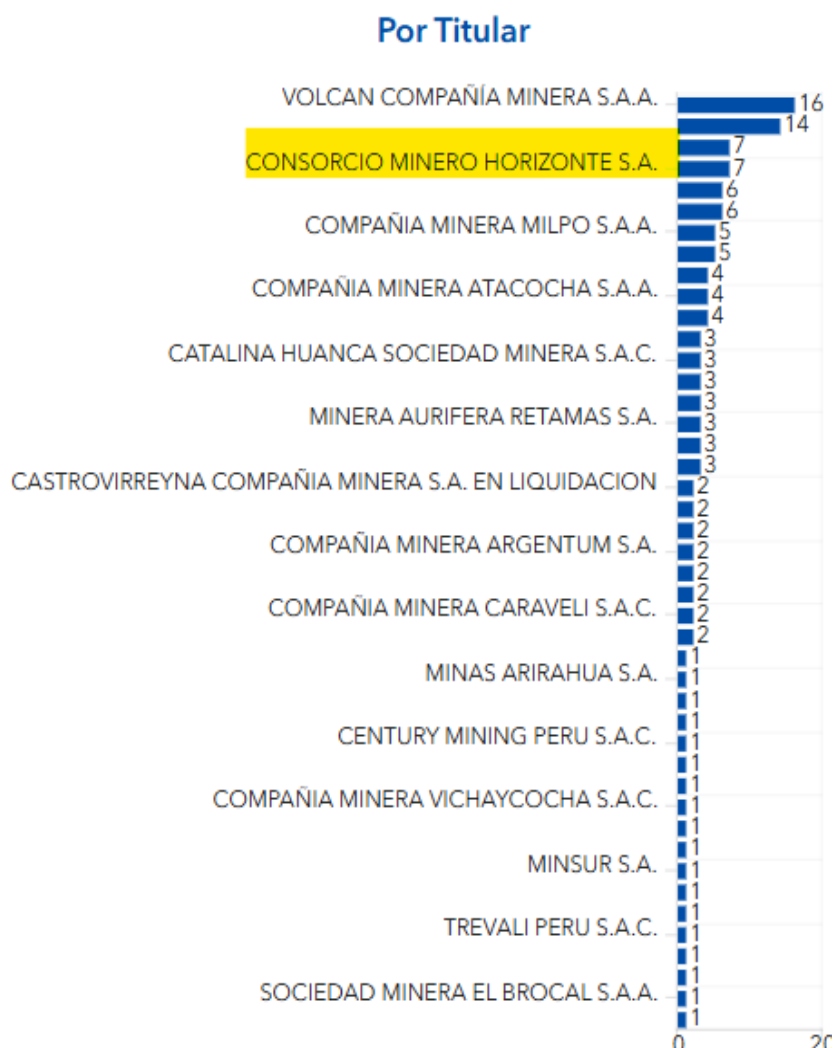


Nota: La figura ilustra la tasa de ocurrencia, que se refiere al total de accidentes fatales y que provocan incapacidad por cada millón de horas laborales realizadas. Asimismo, presenta la tasa de gravedad, que indica el total de días perdidos o contabilizados por cada millón de horas trabajadas. Fuente: Osinergmin (2024).

La figura 02 (Índice de severidad) muestra la evolución del Índice de Severidad a lo largo de cinco períodos, desde 2020 hasta septiembre de 2024. Este índice generalmente mide el número de días perdidos por lesiones o accidentes en relación con el total de horas trabajadas, reflejando el impacto o la gravedad de los accidentes.

Figura 3

Empresas mineras con más accidentes mortales por caída de roca (2000 – 2019).



Nota: La figura muestra el ranking de empresas con más accidentes por temas de caída de rocas (geomecánica) entre el 2000 al 2019.. Fuente: Osinergmin (2025).

La figura 3 muestra el ranking de empresas con más accidentes mortales por caída de rocas a partir del año 2000 hasta el 2019, precisamente el proyecto en investigación se encuentra en segundo lugar. La combinación del análisis de Tipificación de Accidentes y la tendencia del Índice de Severidad ofrece una visión completa de los riesgos y la gestión de seguridad de la operación. La tendencia en el Índice de Severidad sugiere que, a pesar de que los tipos de accidentes siguen siendo los mismos (como Caída de rocas), las acciones de seguridad implementadas después del pico de 2021 han tenido un impacto positivo en la gravedad de las lesiones.

Figura 4*Tipificación de accidente mortales en minería (2000 – 2019).*

Nota: La figura muestra por tipificación de accidentes mortales en minería entre el 2000 al 2019. Fuente: Osinergmin (2025).

Por lo expuesto se debe conseguir un diseño de sostenimiento que reduzca los riesgos que puedan ocasionar un daño a personal o a la propiedad. La presente investigación garantiza un estudio acorde a la realidad de la mina, cumpliendo los estándares mínimos de seguridad según el DS023 y su modificación DS024 (Normativa sobre seguridad y salud en el trabajo minero). Este estudio contribuirá a reducir los peligros relacionados con las caídas de rocas,

permitiendo así definir indicadores clave de rendimiento (accidentes, sucesos, cumplimiento de revisiones, horas de entrenamiento, mediciones de contaminantes y otros).

2.1.2 Formulación del problema de investigación

2.1.2.1 Problema General

¿Cómo se realiza la aplicación del concreto lanzado en labores subterráneas según la calidad de roca en la mina Consorcio Minero Horizonte - 2024?

2.1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cómo serán las características geomecánicas en la mina Consorcio Minero Horizonte- 2024 para la aplicación efectiva del concreto lanzado?
- b) ¿Cómo será el diseño de sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte - 2024?
- c) ¿De qué manera se realiza la elección del sostenimiento con concreto lanzado en labores en la mina Consorcio Minero Horizonte - 2024?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Analizar la aplicación del concreto lanzado en labores subterráneas según la calidad de la roca para el sostenimiento de labores subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte – 2024.

2.2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar las características geomecánicas en la mina Consorcio Minero Horizonte según el valor de la estimación de la calidad de roca para la aplicación efectiva del concreto lanzado en labores subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte – 2024.
- b) Determinar el diseño de sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas según la calidad de roca en la mina Consorcio Minero Horizonte – 2024.

- c) Analizar la elección de sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte – 2024.

2.3 Justificación e importancia

El sostenimiento dentro de las actividades de la Mina Balcón no está la atención que merece, donde la aplicación de concreto lanzado o shotcrete es usado en puntos donde no se tiene buenos resultados, es decir donde existe rajaduras de concreto e incluso genere sobrecostos de sostenimiento, así también, si bien en cierto este tipo de sostenimiento es aplicado según previa evaluación, no se ha demostrado con certeza su aplicabilidad y efectividad acorde a la calidad de la roca (Estudio RMR).

Por ello esta investigación busca mejorar la efectividad de sostenimiento (Adecuado diseño de sostenimiento para ese tipo de roca), con la aplicación del concreto lanzado y los complementos a utilizar como las mallas electrosoldadas y los pernos swellex.

Es importante mencionar que los problemas operativos se enfocan en su mayoría en la calidad de la roca (presencia de agua, fracturamiento excesivo, presencia de cuñas y otros), este es una condición que no se puede eliminar, pero si se puede controlar, por tal motivo se busca definir un tipo y diseño de sostenimiento tunelero acorde a las condiciones geomecánicas de la rampa 2705.

Al tener definido un diseño de sostenimiento acorde a la calidad de la roca (RMR), este servirá también de guía para otros proyectos tuneleros con similares características geomecánicas.

Así mismo se requiere reforzar la destreza de los operadores de los equipos lanzadores y así reducir el rebote de alguna manera, el mantenimiento preventivo y demás que también puedan conllevar a una desviación operativa.

2.4 Limitaciones de estudio

Este análisis se dirige hacia las cuestiones técnicas y de operación, por lo que surge la siguiente pregunta: hay una preocupación entre los trabajadores de la compañía por salir de sus áreas de comodidad para adoptar técnicas contemporáneas de sostenibilidad.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

La calidad geomecánica de la roca en la mina Consorcio Minero Horizonte ejerce una influencia significativa sobre la eficacia en la aplicación del concreto lanzado, incidiendo tanto en el diseño del sostenimiento como en las actividades de selección del sostenimiento más adecuado para las labores subterráneas.

2.5.2 Hipótesis específicas

- a) Las características geomecánicas de la roca, determinadas mediante la estimación de la calidad de roca, influyen directamente en el uso efectivo del concreto lanzado en labores subterráneas de la mina Consorcio Minero Horizonte. Se espera que, a mayor valor del RMR (mejor calidad de roca), menor sea la necesidad del sostenimiento y viceversa.
- b) El diseño del sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas depende de la calidad de la roca, lo que implica ajustes en parámetros tales como el espesor de aplicación, uso o no de la malla de refuerzo, uso de pernos swellex, su distanciamiento y las proporciones de los materiales, con el fin de garantizar la estabilidad del macizo rocoso.
- c) La selección del tipo de sostenimiento con concreto lanzado se ve determinada por las características geomecánicas de la roca y las características de las labores subterráneas. Se plantea que, a menor calidad o mayor inestabilidad de la roca, se incrementa la necesidad de aplicar concreto lanzado como método principal de sostenimiento.

2.6 Variables

Tabla 1

Variables de investigación

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN	COMENTARIOS
Calidad de la roca en la mina Consortio Minero Horizonte – La Libertad - 2024	Dependiente	Estudia las características físicas y mecánicas de la roca, así como las irregularidades y grietas que se encuentran. Esta prueba ayuda a identificar el tipo de refuerzo requerido para asegurar la firmeza de las excavaciones y evitar incidentes.	Evaluación geomecánica del macizo rocoso	Estimación del RMR (Rock Mass Rating)	Resistencia de la roca intacta a Compresión Simple	Razón	Se obtendrá mediante ensayos de compresión simple.
					RQD (Rock Quality Designation)	Razón	Se calcula con la Sgte. formula: $RQD=100 \times e^{(-0.1\lambda) \times (0.1\lambda + 1)}$
					Espaciamiento de las discontinuidades	Razón	Es recopilado en campo con el apoyo de un distanciómetro.
					Estado o condición de las juntas	Razón	Se mide mediante la evaluación de cinco características clave: Persistencia, apertura, rugosidad, relleno y meteorización:
					Presencia de agua	Razón	Se logra al cuantificar el flujo en una sección de 10 metros de túnel, comparando la presión del agua con la mayor tensión principal y observando el estado general del área.
					Orientación de las discontinuidades	Razón	Se mide con el apoyo de una brújula (buzamientos)
					Estimación del RQD ((Rock Quality Designation)	Razón	Es la cantidad de fracturamiento mayores o iguales a 10cm que se encuentra en un taladro
					Longitud de testigos mayores a 10cm.	Razón	N.A.
					Longitud del taladro	Razón	
					RQD	Razón	$RQD = \frac{\sum(\text{Longitud de testigos} \geq 10\text{cm})}{\text{Longitud del taladro (cm)}} * 100\%$
					Nº de familia de discontinuidades (Jn)	Razón	Se mide con la sumatoria de familia de discontinuidades

Estimación del Q de Barton	Rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Razón	Se mide evaluando la resistencia a la fricción de las caras de la junta
	Alteración de las discontinuidades (Ja)	Razón	Se evalúa analizando el contenido de relleno y el nivel de daño en los bordes de la unión.
	Presencia de agua (Jw)	Razón	Se analiza a través de observaciones indirectas, como la situación de las fracturas (existencia de minerales de relleno, arcillas), la capacidad de permeabilidad de las rocas y las condiciones de exudación en boreholes o excavaciones.
	Condiciones tensoriales (SRF)	Razón	Se mide estimando el cambio de estrés durante la excavación, que se correlaciona con la reducción de la resistencia de la roca y puede variar de 50 a 400
Estimación GSI (Geological Strength Index)	Estructura Geológica	Ordinal	Según la cantidad de fracturamiento de la roca.
	Condición superficial de la roca	Ordinal	Cantidad de golpes con picota que requiere la roca para romperse.
Ensayo de laboratorio de mecánica de rocas	Densidad (gr/cm3)	Razón	La densidad se calcula utilizando la fórmula fundamental: Densidad = Masa / Volumen.
	Resistencia a la compresión Simple (Mpa)	Razón	Se determina a través de una prueba en un laboratorio y se consigue al dividir la carga máxima que un material es capaz de aguantar entre el área de su sección transversal original. La ecuación es: Resistencia a la Compresión (F)=Carga Máxima (P) /Área de la Sección Transversal (A)
	Cohesión (Mpa)	Razón	Se determina experimentalmente mediante ensayos de laboratorio. Se expresa en unidades de presión. Los métodos principales para evaluar la cohesión son la prueba de corte directo y la prueba triaxial.
	Módulo de Young (Gpa)	Razón	Mide la rigidez de un material. Se determina experimentalmente, comúnmente mediante un ensayo de tracción o compresión uniaxial en el

					laboratorio. Se define por la Ley de Hooke en la región elástica: E=Tensión(σ) / Deformación(ε).
			Parámetros del macizo rocoso con software phase 2	Factor de seguridad	Razón
					FS > 1: La estructura de roca se considera estable. Cuanto mayor sea el número, mayor es el margen de seguridad. FS = 1: La roca está en el punto de falla (equilibrio límite). FS < 1: La roca es inestable y se espera un movimiento o falla
Aplicación del concreto lanzado en la mina Consortio Minero Horizonte – La Libertad - 2024	Independiente	También conocido como shotcrete, se utiliza para la estabilización y revestimiento de túneles, galerías, y otras estructuras subterráneas. El diseño del concreto es crucial para la aplicación del shotcrete, para ello se realiza ensayos y pruebas del concreto, así como su correcta aplicación.	Espesor de concreto		Razón
			Diseño de sostenimiento	Numero de capas	Razón
				Cantidad de materiales para llegar a la resistencia de 400 kg/cm2	Razón
			Ensayo de compresión simple	Resistencia de concreto (kg/cm2)	Razón
			Ensayo con testigos diamantinos de concreto	Resistencia de concreto (kg/cm2)	Razón
			Ensayos de tenacidad	Absorción de energía (Joules)	Razón
			Presión de aire (Bar)		Razón
					Uso de calibradores de espesor de shotcrete. N.A. N.A. Se evalúa mediante una prueba de compresión destructiva efectuada en el laboratorio. El resultado se calcula al dividir la carga máxima que puede aguantar una muestra de concreto por el área de su sección transversal. Se mide a través de un ensayo de compresión destructivo realizado en el laboratorio. El resultado se obtiene al dividir la carga máxima que soporta una probeta de concreto entre el área de su sección transversal. Se mide la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. El objetivo es determinar la resistencia del material a una fractura repentina o a un impacto. Se mide con instrumentos específicos como el manómetro y el barómetro

s y mejorar la
estabilidad

Ensayos con paneles de concreto	Cantidad de fibras de acero (Kg/m ³)	Razón	La cantidad de fibras de acero (en kg) se pesa con precisión y se añade al camión mezclador en la planta de shotcrete, asegurando que se cumpla la dosificación
	Resistencia (Joules)	Razón	Los Joules representan una medida de energía, por lo tanto, indican la resistencia o la habilidad de un material para absorber energía antes de que se rompa.
	Rebote	Razón	Se mide como un porcentaje de la cantidad total de material proyectado.

Nota: La tabla muestra las variables de la presente investigación. Fuente: Propia

III. Marco teórico

3.1 Antecedentes Del Problema

3.1.1 Antecedentes Internacionales

Guevara (2017), en su investigación “Estudio dl Comportamiento en durabilidad del hormigón proyectado (Shotcrete), mediante ensayos de migración de cloruros” para la Universidad de Chile, su propósito primordial es el considerable incremento en el uso de hormigón proyectado, conocido también como shotcrete, lo que crea la necesidad de analizarlo en profundidad para optimizar su aplicación y, eventualmente, mejorar los materiales que lo componen y las técnicas de aplicación. Guevara indica en sus conclusiones que, tras llevar a cabo las pruebas y obtener los resultados pertinentes, se determina que el método de evaluación de migración de cloruros RCPT mostró resultados acordes con lo anticipado en el hormigón proyectado.

Reyes (2015), en su investigación “Comparación de alternativas de refuerzo para shotcrete: modelación numérica en base a elementos finitos”, Universidad De Chile. En su objetivo general “Actualmente el shotcrete es utilizado principalmente como elemento primario y secundario de sostenimiento y estabilización (sistema de fortificación) de suelo/roca en aplicaciones de la minería subterránea, túneles en obras civiles y taludes, de manera de controlar grietas, deformaciones y proveer resistencia.” Menciona en su conclusión: De acuerdo con los hallazgos de las evaluaciones, el sistema de refuerzo comienza a desempeñar una función más importante en la carga y la deformación del disco de Shotcrete reforzado al finalizar la etapa lineal. En las ilustraciones, es posible observar diferentes cargas remanentes y la energía absorbida, las cuales varían según el tipo de malla utilizada. La etapa inicial se fundamenta principalmente en las propiedades del shotcrete.

Zenon (2021), en su investigación “Evaluación de desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras en túneles mediante el ensayo de paneles” para la Universidad Nacional Autónoma de México tiene como propósito fundamental crear un vínculo entre el método de prueba estipulado en la norma europea UNE-EN 14488-5 y el enfoque señalado en la norma estadounidense ASTM C1550. Esto se lleva a cabo basándose en los resultados obtenidos mediante evaluaciones de flexión en paneles, que verifican la eficacia del hormigón proyectado con refuerzos de fibras metálicas, el cual se aplica como revestimiento en túneles. En su cierre, Zenón indica que el enfoque de esta investigación se dedicó a descubrir una conexión entre los resultados obtenidos en el análisis del rendimiento de una mezcla de hormigón proyectado que lleva fibras metálicas, empleado como revestimiento fundamental en la construcción de un túnel en un caso práctico. Esto se alcanzó a través de la implementación de dos métodos de evaluación de flexión en paneles que están normados por estándares internacionales.

Villarroel (2022), en su investigación “Sistema que permite monitorear, reconocer, marcar y registrar visualmente el espesor requerido durante la proyección de hormigón en túneles” para la Universidad de Chile, tiene como objetivo general sugerir un sistema que posibilite el seguimiento, la identificación, la señalización y el registro visual del grosor necesario por parte del pitonero y su equipo, mientras se lleva a cabo la labor de proyección de concreto en los túneles, fue uno de los objetivos de esta investigación. Es importante señalar que durante este proceso se consideraron aspectos de eficacia y coste. Por ende, se logró el objetivo de este proyecto, ya que se formuló una propuesta que es tanto rentable como efectiva, de acuerdo a las respuestas del diferencial semántico realizado con usuarios clave.

Barberena (2016), en su investigación “Conservación de esculturas de hormigón: efecto de consolidantes en pastas y morteros de cemento”, Universidad Complutense de

Madrid. En su objetivo general “diseñar una metodología para seleccionar el consolidante más idóneo para el tratamiento de esculturas de mortero de cemento u hormigón.”. Menciona en su conclusión: Los cuatro métodos elegidos y las seis combinaciones de estos han sido analizados usando técnicas espectroscópicas, tanto en su forma líquida como después de haber sido reticulados bajo diferentes condiciones de curado.

3.1.2 Antecedentes Nacionales

Huamán (2015), en su investigación “Optimización de shotcrete y disminución de costos en tajo morro solar de la compañía minera Argentum S.A.”, La Universidad Nacional del Centro del Perú tiene como objetivo optimizar el procedimiento de sostenimiento del shotcrete para incrementar la eficacia y reducir costos en el tajo Morro Solar, que se encuentra en la región de Alapampa. Se concluye que un análisis apropiado de los costos y la productividad facilita la adopción de decisiones más eficientes respecto al uso del shotcrete, teniendo en cuenta las características únicas de la veta Morro Solar.

Guzman (2008), en su investigación “Sostenimiento con shotcrete vía húmeda en la mina cobriza”, Universidad Ricardo Palma. En su objetivo general “Determinar el uso del shotcrete con fibras como un método seguro para el sostenimiento a corto plazo.”. Menciona en su conclusión N°8: de los hallazgos de las pruebas podemos deducir que no hay un modelo que determine cuál es más fuerte, esto se debe a que la resistencia del concreto bajo compresión puede depender de la manera en que se distribuye la fibra en la muestra.

Cabrera y Leonardo (2015), En su investigación “Gestión de calidad en el proceso de lanzado de shotcrete en túneles” para la Universidad Ricardo Palma con el fin de desarrollar una propuesta de Control de Calidad que mejore el método de

aplicación de Shotcrete en túneles, basándose en el manual del pmbok y su aplicación en proyectos futuros, se indica en el cierre que en el estudio se reconocieron los procesos de construcción para el Shotcrete en el soporte del túnel elegido como caso de análisis. Al examinar las diversas etapas del trabajo, se encontraron, a través de un estudio de causas, diversas deficiencias en el ciclo de trabajo, lo que llevó a demoras en los plazos y un aumento en los gastos.

Camarena (2016), en su investigación titulada “Optimización del sostenimiento con shotcrete vía húmeda con fines de minimizar costos y mejorar la producción de lanzado de la E.E. Robocon S.A.C. en la mina San Cristóbal - Cía Minera Volcan S.A.A” Para la Universidad Nacional del Centro del Perú. Su objetivo es optimizar el procedimiento de uso de shotcrete por medio del método húmedo, regulando la efectividad del rebote de las fibras y la composición de la mezcla, con el fin de alcanzar un rendimiento estándar en la producción total de shotcrete y reducir los gastos operativos. Camarena indica en su conclusión que se logró controlar y disminuir notablemente el porcentaje de rebote de fibras durante la aplicación de shotcrete mediante la adecuada aplicación de las técnicas de proyección y el uso exclusivo de una mezcla especialmente diseñada, lo que a su vez resultó en una baja en los costos por cada metro cúbico de shotcrete.

Vizcarra (2014), en su investigación “Análisis y aplicación del shotcrete para lograr continuidad y velocidad en el sostenimiento unidad operativa Chipmo Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.”, Universidad Nacional de San Agustín De Arequipa. En su objetivo general “Analizar y aplicar el sistema de sostenimiento con concreto lanzado como una alternativa viable de sostenimiento en las distintas labores subterráneas de la mina.”. Menciona en su conclusión N°2: Las variaciones entre las características del concreto en estado fresco y el concreto ya curado son especialmente

notables en el concreto proyectado conocido como "shotcrete". Esta situación reduce la calidad del shotcrete producido mediante el proceso húmedo, en comparación con el método seco, que conserva esas propiedades por un tiempo más prolongado.

3.1.3 Antecedentes Regionales y Locales

Muñoz (2019), en su investigación titulada “Propuesta de mejoramiento en el sistema de sostenimiento mediante shotcrete vía húmeda en sección cuerpos zona alta en la Compañía Minera Casapalca – Huarochiri – Lima” El propósito de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco es identificar los beneficios del shotcrete húmedo como técnica de soporte en actividades mineras en la zona alta de cuerpos de la Compañía Minera Casapalca. Muñoz indica en sus conclusiones que el uso de shotcrete húmedo favorecerá una mejor implementación de la mezcla adecuada en formaciones rocosas de calidad variable, con un RMR de entre 0 y 60, para trabajos permanentes en la sección de cuerpos de dicha compañía. Esto se debe a un proceso altamente dinámico, facilitado por el empleo del equipo robotizado spm 4210 wetkret. asimismo, se incrementó notablemente la aplicación de metros cúbicos de shotcrete gracias a la planta dosificadora cifamoove 30 y al equipo de transporte mixkret 4, logrando mayor adaptabilidad, dado que la movilidad de estos equipos es autónoma y no depende de maquinaria adicional para su desplazamiento. De esta manera, se demuestra que es una opción más eficiente y beneficiosa para el soporte de operaciones subterráneas en la sección de cuerpos en la Compañía Minera Casapalca.

Carpio (2021), en su investigación titulada “Selección de fibras y diseño para shotcrete en la construcción del by pass del nivel 4540 en la U.P. Tambomayo, Arequipa”, la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco tiene como objetivo principal determinar el costo por unidad del shotcrete utilizando la fibra correcta que satisfaga las necesidades geomecánicas del By Pass en el nivel 4540 de la

U. P Tambomayo – Arequipa. En su conclusión, menciona que se definió la mezcla de shotcrete con fibra metálica de 20 kg y otra con fibra sintética de 4 kg, para evaluar la resistencia a las 4 horas posteriores a su aplicación.

Baca y Vela (2019), en su investigación “Evaluación de las propiedades mecánicas de un concreto autocompactante adicionando fibras sintéticas sikacem®-1 fiber – cusco”, para la Universidad Andina del Cusco se propone como objetivo principal investigar las propiedades mecánicas de un concreto autocompactante, incorporando fibras Sikacem-1 Fiber en cantidades de 100 g y 200 g por cada saco de cemento. Según el estudio de Baca y Vela, las resistencias a la compresión logradas a los 28 días fueron 290. 76, 316. 26, 327. 71 y 340. 94 kg/cm² para el concreto de control y para las mezclas que contienen fibras en proporciones de 2, 3 y 4 kg/m³, respectivamente. Las resistencias a la tracción indirecta al pasar los 28 días resultaron en 30. 42, 34. 16, 34. 94 y 38. 55 kg/cm² para el concreto de control y para las mezclas que incluyen fibras en cantidades de 2, 3 y 4 kg/m³, respectivamente. Los resultados de resistencia a flexión al cumplir los 28 días fueron 56. 59, 60. 51, 53. 32 y 48. 12 kg/cm² para el concreto de referencia y para las versiones con adición de fibra de 2, 3 y 4 kg/m³, destacándose un aumento del 7% (en la mezcla que contiene 2 kg/m³ de fibra).

3.2 Bases teóricas

- **Sostenimiento en Túneles y Minería Subterránea**

Según Aquino (2018), el sostenimiento en minería subterránea es muy importante, ya que por la naturaleza del trabajo toda labor que se hace en el interior de la mina se realiza en espacios vacíos, inestabilizados producto de la rotura de la roca o mineral extraído, para lograr que tenga nuevamente estable la zona y en condiciones, la zona debe de redistribuir

sus fuerzas, para ello es necesario apoyar inmediatamente con el refuerzo o soporte adecuado, considerando el tipo de roca, fallos con relleno, fallos abiertos.

- **Labores subterráneas**

Son todas las excavaciones, obras y estructuras internas que permiten acceder, explotar, transportar y ventilar el mineral bajo tierra.

- **Labores de avance**

Tienen el fin de ingresar a las labores de explotación, puede ser las rampas, cruceros y chimeneas, en la mayoría de casos estas sirven para que se pueda transportar el mineral a la superficie mediante diferentes métodos de transporte.

- **Labores de explotación**

Las labores de explotación son las utilizadas para recoger el mineral, en este punto están ubicadas las vetas o las bolsas de mineral, las cuales mediante un proceso de perforación, voladura y sostenimiento son extraídas a superficie por las labores de avance.

- **Sostenimiento de soporte**

Según Sánchez (2013), son los componentes de soporte que están en contacto con la piedra, entre ellos se incluyen los marcos de madera, las mallas, hilos, cintas de acero, mezcla lanzada simple y con refuerzos de fibras, estructuras de acero, gatos, material de relleno y otras técnicas para estabilizar la masa de roca.

- **Sostenimiento de Refuerzo**

Según Sánchez (2013), son componentes de soporte vinculados con los anclajes en rocas duras, y consisten en fijaciones mecánicas de varillas de acero corrugado o varillas en espiral fijadas con cemento o resina, Split Set y Swellex.

- **Sostenimiento en Tajos**

Según Gonzales (2020), durante las excavaciones, es crucial examinar el papel del soporte y del material de relleno, teniendo en cuenta la seguridad y la dilución. En las zonas donde es necesario que el equipo llegue para llevar a cabo su labor, como sucede en el método de minería de corte y relleno, el soporte es esencial para asegurar la protección y controlar la dilución.

- **Concreto Lanzado**

Según Peña (2022), el concreto proyectado es el término general para el concreto que incluye los siguientes componentes: cemento, áridos, agua, aditivos y refuerzos, que se aplican mediante un sistema neumático y se compactan rápidamente sobre una superficie. La técnica del concreto proyectado abarca tanto la mezcla seca como la mezcla húmeda.

- **Mezcla Seca**

Según Montoya (2017), Los componentes del hormigón seco proyectado o ligeramente húmedo son colocados en un contenedor que se agita continuamente. El aire comprimido se introduce a través de un tambor giratorio o un receptáculo de alimentación para transportar los materiales de manera uniforme hacia la manguera de salida. La mezcla de agua se añade en el inyector.

- **Mezcla Húmeda**

Según Chipana (2017), Los componentes del shotcrete junto con el agua se mezclan previamente antes de ser conducidos a una bomba de desplazamiento positivo, que posteriormente impulsa la mezcla mediante presión hacia la boquilla, donde se añade aire para proyectar el material sobre la roca. Normalmente se emplea cemento estándar tipo I Portland. El agua que se incorpora en la mezcla tiene que ser limpia y libre de sustancias que puedan dañar el concreto o el acero. Se recomienda el uso de agua potable; de lo contrario, será necesario realizar análisis del agua.

- **Aditivos**

Según Sika Perú (2025), Se utilizan aditivos para mejorar las propiedades del shotcrete. Dentro de ellos se hallan los acelerantes de fraguado, cuyo porcentaje no debe exceder el 2% del peso del cemento; igualmente, se incluyen los reductores de agua y los retardantes. Recientemente, se ha añadido la microsíllica como un nuevo componente en el cemento. Este material es una puzolana extremadamente fina que, cuando se emplea en cantidades que varían entre el 8 y el 15% del peso del cemento, tiene el potencial de incrementar la resistencia del shotcrete entre dos y tres veces.

- **Aditivo Acelerante de fragua (Sigurit L-30)**

El Sigurit es un aditivo diseñado para acelerar el fraguado y endurecimiento del concreto, diseñado especialmente para concreto proyectado (shotcrete). Se aplica cuando se necesita que el material adquiera resistencia en poco tiempo o fragüe rápidamente, especialmente en ambientes fríos o en obras donde se requiere rapidez de ejecución.

Su formulación no contiene cloruros, lo que lo hace ideal en estructuras con refuerzo de acero, evitando riesgos de corrosión.

Se trata de un acelerante alcalino líquido y viscoso, recomendado para túneles, minería, muros de contención, canales y otras obras de sostenimiento.

✓ **Funciones principales:**

- Reduce los periodos de fraguado inicial y final del shotcrete
- Incrementa la ganancia de resistencias mecánicas tempranas (por ejemplo, a las 24 horas).
- Permite un desencofrado más ágil o la reutilización rápida de moldes.
- Facilita las labores en climas fríos, donde el fraguado se retrasa.
- En algunos casos, mejora la adherencia del concreto proyectado (*shotcrete*).

✓ **Ventajas y beneficios:**

- Permite aplicar capas sucesivas rápidamente, incluso en superficies inclinadas o sobre cabeza.
- Disminuye el rebote durante la proyección del concreto, mejorando la eficiencia del shotcrete.
- Acelera el fraguado, alcanzando resistencias mecánicas tempranas en pocas horas.
- Al ser libre de cloruros, reduce el riesgo de corrosión en las armaduras de acero.

• **Aditivo super plastificante**

Un acelerante superplastificante es un aditivo químico multifuncional que combina dos efectos principales: acelerar el fraguado del concreto y mejorar su fluidez o trabajabilidad sin incrementar la proporción de agua en la mezcla. Está formulado para proyectos que exigen una colocación rápida y una alta resistencia inicial, manteniendo una consistencia uniforme y homogénea durante la aplicación.

✓ **Funciones principales:**

- Disminuye el periodo de fraguado inicial y acelera el las resistencias tempranas.
- Mejora la trabajabilidad del concreto sin necesidad de añadir más agua.
- Agiliza el desencofrado y la manipulación de piezas prefabricadas.
- Optimiza el rendimiento en climas fríos, donde el fraguado suele ralentizarse.
- Favorece la compactación y reduce la porosidad, incrementando la durabilidad del concreto

✓ **Ventajas y beneficios:**

- Proporciona altas resistencias iniciales en pocas horas.

- Reduce los tiempos de fraguado sin comprometer la fluidez.
- Ideal para elementos prefabricados, pavimentos o reparaciones rápidas.
- Permite obtener concretos más densos y con mejor acabado superficial.
- Es compatible con la mayoría de cementos Portland y mezclas con adiciones minerales.

- **Elementos de Refuerzo**

Según Sanchez (2017), entre los elementos de soporte, se encuentran principalmente las fibras de acero y la malla soldada eléctricamente que se adhiere de forma segura a la roca.

- **Lineamientos de operación del shotcrete en el apoyo de actividades subterráneas**

- ✓ La combinación de shotcrete y roca evita que cada uno se deforme por separado.
- ✓ Esta interacción genera un esfuerzo radial que actúa como confinamiento, controlando las deformaciones y, al aplicarse en los bordes de la excavación, contribuye a la creación de un arco de soporte.
- ✓ El shotcrete asegura el soporte de posibles bloques o cuñas de roca, cerrando las discontinuidades o fisuras causadas por la voladura.
- ✓ Previene cambios en los minerales inestables que se encuentran en la roca excavada debido a la erosión.

- **Aplicación del shotcrete**

Según Matamorros (2019), la excelencia del shotcrete final está sujeta a los métodos utilizados durante su colocación. Estos métodos abarcan la preparación del sustrato, las técnicas de proyección (control de la boquilla), la iluminación, la ventilación, la comunicación y la formación del equipo. No se debe aplicar el shotcrete directamente sobre rocas secas, polvorientas o heladas. Es fundamental que el área de trabajo sea

saturada con una mezcla de aire y agua para eliminar el material suelto y el polvo de la superficie donde se pondrá la primera capa de shotcrete. Si se van a colocar múltiples capas de shotcrete, es imprescindible limpiar la capa anterior antes de añadir la siguiente para asegurar una adecuada adherencia. La persona que maneje la boquilla deberá proceder de la siguiente manera:

Figura 5

Rociado de aire y agua en la superficie antes de aplicar el shotcrete



Nota: En la imagen se ilustra el uso de una mezcla de aire y agua para eliminar las piedras sueltas y el polvo de la área que recibirá la primera capa de shotcrete.. Fuente: Putzmeister (2025).

- ✓ La distancia óptima para el lanzamiento se sitúa entre 1 y 1.5 metros. Si se mantiene la boquilla más alejada de la roca, esto provocará una reducción en la velocidad del flujo de los materiales, lo que resultará en una compactación deficiente y un incremento en el rebote.

Figura 6

Lanzado del shotcrete a una distancia de 1 a 1.5m.



Nota: En la figura se muestra el correcto distanciamiento del lanzado del shotcrete: Hormigón al día (2025).

- ✓ En relación con el ángulo de lanzamiento, como norma general, la boquilla tiene que estar orientada en un ángulo recto respecto a la superficie de la roca. El ángulo de lanzamiento no puede ser inferior a 45 grados.
- ✓ Para lograr una distribución uniforme del shotcrete, es necesario apuntar la boquilla en un ángulo recto respecto a la superficie de la roca y girarla de manera constante en movimientos circulares pequeños.

Figura 7

Lanzado del shotcrete a una distancia de manera perpendicular y en pequeños círculos.



Nota: En la figura se muestra el correcto distanciamiento del lanzado del shotcrete de manera perpendicular a la superficie: MTI Rental (2025).

- ✓ Cuando se aplica el shotcrete en muros, el proceso debe comenzar desde la parte baja. La capa inicial de shotcrete debe, en lo posible, cubrir de manera total los refuerzos. Al aplicar el shotcrete desde abajo, garantizamos que no se forme rebote sobre la roca. Este método previene que más adelante se produzca el problema del shotcrete “falso”.
- ✓ Al aplicar shotcrete en refuerzos como varillas o mallas, es esencial que estos queden totalmente cubiertos por el concreto o mortero. Para conseguir esto, es importante dirigir la boquilla en ángulo recto con respecto a la superficie o ligeramente inclinada hacia ella, lo que favorecerá un sellado efectivo y disminuirá el riesgo de rebote.
- ✓ El mortero o concreto debe fluir de la boquilla de manera constante y continua. Si hay interrupciones en el flujo, el operador debe ajustar la dirección hacia la zona de recepción hasta que el flujo se restablezca a su estado normal.

- ✓ Un profesional entrenado tiene la capacidad de crear a mano un concreto proyectado de buena calidad, siempre que el área de trabajo cuente con la iluminación y ventilación apropiadas.
- ✓ Cuando se aplica shotcrete sobre roca que presenta juntas bien definidas y que conserve agua, es esencial proporcionar drenaje a través de la capa de shotcrete para aliviar las altas presiones del agua. Para ello, se utilizan taladros de drenaje con tubos de plástico.

- **Rebote**

Según Putzmesiter (2025), para la combinación en seco, la forma más efectiva de minimizar el rebote implica disminuir la presión de aire, utilizar una mayor cantidad de partículas finas, humedecer previamente la superficie y aplicar con una consistencia regular. Una de las ventajas más significativas de la mezcla húmeda es su reducido nivel de rebote. El rebote se ve influenciado por la consistencia del concreto, el uso de aceleradores, las técnicas de aplicación y la clasificación de los agregados.

- **Espesor de la Aplicación**

Según Soto (2022), siempre que sea factible, el shotcrete debe ser aplicado en una sola capa que alcance su grosor total de diseño.

- **Curado**

Según Chávez (2021), de manera similar al concreto, el shotcrete requiere ser curado de forma que se alcance su máxima resistencia y durabilidad. La forma más eficaz de curarlo es mantenerlo constantemente húmedo durante una semana, utilizando agua para este propósito.

- **Presión del Aire**

La fuerza del aire durante el funcionamiento se refiere al empuje que mueve el material de la máquina hacia la manguera. Una sugerencia común es que la presión de operación no baje de 175 Kpa (26 psi) al utilizar una manguera que mida 30 metros o

menos. Esta presión debe incrementarse en 35 Kpa (5 psi) por cada 15 metros extra de manguera, así como en 35 Kpa (5 psi) por cada 8 metros adicionales por encima del equipo.

- **Control de Calidad**

Según Llerena (2019), El shotcrete es una sustancia que requiere un cuidado meticuloso, desde su concepción hasta su uso. Se percibe más como una expresión artística que como una disciplina científica. Por lo tanto, es esencial establecer protocolos de control de calidad que aseguren un resultado satisfactoriamente. Factores que afectan la calidad del shotcrete y que deben ser monitoreados incluyen: la planificación, los materiales, el equipo utilizado, el personal asignado, las técnicas empleadas, las verificaciones y los métodos de evaluación. Es fundamental verificar que las especificaciones de aire, presión y volumen del equipo sean las adecuadas, así como garantizar que la boquilla, el mezclador, la manguera y otros componentes sean mantenidos de manera apropiada, limpiados, calibrados y revisados de forma periódica. La supervisión de calidad durante la inspección requiere de personal cualificado para aplicar los procedimientos de control. Este equipo debe conocer todas las fases del proceso de shotcrete, con énfasis en las técnicas de aplicación, y debe monitorear constantemente los trabajos, además de encargarse de las pruebas sobre el terreno. Un componente clave en el control de calidad es la evaluación de las características físicas del shotcrete antes, durante y después de su implementación.

3.3 Definición de términos

- **Sostenimiento subterráneo**

Según Sonami (2016), en la actualidad se entiende por sostenimiento un conjunto de soportes que contribuyen a la consolidación de las obras en minería, mejorando así la estabilidad del macizo rocoso. Este también se refiere a los métodos

y materiales utilizados para optimizar la estabilidad y conservar la capacidad de soportar las cargas impuestas por las rocas cercanas al borde de las excavaciones subterráneas.

- **Soporte de rocas**

Según Tecnomin Data (2018), este término se refiere a un conjunto de componentes materiales y técnicas que se implementan durante la ejecución de trabajos subterráneos con el fin de corregir los desajustes en el macizo rocoso provocados por las excavaciones. Estos sistemas pueden ser divididos en dos categorías principales:

- **Soporte activo:** Se refiere al refuerzo de la roca, donde los elementos de sostenimiento forman parte esencial de la masa rocosa.

- ✓ Perno helicoidal
- ✓ Pernos hydrabolt.

- **Soporte pasivo:** En este caso, los elementos de sostenimiento están situados fuera de la roca y dependen de la movilidad interna de la roca que está en contacto con el área excavada.

- ✓ Shotcrete.
- ✓ Cimbras
- ✓ Cuadros de madera.

- **Sostenimiento con concreto lanzado (shotcrete)**

Según Enami (2019), el término Concreto Lanzado, o Shotcrete, se refiere a una mezcla “preparada” que consiste en cemento, agregados, fibras, agua y, de forma opcional, un aditivo superplastificante, ya sea mediante el método seco o húmedo. Esta mezcla es transportada a la zona que necesita refuerzo y es proyectada con aire comprimido a alta velocidad contra una superficie rocosa a través de una manguera.

Además, se incorpora un aditivo acelerante de fraguado que provoca un endurecimiento prácticamente instantáneo del concreto.

- **Sistemas de aplicación del shotcrete**

Según la página web “Hormigón al día” (2020), La utilización del Shotcrete se realiza mediante tres métodos de suministro de agua, que son: método de mezcla seca, método de mezcla semihúmeda y método de mezcla húmeda.

- a) Sistema de mezcla seca**

En primer lugar, el cemento se mezcla en seco en una planta situada en la parte superior, y luego se transporta a la mina usando camiones, que pueden ser de autoensamblaje o de carga trasera. Cuando se utiliza un camión de carga trasera, la mezcla se coloca en un alimentador o bien se puede verter manualmente con una palanca al llegar a la máquina de gunitado; desde este punto, se aplica sobre la roca mediante una manguera. Si la máquina de gunitado es del modelo rotor, la mezcla es empujada por ella a través de la manguera, que actúa como una rueda verticalmente distribuida con agujeros; la mezcla es proyectada gracias a la presión del aire comprimido hasta alcanzar una boquilla o pistola diseñada para ello, que incluye un distribuidor múltiple perforado, donde se atomiza el agua, se combina y se humedece el agregado; la mezcla húmeda es lanzada desde la boquilla sobre la superficie de trabajo. La incorporación del aditivo.

- b) Sistema de mezcla semi-húmeda**

Este enfoque de aplicación de Shotcrete o gunita se asemeja bastante al de mezcla en seco, con la única diferencia de que el agua se integra completamente con los agregados y el cemento cinco metros antes de llegar a la boquilla. En este sistema, se añade una pequeña cantidad de agua (entre 5 y 6 litros por bolsa) durante la mezcla del cemento con los agregados, con la intención de humedecer la mezcla

y evitar la creación de polvo. Este método ofrece el beneficio de minimizar el polvo de cemento en el ambiente y asegura una mezcla más homogénea de arena en el concreto o mortero; sin embargo, presenta la desventaja de complicar la regulación de la consistencia de la mezcla, dependiendo de la distancia y el ángulo de aplicación, lo que puede generar mayor desperdicio. En esta segunda situación, si la mezcla no se aplica en el mismo turno en que se elaboró la mezcla inicial con agua, existe el peligro de que se endurezca y fragüe, lo que podría provocar daños en el equipo y pérdida de material.

c) Sistema de mezcla húmeda

El Shotcrete posee rasgos particulares que se manifiestan en su método de aplicación. El tipo de Gunita o Shotcrete de mezcla húmeda destaca por estas cualidades. Este procedimiento consiste en combinar el cemento, los agregados y el agua previamente en una planta de mezclado o en un camión, que luego suministra a la Gunitadora; con este proceso, no se puede modificar la cantidad de agua en función de la distancia o el ángulo de aplicación, además de que limita el control sobre la dosificación de aditivos acelerantes. Por esta razón, al ser utilizada en las paredes y techos de las galerías, se produce un alto volumen de desechos.

• Requerimientos de equipos

Según Martínez (2016), el ámbito de la excavación subterránea se distingue por su alto nivel de peligro, a pesar de contar con diversas opciones técnicas. Para alcanzar los estándares de calidad y eficacia necesarios, es esencial contar con maquinaria, productos y servicios que sean confiables y de gran calidad. A continuación, presentaremos una descripción general del equipo que requerimos. La ALIVA 252 es una máquina resistente para la proyección de concreto y/o mortero en seco y en condiciones semihúmedas, equipada con un rotor de doble eje. Su diseño compacto y alta movilidad la hacen

adecuada para trabajar en áreas reducidas, como en túneles. Esta máquina cuenta con un sistema de ejes robusto que permite proyectar concreto en métodos de vía seca, mantiene un porcentaje de transporte del 100%, y si el motor opera a 60 Hz, su capacidad de transporte aumenta un 20%. Su consumo total de aire para el transporte, sumado al del motor (Nm³/min), alcanza un total de 35 CFM.

Ventajas de la ALIVA 252

- Diseño compacto y resistente: su estructura sólida permite operar eficazmente en espacios reducidos, como minas, túneles y galerías.
- Buena capacidad de salida en relación con su tamaño: alcanza aproximadamente entre 5 y 11 m³/h, dependiendo del rotor empleado.
- Adecuado para transporte a larga distancia: posibilita el desplazamiento de mezcla seca a grandes recorridos horizontales y verticales, ideal para aplicaciones subterráneas.
- Mantenimiento sencillo: el fácil acceso a las piezas de desgaste facilita las labores de inspección y reemplazo.
- Menor complejidad operativa: al estar diseñado para el proceso de vía seca, requiere menos componentes de bombeo que los sistemas de mezcla húmeda.
- Disponibilidad en versiones eléctrica y neumática: ofrece flexibilidad para adaptarse a la fuente de energía disponible en el sitio de trabajo.

Desventajas de la ALIVA 252

- Requiere control riguroso de la mezcla: el uso de material seco demanda un diseño adecuado de la mezcla y un manejo cuidadoso para evitar rebote, segregación o taponamientos.

- Dependencia del aire comprimido: las versiones neumáticas necesitan un compresor de aire, lo que incrementa el consumo energético y los costos operativos.
- Peso considerable: aunque es compacto, su masa (aprox. 760–800 kg) exige espacio y medios adecuados para instalación y mantenimiento.
- Capacidad teórica idealizada: los valores de rendimiento indicados en las fichas técnicas se obtienen bajo condiciones óptimas que pueden diferir de la operación real.
- Necesidad de personal especializado: la proyección requiere operarios capacitados (por ejemplo, en el manejo del nozzle) para garantizar una aplicación uniforme y segura.
- Limitaciones frente a mezcla húmeda: si se intenta usar con concreto húmedo, podrían presentarse ajustes significativos o un desgaste prematuro, ya que el modelo está diseñado exclusivamente para mezcla seca.

Figura 8

Aliva 252



Nota: En la figura se muestra el equipo Aliva empleado para la mezcla y proyectado de shotcrete. Fuente: Maquina para hormigón proyectado Aliva 252, Technical data sheet, (2005).

Los dispositivos de proyección, conocidos como máquinas, son empleados para la colocación de grandes volúmenes de Shotcrete, especialmente en obras subterráneas como túneles y galerías, así como en la proyección de chimeneas y taludes. Esta tecnología automatizada y mecánica permite la aplicación de Shotcrete en formatos húmedos o secos, favoreciendo las condiciones laborales y generando un entorno ideal para los trabajadores que manejan la boquilla.

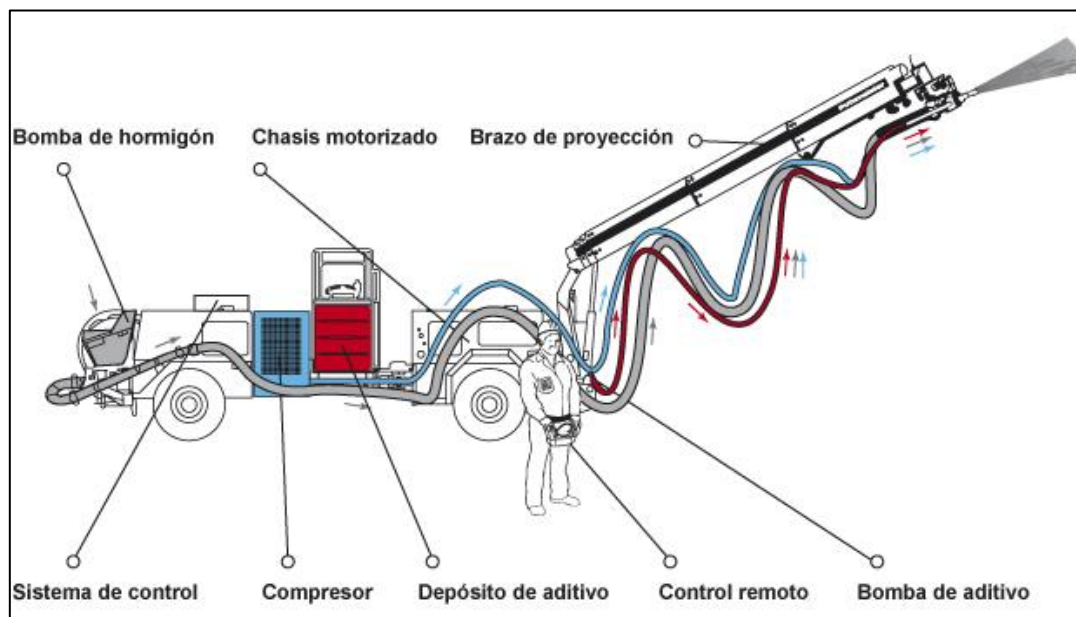
Ventajas de los brazos de proyección (robots)

- Alta productividad:
- Precisión y uniformidad
- Seguridad del personal
- Versatilidad de movimiento
- Reducción de fatiga operativa
- Integración con sistemas automáticos de control

Desventajas de los brazos de proyección (robots)

- Alto costo inicial:
- Requiere personal especializado:
- Mantenimiento complejo:
- Limitaciones de espacio:
- Dependencia de energía y suministro continuo de material:
- Rigidez frente a cambios imprevistos:

Figura 9
Equipo robotizado de shotcrete



Nota: En la figura se observa un equipo robotizado que comúnmente se usa en minería subterránea. Fuente: Putzmeiste.

Los dispositivos de proyección están generalmente formados por los próximos componentes:

- Conjunto de lanza con boquilla.
- Articulación mecánica.
- Mando a distancia.
- Sistema de control.
- Base rotativa o conector – panel para diversas variantes de instalación.

Figura 10

Equipo de lanzado automático



Nota: En la figura se observa un robot lanzando shotcrete al techo de una labor subterránea. Fuente: Maclean Camión Lanzador de Concreto SS5 (2020).

- **Características del shotcrete**

Según el Instituto Tecnológico De Villahermosa (2020), el concreto común, también conocido como convencional, se elabora mezclando tres elementos fundamentales: cemento, agua y agregados. A esta mezcla se le añade un cuarto elemento, generalmente llamado aditivo, en las cantidades apropiadas para conseguir características específicas, sobre todo la resistencia.

Ventajas del shotcrete

- a) La facilidad con la que se puede aplicar mientras todavía conserva una textura plástica.
- b) Su alta resistencia a la compresión, que lo hace ideal para soportes estructurales.
- c) Su notable resistencia al fuego y a la invasión de agua.
- d) Costo reducido.

Desventajas del shotcrete

- a) A menudo, el shotcrete debe ser preparado en entornos donde exista un control total de su elaboración. De lo contrario, la calidad del producto puede verse afectada.
- b) El shotcrete presenta una baja resistencia a la tracción, lo que complica su utilización en elementos estructurales que enfrentan esfuerzos de tracción constantes.

Retos técnicos del shotcrete

1. Formulación de la mezcla

- Es fundamental diseñar una mezcla que combine buena trabajabilidad para la proyección con resistencia y adherencia adecuadas.
- En mezclas secas, es importante controlar la humedad de cemento y agregados para minimizar rebote y generación de polvo.
- En mezclas húmedas, se debe mantener la consistencia correcta, evitando segregación o exceso de agua que comprometa la resistencia.
- Los aditivos (acelerantes, plastificantes, fibras, retardantes) deben ajustarse según la temperatura y las condiciones de la obra.

2. Control del rebote

- El material proyectado puede desprenderse de la superficie, especialmente si la mezcla es seca o contiene agregados grandes.
- Es necesario regular la presión, la distancia, el ángulo de la boquilla y la composición de la mezcla para minimizar pérdidas.

3. Adherencia y fraguado

- Se debe asegurar que el shotcrete se adhiera correctamente a superficies verticales o sobre cabeza sin desprenderse.
- Controlar la velocidad de fraguado es clave: debe ser suficiente para permitir la aplicación y modelado, pero evitar que colapse la mezcla fresca.
- Se pueden usar acelerantes o fibras para mejorar la adherencia y disminuir la aparición de fisuras.

4. Uniformidad y control de espesor

- Mantener un espesor constante en muros, túneles o taludes requiere técnica precisa o sistemas automatizados.
- Variaciones pueden afectar la resistencia estructural o generar defectos superficiales.

5. Gestión del polvo y seguridad

- En mezclas secas, el polvo de cemento y agregados puede ser irritante y representar riesgos respiratorios.
- Es imprescindible una ventilación adecuada, uso de equipo de protección personal y monitoreo ambiental.

6. Condiciones ambientales

- Temperaturas extremas afectan el fraguado y la hidratación del cemento, mientras que humedad y viento influyen en la pérdida de agua, fisuración y adherencia.
- En túneles o minas, la ventilación limitada y la presencia de agua aumentan la complejidad del trabajo.

7. Equipamiento y logística

- Bombas, mangueras y boquillas deben mantener presión constante y estar libres de obstrucciones.
- Transportar el concreto desde la planta hasta el punto de aplicación, sobre todo en túneles largos, puede ser complicado.
- Para sistemas robotizados o brazos de proyección, el mantenimiento y calibración son críticos para el progreso continuo de la obra.

8. Control de calidad y monitoreo

- Es necesario verificar resistencias tempranas y finales, densidad, espesor y uniformidad del shotcrete.
- Se debe llevar registro de la dosificación de aditivos y de la cantidad de mezcla proyectada.
- En proyectos críticos, como túneles o minería subterránea, la documentación rigurosa de calidad es obligatoria.

9. Fisuración y retracción

- La fisuración por retracción puede reducirse mediante fibras, control de humedad y curado adecuado.
- En estructuras expuestas, las grietas pueden afectar durabilidad y seguridad.

10. Adaptación a geometrías complejas

- Superficies curvas, techos o espacios confinados requieren técnicas especializadas o automatización con brazos robotizados.
- Mantener consistencia y cobertura en geometrías irregulares representa un reto técnico importante.

- **El cemento**

Clasificación del cemento Portland; De acuerdo a Cemex (2023), existen cinco variedades de cemento Portland que han sido estandarizadas siguiendo las normas de especificación ASTM para el cemento Portland (C150).

TIPO I: Este tipo de cemento está destinado a la construcción de obras de concreto en general, cuando no se indica la utilización de alguno de los otros cuatro tipos de cemento.

TIPO II: Este cemento se utiliza para obras de concreto en general y en proyectos que enfrentan una exposición moderada a sulfatos o donde se requiere un calor de hidratación moderado.

TIPO III: Es un cemento que ofrece alta resistencia inicial. El concreto elaborado con el tipo III alcanza la misma resistencia en tres días que el concreto de tipo I o II logra en 28 días.

TIPO IV: Este cemento se utiliza cuando se necesita un bajo calor de hidratación.

TIPO V: Este tipo de cemento está diseñado para ofrecer alta resistencia contra sulfatos. Usos comunes abarcan estructuras hidráulicas en contacto con aguas con alto contenido de álcalis y estructuras expuestas al agua de mar.

- **Agua en el shotcrete**

Según Tecnología del concreto (2016), El agua es un componente esencial en la elaboración del concreto, influyendo en la durabilidad, facilidad de uso y características del concreto ya seco. Necesidades que debe satisfacer

- El agua a utilizar para la mezcla de shotcrete debe ser pura y carecer de cantidades dañinas de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica y otras sustancias que puedan afectar negativamente al concreto o al acero.

- Si hay incertidumbres sobre la calidad del agua para la mezcla, será imprescindible llevar a cabo un análisis químico de la misma, con el fin de comparar los resultados con los límites máximos permitidos de las sustancias presentes en el agua que se empleará para la fabricación del concreto, que se detallan a continuación.

Tabla 2

Valores permisibles en sustancias disueltas del agua

SUSTANCIAS DISUELTAS	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE
Cloruros Sulfatos	300 ppm
Sulfatos	300 ppm
Sales de magnesio Sales solubles	150 ppm
Sales solubles	1500 ppm
PH	5.5 - 8
Sólidos en suspensión	1500 ppm
Materia orgánica	10 ppm

Nota: En la tabla se observan los valores máximos permisibles para el agua a utilizar para el shotcrete. Fuente: Putzmeiste.

- El agua es un componente esencial en la elaboración del concreto, influyendo en la durabilidad, facilidad de uso y características del concreto ya seco. Necesidades que debe satisfacer
- El agua a utilizar para la mezcla de shotcrete debe ser pura y carecer de cantidades dañinas de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica y otras sustancias que puedan afectar negativamente al concreto o al acero.
- Si hay incertidumbres sobre la calidad del agua para la mezcla, será imprescindible llevar a cabo un análisis químico de la misma, con el fin de comparar los resultados con los límites máximos permitidos de las sustancias presentes en el agua que se empleará para la fabricación del concreto, que se detallan a continuación.

Normativas y referencias principales del uso del agua en el shotcrete

- **ASTM C1602/C1602M** es la norma que establece los criterios para el agua usada en la producción de hormigón de cemento hidráulico. En términos simples, define los requisitos de calidad que debe cumplir el agua para asegurar que no afecte negativamente el fraguado, la resistencia ni la durabilidad del hormigón.

Puntos Clave de la normal ASTM C1602/C1602M

a) Objetivo:

Asegurar que el agua empleada en la fabricación de hormigón sea adecuada y no degrade su rendimiento.

b) Alcance:

Se aplica tanto a agua potable como a agua no potable, siempre que cumpla ciertos límites químicos. Incluye agua de origen doméstico, superficial o subterráneo (pozos, manantiales).

c) Requisitos del agua:

Debe estar libre de cantidades dañinas de:

- Álcalis (sodio, potasio), que pueden afectar el fraguado y la durabilidad.
- Sales (cloruros, sulfatos), que favorecen la corrosión del refuerzo.
- Materia orgánica, que retrasa el fraguado.
- Ácidos o bases fuera del rango de pH aceptable.

d) Pruebas y límites típicos:

- Cloruros: ≤ 250 mg/L
- Sulfatos: ≤ 1000 mg/L
- Sólidos disueltos totales: ≤ 3000 mg/L
- pH: generalmente entre 6 y 8.

e) Aceptación:

El agua puede ser evaluada mediante análisis químico o mediante experiencia previa comprobando su idoneidad para la mezcla de hormigón.

f) Uso práctico:

Ingenieros y fabricantes de hormigón emplean ASTM C1602 para garantizar que cualquier fuente de agua local no comprometa la calidad y durabilidad del hormigón.

- **Los agregados**

De acuerdo con Tecnología del concreto (2016), conocidos también como áridos, son materiales inertes que se combinan junto con los aglomerantes (como el cemento y la cal) y el agua para crear morteros y concreciones. La importancia de los agregados radica en que constituyen alrededor del 60% al 75% del volumen de una mezcla típica de concreto. Por esta razón, es fundamental que los agregados tengan alta resistencia, durabilidad y la capacidad de soportar diferentes elementos, además de que su superficie debe estar libre de contaminantes como barro, limo y materia orgánica que puedan afectar la adhesión con la pasta de cemento. Los agregados se clasifican en dos tipos:

- Agregados finos

- ✓ Arena fina

- ✓ Arena gruesa que pasa por la malla de 3/8" y retiene la malla 200

- Agregados gruesos

- ✓ Grava (canto rodado)

- ✓ Piedra chancada que retiene la malla número 4.

- **Problemas frecuentes en el uso de agua de mala calidad en el shotcrete**

Los problemas más frecuentes que se tiene cuando se usa agua de mala calidad se resumen en la tabla 3.

Tabla 3

Tabla resumen de los problemas ocasionados por el uso de mala calidad de agua en el shotcrete

Problema en Shotcrete	Causa relacionada con el agua	Efecto / Consecuencia
Reducción de resistencia y durabilidad	Altos sólidos disueltos, sales, contaminantes orgánicos	Disminuye la resistencia temprana y final, mayor porosidad, menor durabilidad
Corrosión del acero de refuerzo	Iones cloruro o sulfato	Fisuración, desprendimiento de recubrimiento, reducción de vida útil
Fraguado retrasado o irregular	Materia orgánica, pH fuera de rango	Dificultad de aplicación, mala adherencia, necesidad de repetir capas
Mala adherencia y rebote excesivo	Impurezas, exceso de sales	Mayor desperdicio de material, capas irregulares
Segregación o exudación (bleeding)	Contaminantes químicos, partículas finas, exceso de sales	Huecos, vacíos, menor densidad y resistencia desigual
Fisuración prematura	Fraguado desuniforme, contaminantes	Grietas superficiales, reducción de durabilidad, riesgo de penetración de agua y agresivos
Problemas de bombeo y proyección	Partículas finas, sólidos disueltos, viscosidad irregular	Dificultad en transporte por mangueras/nozzles, pérdida de productividad, mayor desgaste del equipo

Nota: En la tabla se observan los problemas ocasionados por el uso de mala calidad de agua en el shotcrete Fuente: Propia.

- **Generalidad de la operación de sostenimiento con shotcrete**

A continuación, se presentan las recomendaciones para garantizar una operación segura y eficiente:

1. Ventilar el área durante 30 minutos después de cada proceso, ya sea limpieza, desahogo mecánico, entre otros.
2. Cumplir con el (PETS) utilizando shotcrete por vía húmeda.
3. Efectuar una liberación manual y/o mecanizada apropiada del trabajo antes de comenzar el sostenimiento.

4. Verificar que se usen todos los Equipos de Protección Personal (EPP) completos y en condiciones óptimas, como protector facial, gafas de seguridad, respirador, lámpara, overol, botas de goma con punta de acero, guantes, entre otros.
5. La tarea debe ser supervisada por un personal que cuente con experiencia verificable y certificada.
6. Cerrar la zona de trabajo a asegurar para impedir la entrada de personas no autorizadas durante la operación de sostenimiento con shotcrete.
7. Comprobar que la cuerda de bloqueo del área de trabajo esté situada a la altura del panel eléctrico.
8. Instalar la iluminación adecuada antes de comenzar cualquier labor, de acuerdo con los estándares de sostenimiento, con el propósito de detectar fracturas, fallas o rocas sueltas en la zona que se va a asegurar.

Estas medidas ayudarán a mantener la seguridad y la efectividad en los procesos de sostenimiento.

- **Norma ASTM C39**

La norma ASTM C39 establece el método estándar para evaluar cuánta compresión puede soportar cilindros de concreto. Este método detalla cómo ejercer una presión axial sobre las muestras hasta que se rompan. La resistencia de un cilindro se determina al dividir la carga máxima alcanzada por el área de su sección transversal, lo que ayuda a calcular el valor de tensión conocido como resistencia a compresión.

Un cilindro de concreto es un molde que se fabrica, elabora y cura utilizando concreto nuevo en el lugar de construcción. También es posible fabricar cilindros mediante la extracción de núcleos de estructuras que ya están en pie; sin embargo, este enfoque debería ser una opción de último recurso, ya que no es el más adecuado.

Los resultados obtenidos de acuerdo con la ASTM C39 se utilizan como guía para verificar que el concreto cumple con las especificaciones y para llevar a cabo controles de calidad, abarcando aspectos como la dosificación, la mezcla y la colocación. Conforme al Código ACI 318-19(22), “Requisitos del Código de Construcción para Concreto Estructural y Comentarios (Reaprobado en 2022)”, la aceptación de la resistencia del concreto en el sitio se basa en el promedio de dos cilindros de 6” x 12” o tres cilindros de 4” x 8”.

- **Materiales, aditivos y equipos a emplear en el shotcrete**

- a) **Robot lanzador de concreto**

Dispositivo creado para impulsar mezcla de concreto ya preparada mediante una manguera de elevada presión, conocida como manguera de bomba. Este mecanismo incluye compuestos que aceleran el endurecimiento y aire comprimido en su aplicación final sobre el área a reforzar. Así, se forma una capa de concreto que otorga soporte y firmeza, fusionándose con la obra y optimizando sus características estructurales.

- a) **Equipo mixer**

Los equipos hormigueros de bajo perfil son utilizados para transportar concreto desde una planta dosificadora hasta áreas que requieren sostenimiento. En Consorcio Minero Horizonte, la capacidad de estos equipos varía, siendo de 3.0 m³ para los mixeres de la compañía y de 4.0 m³ para los socios estratégicos

- a) **Agregados o áridos**

Estos insumos constituyen alrededor del 70 al 75 por ciento del total del volumen del shotcrete, y son elegidos en una instalación ubicada a la orilla del río Parcoy.

b) Cemento portland

Es un aglomerante que se obtiene de la combinación de caliza y arcillas calcinadas. Al mezclarlo con agua, el cemento adquiere sus propiedades de adherencia y cohesión a través del proceso de hidratación.

c) Aditivo super plastificante

Este aditivo ofrece la capacidad de conferir plasticidad al concreto y puede retardar su fraguado durante un máximo de 4 horas. Además, aporta una serie de beneficios significativos, tales como:

- Aumenta la resistencia a la compresión tanto en las fases iniciales como en las finales.
- Reduce la proporción de agua en comparación con el cemento.
- Incrementa la cantidad de aire retenido, permitiendo que el asentamiento se extienda hasta 4 horas.
- Refuerza la adherencia al acero, mientras minimiza la oxidación y la separación de materiales.
- Ayuda a lograr resultados favorables durante el proceso de curado del concreto.

d) Aditivo acelerante de fragua

Es un compuesto químico que transforma y mejora las características del concreto. Su rasgo más notable es su capacidad para disminuir el tiempo necesario para el fraguado. Al utilizar este aditivo, se facilita el uso del shotcrete, lo que permite un aumento en el grosor de las capas aplicadas.

e) Fibras

La incorporación de alambres de acero o de fibras sintéticas en pequeñas piezas a la mezcla proporciona propiedades particulares que incrementan su rigidez y

flexibilidad. Estas fibras se utilizan para mejorar la resistencia a las imperfecciones en estructuras elaboradas con shotcrete.

- **Sostenimiento activo**

Los componentes de soporte actúan como un refuerzo al macizo rocoso, colaborando con él para mejorar su estabilidad. Desde el instante de su colocación, estos elementos permiten que la roca reforzada participe activamente en el soporte de la excavación. Dentro de este grupo se encuentran todos los sistemas de anclaje disponibles comercialmente, siendo principalmente los pernos y cables de anclaje.

- **Pernos de anclaje:** Brindan soporte inmediato a la roca tras su colocación. Existe una amplia variedad de tipos en función del mecanismo de anclaje (fricción, adherencia o expansión) y de su comportamiento frente a la deformación (rígidos o dinámicos). La elección del tipo de perno adecuado depende de las características estructurales del macizo rocoso, la calidad del material y el tipo de excavación a realizar.

- **Pernos Swellex**

Los pernos Swellex son dispositivos de sostenimiento ampliamente empleados en minería subterránea y obras de ingeniería civil, cuya función esencial es reforzar el macizo rocoso y mantener su estabilidad mediante un sistema de anclaje por expansión hidráulica. Este tipo de pernos fue desarrollado por Atlas Copco (actualmente Epiroc) como una solución moderna, eficiente y de rápida instalación, en comparación con los sistemas tradicionales de anclaje.

El principio de operación del perno Swellex consiste en la expansión de un tubo de acero plegado que se inserta en un taladro con un diámetro ligeramente superior al del perno. Una vez colocado, el tubo se expande internamente con agua a alta presión (entre 25 y 30 MPa), generando una adhesión completa y permanente entre el acero

del perno y la superficie de la roca. Este procedimiento produce un anclaje continuo por fricción y adherencia a lo largo de toda su longitud.

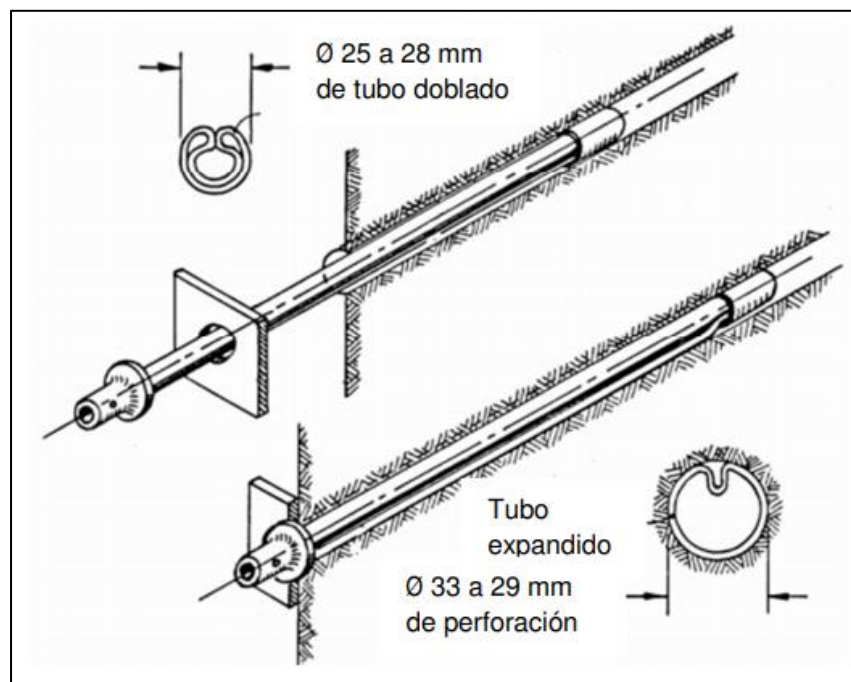
Entre las principales ventajas del sistema Swellex se destacan:

- ✓ Instalación sencilla, rápida y segura, sin requerir el uso de lechada ni resinas.
- ✓ Capacidad de carga inmediata tras su expansión.
- ✓ Adaptabilidad a diversos tipos de macizo rocoso, incluso en terrenos húmedos o fracturados.
- ✓ Capacidad de absorción de energía y comportamiento dúctil, lo que mejora su rendimiento en zonas con desplazamientos o relajación del terreno.

Los modelos más utilizados son los Swellex PM12, PM16 y PM24, con capacidades nominales aproximadas de 120 kN, 160 kN y 240 kN, respectivamente. La selección del estilo de anclaje está sujeta a las propiedades estructurales del macizo, el tamaño de la perforación, las circunstancias geotécnicas y el grado de refuerzo necesario.

Desde el punto de vista del diseño, los pernos Swellex se clasifican como elementos de anclaje pasivos, ya que no aplican una tensión previa al momento de su instalación. Su desempeño se basa en la fricción generada entre la superficie expandida del perno y las paredes del taladro, permitiendo que el sistema roca – perno trabaje conjuntamente para resistir las tensiones inducidas por la excavación.

Figura 11
Perno Swellex



Nota: Se evidencia en la figura un perno swellex por fricción, Fuente: (Laboratorio Oficial J. M. Madariaga (LOM), 2015)

✓ **Método Utilizando las Clasificaciones Geomecánicas**

Según Larrea (2018), son enfoques aproximados para la planificación del soporte basados en los sistemas de categorización geomecánica de la roca, tales como el índice Q y RMR. El método más común es el diseño de soporte utilizando el valor Q de la roca y la medida equivalente de la excavación, con la ayuda del ábaco de

$$\text{Barton. } D_e = \frac{\text{Span}}{\text{ESR}} \dots\dots\dots (\text{Ecuación N° 01})$$

Donde:

- Span: Tamaño clave de la cavidad, ya sea en altura o ancho (m).
- ESR: Excavation support ratio, es un coeficiente de seguridad que varía según el tipo de excavación.

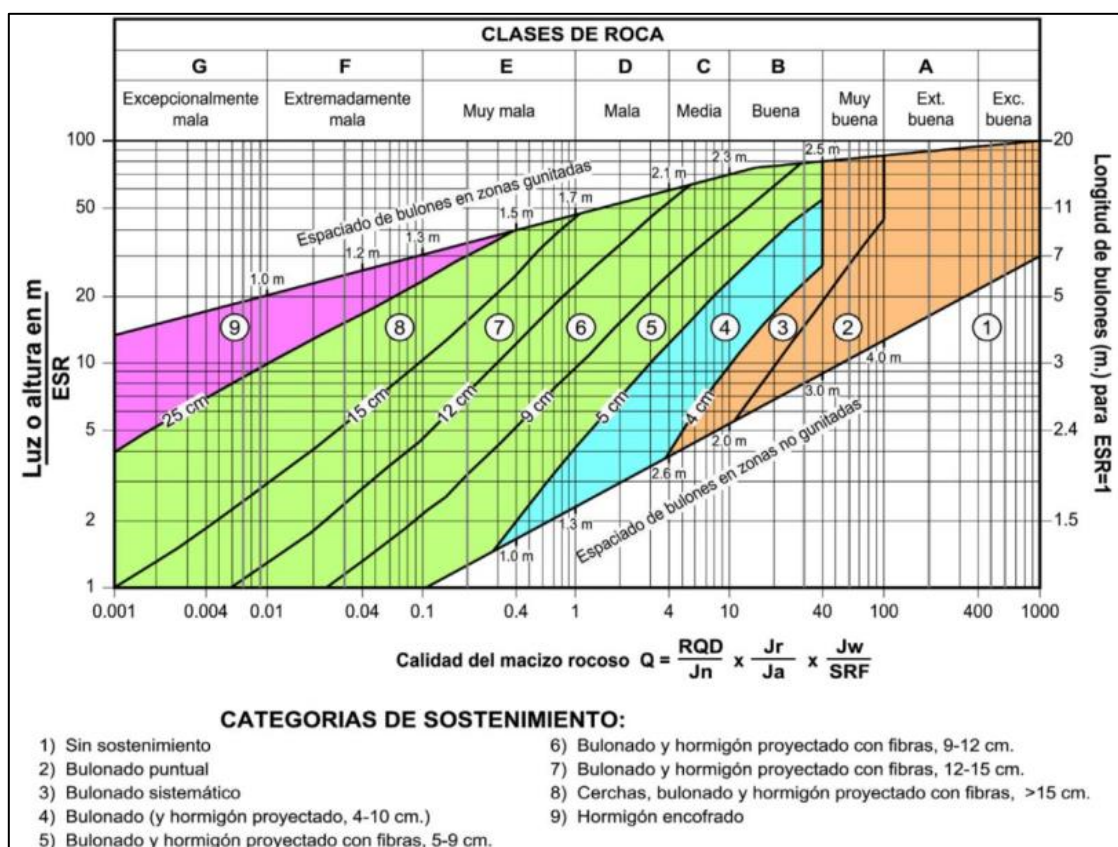
Tabla 4
Valores de ESR

TIPO	DESCRIPCION	ESR
A	Labores mineras de carácter temporal.	3-5
B	Pozos verticales	2- 2.5
C	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas	1.6
D	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras	1.3
E	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carretera y ferrocarril mayores	1
F	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones	0.8

Nota: La tabla muestra los valores asignados de ESR por tipo de labor o característica de trabajo. Fuente: (Barton y Grimstad, 1993)

Figura 12

Abaco de Barton.



Nota: En la imagen se observa el Abaco de Barton la cual nos ayuda a identificar el tipo de sostenimiento según el ESR y tipo de roca. Fuente: Barton y Grimstad, (1993).

Explicación de la figura 12 “El Abaco de Barton”

Eje X (horizontal): Valor de Q, calculada con la fórmula:

$$Q = (RQD / J_n) \times (J_r / J_a) \times (J_w / SRF) \dots\dots\dots (\text{Ecuación N° 02})$$

- RQD: Índice de calidad del macizo rocoso.
 - J_n: Número de discontinuidades.
 - J_r: Resistencia de las juntas.
 - J_a: Apertura de las juntas.
 - J_w: Condición del agua.
 - SRF: Factor de esfuerzo de rotura.
-
- ✓ **Eje Y izquierdo:** Luz o altura libre del túnel en metros (escala logarítmica).
 - ✓ **Eje Y derecho:** Longitud de bulones recomendada para ESR = 1 (en metros).
 - ✓ **Las zonas coloreadas** indican diferentes categorías de sostenimiento con números que corresponden a los tipos de sostenimiento indicados en la leyenda abajo del gráfico.
 - ✓ **Categorías de sostenimiento (según números):**
 - Sin soporte.
 - Anclaje puntual.
 - Anclaje sistemático.
 - Anclaje y concreto proyectado, 4-10 cm.
 - Anclaje y concreto proyectado con fibras, 5-9 cm.
 - Anclaje y concreto proyectado con fibras, 9-12 cm.
 - Anclaje y concreto proyectado con fibras, 12-15 cm.
 - Trusses, anclaje y concreto proyectado con fibras, más de 15 cm.
 - Concreto en forma.

Por ejemplo, si tienes un macizo rocoso con calidad $Q = 0.1$ y altura libre de 5 m, el gráfico indica que deberías aplicar sostenimiento tipo 7 (bulonado y hormigón proyectado con fibras, 12-15 cm).

- **Aspectos de diseño**

El siguiente listado incluye varios elementos que afectan el diseño de un sistema de soporte subterráneo. Objetivo de la excavación.

- Refuerzo temporal o duradero.
- Normativas de seguridad.
- Consideraciones prácticas.
- Formato de la excavación.
- Rutas de acceso disponibles.
- Métodos de extracción.
- Cercanía a excavaciones vecinas.
- Estado de las tensiones generales.
- Condiciones del material rocoso.
- Situación de aguas subterráneas.
- Posibles modos de fallo.
- Soporte necesario contra presión.
- Plazo para la implementación del soporte.
- Experiencia anterior.
- Gastos y disponibilidad.

- **Condiciones especiales**

- **Altas tensiones en el área**

Conforme a Osinergmin (2017), las presiones en la roca en su ubicación natural pueden ser evaluadas a través de mediciones de estrés en la misma. Las magnitudes, direcciones y proporciones de las tensiones primarias, junto a las características mecánicas del material rocoso, ayudan al ingeniero a estimar la probabilidad de que

se produzcan estallidos o problemas de desprendimiento durante la excavación. El comportamiento de la roca alrededor de una obra subterránea está, en gran medida, vinculado a las tensiones in situ. Cuando se lleva a cabo una excavación subterránea, las tensiones originales en el área se ven alteradas hasta aproximadamente la distancia de un "diámetro de la obra" desde los bordes. Generalmente, las tensiones verticales en la roca dependen de la altura del material que la cubre y de su densidad. En cambio, las tensiones horizontales pueden variar significativamente.

Estas podrían ser inducidas por actividad tectónica o concentradas de diversas maneras, logrando niveles comparables a la resistencia del material rocoso. Dependiendo de sus propiedades, la roca puede experimentar estallidos.

Los desprendimientos se refieren a fragmentos o grandes planchas de roca que se separan del bloque original debido a tensiones elevadas. El desprendimiento es un proceso moderado de caída de roca, mientras que un estallido de roca implica un colapso brusco. Para que un estallido ocurra, es necesario que las tensiones en la roca superen su resistencia.

Tras la excavación de un túnel subterráneo, las tensiones que se generan a su alrededor se redistribuyen gradualmente sobre áreas más amplias, reduciendo así la tensión máxima. La concentración de tensión que estaba inicialmente en la superficie se desplaza lejos de ese límite. En situaciones con roca débil, este reajuste sucede de manera casi instantánea tras la voladura, debido a la deformación del material. Sin embargo, en roca inelástica, densa y frágil con fracturas cercanas, hay mayor riesgo de estallido bajo altas tensiones.

En masas rocosas inelásticas, el reajuste transcurre más lentamente. Si las tensiones en este contexto superan la resistencia de la roca que está próxima a la excavación, pueden darse estallidos, generando una zona de roca fracturada. Esta

zona, sometida a altas tensiones, se ajusta a un nivel de equilibrio menor que la resistencia de la roca intacta.

- a) El peso de un sobrecargado de roca en un túnel profundo, que contiene granito frágil, genera movimientos semiplásticos en un objetivo débil de esquistos y mica abundante. Los estallidos de roca (en sombra) suceden en el túnel cercano a ese objetivo.
- b) Un dique de roca ígnea que se introduce de manera forzada en una dura cuarcita está asociado con tensiones residuales que facilitarán el estallido de roca en las paredes del túnel.
- c) Las acciones que han generado resistencia elástica en rocas ígneas duras son orientadas hacia la entrada del túnel para provocar explosiones de roca.

– **Voladura controlada:**

De acuerdo con Bejarano (2021), un paso fundamental para lograr un adecuado refuerzo en roca es reducir la fractura excesiva y utilizar un método de voladura controlada en trabajos subterráneos. Para evitar la fractura adicional, es vital que la dirección de las perforaciones sea elegida con precisión y que la desviación y la carga sean monitoreadas.

La voladura precisa implica hacer perforaciones, con varios taladros paralelos colocados cercanos a la parte final de la excavación. Se colocan explosivos de baja densidad en los taladros y se detonan conjuntamente, pero tras la explosión de los taladros de corte y otros principales. Este procedimiento también se conoce como "voladura suave".

La imagen muestra cómo varía la intensidad de los daños en la roca que rodea el túnel entre la voladura convencional y la controlada.

- **Efecto del sistema de soporte**

Según Osinergmin (2016), durante la construcción, la mayor parte de las excavaciones subterráneas están sostenidas. El comportamiento de la abertura y su sistema de soporte está influenciado por el momento y la manera en que se coloca el sostenimiento.

- **Evaluación de la estabilidad estructural**

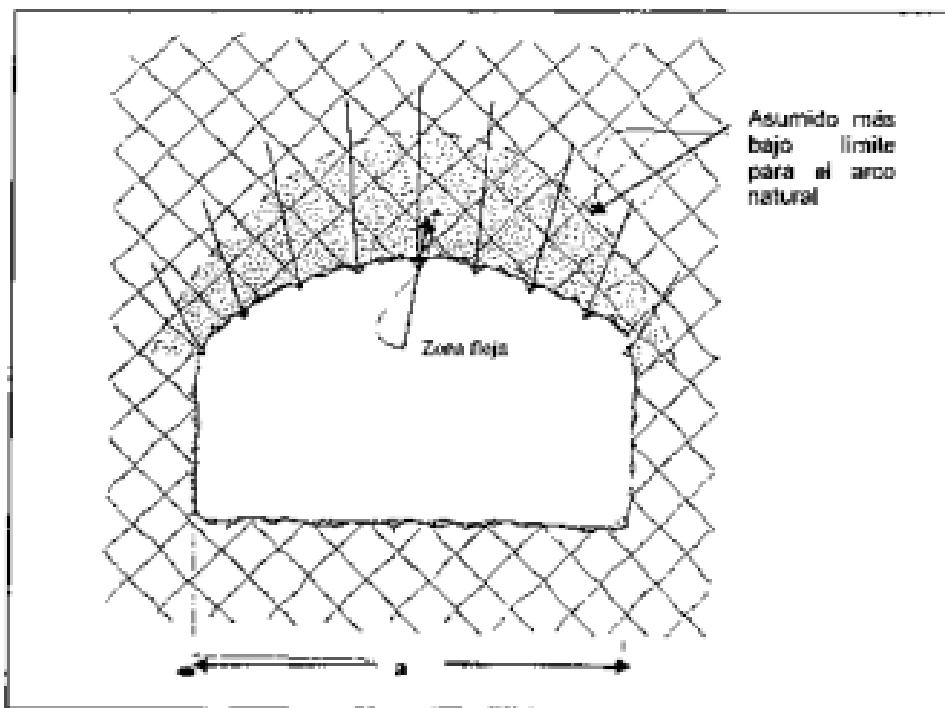
Osinergmin (2016) indica que, aunque la estabilidad de excavaciones subterráneas cercanas a la superficie suele estar controlada estructuralmente, especialmente en condiciones de roca dura, los análisis de tensión pueden ser fundamentales para evaluar la estabilidad de dichas excavaciones. Las áreas alrededor de la excavación que enfrentan tensiones bajas o disminuciones en la tensión por la baja resistencia en superficies de fallas, así como las tensiones que provocan inestabilidad en bloques de roca, son cruciales en el diseño y deben tenerse en cuenta.

- **El principio del arco de roca**

Conforme a Osinergmin (2016), Si se crea una cavidad con un techo arqueado en una masa de roca fracturada (roca en mosaico), se genera un arco natural a cierta profundidad en el interior de la roca, justo por encima del techo de la cavidad. La roca que compone este arco sufre principalmente compresión. La separación entre el techo y la base del arco natural cambia en función del tipo de suelo en el que se está trabajando y de las dimensiones de la cavidad; este fenómeno se denomina "el principio del desarrollo del arco natural". Para garantizar la estabilidad de este arco natural, es fundamental estabilizar la "Zona Floja" que se encuentra bajo el arco, así como las paredes de la cavidad. Esto se puede conseguir reforzando la roca utilizando anclajes, ya sean tensados o sin tensión.

Figura 13

Pernos de roca no tensionados anclados en la roca del arco natural más shotcrete



Nota: En la figura se observa la acción de colocación de pernos con shotcrete.

Fuente: Boletín de Ciencias de la Tierra, Medellín (2007).

- **Geomecánica**

De acuerdo con Taype (2021), se trata de la integración de diversas áreas del conocimiento, como la geología, la mecánica de rocas y la hidrogeología, que se dedica a examinar el macizo rocoso y su utilización para abordar problemas de construcción en entornos específicos, como en minas subterráneas, en la superficie, en túneles o en plantas generadoras de energía. Las funciones principales de la geomecánica incluyen:

- Establecer el tipo de soporte que debe ser instalado en la obra, lo que implica el análisis de los índices geomecánicos del macizo rocoso: índice Q, índice RMR, índice GSI.

- Determinar el periodo durante el cual la roca puede sostenerse por sí misma tras una explosión.
 - Identificar las aberturas máximas que el macizo rocoso puede resistir.
- Realizar investigaciones geomecánicas destinadas a optimizar o alterar los métodos de extracción de minerales.

- **El strength factor (FS)**

Es un parámetro de resistencia que indica cuán próximo está un estado de tensiones en la roca a su límite de falla por tracción.

Matemáticamente se define como:

$$\text{Strength Factor (FS)} = \frac{\text{Resistencia a la tracción de la roca } (\sigma_t)}{\text{Tensión principal máxima aplicada } (\sigma_1)} \dots\dots (\text{Ecuación N° 03})$$

- ✓ Si el factor es mayor que 1, la roca no ha fallado.
- ✓ Si el factor es igual a 1, la roca está al borde de la falla.
- ✓ Si el factor es menor que 1, la roca ya falló por tracción.

- **Clasificación geomecánica**

De acuerdo con Osinergmin (2016), la revisión geomecánica integral de la mina se realiza siguiendo las pautas de las clasificaciones geomecánicas reconocidas internacionalmente, lo que ayuda a determinar la calidad del macizo rocoso en un contexto específico y proporciona información necesaria para mejorar la zonificación geomecánica y desarrollar un diseño adecuado del soporte. El macizo rocoso de la Mina Parcoy se caracteriza principalmente por tener una calidad geomecánica deficiente, con la presencia de tensiones y agua subterránea, lo que hace que las clasificaciones de Barton y RMR sean efectivas. En esta investigación se examinarán las cinco clasificaciones más comunes en la actualidad:

- Deere (RQD)
- Bieniawsky (RMR del CSIR).
- Barton (NGI).
- N. A. T. M.
- GSI.

✓ **Clasificación de Deere (RQD)** En 1967, Deere introdujo un sistema para el diseño de sostenimientos basado en el RQD. Este parámetro se calcula mediante el porcentaje de trozos de testigo de 10 cm o más, que se obtienen de un sondeo y que permiten evaluar el nivel de fracturación del macizo rocoso.

$$RQD = \frac{\sum(\text{Longitud de testigos} \geq 10\text{cm})}{\text{Longitud del taladro (cm)}} * 100\% \quad \dots\dots\dots (\text{Ecuación N}^\circ 04)$$

Tabla 5

Rango de calidad RQD

RQD (%)	Calidad de la roca
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

Nota: La tabla muestra el rango de la calidad de roca según el RQD. Fuente: Propia.

Si no se dispone de testigos provenientes de perforaciones diamantinas, el valor del RQD puede estimarse utilizando la relación propuesta por Priest y Hudson, la cual se basa en el parámetro λ :

$$RQD = 100 \times e^{-0.1\lambda} \times (0.1\lambda + 1) \quad \dots\dots\dots (\text{Ecuación N}^\circ 05)$$

Clasificación de Barton (NGI) El sistema Q se fundamenta en una evaluación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso y se compone de la determinación del índice (Q) de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \dots\dots\dots (Ecuación N° 06)$$

RQD: Porcentaje de obtención del testigo de una perforación

J_n: Cantidad de familias de fracturas

J_r: Índice de rugosidad de las discontinuidades

J_a: Índice de alteración de las discontinuidades

J_w: Índice de disminución por contenido de agua en las discontinuidades

SRF: Parámetro que tiene en cuenta el estado de tensión en el macizo rocoso (Stress Reduction Factor = Factor de reducción por cargas o tensiones)

Los tres conjuntos creados con estos parámetros son:

RQD/J_n = Representa la configuración del macizo rocoso

J_n/J_a = Representa la rugosidad y propiedades de fricción de las paredes.

J_w/SRF = Representa el efecto del estado de tensión.

Tabla 6

Clasificación de los macizos rocosos según el índice Q.

VALORIZACIÓN Q	TIPO DE ROCA
0.001 - 0.01	Excepcionalmente mala
0.01 - 0.1	Extremadamente mala
0.1 - 1	Muy Mala
1 - 4.	Mala
4 - 10.	Regular
10 - 40.	Buena
40 - 100	Muy Buena
100 - 400	Extremadamente buena
400 - 1000	Excepcionalmente buena

Nota: En la tabla se muestra la valorización acorde al índice Q y el tipo de roca.

Fuente: Barton y Lund (1974).

Tabla 7*Valoración de (J_n).*

NUMERO DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	J_n	OBSERVACIONES
Roca masiva sin o con pocas discontinuidades	0.5 - 1.0	
Una familia de discontinuidades	2	
Una familia de discontinuidades y algunas otras aleatorias	3	
Dos familias de discontinuidades	4	3. Para intersecciones usar ($3 \times J_n$)
Dos familias de discontinuidades y algunas otras aleatorias	6	
Tres familias de discontinuidades	9	4. Para portales usar ($2 \times J_n$)
Tres familias de discontinuidades y algunas otras aleatorias	12	
Cuatro familias de discontinuidades, roca fracturada	15	
Roca triturada, suelos	20	

Nota: Parámetros de familias de discontinuidades. Fuente: (Barton, Lien, & Lunde, 1974)

Tabla 8*Evaluación del parámetro de textura de discontinuidades (Jr).*

RUGOSIDAD DE DISCONTINUIDADES	Jr	OBSERVACIONES
a) Interacción entre caras de las discontinuidades		
b) Contacto entre las caras con desplazamiento lateral menor de 10 cm al producirse el corte o cizalle.		
- Fracturas o juntas discontinuas	4	5. Si el espaciado entre la familia principal de discontinuidades es mayor de 3m se aumenta Jr en una unidad.
- Ásperas, irregulares u onduladas	3	
- Lisa ondulada	2	
- Espejo de falla, ondulada	1.5	
- Áspera o irregular, plana	1.5	
- Lisa plana	1	6. Jr = 0.5 para discontinuidades de superficies planas, lisas y espejo de fallas orientadas favorablemente.
- Espejo de falla, plana	0.5	
c) No existe contacto entre las caras al producirse el corte o cizalle		
- Zona con minerales arcillosos con espesor suficiente para evitar el contacto entre las caras de las discontinuidades	1	
- Arenas, gravas o zona fracturada con espesor suficiente y gruesa para impedir el contacto entre las caras de las discontinuidades	1	

Nota: En la tabla se presenta la evaluación de la textura de las discontinuidades.

Referencia: Barton y Lunde (1974).

Tabla 9*Valoración (Ja).*

ALTERACIÓN DE DISCONTINUIDADES	Ja	Ør	OBSERVACIONES
a) Contacto entre las caras de las discontinuidades.			
Junta sellada, dura, no blanda, relleno impermeable. Ejemplo: Cuarzo en las paredes sanas	0.75	25°-30°	7. Los valores de ángulo de fricción residual (Ør), se indican como una guía aproximada de los productos de la alteración si están presentes.
Caras no alteradas, solamente manchadas o con descoloramiento superficial.	1	25°-30°	
Caras ligeramente alteradas con minerales no blandos, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla	2	25°-30°	
Recubrimiento de limo o arena arcillosa, con pequeña porción de arcillosa no blanda	3	20°-25°	
Recubrimiento de minerales arcillosos blandos, de baja fricción, discontinuos, espesores de 1-2 mm.	4	8°-16°	
b) Contacto entre las caras con desplazamiento lateral menor de 10 cm al producirse el corte o cizalle.			
Partículas de arena, roca disgregada libre de arcillas.	4	25°-30°	
Fuertemente consolidado, relleno de minerales arcillosos no blandos, continuos, < 5 mm de espesor.	6	16°-24°	
Consolidación media a baja, relleno de minerales arcillosos blandos, continuos, < 5 mm de espesor.	8	12°-16°	
Relleno con arcillas expansivas (Montmorillonita), continuas < 5 mm de espesor. Depende del % de partículas de arcilla expansiva y la presencia de agua.	8 - 12	6°-12°	
c) No existe contacto entre las caras al producirse el corte o cizalle.			
Zonas o bandas de roca desintegrada y arcilla	8 - 12	6°-24°	
Zonas o bandas de arcilla limosa, arenas, pequeñas porciones de arcillas no blandas	5	6°-24°	
Zonas o capas gruesas y continuas de arcillas	13 - 20	6°-24°	

Nota: En la tabla se ilustra el valor de alteración de discontinuidades. Fuente: *Barton (1974)*.

Tabla 10*Valoración del parámetro presencia de agua (J_w).*

FLUJO DE AGUA	J_w	Presión agua (kg/cm ²)	OBSERVACIONES
Excavaciones secas, flujo mínimo.	1	< 1	8. Los valores con el signo (*) son solo valores estimados. Aumentar J_w de existir elementos de drenaje.
Flujo o presión moderada, lavado de relleno de fractura en forma ocasional	0.66	1 - 2.5	
Flujo o presión altos, en roca competente con fracturas sin relleno.	0.5	2.5 - 10	9. Las condiciones causadas por formaciones de hielo no se consideran.
Flujo o presión altos, considerable lavado de rellenos.	0.33*	2.5 - 10	
Flujo o presión excepcionalmente altos disminuyendo en el tiempo.	0.2 - 0.1*	> 10	
Flujo o presión excepcionalmente altos, sin disminución en el tiempo.	0.1 - 0.05*	> 10	

*Nota: En la tabla se ilustra el parámetro de presencia de agua. Fuente: (Barton 1974)***Tabla 11***Valoración del parámetro condiciones tensionales (SRF).*

CONDICIONES TENSIONALES	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	SRF	OBSERVACIONES
a) Zonas débiles que interceptan la excavación y pueden causar caídas de bloques. Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad).			10	10. Reducir los valores del SRF en un 25-50% si las zonas de rotura solo influyen, pero no interceptan a la excavación.
Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación < 50 m).			5	11. Para campos de tensiones muy anisotropos cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reducir el σ_c y σ_t a $0.6\sigma_c$ y $0.8\sigma_t$. Cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reducir el σ_c y σ_t a $0.6\sigma_c$ y $0.6\sigma_t$.
Solo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación > 50 m).			2.5	

Varias zonas de fractura en roca competente, libre de arcilla, roca suelta alrededor (cualquier profundidad).			7.5	Donde:
Solo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla, (profundidad de excavación < 50 m).			5	• σ_c : Resistencia a compresión simple
Solo una zona fracturada en roca competente, libre de arcilla, (profundidad de excavación > 50 m).			2.5	• σ_t : Resistencia a tracción
Discontinuidades abiertas sueltas, muy fracturadas, etc. (cualquier profundidad).			5	• σ_1 : Esfuerzo principal mayor
b) Rocas competentes con problemas tensionales				• σ_3 : Esfuerzo principal menor
Esfuerzo bajo, cerca de la superficie.	> 200	> 13	2.5	
Esfuerzo medio.	200 - 10	13 - 0.66	1	12. En los casos que el ancho del túnel sea inferior a la altura del mismo se sugiere aumentar el SRF de 2.5 a 5.
Esfuerzos altos, estructura muy compacta, (favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales).	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2	
Desprendimiento moderado de la roca masiva.	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10	
Desprendimiento intenso de la roca masiva.	< 2.5	< 0.16	10 - 20	
c) Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.				
Presión de flujo moderada			5 - 10	
Presión de Flujo Intensa			10 - 20	
d) Roca expansiva, actividad química expansiva dependiendo de la presencia de agua.				
Presión de expansión Moderada			5 - 10	
Presión de expansión Intensa			10 - 15	

Nota: En la tabla se muestra el SRF según la zonificación. Fuente: Barton y Lunde (1974)

✓ Clasificación RMR (Rock Mass Rating) de Bienawski

El sistema de clasificación geomecánica RMR, denominado también como clasificación de Bieniawski, fue introducido por el ingeniero Bieniawski en 1973, recibiendo modificaciones en 1976, 1979, 1984 y 1989. Este método permite clasificar las rocas en su

lugar natural y calcular el tiempo de mantenimiento y la longitud de un vano. Generalmente, se aplica en la edificación de túneles, taludes y fundamentos. Está compuesto por un índice de calidad RMR (Rock Mass Rating), que es independiente de la estructura, y un factor de ajuste.

Tabla 12

Sumatoria de puntuación RMR (Rock Mass Rating)

SISTEMA RMR (BIENIAWSKI) - PARÁMETROS PRINCIPALES		
Parámetro	Descripción / Ensayo	Puntuación Máxima
(1)	Resistencia del material intacto (ensayo carga puntual o compresión simple)	15
(2)	R.Q.D. (Rock Quality Designation)	20
(3)	Distancia entre las discontinuidades (Espaciamiento)	20
(4)	Condición de las discontinuidades	30
(5)	Agua subterránea	15
RMR TOTAL = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)		100

Nota: En la tabla se muestra la valorización de los 5 parámetros del RMR. Fuente: Propia.

Tabla 13

Sumatoria de puntuación RMR

CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ROCA SEGÚN EL RMR		
CLASE	CALIDAD DE ROCA	RMR
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Regular	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy Mala	0 – 20

Nota: En la tabla se muestra los rangos numéricos según la calidad de roca. Fuente: Propia.

Tabla 14

Cuadro de parámetros y valores de RMR

Parámetro		Rangos de Valores					
1. Resistencia	Carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para rangos bajos Mpa)	
	Comp. simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25	1-5 < 1
	Puntuación	15	12	7	4	2	1 0
2. Calidad Testigo / RQD	Rango de RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%	
	Puntuación	20	17	13	8	3	
3. Espaciamiento /	Espaciamiento de discontinuidades	> 2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm	
	Puntuación	20	15	10	8	5	
4. Condición	Descripción de superficie	Superficies muy ásperas, no continuas, sin separación, roca de pared no meteorizada	Superficies ligeramente ásperas, separación < 1 mm	Superficies ligeramente ásperas, separación < 1 mm	Superficies pulidas o con estrías	Relleno blando > 5 mm de espesor.	
	Puntuación	30	25	20	10	0	
5. Agua Subterránea	Caudal por 10m de túnel (l/m)	Inexistente (None)	< 10	10-25	25-125	> 125	
	Relación (Pr. agua) /(Esf. princ. mayor)	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	
	Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteando	Fluyendo	
Puntuación		15	10	7	4	0	

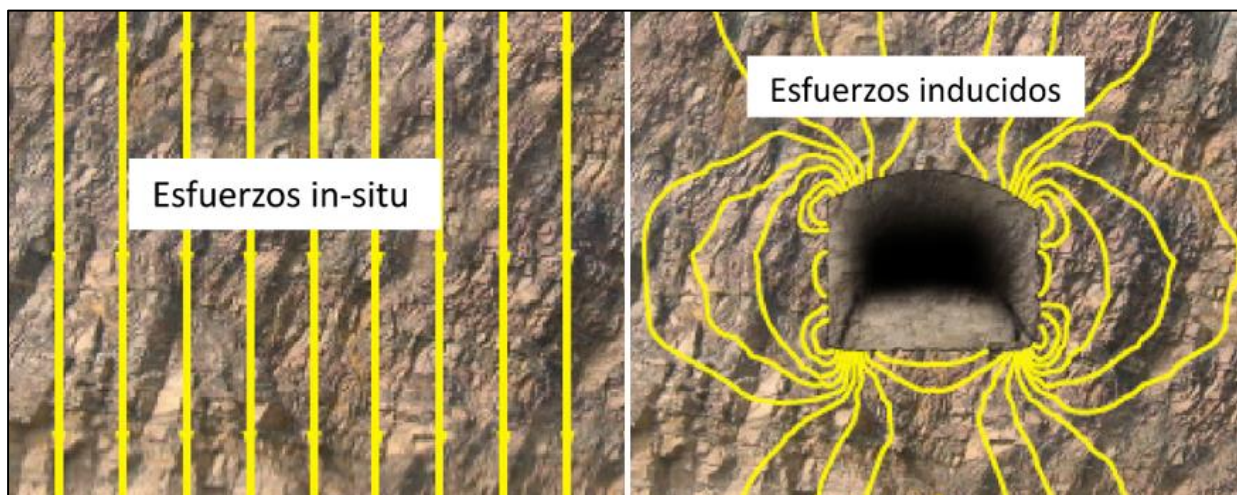
Nota: La tabla muestra la tabla de puntuación del RMR. Fuente: Bieniawski (1989).

- **Campo tensorial en túneles**

Todo bloque de roca experimenta un estado de tensión natural antes de realizar una excavación subterránea, siendo esta tensión el resultado de la tensión natural y la que se genera por la excavación.

Figura 14

Tensiones naturales e inducidas en el macizo rocoso.



Nota: Se muestra los esfuerzos inducidos al macizo rocoso. Fuente: Brown (1980)

Con el aumento de la profundidad, los bloques rocosos enfrentan tensiones naturales más altas, las cuales son causadas por el peso de los materiales que están por encima. Según los datos obtenidos en el lugar, las tensiones verticales que se han medido son equivalentes a la tensión que provoca el peso de los materiales que están por encima.

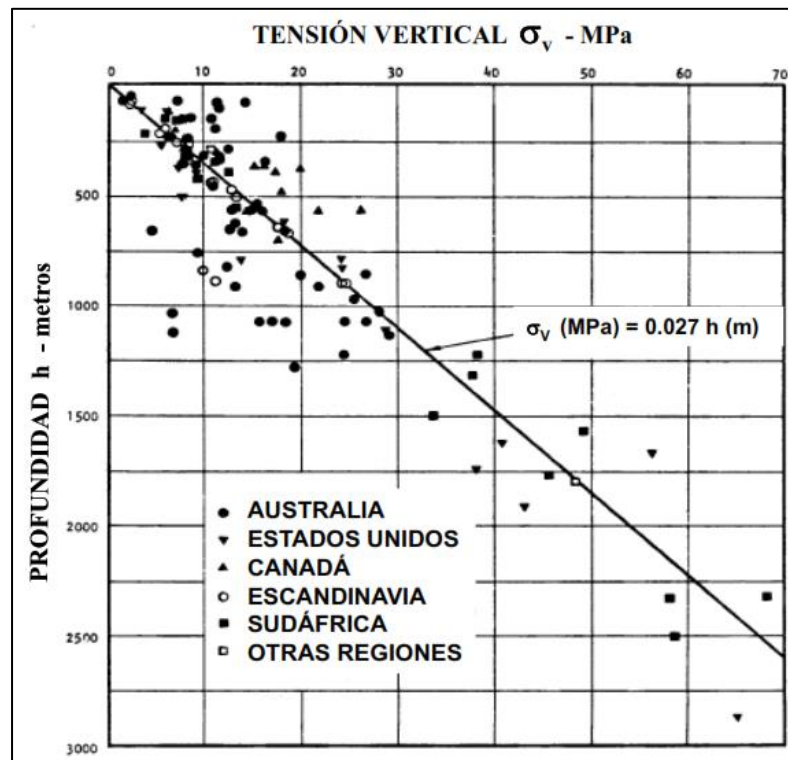
$$\sigma_v = \gamma \times h \dots\dots\dots (Ecuación N° 07)$$

Donde:

- σ_v : Tensión vertical.
- γ : Peso específico del material suprayacente.
- h : Profundidad o altura de la columna litostática sobre la excavación

Figura 15

Relación de esfuerzos verticales y la profundidad de la tunel



Nota: En el gráfico se puede apreciar la conexión entre las tensiones y la profundidad de la zanja. Procedencia: Brown y Hoek (1980).

✓ Clasificación GSI (Geological Strength Index)

Se trata de un método para describir los cuerpos rocosos de manera cualitativa basándose en dos factores: la estructura y el estado superficial de las discontinuidades. El GSI fluctúa entre 1 y 100; los números próximos a 1 sugieren cuerpos rocosos de baja calidad y resistencia debido a una alta fragmentación, erosión significativa y relleno blando. Por otro lado, los números cercanos a 100 indican cuerpos rocosos de alta calidad, con escasa fragmentación, falta de erosión y una estructura más robusta.

Figura 16
Valorización del GSI (Geological Strength Index)

(GSI) MODIFICADO		CONDICIÓN SUPERFICIAL				
De los códigos de letra definidos que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades, seleccione el cuadro apropiado es esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia GSI, de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para GSI, por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor por ejemplo 38.						
ESTRUCTURA		MUY BUENA (extremadamente resistente, fresca) superficie de las discontinuidades muy rugosas e inalteradas, cerradas, (Rc > 250 MPa) (se astilla con golpes de picota)	BUENA (muy resistente, levemente alterada) discontinuidades rugosas, lev. alterada, manchas de oxidación, lig. abierta. (Rc 100 a 250 MPa) (se rompe con varios golpes de picota)	REGULAR (resistente, levemente alterada) discontinuidades lisas, moderadamente alterada, ligeramente abierta. (Rc 50 a 100 MPa) (se rompe con uno o dos golpes de picota)	POBRE (moderadamente resist. moderam. alter.) superficie pulida o con estrías, muy alterada, relleno compacto o con fragmentos de roca. (Rc 25 a 50 MPa), (se indenta superficialmente)	MUY POBRE (blanda, muy alterada) Superficie pulida y estrada, muy abierta, con relleno de arcillas blandas. (Rc < 25 MPa) (se disgrega o indenta superficialmente)
	LEVEMENTE FRACTURADA Tres a menos sistemas de discontinuidades muy espaciadas entre si (RQD 75 - 90%) (2 a 6 fracturas por metro) (RQD = 115 - 3.3 Jn)	95	90	85	80	75
	MODERADAMENTE FRACTURADA Muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75%) (6 a 12 fracturas por metro)	85	80	75	70	65
	MUY FRACTURADA Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades. (RQD 25 - 50%) (12 a 20 fracturas por metro)	75	70	65	60	55
	INTENSAMENTE FRACTURADA Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 0 - 25%) (Más de 20 fracturas por metro)	65	60	55	50	45
	TRITURADA O BRECHADA Ligeramente trabada, masa rocosa extremadamente rota con una mezcla de fragmentos fácilmente disgregables, angulosos y redondeados. (Sin RQD)	55	50	45	40	35
		45	40	35	30	25
		35	30	25	20	15
		25	20	15	10	5
		15	10	5		

Nota: La figura muestra el Abaco usado para el cálculo del GSI. Fuente: Marinós y Hoek (2000).

Para calcular el valor numérico del GSI, Hoek sugiere una fórmula reciente que indica que este valor está influenciado por el estado de las discontinuidades del RMR y del RQD:

$$GSI = 1.5 \times J \text{ Cond}_{89} + \frac{RQD}{2} \dots\dots\dots \text{(Ecuación N° 08)}$$

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

La investigación por su tipo fue aplicada pues el propósito es resolver problemas concretos y prácticas de un nivel técnico operativo. La investigación aplicada es un tipo de investigación que tiene como objetivo resolver problemas concretos y prácticos de la sociedad o las empresas Sampieri (2014). Es decir, la presente tesis busca soluciones técnicas y operativas que mejoran los procesos, optimizar recursos relacionados al sostenimiento de labores subterráneas y mejorar la seguridad disminuyendo los riesgos de caída de rocas, no solo busca generar conocimientos teóricos, sino también, ofrecer resultados útiles aplicables directamente a las operaciones mineras subterráneas u obras de tunelería.

Por su nivel de conocimiento, es de naturaleza descriptiva y analítica, ya que su objetivo es conocer las características dominantes a través de la descripción de actividades, ya que su propósito es predecir y determinar las relaciones que pueden tener dos o más variables Hernández y Baptista (2006). Es decir, a presente tesis es descriptiva y aplicada porque busca identificar características del macizo rocoso en estudio y su relación con el diseño de sostenimiento. Y consideramos que es analítico porque la tesis examina las relaciones entre estas variables (características de la roca y la elección del diseño de sostenimiento).

4.1.1 Diseño de investigación

La investigación es No Experimental, pues no se manipula las variables de ninguna manera, únicamente observamos los fenómenos tal cual como se presentan de manera natural y así finalmente ser analizados.

4.1.1.2 Pasos específicos para la selección de la muestra

Los procedimientos empleados para la recolección de datos en este estudio fueron los siguientes:

a) Definir el objetivo de muestreo

Establecer claramente qué se busca evaluar: Características geomecánicas de la roca, diseño de sostenimiento, controles operativos de sostenimiento, otros.

b) Caracterizar el área de estudio

Recopilar información previa del yacimiento, planos, mapas geológicos, tipos de roca, estructura del macizo y condiciones de acceso en la mina.

c) Determinar la población o volumen a muestrear

Definir la zona específica dentro de la mina (frentes de trabajo, rampas, labores de avance y labores de explotación) y delimitar los sectores de interés para la toma de muestras.

d) Elegir el tipo de muestreo

Estratificado: En este caso el tipo de muestreo es estratificado, pues se divide el área en sectores con características similares y muestrear dentro de cada uno para mejor representatividad.

e) Diseñar el plan de muestreo

Establecer la cantidad y ubicación exacta de la muestra, considerando el tamaño del área, heterogeneidad del material y condiciones de seguridad.

f) Preparación logística y de seguridad

Coordinar permisos, asegurar condiciones seguras para los operativos (uso de equipo de protección personal, ventilación, sostenimiento, señalización) y disponer de herramientas adecuadas para la toma de muestras.

4.2 Ámbito temporal y espacial**4.2.1 Delimitación temporal**

El trabajo de investigación se realizó en el periodo de octubre del 2023 hasta mayo 2024.

4.2.2 Delimitación espacial

El estudio se llevará a cabo en la mina Consorcio Minero Horizonte, situada en el distrito de Parcoy, dentro de la provincia de Pataz, en la región de La Libertad, donde se extraen minerales de oro. La Unidad Minera Consorcio Minero Horizonte se encuentra a una altitud promedio de entre 2,700 y 2,800 metros sobre el nivel del mar (msnm)

El estudio se centra específicamente en la profundización de la zona balcón, específicamente en labores subterráneas del nivel 2705 de la mina Consorcio Minero Horizonte.

Se seleccionaron estas áreas debido a su representatividad de las condiciones geomecánicas y operativas de la mina, garantizando que los resultados obtenidos reflejen el comportamiento típico de los procesos de sostenimiento subterráneo y las propiedades del shotcrete en la roca.

4.3 Población y muestra

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), la población se refiere a todos los casos que cumplen con ciertas características.

Tamayo (2006) describe la muestra como el conjunto de procedimientos que se llevan a cabo para analizar la distribución de ciertas características en el total de una población general o grupo, comenzando con la observación de una parte de esa población.

En el estudio actual, la población se centra en las actividades subterráneas en el área de balcón de la mina Consorcio Minero Horizonte.

El muestreo utilizado es no probabilístico y por conveniencia. La muestra seleccionada será la rampa negativa 2705 de la mina Consorcio Minero Horizonte.

El enfoque de muestreo para esta investigación es a través de conveniencia, dado que se escoge la muestra más accesible en el momento de la investigación debido a su facilidad de acceso y la disponibilidad de los elementos a estudiar.

Entre las posibles limitaciones del estudio con respecto a la muestra seleccionada se encuentran:

La muestra podría no representar de manera completa a la población, lo que restringe la posibilidad de generalizar los hallazgos, representando únicamente las labores con niveles de RMR similares, y debido a que no es aleatoria, los análisis estadísticos inferenciales podrían no ser del todo confiables. No obstante, se elige por conveniencia por sus características que se asemejan a otras tareas en la mina.

4.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos

4.4.1 Técnicas e instrumentos usados para la recolección de datos

Tabla 15

Técnicas e instrumentos utilizados en la presente investigación

TECNICAS	INSTRUMENTOS
Aplicación del concreto lanzado	Robot lanzador de concreto
	Equipo mixer
	Agregados o áridos
	Cemento portland
	Aditivo super plastificante
	Aditivo acelerante de fragua
	Fibras
Revisión de bibliografía relacionada	Libros, publicaciones, informes de investigación, estudios y demás bibliografía relacionada con el tema de estudio.
Recolección de datos en campo	Cuaderno de campo
	Bolígrafo
	distanciómetro
	flexómetro
	Picota
	Brújula
	Calculadora

	pintura Sprite Equipos de protección personal para minería subterránea.
Trabajo de gabinete	Celular Laptop Tablas geomecánicas Softwares de interpretación de sostenimiento de túneles.
Ensayos de laboratorio	Equipos de compresión uniaxial. Cono de asentamiento. Equipo de corte de testigo cilíndrico Equipo de rotura de paneles de concreto Paneles de concreto
Sostenimiento de rocas	Equipo Bolter Malla Pernos swellex de 7 '' Softwares de interpretación de sostenimiento de túneles.

Nota: La tabla muestra las técnicas e instrumentos usados en la investigación Fuente: Propia.

4.4.1.1 Validación y confiabilidad de los instrumentos

Tabla 16

Validación y confiabilidad de los instrumentos

Tipo de instrumento	Validación	Confiabilidad
Equipos mecánicos (robot, mixer, bolter)	Certificación del fabricante y normas ASTM	Calibración y mantenimiento periódico
Equipos de ensayo (compresión, corte, cono)	Normas ASTM y NTP	Repetición y control de ensayos
Instrumentos de medición	Calibración metrológica	Doble registro de mediciones
Materiales	Certificados de calidad ASTM	Ensayos de control previo
Software	Basado en modelos internacionales (Q, RMR)	Verificación con datos reales
Fuentes documentales	Literatura académica validada	Triangulación de información

Tipo de instrumento	Validación	Confiabilidad
EPP	Certificaciones ISO/ANSI	Seguridad y reducción de errores operativos

Nota: Se observa la validación y confiabilidad de los instrumentos usados en la presente investigación de tesis Fuente: Propia.

4.4.1.2 Procedimientos

Seguimiento de los trabajos de sostenimiento dentro de los estándares operativos recomendados por la mina Consorcio Minero Horizonte.

Así mismo se realizó los siguientes procedimientos, los cuales serán descritos con mayor profundidad cada técnica en el punto 4.5 Análisis de datos.

- ✓ Estimación del Q de Barton
- ✓ Estimación del RQD
- ✓ Estimación del GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)
- ✓ Ensayo con testigos diamantinos de concreto
- ✓ Ensayos de laboratorio de mecánica de rocas
- ✓ Ensayos de tenacidad

Nota: De manera más detallada se explican los procedimientos en el punto 4.5 Análisis de datos.

4.5 Análisis datos

Para el análisis de datos se empleó softwares de soporte de ingeniería en geomecánica (Phase 2 y RocData), para poder identificar con certeza las características del macizo rocoso, estos softwares son explicados paso a paso y analizados en el punto 5.5.5. (cálculo de parámetros del macizo rocoso con software: RocData y phase 2), de igual manera, se utilizó el programa Microsoft Excel 2016 para realizar cálculos y generar apoyo en gráficos estadísticos

de indicadores clave y en la creación de tablas dinámicas. Asimismo, se llevaron a cabo diversos análisis de datos, como, por ejemplo:

4.5.1 Estimación del RQD (Rock Quality Designation)

El RQD se calcula considerando el número de fallas presentes por cada metro lineal, conforme a la relación que propone Priest y Hudson.

$$RQD = 100 \times e^{(-0.1\lambda)} \times (0.1\lambda + 1) \dots\dots\dots (Ecuación N^\circ 09)$$

$$\lambda = \text{número de discontinuidades} / L (m) \dots\dots\dots (Ecuación N^\circ 10)$$

Acorde a la fórmula de Priest y Hudson, calculamos la estimación del RQD, a partir del muestreo del número de discontinuidades en los 50 metros de la rampa 2705 divididos entre 10 metros por cada estación. El resultado del conteo de discontinuidades por cada 10 metros se observa en la tabla 19.

4.5.2 Estimación del Q de Barton

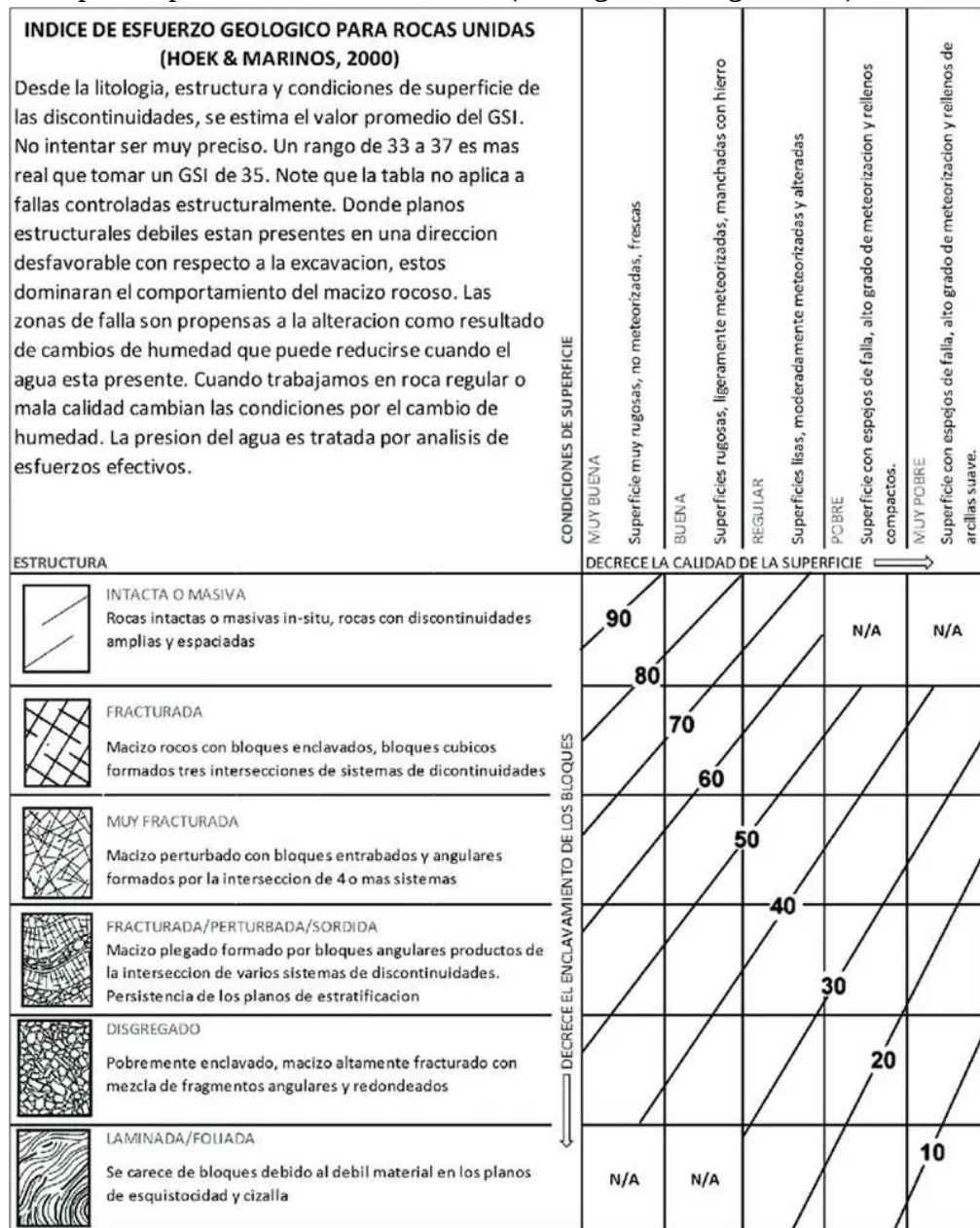
De igual manera se tomarán las 5 estaciones para el cálculo del índice del Q de Barton considerando 6 parámetros: RQD, Cantidad de familias de fallas significativas (J_n), Textura de las fallas (J_r), Modificación de las fallas (J_a), Existencia de humedad (J_w), y Condiciones tensionales (SRF), las cuales serán calculadas según el mapeo geomecánico. Los resultados se observan en la tabla 23.

4.5.3 Estimación del GSI (Geological Strength Index)

Para el cálculo del GSI usaremos la gráfica de estimación acorde a los parámetros de estructura de macizo rocoso y las condiciones superficiales del macizo rocoso, esta evaluación también es realizada en 5 estaciones, los resultados se pueden observar desde la figura 19 al 23. A continuación se observa el gráfico utilizado para esta estimación.

Figura 17

Gráfico empleado para la estimación del GSI (Geological Strength Index)



Nota: Se observa el grafico utilizado para la estimación del índice de resistencia geológica. Fuente: Hoek et al., (1995).

Para el cálculo del valor numérico del GSI usaremos la siguiente formula:

$$\text{GSI} = 1.5 \times J \text{ Cond}_{89} + \frac{\text{RQD}}{2} \dots \dots \dots (\text{Ecuación N}^\circ 11)$$

4.5.4 Ensayos de laboratorio de mecánica de rocas

Para conocer a mayor detalle la caracterización de la roca se realizaron ensayos:

4.5.5 Ensayo de compresión simple

- La prueba de compresión simple del concreto proyectado se realizó con la finalidad de evaluar su resistencia mecánica, cumpliendo con los estándares de la norma ASTM C39/C39M (“Método de ensayo para medir la resistencia a la compresión de cilindros de concreto”) y las sugerencias de la norma ASTM C1140, que tratan sobre el manejo y las pruebas del concreto lanzado. Las probetas se obtuvieron directamente del concreto proyectado sobre los paneles de prueba, empleando moldes cilíndricos de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura (6”x12”), conforme a la normativa vigente.

a) Preparación y moldeo de las probetas

- Las muestras fueron extraídas del hormigón aplicado sobre los paneles de ensayo, utilizando moldes cilíndricos con un diámetro de 150 mm y una altura de 300 mm (6”x12”), de acuerdo con las regulaciones actuales.
- El material fue proyectado dentro de los moldes utilizando el mismo equipo y presión empleados en la obra, con el objetivo de reproducir fielmente las condiciones reales de aplicación.
- Una vez llenos, los moldes se nivelaron y se cubrieron para evitar la pérdida de humedad.

b) Curado de las muestras

- Las muestras fueron tratadas en un ambiente regulado con una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa igual o mayor al 95% durante los intervalos de 1, 3 y 28 días que se definieron.
- El curado se realizó en una cámara húmeda o en un tanque de agua, evitando la exposición directa al sol o a corrientes de aire.
- Este método garantiza que el cemento esté adecuadamente humectado, favoreciendo el ideal crecimiento de la resistencia del shotcrete.

c) Condiciones del ensayo

- Los ensayos se efectuaron en una máquina de compresión hidráulica calibrada, con una capacidad mínima de 2000 kN.
- Se aplicó una carga axial continua y uniforme, sin impactos, a una velocidad de 0.25 ± 0.05 MPa/s, hasta la rotura de la muestra.
- Previo a cada ensayo, se verificó la alineación de los platos de carga y la planicidad de las superficies de las probetas.

d) Controles para asegurar la confiabilidad de los resultados**I. Calibración y verificación de equipos**

La máquina de compresión y los instrumentos de medición fueron calibrados conforme a las normas ISO 7500-1 y ASTM E4.

II. Control ambiental

Durante el curado y los ensayos, la temperatura y la humedad fueron monitoreadas mediante termohigrómetros certificados, garantizando condiciones estables y uniformes.

III. Homogeneidad de las muestras

Todas las probetas se fabricaron con la misma dosificación, tipo de cemento, aditivos y parámetros de proyección, asegurando su representatividad. Se elaboraron tres probetas por cada edad de ensayo (1, 3 y 28 días) para obtener un valor promedio y minimizar errores aleatorios.

IV. Repetición y control estadístico

Se aplicó un control estadístico, eliminando valores atípicos según el criterio de desviación estándar.

V. Registro y trazabilidad

Cada muestra fue identificada con un código único que incluía la fecha de proyección, ubicación, edad de ensayo y tipo de aditivo utilizado.

Se llevó un registro documental durante todas las etapas de muestreo, curado y ensayo.

VI. Manipulación y transporte

Las probetas fueron trasladadas desde la mina hasta el laboratorio en contenedores cerrados, evitando golpes, vibraciones y pérdida de humedad. Antes del ensayo, se verificó que no presentaran fisuras ni defectos visibles.

Para Consorcio Minero Horizonte S.A la resistencia mínima es de 400 kg/cm², esto establecido como estándar para sus actividades de sostenimiento con Shotcrete en 28 días de edad.

4.5.6 Ensayo con testigos diamantinos de concreto

a) Objetivo del ensayo

El ensayo tiene como propósito determinar la resistencia a la compresión del shotcrete aplicado en la operación de sostenimiento de labores subterráneas, considerando la acción del aditivo acelerante Sigurit L-30 y la incorporación de fibras metálicas Dramix 65/35. Esto permite evaluar la cohesión, adherencia y comportamiento mecánico del revestimiento en túneles y labores subterráneas.

Estos se generan a partir de los paneles de shotcrete que se aplican en los mismos lugares de trabajo con el propósito de soporte, en este caso específico de la rampa 2705. Este procedimiento se realizó a diario, cumpliendo con las regulaciones internacionales (ASTM C 39). Para este caso, el estándar de Antamina establece como mínimo una resistencia de 360 kg/cm², cifra que se debe a la interacción entre el shotcrete, el aditivo acelerador de fraguado Sigunit L-30 y la presión del aire utilizada para proyectar sobre los

paneles. Asimismo, es fundamental que estos testigos sigan el mismo método de curado que los testigos de hormigón.

b) Normas de referencia

- ASTM C42/C42M: Obtención de muestras cilíndricas de hormigón.
- ASTM C39/C39M: Prueba de fortaleza a la compresión de cilindros o muestras.
- ASTM C1550: Ensayo de hormigón reforzado con fibras.
- ASTM C1602: Supervisión del agua usada en la mezcla y los aditivos.
- NTP 339.034: Evaluación de resistencia a la compresión de muestras de hormigón.

c) Extracción y preparación de los testigos

Los núcleos diamantinos se obtuvieron perpendicularmente a los paneles de shotcrete mediante taladro con corona de diamante de 100 mm de diámetro.

Se utilizó agua limpia como refrigerante para prevenir sobrecalentamiento y microfisuras.

Cada núcleo se identificó con datos de ubicación, fecha, tipo de mezcla, dosis de Sigurit L-30 y fibras Dramix 65/35.

d) Preparación de los testigos

Los extremos de los núcleos se rectificaron para garantizar superficies planas y paralelas, evitando errores de alineación durante la compresión.

Se almacenaron en cámara húmeda ($HR \geq 95 \%$, $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) hasta el momento de la prueba. Cuando se presentaron irregularidades, se empleó pasta de azufre fundido para nivelación.

e) Ensayo de compresión

Los testeos se llevaron a cabo en una prensa de compresión ajustada, con una capacidad mínima de 2000 kN, de acuerdo con la norma ASTM C39/C39M. La fuerza

se introdujo de forma uniforme y sin sacudidas, aumentando a una velocidad de 0.25 ± 0.05 MPa/s hasta que ocurrió la ruptura de la muestra.

f) Influencia de aditivos y fibras

El aditivo Sigurit L-30 acelera el fraguado del concreto, por lo que los núcleos se extrajeron a edades de 1 y 28 para evaluar el desarrollo de resistencia. Las fibras Dramix 65/35 mejoran la ductilidad, tenacidad y resistencia post - fisuración, evitando fallas frágiles.

Durante el corte y manipulación, se cuidó no dañar ni desprender las fibras, asegurando que su efecto sobre la resistencia se reflejara correctamente.

g) Controles para asegurar la confiabilidad de los resultados

- **Calibración de equipos:** La prensa y el taladro diamantado fueron verificados según ISO 17025. Se comprobó el paralelismo y alineación de los platos de carga.
- **Condiciones de curado:** Los testigos se almacenaron en cámara húmeda controlada y se transportaron en bolsas herméticas para mantener la humedad.
- **Homogeneidad y selección:**
- Se extrajeron al menos tres núcleos por panel. Se rechazaron aquellos con grietas visibles, cavidades o segregación.
- **Trazabilidad y documentación:** Cada núcleo fue registrado con información de ubicación, mezcla, aditivo, fibras, fecha, edad, densidad y resistencia. Se realizaron fotografías antes y después del ensayo.
- **Seguridad:** Se empleó equipo de protección personal completo (casco, guantes anticorte, gafas, botas y mascarilla).

4.5.7 Ensayos de tenacidad

a) Objetivo del ensayo

El propósito del ensayo de tenacidad es determinar la capacidad del shotcrete reforzado con fibras para absorber energía bajo cargas de flexión controladas. Este análisis permite evaluar su comportamiento post-fisuración, su ductilidad y la resistencia residual, aspectos esenciales para aplicaciones estructurales como túneles, sostenimiento primario o revestimientos en obras subterráneas.

También conocidos como ensayos de absorción de energía, estos dependen de la cantidad de energía presente en el macizo rocoso. En el caso de este tipo de roca ya catalogados como mala, los valores del RMR oscilan entre 20 y 40. A partir de esto, podemos deducir, según el modelo de Barton, que el shotcrete debe tener una absorción de energía requerida de entre 1000 y 1200 Joules. La fibra metálica desempeña un papel crucial en el shotcrete, ya que le confiere ductilidad y tenacidad. Estas propiedades contribuyen a que el avance de las excavaciones sea más seguro. Además, el uso de fibra metálica permite reemplazar la malla electrosoldada en algunas tareas, lo que optimiza el sostenimiento y reduce las condiciones inseguras que esta última puede generar durante su instalación.

b) Normativa de referencia

El procedimiento se basa en las normas UNE-EN 14487-1 y UNE-EN 14488-5, que especifican los requisitos del concreto proyectado y los métodos para ensayar su resistencia a flexión y tenacidad. También se aplican las siguientes normas complementarias:

- UNE-EN 14488-2: Obtención y preparación de probetas de shotcrete.
- UNE-EN 12390-1 a 3: Elaboración, curado y ensayo de hormigones endurecidos.
- UNE-EN 14651: Ensayo de tracción por flexión en concreto reforzado con fibras

c) Preparación y procedimiento del ensayo de flexión

- Se moldean o extraen vigas prismáticas de $600 \times 150 \times 150$ mm, proyectando el concreto directamente sobre moldes metálicos o paneles de prueba.
- Las probetas se curan a (20 ± 2) °C y $HR \geq 95$ % durante el período establecido (usualmente 28 días).
- Antes del ensayo, se inspeccionan las superficies para asegurar contacto uniforme con los apoyos.
- Se utiliza una máquina de flexión controlada por desplazamiento (servohidráulica o electromecánica) equipada con sensores de carga y deflexión.
- La probeta se apoya en dos puntos y se aplica carga en el centro (ensayo de tres puntos), siguiendo la UNE-EN 14488-5.
- La carga se aplica de forma continua, sin impactos, manteniendo una velocidad de deflexión de 0.2 ± 0.05 mm/min.

d) Interpretación de los resultados

Los valores de tenacidad se comparan con los requisitos estructurales del diseño y los mínimos establecidos en la UNE-EN 14487-1 para shotcrete (con o sin fibras). Del análisis de la curva carga-deflexión se obtiene:

- Energía total y residual absorbida.
- Ductilidad y comportamiento post-fisuración.
- Eficiencia del refuerzo por fibras y aditivos en la mezcla.

4.5.8 Ensayos en paneles de concreto

Estos paneles poseen un diseño cuadrado y tienen medidas de 60 x 60 x 10 cm. Se fabrican mediante la proyección de concreto en ángulo recto. Tras la proyección, se ajusta la superficie para facilitar su traslado al laboratorio.

Es esencial indicar la cantidad de aditivo de fraguado acelerado utilizado en la proyección de estos paneles. Asimismo, es necesario marcar con spray la fecha, la actividad realizada y la presión de aire empleada durante la proyección.

También aprovechamos el proceso de paneles para la extracción de muestras diamantinas.

a) Objetivo del ensayo

El ensayo en paneles tiene como propósito evaluar el comportamiento mecánico y la capacidad de absorción de energía del shotcrete proyectado bajo condiciones que simulan su aplicación en obra.

Este estudio permite determinar parámetros como: tenacidad, resistencia residual, ductilidad, cohesión y la eficiencia del refuerzo mediante fibras o aditivos acelerantes.

b) Normas de referencia

Los ensayos se ejecutan siguiendo las normas y guías técnicas:

- **UNE-EN 14487-1:** Concreto proyectado – definiciones, especificaciones y conformidad.
- **UNE-EN 14488-5:** Técnicas para medir la energía absorbida en paneles de hormigón proyectado.
- **ASTM C1550:** Tenacidad de concreto con fibras en panel circular.
- **ASTM C1602 / UNE-EN 1008:** Control de agua y aditivos en concreto.
- **UNE-EN 12390:** Métodos de curado y ensayo de hormigón endurecido.

c) Fabricación, curado y ensayo de tenacidad de paneles de concreto

Se preparan paneles rectangulares de 600 × 600 × 100 mm (UNE-EN) o circulares de 700 mm de diámetro y 75 mm de espesor (ASTM C1550).

El shotcrete se proyecta directamente sobre moldes metálicos o de madera, utilizando la misma técnica y presión de obra para reproducir las condiciones reales. La superficie del molde debe estar limpia y húmeda, garantizando buena adhesión inicial. Después de la presentación, los paneles se tapan con plástico o tela por un periodo las primeras 24 horas para evitar pérdida de humedad.

El curado se realiza en cámara húmeda o ambiente controlado, 20 ± 2 °C y HR ≥ 95 %.

El curado mínimo es de 7 a 28 días, según especificaciones del proyecto o norma aplicable. Se evita exposición directa al sol, corrientes de aire y vibraciones que puedan afectar la estructura interna del concreto.

d) Ensayo de tenacidad

Se emplea un marco de carga o máquina de compresión con anillo de apoyo y punzón central para panel circular. La carga se aplica de manera continua y controlada, a velocidad de 2 ± 0.2 mm/min, hasta alcanzar una deflexión aproximada de 25 mm o la rotura total del panel. Se registra la carga aplicada (N) y la deflexión (mm) en tiempo real mediante sensores. La región situada por debajo de la curva de carga-deflexión indica la energía capturada (tenacidad) del shotcrete.

e) Interpretación de resultados

El ensayo en panel permite evaluar:

- Tenacidad total y residual del shotcrete.
- Ductilidad y absorción de energía post-fisuración.
- Efectividad del refuerzo con fibras o aditivos acelerantes.
- Conformidad del shotcrete con los requisitos estructurales del diseño y las normas UNE-EN 14487-1 o ASTM C1550.

4.5.9 Cálculo de parámetros del macizo rocoso con software: RocData y Phase 2

Acorde a los ensayos de laboratorio y sus resultados se podrá determinar lo parámetros representativos del macizo rocoso, esto gracias al software RocData el cual tiene como base la teoría de rotura de Hoek-Brown. Los datos también obtenidos por el phase 2 nos ayudan a interpretar futuras condiciones que podrían ocasionar un mal sostenimiento.

Tabla 17*Matriz de consistencia***4.6 Matriz de consistencia**

ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL CONCRETO LANZADO PARA EL SOSTENIMIENTO DE LABORES SUBTERRANEAS SEGÚN LA CALIDAD DE ROCA EN LA MINA CONSORCIO MINERO HORIZONTE– LA LIBERTAD – 2024							
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES	METODOLOGÍA	
Problema General ¿Cómo se realiza la aplicación del concreto lanzado en labores subterráneas según la calidad de roca en la mina Consorcio Minero Horizonte - 2024? Problemas Específicos PE 01: ¿Cómo serán las características geomecánicas en la mina Consorcio Minero Horizonte- 2024 para la aplicación efectiva del concreto lanzado?	Objetivo General Analizar la aplicación del concreto lanzado en labores subterráneas según la calidad de la roca para el sostenimiento de labores subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte – 2024.	Hipótesis General La calidad de la roca en la mina Consorcio Minero Horizonte tiene una influencia significativa en la aplicación efectiva del concreto lanzado, afectando tanto el diseño del sostenimiento como el	DEPENDIENTE (X) Calidad de la roca en la mina Consorcio Minero Horizonte – La Libertad - 2024	Estimación del RMR (Rock Mass Rating) Boart Longyear Vida Útil de brocas	Resistencia de la roca intacta a Compresión Simple	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN La investigación por su tipo fue aplicada pues el propósito es resolver problemas concretos y prácticas de un nivel técnico operativo. La investigación práctica es un tipo de estudio que busca abordar problemas específicos y reales en la sociedad o en las organizaciones Sampieri (2014). Debido a su grado de comprensión, es de tipo descriptivo y analítico, ya que su misión es identificar las características predominantes mediante la descripción de acciones, con el fin de prever y establecer las conexiones entre dos o más variables Hernández y Baptista (2006). DISEÑO DE INVESTIGACIÓN La investigación es No Experimental, pues no se manipula las variables de ninguna manera, únicamente observamos los fenómenos tal cual como se presentan de manera natural y así finalmente ser analizados.	
	Objeto Especifico OE 01: Determinar las características geomecánicas en la mina Consorcio Minero Horizonte para la aplicación efectiva del concreto lanzado en labores subterráneas en la				RQD		
					Espaciamiento de las discontinuidades		
					Estado o condición de las juntas		
					Presencia de agua		
					Orientación de las discontinuidades		
							Nº de discontinuidades
	Longitud de rampa						
	RQD						
	Nº de familia de discontinuidades (Jn)						
	Estimación del Q de Barton						DELIMITACIÓN TEMPORAL

PE 02: ¿Cómo será el diseño de sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte - 2024? PE 03: ¿De qué manera se realiza la elección del sostenimiento con concreto lanzado en labores en la mina Consorcio Minero Horizonte - 2024?	mina Consorcio Minero Horizonte – 2024. OE 02: Determinar el diseño de sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas según la calidad de roca en la mina Consorcio Minero Horizonte – 2024. OE 03: Analizar la elección de sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas en la mina Consorcio Minero Horizonte – 2024.	proceso de selección de este tipo de sostenimiento en labores subterráneas. Hipótesis Específico HP 01: Las características geomecánicas de la roca en la mina influirán en la selección del tipo de concreto lanzado y en las técnicas de aplicación para lograr un sostenimiento efectivo. Se espera que, a mejor calidad de roca, menor será la necesidad de			Rugosidad de las discontinuidades (Jr)	El trabajo de investigación se realizó entre octubre del 2023 hasta mayo 2024. DELIMITACIÓN ESPACIAL En la profundización de la zona balcón, específicamente en labores subterráneas del nivel 2705 de la mina Consorcio Minero Horizonte. POBLACIÓN Y MUESTRA De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), la población se refiere al total de todos los elementos que cumplen con ciertas características. Según Tamayo (2006), una muestra es el grupo de procedimientos llevados a cabo para analizar la distribución de ciertos atributos dentro del total de una población general o grupo, basado en la observación de una parte de la población seleccionada. Para este estudio, la población estuvo formada por las actividades subterráneas en el área balcón de la mina Consorcio Minero Horizonte. El muestreo utilizado es de tipo no probabilístico basado en conveniencia. La muestra seleccionada será la rampa negativa 2705 de la mina Consorcio Minero Horizonte. TÉCNICAS ➤ Aplicación del concreto lanzado ➤ Revisión de bibliografía relacionada ➤ Recolección de datos en campo ➤ Trabajo de gabinete ➤ Ensayos de laboratorio ➤ Sostenimiento de rocas
					Alteración de las discontinuidades (Ja)	
					Presencia de agua (Jw)	
					Condiciones tensoriales (SRF)	
					Estimación GSI (Geological Strength Index)	
					Estructura Geológica	
					Condición superficial de la roca	
					Densidad (gr/cm3)	
					Resistencia a la compresión Simple (Mpa)	
					Cohesión (Mpa)	
					Módulo de Young (Gpa)	
				Parámetros del macizo rocoso con software phase 2	Factor de seguridad	
				Diseño de sostenimiento	Espesor de concreto	
					Numero de capas	

		concreto lanzado y viceversa.	INDEPENDIENTE (Y) Aplicación del concreto lanzado en la mina Consorcio Minero Horizonte – La Libertad - 2024		Cantidad de materiales para llegar a la resistencia de 400 kg/cm2	INSTRUMENTOS ➤ Robot lanzador de concreto ➤ Equipo mixer ➤ Agregados o áridos ➤ Cemento portland ➤ Aditivo super plastificante ➤ Aditivo acelerante de fragua ➤ Fibras ➤ Libros, publicaciones, informes de investigación, estudios y demás bibliografía relacionada con el tema de estudio. ➤ Cuaderno de campo ➤ Bolígrafo ➤ distanciómetro ➤ flexómetro ➤ Picota ➤ Brújula ➤ Calculadora ➤ pintura Sprite ➤ Equipos de protección personal para minería subterránea. ➤ Celular ➤ Laptop ➤ Tablas geomecánicas ➤ Softwares de interpretación de sostenimiento de túneles. ➤ Equipos de compresión uniaxial. ➤ Cono de asentamiento. ➤ Equipo de corte de testigo cilíndrico ➤ Equipo de rotura de paneles de concreto ➤ Paneles de concreto
		HP 02: El diseño del sostenimiento con concreto lanzado en labores subterráneas se verá afectado por las características geomecánicas de la roca, requiriendo modificaciones en el espesor, la malla de refuerzo y otros parámetros para adaptarse a las diferentes condiciones.		Ensayo de compresión simple	Resistencia de concreto (kg/cm2)	
				Ensayo con testigos diamantinos de concreto	Resistencia de concreto (kg/cm2)	
				Ensayos de tenacidad	Absorción de energía (Joules)	
				Ensayos con paneles de concreto	Presión de aire (Bar)	
					Cantidad de fibras de acero (Kg)	
					Resistencia (Joules)	
				Rebote	Cantidad de concreto no adherido	
		HP 03: La selección del				

		sostenimiento con concreto lanzado se realizará considerando las características geomecánicas de la roca, el tipo de labores y los resultados esperados del sostenimiento. Se espera que, a mayor inestabilidad de la roca, mayor sea la necesidad de un sostenimiento con concreto lanzado.			➤ Equipo Bolter ➤ Malla electrosoldada. ➤ Pernos swellex de 7 pies. ➤ Softwares de interpretación de sostenimiento de túneles. PROCEDIMIENTOS Y ANALISIS DE DATOS Seguimiento y control de los trabajos de sostenimiento dentro de los procedimientos y estándares operacionales recomendados por la mina Consorcio Minero Horizonte. Así mismo se realizó los siguientes procedimientos: ➤ Estimación del Q de Barton ➤ Estimación del RQD ➤ Estimación del GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX) ➤ Ensayo con testigos diamantinos de concreto ➤ Ensayos de laboratorio de mecánica de rocas ➤ Ensayos de tenacidad Para llevar a cabo el examen de la información se utilizaron programas de asistencia en ingeniería geomecánica (Phase 2 y RocData), con el fin de determinar con precisión las propiedades del macizo rocoso. Además, se empleará el software Microsoft Excel 2016 para realizar cálculos y crear gráficos estadísticos de indicadores clave de rendimiento y tablas dinámicas.
--	--	---	--	--	---

Nota: Se observa la matriz de consistencia de la presente investigación. Fuente: Propia.

V. Resultados y discusión

5.1. Especificaciones de la rampa negativa 2705

La rampa negativa 2705 tiene la función de acceso a las labores subterráneas de profundización (labores de avance y de explotación). Por esta rampa principal se transportan camiones de 80 toneladas, así como equipos de bajo perfil como scooptram, emperadoras bolter, jumbos de perforación y camiones mixer.

Figura 18

Rampa negativa 2705



Nota: Fotografía de la rampa 2705 recién shotcreteada la cual viene siendo perforada por un equipo Jumbo de un brazo. Fuente: Propia

Para el caso de la perforación del frente de la rampa, previamente se realiza el trazado de la malla de perforación como se ve en la figura 18, este también dependerá de la calidad del macizo rocoso.

El mapeo geomecánico de la rampa Sandra se realizó en 5 estaciones según el siguiente detalle:

Tabla 18*Estaciones geomecánicas.*

ESTACIÓN GEOMECÁNICA	TRAMO (m)		ORIENTACIÓN DEL TRAMO
	DESDE	HASTA	
1	0	10	75.39°
2	10	20	60.62°
3	20	30	63.86°
4	30	40	66.25°
5	40	50	74.11°

Nota: La tabla muestra las estaciones de evaluación de la investigación con la orientación de cada tramo Fuente: propia.

Para el caso de los tramos de estudio de la rampa 2705 se consideró por cada 10 metros para el estudio de la investigación, subdivididas en 5 estaciones.

5.2. Resultados de estimación de la calidad de la roca de la rampa 2705

5.2.1 Resultados de la estimación del RQD

El RQD se calcula considerando el número de discontinuidades presentes por cada metro lineal, según la relación propuesta por Priest y Hudson. Los resultados obtenidos se describen a continuación.

$$RQD = 100 \times e^{(-0.1\lambda)} \times (0.1\lambda + 1) \dots\dots\dots (Ecuación N^\circ 12)$$

$$\lambda = \text{numero de discontinuidades} / L \text{ (m)} \dots\dots\dots (Ecuación N^\circ 13)$$

Acorde a la fórmula de Priest y Hudson, calculamos la estimación del RQD, a partir del del muestreo del número de discontinuidades en los 50 metros de la rampa 2705 divididos

entre 10 metros por cada estación. El resultado del conteo de discontinuidades por cada 10 metros fue lo siguiente

Tabla 19

Estaciones de estudio

ESTACIÓN	NRO DISCONTINUIDADES
EST-01	30
EST-02	26
EST-03	22
EST-04	31
EST-05	24
$\bar{x}$ 26.6	
σ 3.80	
Max 31.0	
Min 22.0	

Nota: La tabla muestra las estaciones de estudio de la investigación con el número de discontinuidades por tramo. Fuente: Propia.

En la tabla 19 se muestra la cantidad de discontinuidades por tramo, en el tramo 1 existe un total de 30 discontinuidades, en la estación 2 hay 26, en la estación 3 hay 22, en la estación 4 hay 31 y en la estación 5 hay 24 discontinuidades. En Promedio llegamos a 27 discontinuidades en los 50 metros. Para el cálculo de λ según la estimación de Priest y Hudson, dividimos la cantidad de discontinuidades sobre los metros lineales muestreados que en este caso serán 10 para cada estación.

Tabla 20*Resultados de cálculo de numero de discontinuidades y RQD*

ESTACIÓN	NRO DISCONTINUIDADES	λ	RQD (%)	RQD REDONDEADO (%)	CALIDAD DE ROCA
EST-01	30	3	24.19%	24%	Muy mala
EST-02	26	2.6	29.34%	29%	Mala
EST-03	22	2.2	35.55%	36%	Mala
EST-04	31	3.1	23.05%	23%	Muy mala
EST-05	24	2.4	32.30%	32%	Mala
				$\bar{x}$	28.89%
				σ	0.05
				Max	36.0%
				Min	23.0%

Nota: Se observa el resumen del cálculo de RQD y su interpretación de calidad de roca.

Fuente: Propia.

La tabla 20 contiene los resultados del número de discontinuidades / luz y los resultados de la estimación de RQD aplicando la ecuación N° 12, los resultados al ser comparado con la tabla 21 se evidencia que el valor promedio “28.89” se encuentra en el rango de 25 -50, lo que se interpreta como una calidad aproximada del macizo rocoso de “Mala”.

Tabla 21*Clasificación del macizo rocoso según la estimación del RQD*

RQD (%)	Calidad aproximada del macizo
0 – 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Bueno
90 – 100	Muy bueno

Nota: Se observa la clasificación de la roca según el valor numérico del RQD. Fuente: Deere (1964).

Para el cálculo del Q de Barton se calcula considerando 6 parámetros: RQD, Numero de familias de discontinuidades (Jn) importantes, Rugosidad de las discontinuidades (Jr), Alteración de las discontinuidades (Ja), Presencia de agua (Jw) y Condiciones tensionales (SRF), tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \dots\dots\dots (Ecuación N° 14)$$

Otra manera de calcular el índice de Q de Barton es en función del valor del RMR, el cual puede ser calculado por la siguiente formula:

$$RMR = 9 \times \ln Q + 44 \dots\dots\dots (Ecuación N° 15)$$

5.2.2 Resultados de estimación del Q de Barton

De la misma forma, se utilizarán las cinco estaciones para determinar el índice del Q de Barton, considerando seis factores: RQD, número de familias de discontinuidades significativas (Jn), rugosidad de las discontinuidades (Jr), alteración de las discontinuidades (Ja), presencia de agua (Jw) y condiciones de tensión (SRF), que serán calculadas de acuerdo con el mapeo geomecánico.

Tabla 22

Cálculo de Q de barton

ESTACIÓN	PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR
EST - 01	1. RQD	30 discontinuidades / 10 m lineal	24
	2. Nro de familias de discontinuidades (Jn)	Cuatro familias de discontinuidades, roca fracturada	15
	3. Rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Fracturas o juntas discontinuas	4
	4. Alteración de las discontinuidades (Ja)	Superficies ligeramente modificadas con minerales que no son blandos, granos de arena y roca descompuesta sin arcilla.	1

	5. Presencia de agua (Jw)	Flujo o presión moderada, lavado de relleno de fractura en forma ocasional	0.66
	6. Condiciones tensionales (SRF)	Solo una sección rota en roca sólida, sin presencia de arcilla, (profundidad de excavación mayor a 50 m).	2.5
	Q = (RQD/Jn) x (Jr/Ja) x (Jw/SRF)		1.69
EST - 02	1. RQD	26 discontinuidades / 10 m lineal	29
	2. Nro de familias de discontinuidades (Jn)	Tres familias de discontinuidades y algunas otras aleatorias	12
	3. Rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Espejo de falla, ondulada	1.5
	4. Alteración de las discontinuidades (Ja)	Superficies ligeramente modificadas con minerales que no son blandos, granos de arena y roca descompuesta sin arcilla.	1
	5. Presencia de agua (Jw)	Flujo o presión intermedia, limpieza ocasional de la fractura con relleno.	0.66
	6. Condiciones tensionales (SRF)	Solo una sección rota en roca sólida, sin presencia de arcilla, (profundidad de excavación mayor a 50 m).	2.5
	Q = (RQD/Jn) x (Jr/Ja) x (Jw/SRF)		0.96
EST - 03	1. RQD	22 discontinuidades / 10 m lineal	36
	2. Nro de familias de discontinuidades (Jn)	Cuatro familias de discontinuidades, roca fracturada	15
	3. Rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Espejo de falla, ondulada	1.5
	4. Alteración de las discontinuidades (Ja)	Capa de limo o arena con una pequeña cantidad de arcilla no suave.	3
	5. Presencia de agua (Jw)	Flujo o presión intermedia, limpieza ocasional de la fractura con relleno.	0.66
	6. Condiciones tensionales (SRF)	Solo una sección rota en roca sólida, sin presencia de arcilla, (profundidad de excavación mayor a 50 m).	2.5
	Q = (RQD/Jn) x (Jr/Ja) x (Jw/SRF)		0.32
EST - 04	1. RQD	31 discontinuidades / 10 m lineal	23
	2. Nro de familias de discontinuidades (Jn)	Tres familias de discontinuidades y algunas otras aleatorias	12
	3. Rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Espejo de falla, ondulada	1.5

	4. Alteración de las discontinuidades (Ja)	Superficies ligeramente modificadas con minerales que no son blandos, granos de arena y roca descompuesta sin arcilla.	2
	5. Presencia de agua (Jw)	Flujo o presión intermedia, limpieza ocasional de la fractura con relleno.	0.66
	6. Condiciones tensionales (SRF)	Solo una sección rota en roca sólida, sin presencia de arcilla, (profundidad de excavación mayor a 50 m).	2.5
	Q = (RQD/Jn) x (Jr/Ja) x (Jw/SRF)		0.38
EST - 05	1. RQD	24 discontinuidades / 10 m lineal	32
	2. Nro de familias de discontinuidades (Jn)	Cuatro familias de discontinuidades, roca fracturada	15
	3. Rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Lisa ondulada	2
	4. Alteración de las discontinuidades (Ja)	Capa de limo o arena con una pequeña cantidad de arcilla no suave.	2
	5. Presencia de agua (Jw)	Superficies ligeramente modificadas con minerales que no son blandos, granos de arena y roca descompuesta sin arcilla.	0.66
	6. Condiciones tensionales (SRF)	Solo una sección rota en roca sólida, sin presencia de arcilla, (profundidad de excavación mayor a 50 m).	2.5
	Q = (RQD/Jn) x (Jr/Ja) x (Jw/SRF)		0.56

Nota: La tabla muestra el resultado de la evaluación por cada estación. Fuente: Propia.

En la tabla 22 nos muestran los resultados del valor de Q, el cual se resumirán en la siguiente tabla:

Tabla 23*Estimación Q de Barton resumen*

ESTACIÓN	Q
EST-01	0.69
EST-02	0.96
EST-03	0.32
EST-04	0.38
EST-05	0.56

Nota: Se observa el resultado de la evaluación de Q de Barton Fuente: Propia.

La tabla 23 muestra un promedio del valor de Q en las 5 estaciones de 0.58, lo que según la tabla 24 corresponde a una clase de roca II con calidad del macizo rocoso “Pobre” con fracturas abiertas y roca débil.

Tabla 24*Clasificación de la calidad del macizo rocoso según el Q de Barton*

Q	Clase	Calidad de la roca	Condición típica
<0.01	I	Extremadamente pobre	Roca desintegrada, colapsada
0.01–0.1	II	Muy pobre	Macizo intensamente fracturado
0.1–1	III	Pobre	Fracturas abiertas, roca débil
1–4	IV	Regular	Roca medianamente fracturada
4–10	V	Buena	Roca competente
10–40	VI	Muy buena	Roca masiva, estable
>40	VII	Excelente	Roca intacta o casi intacta

Nota: La tabla muestra la clasificación de la calidad de la roca según el Q de Barton. Fuente: Barton (1974).

5.2.3 Resultados de la estimación del GSI

Para el cálculo del GSI usaremos la gráfica de estimación acorde a los parámetros de estructura de macizo rocoso y las condiciones superficiales del macizo rocoso, esta evaluación también es realizada en 5 estaciones según el siguiente detalle:

Figura 19

Estimación GSI de estación 01

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN GSI MODIFICADO							
Se basa en la cantidad de fracturas por metro lineal medidos in situ con un fleómetro, la mala voladura afecta esta condición. Para la resistencia se toma en cuenta la condición de fracturas (apertura, alteración, rugosidad, relleno y recubrimiento). Si las fracturas están cerradas o levemente abiertas, se determina la resistencia golpeando o indentando la roca (resistencia de la roca intacta). En la caracterización del macizo rocoso no se toma en cuenta la presencia de agua, estado tensional y los métodos constructivos.							
CLASIFICACIÓN CUALITATIVA							
ESTRUCTURA	CONDICIÓN SUPERFICIAL	MUY BUENA (MB)	BUENA (B)	REGULAR (R)	POBRE (P)	MUY POBRE (MP)	
LEVEMENTE FRACTURADA (LF) TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 75 - 100) (1 A 5 FRACT. POR METRO) 20cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<100cm.	100cm- 50cm- 40cm-	LF/MB	LF/B	LF/R	LF/P	—	1m ³
MODERADAMENTE FRACTURADA (F) TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MODERADAMENTE ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 50 - 75) (6 A 10 FRACT. POR METRO) 10cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<20cm	20cm- 15cm- 10cm-	F/MB	F/B	F/R	F/P	F/MP	1dm ³
MUY FRACTURADA (MF) CUATRO O MÁS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES (RQD 25 - 50) (11 A 20 FRACT. POR METRO) 5cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<10cm.	8cm- 6cm-	—	MF/B	MF/R	MF/P	MF/MP	1cm ³
INTENSAMENTE FRACTURADA (IF) PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO, CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO FRAGMENTOS ANGULOSOS O IRREGULARES. (RQD 0 - 25) (MÁS DE 20 FRACT. POR METRO) 2cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<5cm.	4cm- 2cm-	—	—	IF/R	IF/P	IF/MP	1cm ³
TRITURADA (T) MASA ROCOSA EXTREMADAMENTE ROTA CON UNA MEZCLA DE FRAGMENTOS FACILMENTE DISGREGABLES, ANGULOSOS Y REDONDEADOS EN MATRIZ ARCILLOSA (SIN RQD)	1cm-	—	—	—	T/P	T/MP	1cm ³
C. VALLEJO, 2011		12	4.5	1.7	0.67	0.25	0.1
		FACTOR DE ESTADO DE LAS DIACLASAS, Jc					

Nota: La figura muestra el análisis GSI en la estación 1. Fuente: Propia.

Para la estación 1 la estructura del macizo rocoso es intensamente fracturada con una condición superficial pobre, dándonos como indicador “IF/P”. La clasificación IF

(Intensamente fracturada) señala que la superficie presenta pliegues y fallas junto con numerosas discontinuidades que crean trozos angulados o irregulares, mientras que el RQD para esta estructura varía entre 0 y 25. La clasificación P (Pobre) sugiere que la superficie es recta y nivelada, con estrías abiertas que miden de 5 mm a 1 cm, recubierta de sericita y caolín, y que tiene un relleno compacto o trozos de roca; la resistencia asociada a esta categoría de superficie. es de 25 a 50 Mpa.

Figura 20

Estimación GSI de estación 02

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN GSI MODIFICADO		CONDICIÓN SUPERFICIAL					
Se basa en la cantidad de fracturas por metro lineal medidos in situ con un flexómetro, la más voladora afecta esta condición. Para la resistencia se toma en cuenta la condición de fracturas (apertura, alteración, rugosidad, relleno y recubrimiento).							
Si las fracturas están cerradas o levemente abiertas, se determina la resistencia golpeando o indentando la roca (resistencia de la roca intacta).							
En la caracterización del macizo rocoso no se toma en cuenta la presencia de agua, estado tensional y los métodos constructivos.							
CLASIFICACIÓN CUALITATIVA							
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB)	BUENA (B)	REGULAR (R)	POBRE (P)	MUY POBRE (MP)	
LEVEMENTE FRACTURADA (LF)	100cm	—	—	—	—	—	1m ³
TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SÍ. (RQD 75 - 100) (1 A 5 FRACT. POR METRO) 20cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<100cm.	50cm	LF/MB	LF/B	LF/R	LF/P	—	
MODERADAMENTE FRACTURADA (F)	20cm	—	—	—	—	—	
TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MODERADAMENTE ESPACIADAS ENTRE SÍ. (RQD 50 - 75) (6 A 10 FRACT. POR METRO) 10cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<20cm	15cm	F/MB	F/B	F/R	F/P	F/MP	
MUY FRACTURADA (MF)	10cm	—	—	—	—	—	
CUATRO O MÁS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES (RQD 25 - 50) (11 A 20 FRACT. POR METRO) 5cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<10cm.	8cm	—	MF/B	MF/R	MF/P	MF/MP	1dm ³
INTENSAMENTE FRACTURADA (IF)	4cm	—	—	IF/R	IF/P	IF/MP	
PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO, CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO FRAGMENTOS ANGULOSOS O IRREGULARES. (RQD 0 - 25) (MÁS DE 20 FRACT. POR METRO) 2cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<5cm.	2cm	—	—	IF/R	IF/P	IF/MP	
TRITURADA (T)	1cm	—	—	—	T/P	T/MP	1cm ³
		12	4.5	1.7	0.67	0.25	
C. VALLEJO, 2011		FACTOR DE ESTADO DE LAS DIACLASAS, Jc					

Nota: La figura muestra el análisis GSI en la estación 2. Fuente: Propia.

Para la estación 2 la estructura del macizo rocoso es muy fracturada con una condición superficial pobre, dándonos como indicador MF/P. La nomenclatura “MF” (Muy fracturada) indica que la superficie tiene 4 o más sistemas de discontinuidades, el RQD asignado para esta estructura es de 25 a 50. La nomenclatura P (Pobre) indica que la superficie es lisa, plana con estrías abierta de 5mm a 1cm con recubrimiento de sericita y caolín, relleno compacto o con fragmentos de roca, la resistencia asignada a este tipo de condición superficial es de 25 a 50 Mpa.

Figura 21

Estimación GSI de estación 03

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN GSI MODIFICADO						
Se basa en la cantidad de fracturas por metro lineal medidas in situ con un flexómetro, la mala voladura afecta esta condición. Para la resistencia se toma en cuenta la condición de fracturas (apertura, orientación, rugosidad, relleno y recubrimiento). Si las fracturas están cerradas o levemente abiertas, se determina la resistencia golpeando o indiciando la roca (resistencia de la roca intacta). En la caracterización del macizo rocoso no se toma en cuenta la presencia de agua, estado tensional y las medidas constructivas. CLASIFICACIÓN CUALITATIVA						
ESTRUCTURA	CONDICIÓN SUPERFICIAL	MUY BUENA (MB)	BUENA (B)	REGULAR (R)	POBRE (P)	MUY POBRE (MP)
SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES MUY RUGOSAS O IRREGULARES (SE AJUSTA CON GOLPES DE PROTA) DISCONTINUIDADES RUGOSAS Y ONDULADAS, PRESENTA SUPERFICIE CON ONDULACIÓN, LUZES ABIERTA 1-2mm. (Rc 100-150-250 MPa) (SE GOLPEA CON VARIOS GOLPES DE PROTA) DISCONTINUIDADES LISAS, ONDULADAS CON RECUBRIMIENTO DE SÉRICA Y CLORITA, MODERADAMENTE ABIERTA DE 2-3mm. (Rc 50-100 MPa) (SE GOLPEA CON UNO O DOS GOLPES DE PROTA) SUPERFICIE LISA, PLANAS CON ESTRÍAS, ABIERTA DE 3mm A 1cm, CON RECUBRIMIENTO DE SÉRICA Y CALCÍN, RELLENO COMPACTO O CON FRAGMENTOS DE ROCA (Rc 25-50 MPa) (SE INDENTA SUPERFICIONALMENTE) SUPERFICIE PULIDA Y ESTRIADA, INTENS. ATENIDA Y MUY ABIERTA >1cm, RELLENO DE FRAGMENTOS EN MATRIZ BLANDA O FANESIZ (Rc < 25 MPa) (SE DISGREA O INDENTA PROFUNDAMENTE)						
	LEVEMENTE FRACTURADA (LF)	LF/MB	LF/B	LF/R	LF/P	—
	MODERADAMENTE FRACTURADA (F)	F/MB	F/B	F/R	F/P	F/MP
	MUY FRACTURADA (MF)	—	MF/B	MF/R	MF/P	MF/MP
	INTENSAMENTE FRACTURADA (IF)	—	—	IF/R	IF/P	IF/MP
	TRITURADA (T)	—	—	—	T/P	T/MP
VOLUMEN DE BLOQUE, Vb						
1m ³						
1dm ³						
1cm ³						
C. VALLEJO, 2011						
12 4.5 1.7 0.67 0.25 0.1						
FACTOR DE ESTADO DE LAS DIACLASAS, Jc						

Nota: La figura muestra el análisis GSI en la estación 3. Fuente: Propia.

Para la estación 3 la estructura del macizo rocoso es intensamente fracturada con una condición superficial pobre, dándonos como indicador IF/P. La clasificación IF (Intensamente

fracturada) señala que la superficie presenta pliegues y fallas junto con numerosas discontinuidades que crean trozos angulados o irregulares, mientras que el RQD para esta estructura varía entre 0 y 25. La clasificación P (Pobre) sugiere que la superficie es recta y nivelada, con estrías abiertas que miden de 5 mm a 1 cm, recubierta de sericita y caolín, y que tiene un relleno compacto o trozos de roca; la resistencia asociada a esta categoría de superficie. es de 25 a 50 Mpa.

Figura 22

Estimación GSI de estación 04

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN GSI MODIFICADO		CONDICIÓN SUPERFICIAL									
Se basa en la cantidad de fracturas por metro lineal medidos in situ con un flexómetro, la más valiosa afecta esta condición. Para la resistencia se toma en cuenta la condición de fracturas (apertura, alteración, rugosidad, relleno y recubrimiento). Si las fracturas están cerradas o levemente abiertas, se determina la resistencia golpeando o indentando la roca (resistencia de la roca intacta). En la caracterización del macizo rocoso no se toma en cuenta la presencia de agua, estado tensional y los métodos constructivos.		MUY BUENA (MB) SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES MUY RUGOSAS O IRREGULARES ONCULADAS, MULTIRUGAS, CERRADAS (Rc>250 MPa) (SE ASISTE CON GOLPES DE PROTA)		BUENA (B) DISCONTINUIDADES RUGOSAS Y ONCULADAS, PRESENTA SUPERFICIE CON ONDACIÓN, LIGER ABERTA 1-2mm. (Rc 100-250 MPa) (SE ROMPE CON VARIOS GOLPES DE PROTA)		REGULAR (R) DISCONTINUIDADES LISAS, ONCULADAS CON RECUBRIMIENTO DE SERICITA Y CLORITA, MODERADAMENTE ABERTA DE 2-5mm. (Rc 50-100 MPa) (SE ROMPE CON UNO O DOS GOLPES DE PROTA)		POBRE (P) SUPERFICIE LISA, PLANAS CON ESTRÍAS, ABERTA DE 5mm A 1cm, CON RECUBRIMIENTO DE SERICITA Y CAOLÍN, RELLENO COMPACTO O CON FRAGMENTOS DE ROCA (Rc 25-50 MPa) (SE INDENTA SUPERFICIALEMENTE)		MUY POBRE (MP) SUPERFICIE PULIDA Y ESTRADA, INTENS. ALTERADA Y MUY ABERTA >1cm, RELLENO DE FRAGMENTOS EN MATRIZ BLANDA O PANICO (Rc < 25 MPa) (SE DISGREGA O INDENTA PROFUNDAMENTE)	
ESTRUCTURA		VOLUMEN DE BLOQUE, Vb									
	LEVEMENTE FRACTURADA (LF) TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 75 - 100) (1 A 5 FRACT. POR METRO) 20cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<100cm.	100cm	LF/MB	LF/B	LF/R	LF/P	—	1m ³			
	50cm										
	MODERADAMENTE FRACTURADA (F) TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MODERADAMENTE ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 50 - 75) (6 A 10 FRACT. POR METRO) 10cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<20cm.	20cm	F/MB	F/B	F/R	F/P	F/MP	1dm ³			
	15cm										
	MUY FRACTURADA (MF) CUATRO O MÁS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES. (RQD 25 - 50) (11 A 20 FRACT. POR METRO) 5cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<10cm.	8cm	—	MF/B	MF/R	MF/P	MF/MP	1cm ³			
	6cm										
	INTENSAMENTE FRACTURADA (IF) PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO, CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO FRAGMENTOS ANGULOSOS O IRREGULARES. (RQD 0 - 25) (MÁS DE 20 FRACT. POR METRO) 2cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<5cm.	4cm	—	—	IF/R	IF/P	IF/MP	1cm ³			
	2cm										
	TRITURADA (T) MASA ROCOSA EXTREMADAMENTE ROTA CON UNA MEZCLA DE FRAGMENTOS FACILMENTE DISGREGABLES, ANGULOSOS Y REDONDEADOS EN MATRIZ ARCILLOSA (SIN RQD)	1cm	—	—	—	T/P	T/MP				
C. VALLEJO, 2011		12	4.5	1.7	0.67	0.25	0.1				
		FACTOR DE ESTADO DE LAS DIACLASAS, Jc									

Nota: La figura muestra el análisis GSI en la estación 4. Fuente: Propia.

Para la estación 4 la estructura del macizo rocoso es intensamente fracturada con una condición superficial regular, dándonos como indicador IF/R. La clasificación IF (Intensamente fracturada) sugiere que la superficie presenta plegamientos y fallas, con múltiples discontinuidades que crean trozos angulosos o irregulares. Para esta estructura, el RQD se ubica entre 0 y 25. La clasificación R (Regular) indica que la superficie es lisa y plana, con estrías de 2mm a 5mm que tienen un recubrimiento de sericita y caolín. El relleno puede ser compacto o contener fragmentos rocosos, y la resistencia asociada a esta condición superficial se sitúa de 50 a 100 MPa. Se quiebran con uno o dos golpes de una picota.

Figura 23

Estimación GSI de estación 05

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN GSI MODIFICADO		CONDICIÓN SUPERFICIAL				
Se basa en la cantidad de fracturas por metro lineal medidas in situ con un flexómetro, la más voladora afecta esta condición. Para la resistencia se toma en cuenta la condición de fracturas (apertura, alteración, rugosidad, relleno y recubrimiento).						
Si las fracturas están cerradas o levemente abiertas, se determina la resistencia golpeando e indentando la roca (resistencia de la roca intacta).						
En la caracterización del macizo rocoso no se toma en cuenta la presencia de agua, estado tensional y los métodos constructivos.						
CLASIFICACIÓN CUALITATIVA						
ESTRUCTURA		MUY BUENA (M)	BUENA (B)	REGULAR (R)	POBRE (P)	MUY POBRE (MP)
LEVEMENTE FRACTURADA (LF)		100cm				
TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 75 - 100) (1 A 5 FRACT. POR METRO) 20cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<100cm.		LF/MB	LF/B	LF/R	LF/P	—
MODERADAMENTE FRACTURADA (F)		20cm				
TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MODERADAMENTE ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 50 - 75) (6 A 10 FRACT. POR METRO) 10cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<20cm		F/MB	F/B	F/R	F/P	F/MP
MUY FRACTURADA (MF)		8cm				
CUATRO O MÁS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES (RQD 25 - 50) (11 A 20 FRACT. POR METRO) 5cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<10cm.		—	MF/B	MF/R	MF/P	MF/MP
INTENSAMENTE FRACTURADA (IF)		4cm				
PLEGAMIENTO Y FALLAMIENTO, CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTER-CERTADAS FORMANDO FRAGMENTOS ANGULOSOS O IRREGULARES. (RQD 0 - 25) (MAS DE 20 FRACT. POR METRO) 2cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<5cm.		—	—	IF/R	IF/P	IF/MP
TRITURADA (T)		1cm				
MASA ROCOSA EXTREMADAMENTE ROTA CON UNA MEZCLA DE FRAGMENTOS FACILMENTE DESGREGABLES, ANGULOSOS Y REDONDEADOS EN MATRIZ ARENOLISA (SIN RQD)		—	—	—	T/P	T/MP
C. VALLEJO, 2011		12	4.5	1.7	0.67	0.25
		FACTOR DE ESTADO DE LAS DIACLASAS, Jc				

Nota: La figura muestra el análisis GSI en la estación 5. Fuente: Propia.

Para la estación 5 la estructura del macizo rocoso es intensamente fracturada con una condición superficial pobre, dándonos como indicador IF/P. La clasificación IF (Intensamente fracturada) señala que la superficie presenta pliegues y fallas junto con numerosas discontinuidades que crean trozos angulados o irregulares, mientras que el RQD para esta estructura varía entre 0 y 25. La clasificación P (Pobre) sugiere que la superficie es recta y nivelada, con estrías abiertas que miden de 5 mm a 1 cm, recubierta de sericita y caolín, y que tiene un relleno compacto o trozos de roca; la resistencia asociada a esta categoría de superficie. es de 25 a 50 Mpa.

Después de ver la evaluación resumimos los resultados en el siguiente cuadro:

Tabla 25

Resumen de estimación de GSI de las 5 estaciones de estudio

ESTACIÓN	ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES SUPERFICIALES	GSI
EST-01	Intensamente fracturada (IF)	Pobre (P)	IF/P
EST-02	Muy fracturada (MF)	Pobre (P)	MF/P
EST-03	Intensamente fracturada (IF)	Pobre (P)	IF/P
EST-04	Intensamente fracturada (IF)	Regular (R)	IF/R
EST-05	Intensamente fracturada (IF)	Pobre (P)	IF/P

Nota: En la tabla se muestran los resultados del análisis de estimación del GSI en las 5 estaciones. Fuente: Propia.

Es necesario calcular el valor numérico del GSI para poder interpretar resultados en el software RocData, entonces para el cálculo promedio de este dato usaremos la siguiente formula:

$$\text{GSI} = 1.5 \times \text{J Cond}_{89} + \frac{\text{RQD}}{2} \dots\dots\dots (\text{Ecuación N° 16})$$

Usando la formula del GSI se tiene los siguientes resultados resumidos en la tabla 26.

Tabla 26

Resumen de resultados de estimación de GSI con formula

ESTACIÓN	NRO DISCONTINUIDADES	RQD REDONDEADO (%)	GSI
EST-01	30	24%	45.12
EST-02	26	29%	39.15
EST-03	22	36%	33.18
EST-04	31	23%	46.62
EST-05	24	32%	36.16
			$\bar{x}$ 40.05
			σ 5.74
			Max 46.62
			Min 33.18

Nota: La tabla muestra el resumen de la estimación del GSI en las 5 estaciones. Fuente: Propia.

En la tabla 26 se observa un resumen de los resultados de la estimación del GSI calculado con la formula (Ecuación 11), donde el resultado del GSI tiene un promedio de 40.05, entonces según la tabla 27, se trata de un macizo malo, intensamente fracturado, bloques muy pequeños.

Tabla 27

Clasificación de GSI

GSI (%)	Descripción
85 – 100	Muy buen macizo, bloques grandes y discontinuidades mínimas
65 – 85	Buen macizo, bloques medianos y discontinuidades ligeramente alteradas
45 – 65	Macizo moderado, bloques pequeños, fracturación significativa
25 – 45	Macizo malo, intensamente fracturado, bloques muy pequeños
10 – 25	Macizo muy malo, extremadamente fracturado, bloques sueltos

Nota: La tabla muestra la clasificación GSI según sus valores numéricos. Fuente: Hoek y Brown (1990).

5.2.4 Resultados de estimación de RMR (Rock Mass Rating)

El cálculo de RMR según el RQD es calculado por la siguiente formula:

$$\text{RMR} = 0.77 \times \text{RQD} + 12 \dots\dots\dots (\text{Ecuación N}^\circ 17)$$

Tabla 28

Resumen de resultados de estimación de RMR con formula

ESTACIÓN	RQD REDONDEADO (%)	RMR (con formula)
EST-01	24.00	30.48
EST-02	29.00	34.33
EST-03	36.00	39.72
EST-04	23.00	29.71
EST-05	32.00	36.64

Nota: Se observa el resumen de la estimación del RMR en las 5 estaciones. Fuente: Propia.

De acuerdo con los cálculos realizados utilizando la Ecuación N° 17, y considerando los datos obtenidos en las cinco estaciones de evaluación geomecánica, se determinó un valor promedio de RMR = 34,17, tal como se presenta en la Tabla 28. Según los rangos establecidos en la Tabla 29, este valor clasifica al macizo rocoso dentro de la Cía, correspondiente a una roca con las siguientes características:

- Baja resistencia estructural condicionada por discontinuidades.
- Presencia de fracturamiento moderado a intenso.
- Necesidad de sostenimiento sistemático para garantizar la seguridad de las labores subterráneas.

La clasificación RMR obtenida proporciona una base fundamental para el diseño de soportes y medidas de control geomecánico, ya que un macizo de Clase IV requiere un

enfoque más conservador y la implementación de sistemas de sostenimiento adecuados para prevenir inestabilidades durante el avance de la excavación.

Tabla 29

Sumatoria de puntuación RMR

CLASE	CALIDAD DE ROCA	RMR
I	Muy buena	81 – 100
II	Buena	61 – 80
III	Regular	41 – 60
IV	Mala	21 – 40
V	Muy Mala	0 - 20

Nota: En la tabla se muestra los rangos numéricos de RMR según la calidad de roca. Fuente: Propia.

5.3. Resultados de ensayos de laboratorio de mecánica de rocas

Para conocer a mayor detalle las características del macizo rocoso se realizaron ensayos de compresión uniaxial, triaxial, propiedades físicas, elásticas en dos muestras de roca encajonante de granodiorita, que es el tipo de roca dominante dentro de las labores subterráneas.

Figura 24

Probetas para ensayos



Nota: Probetas usadas en los ensayos de compresión uniaxial, triaxial, propiedades físicas, elásticas. Fuente: Laboratorio de mecánica de rocas CMH.

Tabla 30

Resumen de resultados de ensayos uniaxial y triaxial de dos muestras de la RP2705

MUESTRA	DENSIDAD (gr/cm³)	RESIST. COMPR. SIMPLE (MPa)	COHESIÓN (Mpa)	mi	Ø (°)	MODULO DE YOUNG E(Gpa)	COEF. DE POISSON
M-1	2.37	103.33	12.1	16.85	39.56	26.28	0.32
M-2	2.62	111.94	13.91	13.06	42.87	28.37	0.36
$\bar{x}$	2.5	107.64	13.01	14.96	41.21	27.33	0.34
σ	0.18	6.09	1.28	2.68	2.34	1.48	0.03

Nota: Se observan los resultados de ensayos en dos muestras. Fuente: Propia.

En la tabla 30 se observan los resultados obtenidos del laboratorio de CMH S.A, considerando 2 muestras, se tiene como promedio una densidad de 2.5 gr/cm³, resistencia de compresión simple de 107.64 MPa, Cohesión de 13.01 Mpa y un módulo de Young de 27.33 Gpa. La combinación de los parámetros mecánicos obtenidos sugiere que el macizo rocoso presenta un comportamiento favorable para las excavaciones subterráneas. Entre las implicancias más relevantes se destacan:

- Estabilidad inherente alta, debido a la elevada resistencia y cohesión del material.
- Baja tendencia al colapso local, siempre que se controlen las discontinuidades geológicas.
- Buen desempeño ante voladura.
- Posibilidad de sostenimiento moderado, condición

Estos resultados representan una base sólida para la selección de métodos de excavación, el diseño de la malla de perforación y la definición del sistema de sostenimiento adecuado para la progresión segura y eficiente de la RP 2705.

5.3.1 Resultados de ensayo de compresión simple

Para Consorcio Minero Horizonte S.A la resistencia mínima esperada es de 400 kg/cm², esto establecido como estándar para sus actividades de sostenimiento con Shotcrete en 28 días. Se tendrá el siguiente estándar:

Tabla 31

Estándar de resistencia de compresión simple en CMH S.A.

TIPO DE TESTIGOS CILÍNDRICOS	RESISTENCIA KG/CM²	EDAD (DÍAS)
TESTIGO DE CONCRETO SIMPLE	150	3
	400	28

Nota: La tabla muestra el estándar de la empresa para la compresión simple. Fuente: Propia.

5.3.1.1 Objetivo

Presentar el diseño de mezcla para la fabricación y aplicación de shotcrete vía húmeda con una resistencia característica a compresión de 400 kg/cm² (40 MPa) a los 28 días, cumpliendo con las normas ACI y ASTM vigentes para shotcrete estructural empleado en minería.

5.3.1.2 Normas aplicables

5.3.1.2.1 Normas de diseño y especificación

- **ACI 506R – Guide to Shotcrete**

(Guía principal para diseño de mezcla, aplicación, equipo, control de calidad)

- **ASTM C1116 – Standard Specification for Concrete with Fiber**

Reinforcement (Shotcrete con fibras sintéticas o de acero)

- **EN 14487-1 – Sprayed Concrete – Definitions, Specifications and Conformity**

- **NTP 339.100 – Requisitos del concreto lanzado**

5.3.1.2.2 Normas de ensayo

- **ASTM C39/C39M – Compressive Strength of Cylindrical Specimens**
(Probetas cilíndricas moldeadas)
- **ASTM C42/C42M – Obtaining and Testing Drilled Cores**
(Testigos extraídos del shotcrete aplicado)
- **ASTM C1604/C1604M – Early-Age Strength of Shotcrete**
(Resistencia temprana)
- **ASTM C138 – Density (Unit Weight) of Concrete**
- **ASTM C143 – Slump (cuando aplica vía húmeda)**

5.3.1.2.3 Diseño de mezcla propuesto (400 Kg/cm² equivalente a 40Mpa)

Tabla 32

Resumen de diseño de shotcrete para llegar a una resistencia de 400 a 500 kg/cm² según la norma ACI 506R – Guide to Shotcrete.

Material	Cantidad (kg/m ³)	Observación
Cemento Portland Tipo IP o GU	450 kg	Alta resistencia
Microsílice (Sílice Fume)	45 kg (10% del cemento)	Mejora densidad y resistencia
Arena	950 – 1000 kg	Módulo de finura: 2.6–2.8
Agregado 3/8"	550 – 650 kg	TM = 10 mm
Agua	160 – 180 L	Para lograr a/c $\approx$ 0.36
Superplastificante	1.0 – 1.5% del cemento	Reductor de agua tipo F
Acelerante libre de álcalis (opcional)	4 – 7% del cemento	Para resistencia temprana
Fibras sintéticas estructurales	4 – 6 kg	Opcional según diseño
Fibras de acero	25 – 40 kg	Alternativa a fibras sintéticas

Nota: Diseño de shotcrete para llegar a una resistencia de 400 a 500 kg/cm². Fuente: norma ACI 506R

Este diseño también genera poco rebote, es importante también un adecuado curado.

Las muestras se extraen en la planta de mezcla de concreto, especialmente de la combinación producida por los dispositivos mezcladores que serán empleados para llevar el shotcrete a los lugares de trabajo subterráneos. Estas muestras deben tener unas medidas de 6" x 10", y es necesario cumplir con los métodos adecuados para su curación durante 1, 3 o 28 días, dependiendo de lo que se requiera. Es fundamental adherirse al proceso para garantizar resultados precisos. (Consultar el punto 4. 5. 4)

5.3.1.2.4 Requisitos de los materiales

Tabla 33

Resumen de diseño de shotcrete para llegar a una resistencia de 400 a 500 kg/cm² según la norma ACI 506R – Guide to Shotcrete.

Material	Requisito según NTP 339.100
Cemento Portland	Cumple NTP 334.009 (equivalente a ASTM C150)
Agregados	Cumplen NTP 400.037; granulometría continua y limpia
Microsílice / Sílice fume	Según ASTM C1240, opcional para alta resistencia
Aditivos químicos	Según ASTM C494, superplastificantes o acelerantes
Fibras (opcional)	ASTM C1116, para reforzamiento estructural

Nota: Diseño de shotcrete para llegar a una resistencia de 400 a 500 kg/cm². Fuente: norma ACI 506R

Figura 25*Testigos cilíndricos*

Nota: Se muestra una fotografía de los testigos cilíndricos de 15cm x 30cm. Fuente: Scielo (2017).

Este grado de resistencia se utiliza para cavar a grandes profundidades donde la presión del suelo es considerable. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas llevadas a cabo con un compresor hidráulico de la marca ELE Internacional, de acuerdo a la normativa ASTM C 39 (procedimiento de prueba para establecer la resistencia a compresión de cilindros de concretos moldeados).

Tabla 34

Resultados de los ensayos realizados en un equipo prensa hidráulica – ELE Internacional.

MES	EDAD (DIAS)	PROMEDIO (Kg/cm2)	COMENTARIOS
ENERO	1	215	A/C 0.36
	3	356	A/C 0.36
	28	586	A/C 0.36
FEBRERO	1	226	A/C 0.36
	3	366	A/C 0.36
	28	592	A/C 0.36
MARZO	1	206	A/C 0.36
	3	376	A/C 0.36
	28	581	A/C 0.36
ABRIL	1	213	A/C 0.36
	3	370	A/C 0.36
	28	578	A/C 0.36
MAYO	1	211	A/C 0.36
	3	377	A/C 0.36
	28	576	A/C 0.36
JUNIO	1	222	A/C 0.36
	3	369	A/C 0.36
	28	580	A/C 0.36
1		$\bar{x}$	215.5
		σ	7.341662
		Max	226
		Min	206
3		$\bar{x}$	368.8
		σ	8.526429
		Max	377
		Min	356
28		$\bar{x}$	582.2
		σ	5.879342
		Max	592
		Min	576

Nota: La tabla muestra el resultado resumen de los ensayos con prensa hidráulica obtenidos por mes en edades: 1, 3 y 28. Fuente: Propia.

En la tabla 34 se observan los resultados mensuales obtenidos, a las edades de 1, 3 y 28 días, considerando 395 kg de cemento y una relación de agua y cemento de 0.36. En promedio

a la edad de 1 día se llegó a 215.5 kg/cm² de resistencia, a los 3 días a 368.8 kg/cm² y a los 28 días de edad se llegó a 582.2 kg/cm².

Estos resultados nos dan una señal favorable de las resistencias que se esperan en la operación de sostenimiento en shotcrete, pues son superiores a los esperado, es decir la resistencia a los 28 días es en promedio de 582.2 kg/cm², superior a los 400 kg/cm² permitidos por compañía como mínimo.

5.3.2 Resultados de ensayos con testigos diamantinos de concreto con aditivo acelerante

Estos se obtienen a partir de los paneles de concreto lanzado que se proyectan en los mismos frentes de trabajo para fines de sostenimiento, en este caso de la rampa 2705.

Este proceso se lleva a cabo diariamente, la norma principal para ensayos con testigos diamantinos de shotcrete acelerado + fibra es ASTM C1604 / C1604M la cual se complementa muy bien con la guía ACI 506.4R para definir plan de muestreo y criterios de interpretación.

Para este caso el estándar de Consorcio Minero Horizonte establece como mínimo una resistencia de 360 kg/cm² a los 28 días de edad, esta información proviene de la combinación entre el shotcrete, el aditivo Sigunit L-30 que acelera el fraguado y la presión de aire utilizada para aplicarlo sobre los paneles. Asimismo, es vital que estos testigos se sometan al mismo proceso de curado que los testigos de hormigón.

A continuación, se muestran los resultados promedios mensual de ensayos de compresión con el aditivo Sigunit I -30 Y FIBRA Dramix (65/35).

Tabla 35

Resultados promedios mensual de ensayos de compresión con el aditivo Sigunit I -30 Y FIBRA Dramix (65/35).

MES	EDAD (DIAS)	PROMEDIO (Kg/cm2)	ADITIVO	FIBRA
ENERO	1	165	Sigunit l- 30	Dramix (65/35)
	28	369	Sigunit l- 31	Dramix (65/35)
FEBRERO	1	155	Sigunit l- 32	Dramix (65/35)
	28	359	Sigunit l- 33	Dramix (65/35)
MARZO	1	160	Sigunit l- 34	Dramix (65/35)
	28	372	Sigunit l- 35	Dramix (65/35)
ABRIL	1	167	Sigunit l- 36	Dramix (65/35)
	28	388	Sigunit l- 37	Dramix (65/35)
MAYO	1	175	Sigunit l- 38	Dramix (65/35)
	28	369	Sigunit l- 39	Dramix (65/35)
JUNIO	1	176	Sigunit l- 40	Dramix (65/35)
	28	377	Sigunit l- 41	Dramix (65/35)
		1	$\bar{x}$	166.33
			σ	8.24
			Max	176.00
			Min	155.00
		28	$\bar{x}$	372.33
			σ	9.67
			Max	388.00
			Min	359.00

Nota: la tabla muestra los resultados obtenidos en los ensayos de compresión usando el aditivo Sgurit I-30 y fibra dramix(65/35). Fuente: Propia.

En la tabla 35 se muestran los resultados de la prueba de compresión utilizando el aditivo Sigunit junto con la fibra Dramix, a los 1 y 28 días de edad, donde el promedio para el primer día es de 166. 33 kg/cm2 y para los 28 días es de 388 kg/cm2. Se concluye que el diseño del shotcrete alcanza el estándar mínimo requerido por la empresa, establecido en 360 kg/cm2, considerándolo de calidad adecuada.

Figura 26*Corte de testigo cilíndrico*

Nota: la figura muestra el corte cilíndrico. Fuente: Propia.

En la figura 26 se observa el proceso de corte de testigos diamantinos con un equipo llamado “testiguera” cuya función es realizar cortes circulares precisos en materiales duros como hormigón (concreto), asfalto o piedra. A diferencia de un taladro percutor que golpea y rompe, esta máquina corta el material mediante abrasión.

5.3.3 Estimación de rango de absorción de energía y resistencia residual que debe tener el shotcrete empleado según la calidad de roca

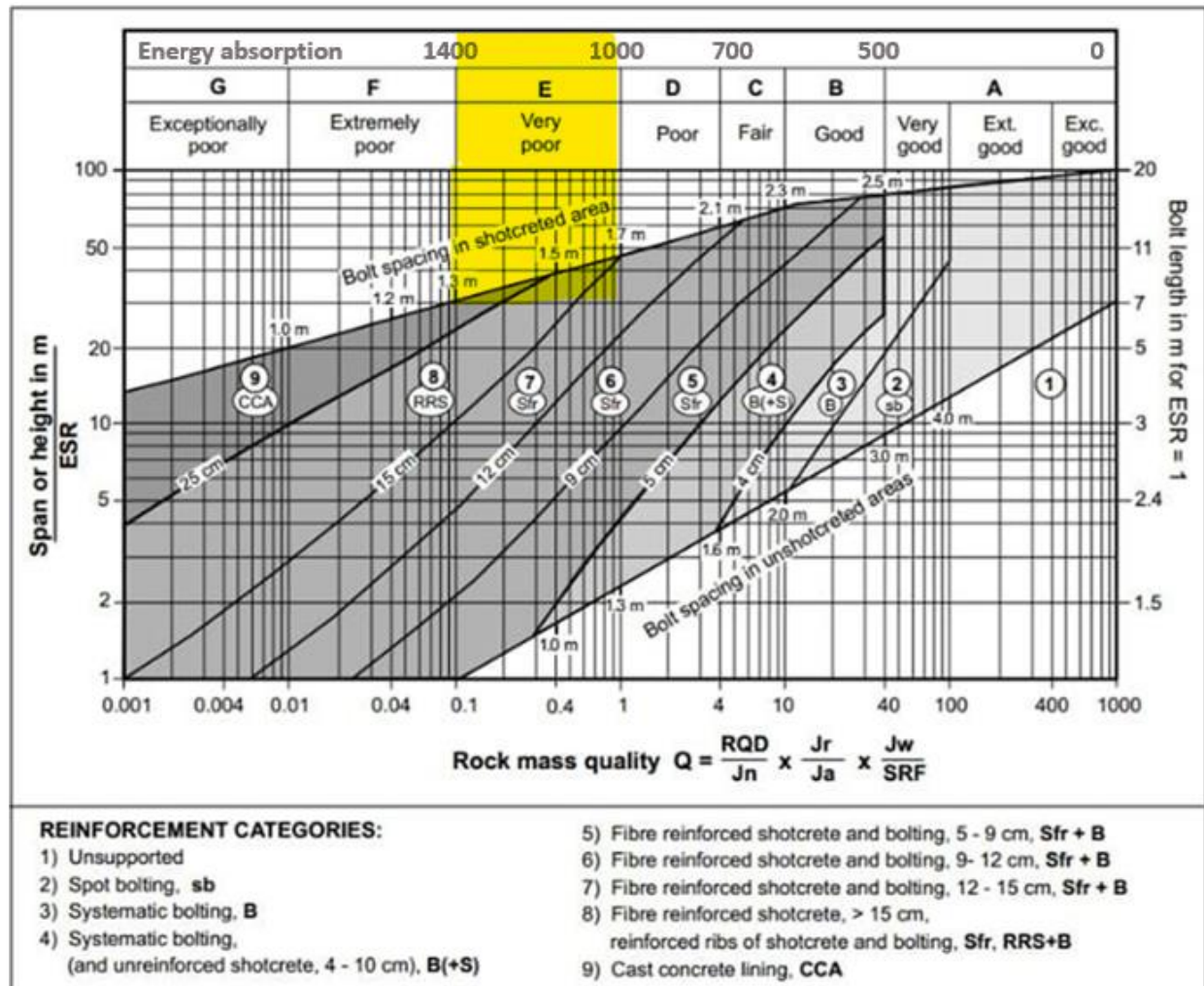
También denominados ensayos de energía absorbida, estos dependen de la cantidad de energía que se capta y de la resistencia remanente en el macizo rocoso. Para este tipo de roca, ya clasificada como deficiente, los valores del RMR varían entre 20 y 40. Con base en esto, podemos inferir, siguiendo el modelo de Barton, que el shotcrete necesita una absorción de energía que esté entre 1000 y 1300 Joules. La fibra metálica cumple una función vital en el shotcrete, ya que le proporciona flexibilidad y resistencia. Estas características ayudan a que

el progreso de las excavaciones sea más seguro. Además, el uso de fibra metálica permite sustituir la malla electrosoldada en algunas actividades, lo que mejora el soporte y disminuye las condiciones peligrosas que esta última puede causar durante su colocación.

Al mencionar que la absorción oscila entre 1000 y 1300 Joules, podemos decir que se está refiriendo a la tenacidad del concreto proyectado. Es decir, significa que el material puede absorber entre 1000 y 1300 Joules de energía antes de alcanzar la deformación límite o la falla parcial, lo que refleja su capacidad de soportar impactos, movimientos del macizo rocoso o cargas dinámicas. Este rango es un criterio de diseño que asegura que el shotcrete tenga suficiente ductilidad y resistencia residual para proteger el túnel o la rampa subterránea, evitando colapsos o desprendimientos.

Figura 27

Absorción de energía necesaria para el sostenimiento



Nota: Rango de absorción de energía necesaria para el sostenimiento. Fuente: Carvajal (2008).

5.3.4 Resultados de ensayos con paneles de concreto

Estos paneles tienen una forma cuadrada y unas dimensiones de 60 x 60 x 10 cm. Se producen proyectando concreto de manera perpendicular. Después de la proyección, se nivela la superficie para facilitar su transporte al laboratorio.

Es importante especificar la cantidad de aditivo acelerante de fraguado que se utiliza en la proyección de estos paneles. Además, se debe marcar con aerosol la fecha, la labor realizada y la presión de aire utilizada durante la proyección.

5.3.4.1 Objetivo del ensayo

Evaluar la calidad del shotcrete proyectado mediante el ensayo sobre panel cuadrado de $60 \times 60 \times 10$ cm, mediante los siguientes parámetros:

- Resistencia a compresión mediante testigos extraídos del panel
- Resistencias residuales / tenacidad (si hay fibras)
- Densidad del material
- Espesor real proyectado

5.3.4.2 Normas utilizadas

5.3.4.2.1 Shotcrete y extracción de testigos

- ASTM C1604 – Obtención y ensayo de núcleos de shotcrete
- ACI 506R – Shotcrete Guide

5.3.4.2.2 Resistencia a compresión

- ASTM C39

5.3.4.2.3 Tenacidad (si el shotcrete contiene fibras)

- UNE-EN 14487-2 – Ensayos de tenacidad de shotcrete
- ASTM C1609 – Flexión para concreto reforzado con fibras

5.3.4.2.4 Densidad

- ASTM C138

5.3.4.3 Características del panel

Las características del panel según la norma ASTM C1604 para el ensayo son los siguiente:

Tabla 36

Las características del panel según la norma ASTM C1604

Parámetro	Especificación
Tipo de elemento	Panel de control de calidad
Forma	Cuadrado
Dimensiones	60 × 60 × 10 cm
Superficie	Placa metálica o encofrado rígido
Shotcrete aplicado	Vía húmeda
Condición	Panel curado y posteriormente ensayado

Nota: La tabla muestra los parámetros y especificaciones del panel de concreto empleado para el ensayo. Fuente: Propia.

Aprovechamos también la toma de paneles para la extracción de testigos diamantinos.

Figura 28

Diagrama de ensayos con paneles de concreto



Nota: Diagrama de pasos para realizar un ensayo con paneles de concreto. Fuente: Propia.

Figura 29*Enrazado de paneles*

Nota: La fotografía muestra el shotcreteo en un panel para ser analizado. Fuente: Propia.

Es fundamental mencionar que el tiempo de curación de estos paneles es de 28 días, periodo tras el cual se pueden realizar las pruebas de absorción de energía.

La habilidad para absorber energía está influenciada por la cantidad de fibra en cada metro cúbico; de acuerdo con las directrices geomecánicas, esta cantidad puede fluctuar entre 30 kg y 50 kg, con el objetivo de conseguir una absorción de energía que varíe entre 1000 y 1300 Joules.

Estos valores exceden los lineamientos establecidos por la norma UNE 14487. En la Unidad Minera de Parcoy del Consorcio Minero Horizonte, los criterios de calidad son los siguientes:

Figura 30*Rotura de paneles de concreto*

Nota: La imagen muestra la rotura de paneles de concreto. Fuente: Propia.

Para la investigación se llevó a cabo un análisis con un grupo de panel utilizando el aditivo acelerador Sigunit I-30 en la rampa 2705 cada mes, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 37*Resultados de resistencia de compresión simple en paneles mensuales*

MES	AÑO	EDAD (días)	RAMPA	FIBRA (Kg)	ADITIVO ACELERANTE	ESPELOR REAL PROYECTADO	PRESION DE AIRE (BAR)	RESISTENCIA (JOULES)
OCTUBRE	2023	28	RP 2705	45	L-30	9.8	3.2	1365
NOVIEMBRE	2023	28	RP 2705	40	L-30	10.1	3.1	1267
DICIEMBRE	2023	28	RP 2705	35	L-30	10	3.2	1159
ENERO	2024	28	RP 2705	40	L-30	9.7	3.3	1380
FEBRERO	2024	28	RP 2705	40	L-30	10.2	3	1552
MARZO	2024	28	RP 2705	45	L-30	9.8	3.5	1272
				$\bar{x}$	40.83			1332.50
				σ	3.76			133.82
				Máx.	45.00			1552.00
				Mín.	35.00			1159.00

Nota: La tabla muestra los resultados obtenidos de resistencia simple en paneles las cuales fueron realizadas mensualmente. Fuente: Propia.

En la tabla 37 se observa el resumen mensual de los resultados de la resistencia a la compresión simple empleando en promedio: 40.83 kg de fibra, aditivo acelerante L-30, una presión de aire de 3.22 bares y una resistencia en Joules de 1332.50.

Estos resultados nos dan a entender que en las condiciones expuestas se logra una resistencia de 1332.50 en promedio, esta resistencia es la mínima que debe llegar el shotcrete a emplear para que pueda llegar a su punto máximo de fracturamiento.

5.4 Cálculo de parámetros del macizo rocoso

Acorde a los ensayos de laboratorio y sus resultados se podrá determinar los parámetros representativos del macizo rocoso, esto gracias al software RocData el cual tiene como base la teoría de rotura de Hoek-Brown. Los datos requeridos por el software son: la resistencia a la compresión simple, el módulo de Young, el GSI, el parámetro m_i y el parámetro D .

El valor del GSI promedio según los cálculos realizados es de 40.05 y el valor del parámetro será de 0.5 según la siguiente figura:

Figura 31

Elección de tipo de labor subterránea según su calidad de roca.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.	$D = 0.8$

Nota: La figura muestra la elección del tipo de labor según su calidad de roca. Fuente: Propia.
Se asigna el valor $D=0.5$ porque se trata de un macizo roco de calidad mala a muy mala.

La figura 31 se usa para la elección del valor de “ D ” el cual será 0.5 por ser la rampa 2705 una rampa excavación manual de calidad de roca mala.

Figura 32

Ingreso de data en el software RocData.

The screenshot shows the RocData software interface with the following input fields and values:

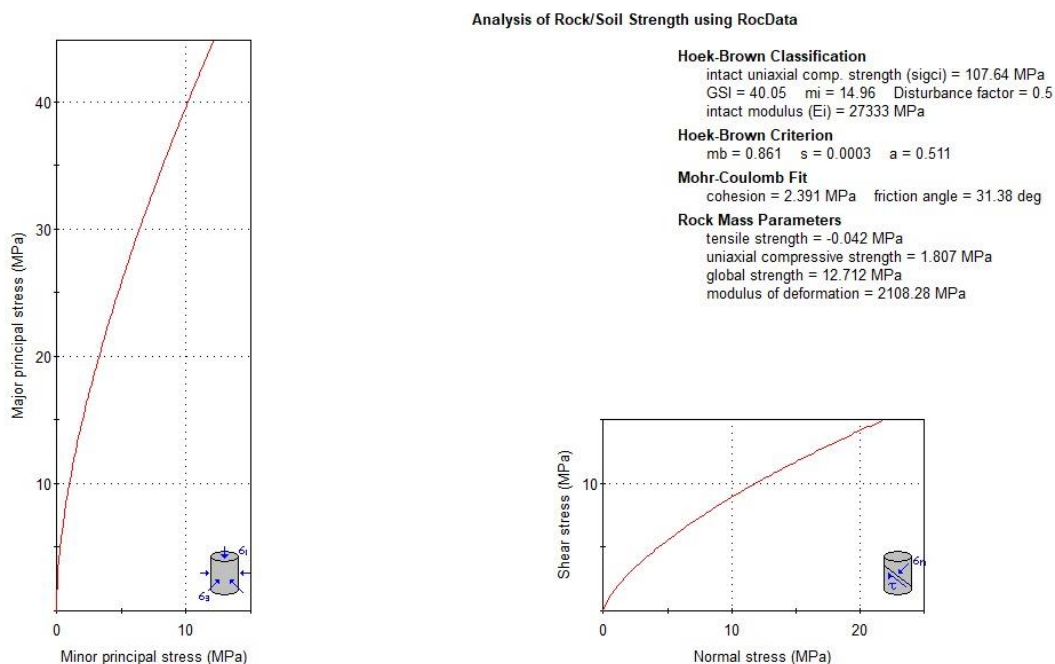
- Hoek-Brown Classification:**
 - sigci: 107.64 MPa
 - GSI: 40.05
 - mi: 14.96
 - D: 0.5
 - ☒ Ei: 27333 MPa
 - ☐ MR: [empty]
- Hoek-Brown Criterion:**
 - mb: 0.861
 - s: 0.0003
 - a: 0.511
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$
- Failure Envelope Range:**
 - Application: Tunnels
 - sig3max: 12.1292 MPa
 - Unit Weight: 0.045 MN/m³
 - Tunnel Depth: 600 m

Nota: La figura muestra el ingreso de datos al RocData. Fuente: Propia.

Tras los resultados obtenidos en la tabla 30, cada una de estas son importantes para poder importarlos al RocData, como se observa en la figura 32: un GSI de 40.05 el cual es resultado del promedio calculado en la tabla 26, y una resistencia de compresión simple de 107.64 Mpa equivalente a 27.33 Gpa, un valor de “mí” de 14.96, un módulo de Young de roca intacta (Ei) de 27333 Mpa y un peso específico de 0.045 MN/m³ el cual es equivalente a 2.5 gr/cm todos estos datos obtenidos de la tabla 30, se considera también una profundidad litostatica de 600 metros, todos estos datos importados al software nos mostraran una interpretación general de la roca encajonante

Figura 33

Resultados gráficos obtenidos con el RocData.



Nota: La figura muestra el resultado de datos al RocData. Fuente: Propia.

Considerando los datos ingresados al RocData, nos muestra los gráficos que se observan en la figura 33, acá podemos identificar valores importantes de la roca como su módulo de elasticidad (Ei) de 27333 Mpa, una cohesión de 2.391 Mpa, un ángulo de fricción de 31.38 y un módulo de deformación de 2108.28 Mpa.

Tabla 38

Resultado de parámetros con software RocData.

PARÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO	VALOR
Resistencia a tracción (σ_t)	- 0.042 MPa
Resistencia a compresión uniaxial (σ_c)	1.807 MPa
Resistencia global (σ_{cm})	12.712 MPa
Módulo de Young o deformación (E_m)	2108.28 MPa

Nota: Resultados de datos del RocData. Fuente: Propia.

5.5 Análisis tensional del macizo rocoso en la rampa 2705

5.5.1 Estimación de Tensiones Naturales

La evaluación de las presiones horizontales y verticales que afectan al macizo rocoso se lleva a cabo usando fórmulas basadas en la experiencia. La presión vertical está relacionada con el peso de la roca que se encuentra por encima, mientras que la presión horizontal se determina utilizando la presión vertical junto con el parámetro k.

Para calcular la presión vertical, se tomó en cuenta un peso específico de la roca de 0.045 MN/m³, equivalente a 4.59 ton/m³, y una altura litostática de 600 m sobre el área excavada. Por otro lado, el parámetro k se obtiene en función del módulo de Young del macizo rocoso, que tiene un valor de 1.25 GP.

$$\sigma_v = \rho \times h \dots\dots\dots (Ecuación N° 18)$$

$$\sigma_v = 4.59 \text{ ton/m}^3 \times \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \right) \times \left(\frac{9.8067 \text{ N}}{1 \text{ kg}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ MN}}{10^6 \text{ N}} \right) \times 600 \text{ m}$$

$$\sigma_v = 27.0 \text{ Mpa}$$

$$k = 0.25 + 7 \times E \times \left(0.001 + \frac{1}{h} \right) \dots\dots\dots (Ecuación N° 19)$$

$$k = 0.25 + 7 \times \frac{2108.28}{1000} \times \left(0.001 + \frac{1}{600} \right)$$

$$k = 0.29$$

$$\sigma_h = \sigma_v \times k$$

$$\sigma_h = 27.0 \times 0.29 = 7.83 \text{ Mpa}$$

5.5.2 Análisis Tensional de la Excavación con el método de elementos finitos (Software Phase 2)

El propósito del análisis de tensiones en excavaciones es examinar cómo se comporta el macizo rocoso en términos de tensiones y deformaciones, utilizando un modelo de elementos finitos a través del software Phase2. Los datos que se deben ingresar incluyen las condiciones

de tensión que enfrentará la excavación, así como las características del material que está presente, tanto de la roca que la rodea como de la vena mineral. Las condiciones de tensión se calculan tomando en cuenta la profundidad de la excavación (altura litostática), el peso específico aproximado del material rocoso y la relación entre las tensiones horizontales y verticales, que está representada por el parámetro k , el cual se carga en Phase2 como se muestra en la figura 34.

Figura 34

Ingreso parámetros tensionales en el software Phase2.

Field Stress Properties	Value
Field Stress Type:	Gravity
☐ Use actual ground surface	
☐ Use effective stress ratio	
☐ Use variable stress ratio	
Ground Surface Elevation (m):	3400
Unit Weight of Overburden (MN/m3):	0.045
Total Stress Ratio (horiz/vert in plane):	0.29
Total Stress Ratio (horiz/vert out-of-plane):	1
Locked-in horizontal stress (in plane) (MPa, Comp. +):	0
Locked-in horizontal stress (out-of-plane) (MPa, Comp. +):	0

Nota: En la imagen se muestra los parámetros ingresados en el phase 2. Fuente: Propia.

Las características del material necesarias, tanto para la roca contenedora como para el filón mineral, abarcan el módulo de Young del conjunto rocoso, la resistencia a la compresión uniaxial de la roca sin modificar y los valores del criterio de resistencia de Hoek-Brown, en particular m_b y s .

Figura 35

Ingreso propiedades del macizo rocoso en el software Phase2.

Define Material Properties

Granodiorita

Material 2

Material 3

Material 4

Material 5

Material 6

Material 7

Material 8

Material 9

Material 10

Material 11

Material 12

Material 13

Material 14

Material 15

Material 16

Material 17

Material 18

Material 19

Material 20

Material 21

Material 22

Material 23

Material 24

Material 25

Material 26

Material 27

Material 28

Material 29

Granodiorita

Material Color:

Initial Element Loading: Field Stress & Body Force Unit Weight: (MN/m3): 0.045

Elastic Properties

Elastic Type: Isotropic Poisson's Ratio: 0.34

Young's Modulus (MPa): 27330 ☐ Young's Modulus (resid) (MPa): 20000

E1 (MPa): 20000 E2 (MPa): 20000 Ez (MPa): 20000

v12: 0.2 v1z: 0.2 v2z: 0.2

Strength Parameters

Failure Criterion: Generalized Hoek-Brown    Material Type: Elastic

Intact Comp. Strength (MPa): 107.64 Dilation Parameter: 0

mb Parameter (peak): 0.861 mb Parameter (resid): 1

s Parameter (peak): 0.0003 s Parameter (resid): 0.001

a Parameter (peak): 0.511 a Parameter (resid): 0.5

☐ Stage Properties ☐ Datum Dependent

Define Factors...

Define Properties...

Unsaturated Shear Strength

Phi b: 0 Air Entry (MPa): 0

Copy To...

Statistics...

☐ Show only properties used in model

OK

Cancel

Nota: En la imagen se muestra la asignación de valores de las características del macizo rocoso. Fuente: Propia.

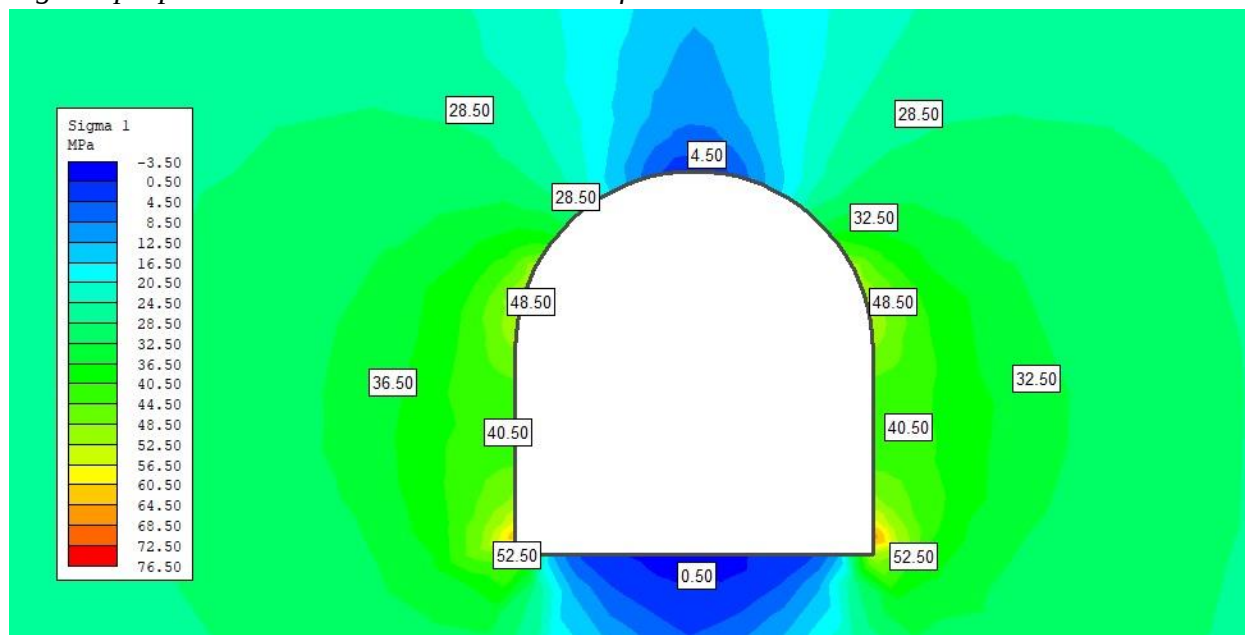
En la figura se observa la asignación del tipo de material significativo de la zona de investigación, que en este caso es la granodiorita, el peso específico asignado según el resultado de laboratorio es 0.045 MN/m^3 y un módulo de Young de 27330 Mpa.

Los análisis realizados con el software Phase2 arroja una distribución de tensiones alrededor de la excavación, concentraciones de esfuerzos principales σ_1 y σ_3 , así como los desplazamientos generados por el campo tensional. El parámetro más relevante es el factor de esfuerzo - equivalente al factor de seguridad en torno a la excavación.

El esfuerzo principal máximo (σ_1) en el contorno alcanza valores entre 0.50 y 48.50 Mpa como se observa en la figura 36. Esto nos da a entender que los esfuerzos en los hastiales y en el techo son significativos.

Figura 36

Ingreso propiedades del macizo rocoso en el software Phase2.

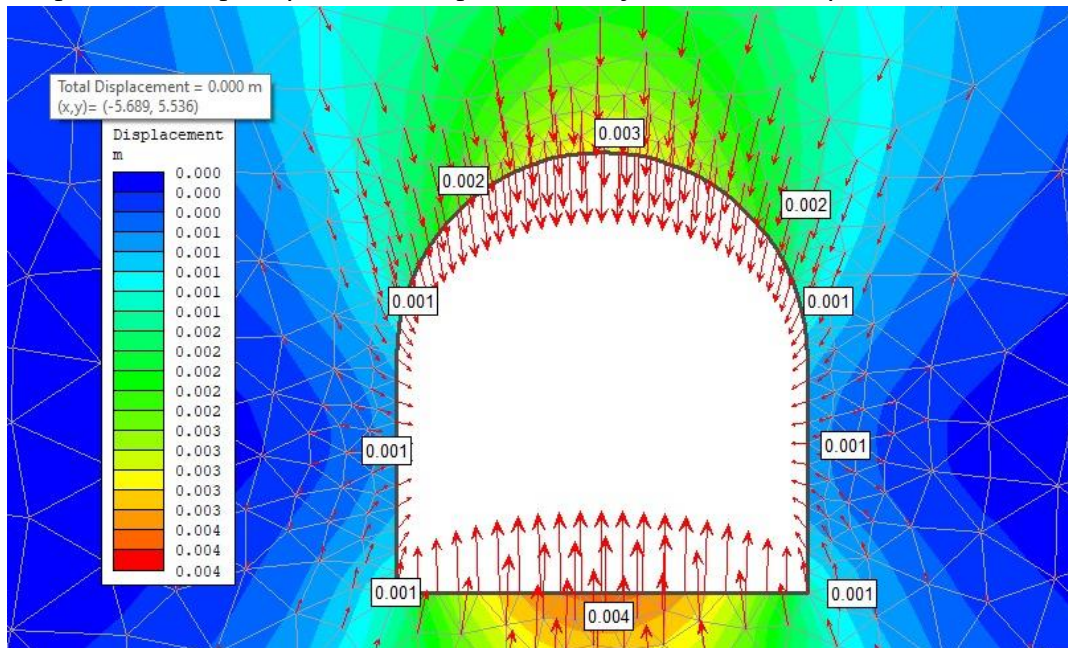


Nota: En la imagen se muestra el resultado de valores del sigma 1, donde los valores llegan hasta 48.50. Fuente. Propia.

Los desplazamientos debidos al campo tensional llegan a aproximadamente 40 mm en la bóveda de la excavación como se observa en la figura 37, se observa como quedaria la sección de la rampa de no tener un sostenimiento, a parte de los desprendimientos de roca que se pueda ocasionar.

Figura 37

Desplazamiento por efecto del campo tensional y vectores de deformación.

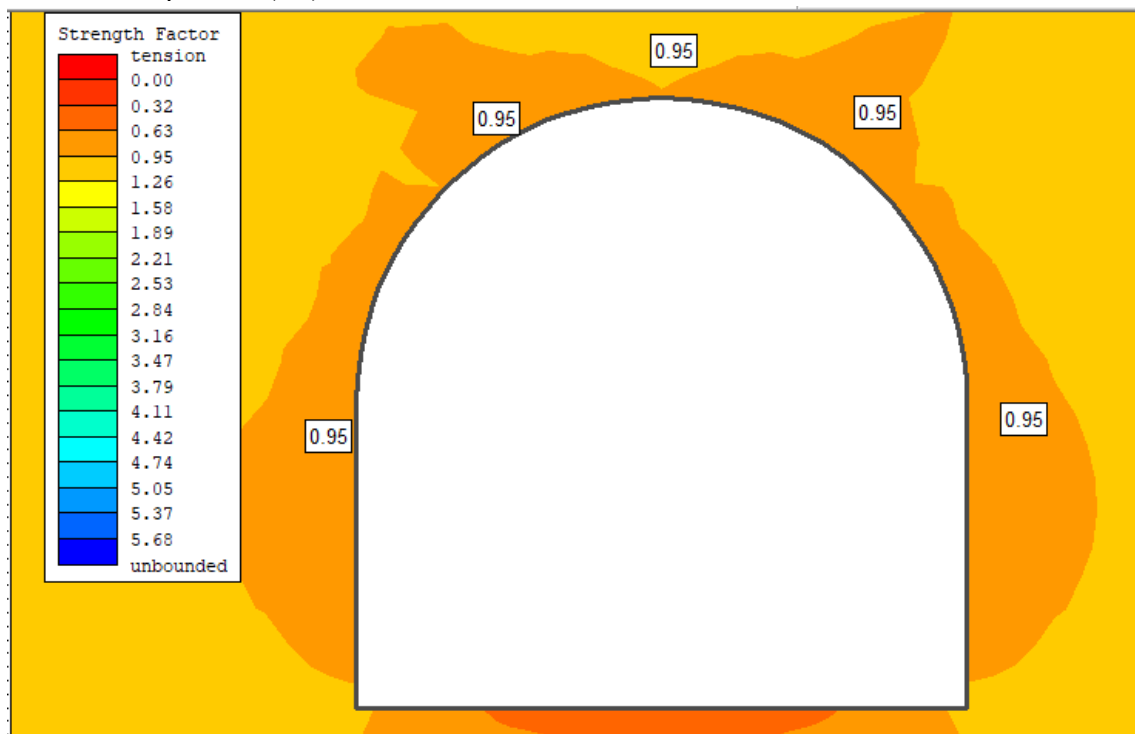


Nota: En la imagen se muestra el desplazamiento de hasta 0.004 mm. Fuente. Propia.

En la figura 38 se observa el factor de esfuerzo equivalente al factor de seguridad la cual tiene un valor 0.95, este valor es menor a 1, lo cual se interpreta que dicha labor requiere ser sostenida por la inestabilidad que tiene la sección. La interpretación del factor de esfuerzo es desde 0 a 5.68 de color rojo a azul respectivamente. Para el caso de 0.95 que es el indicador numérico asignado según el software el color asignado es naranja. Una vez sostenida la labor se realiza nuevamente la simulación con el software con el propósito de obtener un resultado mayor a uno.

Figura 38

Factor de esfuerzos (FS) alrededor de la excavación.



Nota: En la imagen se muestra el factor de esfuerzo que en valor es 0.95. Fuente. Propia.

5.6 Diseño de sostenimiento

5.6.1 Calculo de diseño de sostenimiento

Para determinar el diseño de soporte, se empleará el Abaco de Barton, que se fundamenta en las variables: el Valor de Q y la relación entre la altura y el ESR (Índice de Soporte de Excavación). En la tabla 24 se presentan de manera resumida los resultados del Q, considerando un valor promedio de 0.58, y la relación de altura con el ESR se calculará de la forma siguiente:

$$De = L/ESR..... \text{ (Ecuación N° 20)}$$

Donde:

L: Luz o altura en metros -> Para este caso el valor de L será la altura de la sección de la rampa que es 4.5 metros

Tabla 39

Tabla de descripción de valor ESR

TIPO	DESCRIPCIÓN	ESR
A	Labores mineras de carácter temporal.	3 – 5
B	Pozos verticales	2 – 2.5
C	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión) túneles, galerías de avance y socavones en grandes excavaciones.	1.6
D	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras y de ferrocarril menores, túneles de acceso.	1.3
E	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carretera y ferrocarril mayores, refugios subterráneos, emboquilles e intersecciones de túneles.	1
F	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0.8

Nota: La tabla muestra la asignación de ESR según la descripción del tipo de labor. Fuente:

Propia.

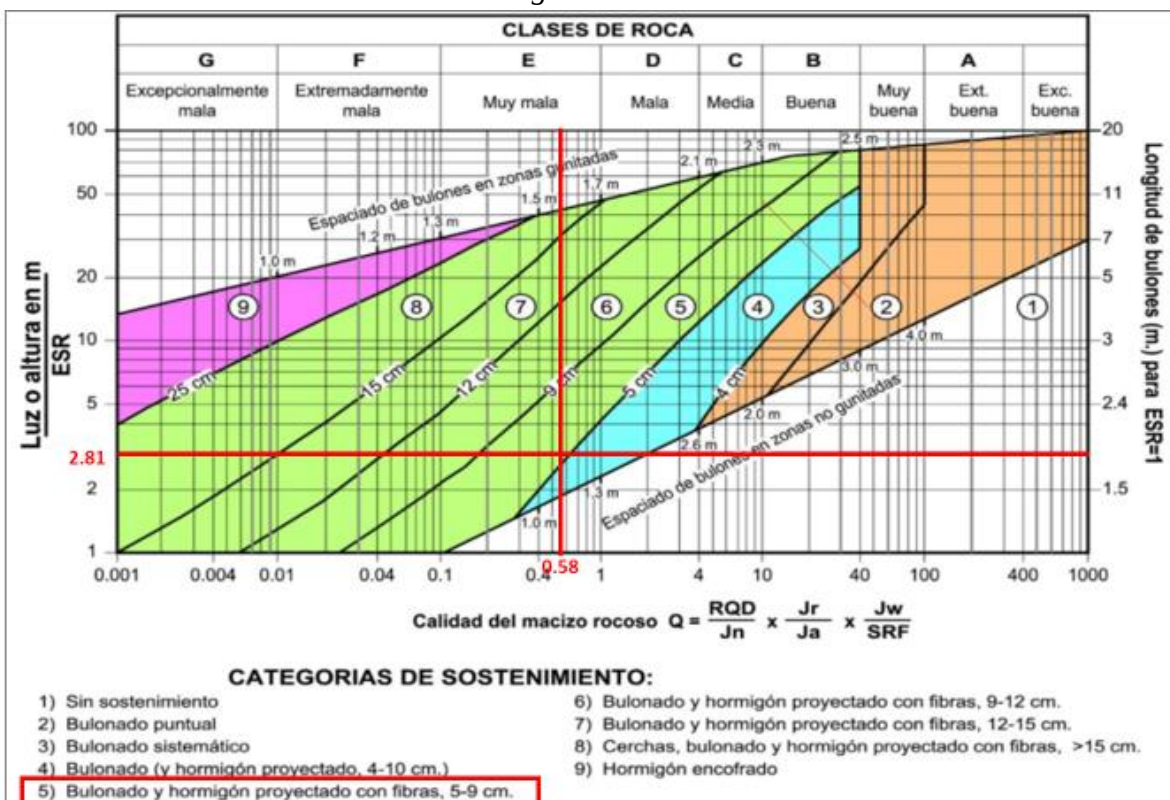
ESR: Excavation Support Ratio -> Verificando la tabla N°04 corresponde un valor de 1.6 por ser una labor permanente.

Entonces: $De = \frac{4.5}{1.6} = 2.81$

$De = 2.81$

Figura 39

Elección del diseño del sostenimiento según el Abaco de Barton



Nota: La figura muestra la elección del tipo de sostenimiento según su calidad de roca y el factor de relación de luz y ESR, Fuente: Propia.

Se observa en la figura 39 la elección de diseño del sostenimiento, que en este caso será usando pernos y hormigón proyectado con fibras, con el siguiente diseño:

- ✚ Pernos Swellex de 2 metros que en pies será: 6.56 pies $\equiv$ 7 pies.
- ✚ Distanciamiento entre pernos: 1.2 metros.
- ✚ Hormigón proyectado con fibras de 5 cm de espesor que en pulgadas será 2''.

5.7 Análisis de estabilidad con el diseño de sostenimiento propuesto con Software Phase 2

El diseño de sostenimiento planteado será evaluado mediante software con el fin de verificar su comportamiento bajo la influencia del campo tensional de la excavación.

Se utilizó el programa Phase2 para analizar la solidez de la excavación, teniendo en cuenta el soporte sugerido y el efecto del campo de tensiones. Para esto, se aplicaron las características técnicas del perno Swellex y los parámetros de diseño relevantes, que fueron incluidos en los modelos creados para el estudio de la excavación.

Figura 40

Ingreso de datos según las características del Swellex con software Phase 2.

Define Bolt Properties

Perno Swellex 7 pies

Name:

Bolt Color:

Bolt Properties

Bolt Type:

Tensile Capacity (MN):

Tributary Area (mm2):

Bolt Modulus, E (MPa):

Bond Strength (MN/m):

Out-of-plane Spacing (m):

Bond Shear Stiffness (MN/m/m):

Residual Tensile Capacity (MN):

Bolt Model

☐ Elastic ☒ Plastic ☒ Joint Shear

Pre-Tensioning

Pre-Tensioning Force (MN):

☒ Constant Force in Install Stage

Face Plates

☒ Attached Face Plates

☐ Add Pull-Out Force

Force (MN):

☐ Constant Shear Stiffness

Stiffness (MN/m/m):

☐ Add Bulges

Bond Length

☐ Percent of Length:

☐ Length (m):

☐ Secondary Bond Length

☐ Show only properties used in model

Nota: La figura muestra el ingreso de las características del perno swellex de 7 pies en el phase 2. Fuente: Propia.

En la figura 40 se observan los parámetros que salen por default al momento de escoger el perno swellex.

Figura 41

Ingreso datos según las características del perno a emplear

Nota: La figura muestra el ingreso de las características del perno swellex de 7 pies en el phase 2, con una longitud de 2.13 metros y un espaciamiento de 1 metro. Fuente: Propia.

La figura 41 muestra la ventana del software Phase2 (RS2) – Add Bolt Pattern, utilizada para definir un patrón de pernos de sostenimiento en un modelo de elementos finitos de la longitud de perno swellex de 7 pies equivalente a 2.13 metros. Con un espaciamiento entre sí de 1.2 metros.

Para el caso del shotcrete con fibra según el diseño de sostenimiento de la figura 39, se trata de un espesor de 2 pulgadas equivalente a 5 cm. Para el cálculo del módulo de Young según la norma ACI 318 se usará la siguiente formula:

$$E = 4700 \times \sqrt{f'c} \dots \dots \dots (Ecuación N^{\circ} 21)$$

Donde:

E: Modulo de Young

f' : Resistencia a la compresión del concreto en Mpa, este valor según los ensayos a los 28 días es de 582.2 kg/cm² equivalente a 57.08 Mpa según la tabla 34, entonces:

$$E = 4700 \times \sqrt{57.08}$$

$$E = 35520 \text{ Mpa (Modulo de Young)}$$

Para el caso del valor del modulo de poisson para el shotcrete se considera tipicamente el valor en el rango de $0.15 \leq V \leq 0.25$ y por ser un concreto de alta resistencia mayor a los 50 Mpa se considera un concreto de alta resistencia, por lo que se asigna un valor de 0.20. Para comprobar lo mencionado usamos la siguiente formula según la norma ACI 318, asumiendo un valor tipico de modulo de corte (G) de 14800 Mpa para shotcrete de alta resistencia en funcion al modulo de young..

$$v = \frac{E}{2G} - 1 \dots \dots \dots \text{(Ecuación N° 22)}$$

Donde:

v : Modulo de Poisson

E : Modulo de Young (Mpa)

G : Modulo de corte (Mpa)

$$v = \frac{35520}{2 \times 14800} - 1$$

$$v = 0.20 \text{ (Modulo de Poisson)}$$

El cálculo de la resistencia a la tracción para el shotcrete será calculado por la siguiente formula en función a la resistencia a la compresión según la norma ACI 318:

$$f_t = 0.3 \times \sqrt{f'c} \dots \dots \dots \text{(Ecuación N° 23)}$$

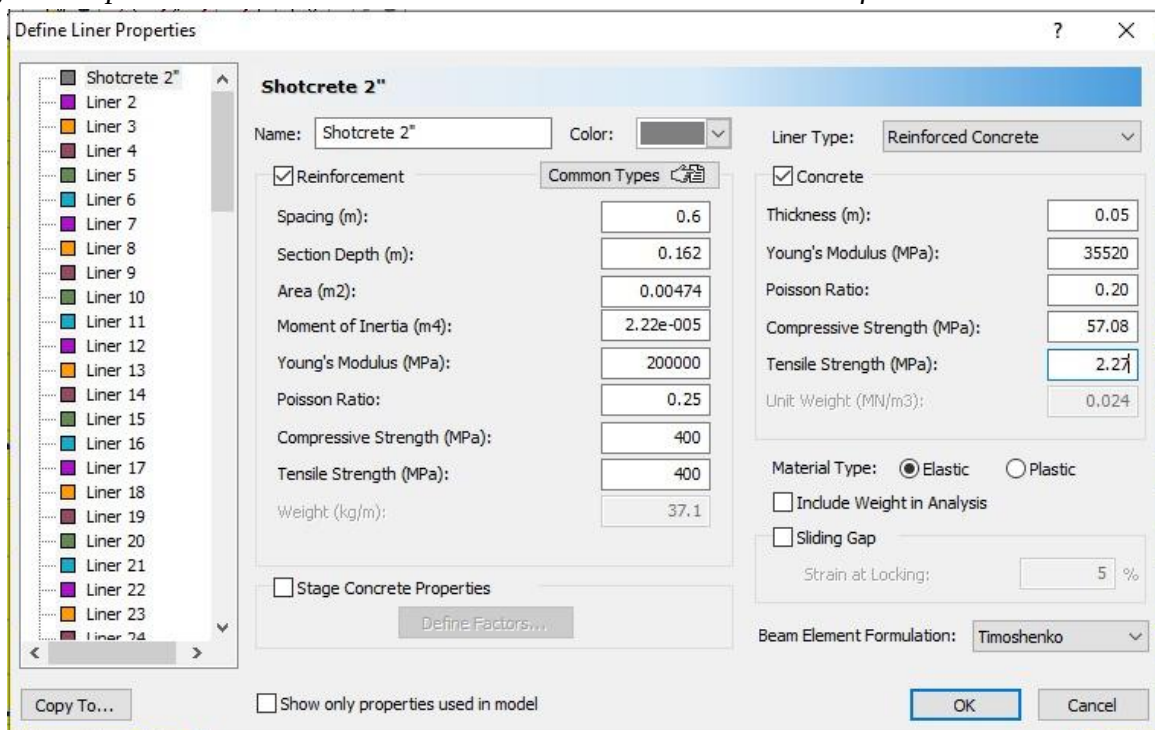
$$f_t = 0.3 \times \sqrt{57.08}$$

$f_t = 2.27 \text{ Mpa}$ (Resistencia a la tracción)

Teniendo estos resultados como características del shotcrete lo importamos en el software phase 2 como se ve en la figura 42.

Figura 42

Ingreso de parámetros de diseño de sostenimiento con shotcrete en software Phase2



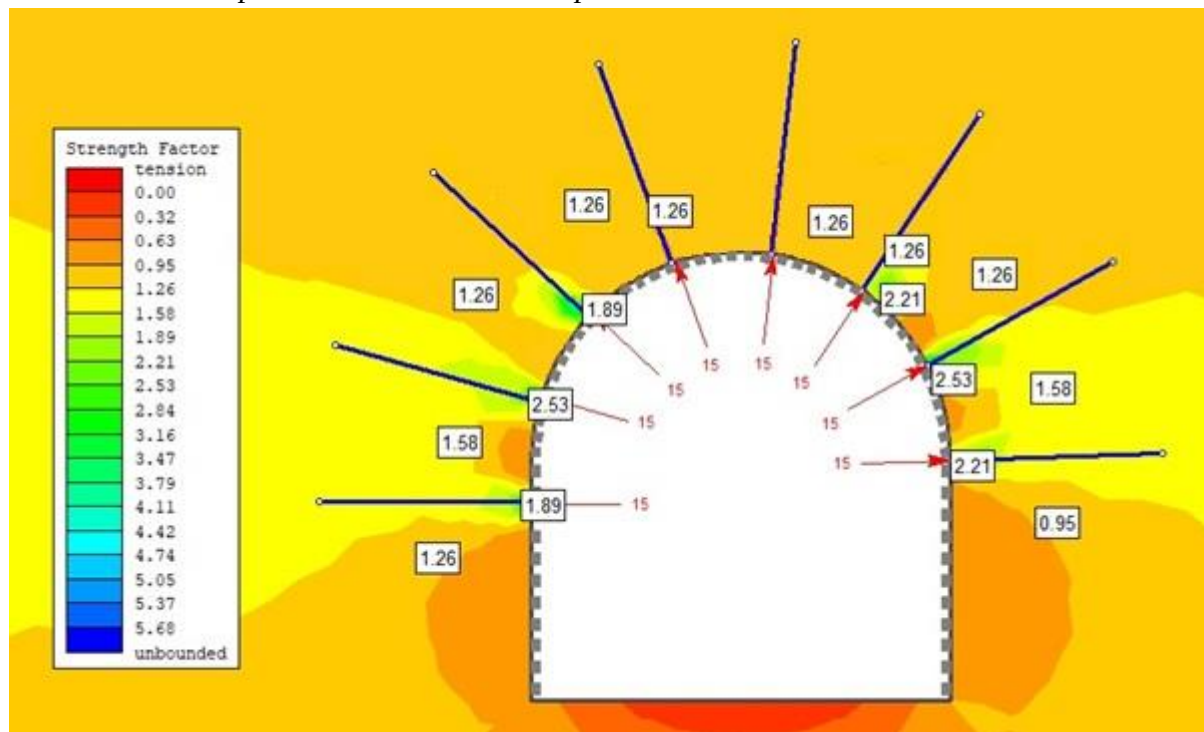
The screenshot shows the 'Define Liner Properties' dialog box for 'Shotcrete 2"'. The left pane lists various liner types from 'Shotcrete 2"' to 'Liner 24'. The main area is divided into two sections: 'Reinforcement' and 'Concrete'. The 'Reinforcement' section includes fields for Spacing (m), Section Depth (m), Area (m2), Moment of Inertia (m4), Young's Modulus (MPa), Poisson Ratio, Compressive Strength (MPa), Tensile Strength (MPa), and Weight (kg/m). The 'Concrete' section includes fields for Thickness (m), Young's Modulus (MPa), Poisson Ratio, Compressive Strength (MPa), Tensile Strength (MPa), and Unit Weight (MN/m3). The 'Tensile Strength (MPa)' field is highlighted with a blue border and contains the value '2.27'. Other values include Thickness (0.05), Young's Modulus (35520), Poisson Ratio (0.20), Compressive Strength (57.08), and Unit Weight (0.024). The 'Material Type' is set to 'Elastic'. The 'Beam Element Formulation' is set to 'Timoshenko'. The 'OK' button is highlighted in blue.

Nota: La figura muestra el ingreso en el phase 2 de las características del shotcrete de 2 pulgadas que en metros será 0.05, un módulo de Young de 35520, un módulo de poisson de 0.20, resistencia a la compresión de 57.08 Mpa y a la tensión de 2.27 Mpa.

Para la simulación de la sección de la rampa 2705 con el shotcrete y perno empleado según lo importado en las figuras 42 y 43 se tiene un factor de esfuerzo (FS) como se observa en la figura 43 con valores mayores a 1, el resultado menor que se tiene es de 1.26 llegando incluso a un FS de 2.53. Esta simulación es favorable empleando el diseño propuesto.

Figura 43

Modelamiento de pernos Swellex set en campo tensional.



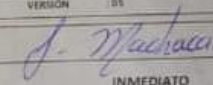
Nota: La figura muestra la interpretación del factor de esfuerzos en la sección aplicando pernos Swellex de 7 pies de longitud y concreto lanzado de 2 pulgadas, nos da factores mayores a 1.26, hasta de 2.53. Fuente. Propia.

5.8. Resultado de elección de sostenimiento en la rampa 2705.

El sector de geotecnia y geomecánica lleva a cabo la evaluación del macizo rocoso en su lugar tras cada explosión, además sugiere el soporte necesario según las condiciones de la roca.

Figura 44

Recomendación geomecánica tipo de roca

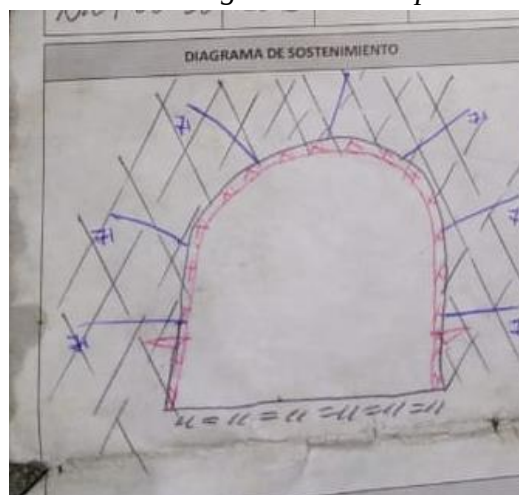
 RECOMENDACIÓN GEOMECÁNICA										U. MINERA / ACUMULACIÓN PARCOY Nº 1 CÓDIGO / F-08-001 SECCIÓN / GEOMECÁNICA VERSIÓN / 01	
NIVEL	1715		CONTRATA	Cominco		SUPERVISOR GEOMECANICA				 INMEDIATO	
LABOR	Rp. 2705.		ZONA	Norte		TIEMPO DE EJECUCIÓN DE SOSTENIMIENTO					
FECHA / HORA	PROGRESIVA		TIPO DE ROCA	A (m)	H (m)	L (m)	Shotcrete (m³)	RMR v	RMR s	OBSERVACIÓN	
	DE (m)	A (m)									
30/03/20:40	125 R + 10 m		Mala A	4.5	4.5	-	-	42	37	Roca F-ME/R ligeramente alterada	
16/04/1:41pm	—	Topo	Mala A	—	—	—	—	38	34	Macizo rocoso fracturado y levemente alterado, parcialmente inundado	
18/04/08:30	126 R + 9.2m		Mala A	4.5	4.7	—	—	38	34	Macizo rocoso HF-IE/R	

Nota: Se muestra la hoja empleada en mina de recomendación geomecánica. Fuente: Propia.

Como se observa en la imagen, el ingeniero de geotecnia y geomecánica después de realizada la caracterización del macizo rocoso realiza la recomendación de sostenimiento de la labor donde se describe: El nivel de la labor (altura con referencia al nivel del mar), contratista encargada de realizar labores de explotación en la labor, datos del supervisor de geomecánica en guardia y el tiempo a realizar el sostenimiento de la labor.

Así mismo los datos importantes de la labor como: La fecha y hora de la caracterización geomecánica, progresiva de la labor en estudio, el tipo de roca, el ancho, la altura, la longitud, cantidad de concreto lanzado (shotcrete) en m³, el valor del RMR de voladura y de sostenimiento y las observaciones acordes a las características de la labor obtenidas visualmente en el lugar.

Figura 45*Recomendación geomecánica tipo de sostenimiento*

DIAGRAMA DE SOSTENIMIENTO	TIPO DE ROCA	RMR	TIPO DE SOSTENIMIENTO			
	Muy Buena (I)	81-100	☒ Espesor del Shotcrete	2" ✓	3"	4"
	Buena (II)	61-80	☒ Fibra Metálica (Kg/m3)	35kg	35kg	
			☒ Tipo de Anclaje	Sweller ✓		
	Regular A (III-A)	51-60	☒ Longitud	4'		
	Regular B (III-B)	41-49	☒ Espaciamiento	1.0m x 1.0m	1.2m x 1.2m ✓	1.4m x 1.4m
			☐ Malla Electrosoldada	Corona	H.I.	H.O.
	Mala A (IV-A)	31-40	☐ Viga H4	Viga H4	Viga H6	Espaciám.
			☐ Cimbra Metálica	3.5m x 3.5m	4.5m x 4.2m	Espaciám.
	Mala B (IV-B)	21-30	☐ Cuadro de Madera	3.0m x 3.0m	3.5m x 3.5m	Espaciám.
			☐ Cuadro Metálicos (m)	2.5m x 2.5m	3.0m x 3.0m	Espaciám.

Nota: En la figura se observa la representación gráfica del sostenimiento con sus características de tamaño, espaciamiento y grosor de sus componentes. Fuente: Propia.

Para las recomendaciones del sostenimiento en el formato contempla: Un diagrama del sostenimiento (dibujo simple donde resalte la ubicación de las cuñas si es que tuviese y el tipo de sostenimiento que aplica para la labor), el tipo de roca, el rango del RMR de sostenimiento y el tipo de sostenimiento (dentro de estos encontraremos el espesor del shotcrete, la fibra metálica (kg/m3), el tipo de anclaje, la longitud del perno, el espaciamiento entre los pernos, ubicación de la malla electrosoldada, tipo de cimbra metálica, dimensión de los cuadros de madera (diámetro de los puntales y espaciamiento) y el tipo de cuadro metálico.

Figura 46
Recomendación geomecánica adicionales

RECOMENDACIÓN GEOMECÁNICA:		2.5m x 2.5m	3.0m x 3.0m
① El tiempo de fraguado del Shotcrete (Vía Húmeda y vía Seca): Después del lanzado se deberá esperar 01 hora para perforar el frente y 03 horas para realizar el empernado y cualquier otra actividad (antes de ingresar se debe validar las condiciones de la excavación, si el Shotcrete no ha fraguado no ingresar), y el tiempo de curado: se debe mantener húmedo mínimo 7 días (Estándar EO-01A Sosténimiento Mecanizado). ② Se debe realizar un constante y minucioso desate de rocas sueltas, eliminar cuñas y/o bloques en hastiales y corona (cumplir el PETS de desate de rocas); así mismo realizar la limpieza completa de los hastiales antes de realizar el sostenimiento con Shotcrete de piso a piso de labor. ③ El sostenimiento debe ser al tope según la recomendación de la supervisión de Geomecánica, los responsables de la ejecución deben validar las condiciones previas al proceso de sostenimiento, de presentarse problemas de estabilidad durante el proceso se comunicará al Dpto. Geomecánica.			
✓ Desatado minucioso de rocas antes, durante y después de cada actividad. ✓ Pegado de corona y hastiales antes de comenzar con el lanzamiento. ✓ Instalar pernos perpendicular a las discontinuidades mayores. ✓ Realizar el repase en la intersección con la Rp. 2786.	④ Desatado completo de rocas durante cada actividad. ⑤ Sostenimiento con shotcrete 2" (55kg de fibra) + P. suelto de 7" (12x12x2m). ⑥ Realizar la instalación de pernos perpendicular a las discontinuidades. ⑦ Controlar la perforación y el estado para control de sección.	⑧ Coordinar el bombeo de agua constante, porque hasta las 1:50am estuvo permanente inundado. ⑨ Cumplir con el espaciado de pernos a 1.2x1.2m, se evidencia pernos bom 1.3, 1.4 m. ⑩ Pernos espaciado a 1.2m hasta la gradiente.	

Fuente: Propia.

Finalmente se describen las recomendaciones de seguridad que se debe tener paso a paso en la labor, firman los supervisores a cargo tanto de la contratista como de la compañía.

5.9 Análisis de la especificación del diseño del shotcrete en la rampa 2705

5.9.1 Análisis de la aplicación operativa del shotcrete

El material debe estar completamente libre de cualquier tipo de materia orgánica, arcilla y otros elementos que no sean parte del diseño de la mezcla.

- La presión de aire requerida para el robot lanzador de shotcrete debe exceder 3.5 bares, tal como se menciona en la guía ACI 506R y en las especificaciones del fabricante del robot, Putzmeister.
- La cantidad de acelerante que se utilizará, que varía entre 10 y 14 litros, dependerá de la cantidad de agua presente en la labor que se va a sostener; de este modo, si hay más agua, se deberá incrementar la dosis de acelerante, alcanzando hasta los 14 litros.

- El shotcrete debe lograr resistencias adecuadas que le permitan equilibrar tanto las fuerzas de cizalla como las de flexión y tensión, garantizando así un soporte eficaz ante la presión de la roca.
- A continuación, se detallan las especificaciones técnicas requeridas para el agregado, las cuales son vitales para asegurar un correcto desempeño del shotcrete en cuanto a calidad y aplicación conforme a las normas:

Para la granulometría: De acuerdo a las normas:

✚ Para la granulometría: Según normas:

- ASTM C136 (Análisis Granulométrico de Agregados Finos y Gruesos)
- NTP 400.012 (Método de análisis granulométrico)

✚ Para el caso de la humedad: Según las normas:

- ASTM C566 – Total Moisture Content of Aggregate
- NTP 400.021 – Método para determinar el contenido de humedad de agregados

✚ Para el pasante de malla N°200: según la norma:

- ASTM C117 (Total Moisture Content of Aggregate)
- NTP 400.011 (Método para determinar el contenido de humedad de agregados)

✚ Para el módulo de fineza: Según norma:

- ASTM C136 – El MF se calcula a partir del análisis granulométrico
- NTP 400.012 – Igual método que ASTM C136

✚ Para el % retenido en malla 3/8: Forma parte del ensayo de granulometría según la norma:

- ASTM C136 (Análisis Granulométrico de Agregados Finos y Gruesos)

- NTP 400.012– Igual método que ASTM C136

Tabla 40*Especificaciones técnicas para el agregado*

ENSAYOS	ESPECIFICACIONES
Granulometría	Tendencia
% de Humedad	0 - 5
% < Malla 200	4.5 - 6
Módulo de fineza	3.4 - 3.9
% retenida malla 3/8	0.6 - 1.2

Nota: En la tabla se muestra las especificaciones técnicas para el agregado. Fuente: Propia.

- Para llegar a una resistencia de 400 kg/cm² se deben tener en 1m³ de mezcla lo siguiente:

Tabla 41

Resumen de diseño de shotcrete para llegar a una resistencia de 400 a 500 kg/cm² según la norma ACI 506R – Guide to Shotcrete.

Material	Cantidad (kg/m ³)	Observación
Cemento Portland Tipo IP o GU	450 kg	Alta resistencia
Microsílice (Sílice Fume)	45 kg (10% del cemento)	Mejora densidad y resistencia
Arena	950 – 1000 kg	Módulo de finura: 2.6–2.8
Agregado 3/8"	550 – 650 kg	TM = 10 mm
Agua	160 – 180 L	Para lograr a/c $\approx$ 0.36
Superplastificante	1.0 – 1.5% del cemento	Reductor de agua tipo F
Acelerante libre de álcalis (opcional)	4 – 7% del cemento	Para resistencia temprana
Fibras sintéticas estructurales	4 – 6 kg	Opcional según diseño
Fibras de acero	25 – 45 kg	Alternativa a fibras sintéticas

Nota: Diseño de shotcrete para llegar a una resistencia de 400 a 500 kg/cm². Fuente: norma ACI 506R

- Se debe considerar que la relación de agua y cemento será de 0.36.
- La fibra metálica a emplear será utilizada según la recomendación geomecánica.
- Para garantizar un proceso óptimo en la instalación del equipo robot lanzador de shotcrete, es fundamental seguir una serie de pautas acorde a la norma del fabricante del robot (Putzmeister)

- El grupo debe ubicarse en una zona firme y totalmente seca sin filtraciones.
- Previo al inicio, es fundamental verificar las conexiones eléctricas del robot, asegurándose de que los cuatro cables de los chupones estén en condiciones óptimas.
- El brazo del robot tiene que estar alineado en paralelo con los hastiales.
- Es necesario fijar las conexiones de las mangueras de la bomba utilizando bridas, además de tener cables que eviten el golpeo.
- La colocación del shotcrete se efectuará a través de solo dos movimientos:
 - a) la elevación vertical del brazo
 - b) el desplazamiento horizontal a través del área de trabajo, haciendo uso de los motores giratorios con el tubo de salida del equipo.
- La técnica para aplicar el shotcrete se llevará a cabo en movimientos ondulados, activando la función del movimiento del orbitrol del equipo.
- Los operadores deben estar correctamente entrenados y tener conocimiento de los aditivos utilizados. También deben disponer de las hojas de seguridad para los productos químicos (aditivos) y recibir la capacitación adecuada.
- La separación entre el cabezal del brazo y la superficie que se va a sostener debe estar entre 0.8 y 1.2 metros.
- El inicio de la primera capa de shotcrete debe llevarse a cabo desde los hastiales hacia la corona, salvo que existan coronas inestables. En ese caso, será preciso estabilizar la corona antes de proceder al lanzamiento.
- El grosor del shotcrete aplicado debe ser de 2 pulgadas, o según lo indicado por las recomendaciones geomecánicas.
- Los calibradores se colocarán a intervalos de 1 metro, de modo perpendicular.

- Es crucial que la zona a sostener esté libre de polvo y que ambos hastiales estén reforzados para asegurar que el soporte provenga del suelo.
- Al concluir la aplicación del shotcrete, se deberá señalar con pintura en aerosol la fecha, hora, cantidad y grosor en el lugar del traslape del lanzamiento.

5.9.2 Control de calidad del shotcrete

5.9.2.1 Ensayo de análisis granulométrico del agregado (ASTM C 1436)

Para el control de calidad del agregado que será usado para el concreto lanzado (shotcrete) se realiza el tamizaje considerando la norma ASTM C 1436. A continuación, se observa los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos.

Tabla 42

Granulometría 01

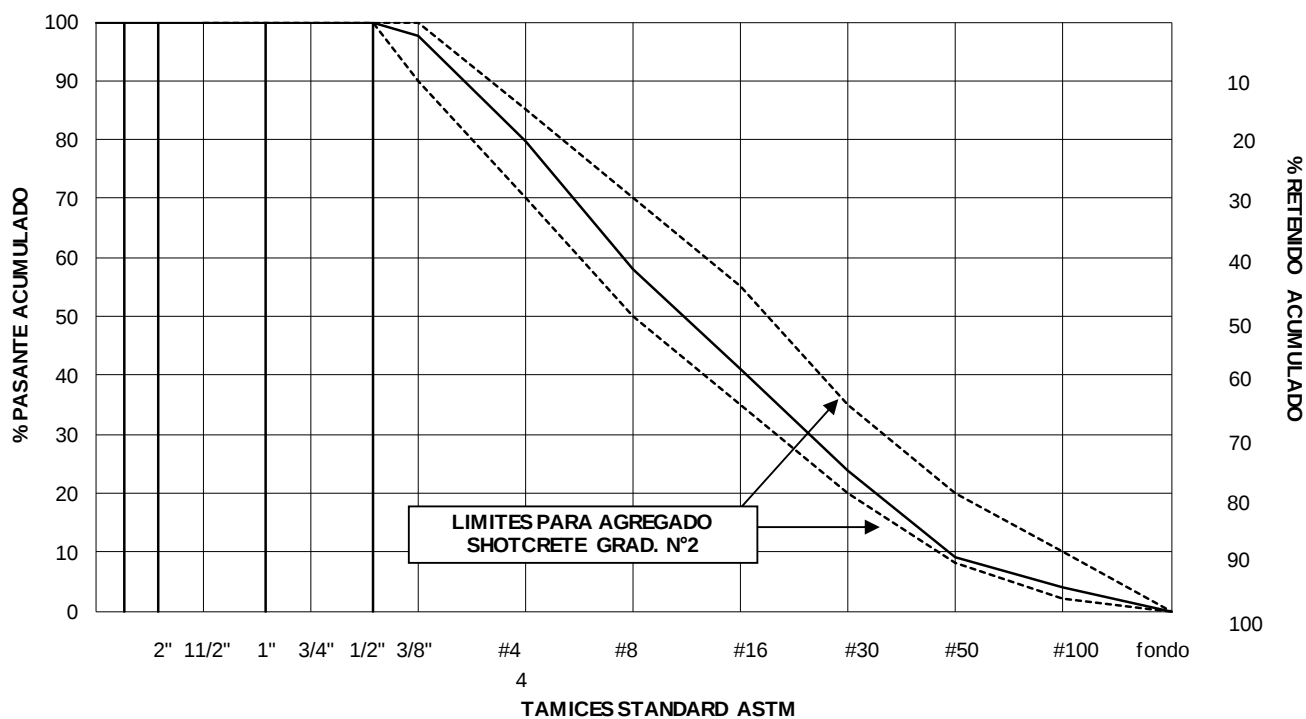
GRANULOMETRIA				
MALLA	PESO RET. en gramos	% RET.	% RET. ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
3"				
2 1/2"		0.0	0.0	100.0
2"		0.0	0.0	100.0
1 1/2"		0.0	0.0	100.0
1"		0.0	0.0	100.0
3/4"		0.0	0.0	100.0
1/2"		0.0	0.0	100.0
3/8"		0.0	0.0	100.0
# 4	288.8	18.2	18.2	81.8
# 8	354.5	22.4	40.6	59.4
# 16	274.7	17.3	57.9	42.1
#30	279.9	17.7	75.6	24.4
#50	237.1	15.0	90.5	9.5
#100	86.9	5.5	96.0	4.0
fondo	63.3	4.0	100.0	0.0
TOTAL	1585.2	100.0	MODULO FINEZA	3.79

Nota: En la tabla se muestra tamizaje considerando la norma ASTM C 1436 en una muestra 1. Fuente: Propia.

En la tabla 42 se observa que el módulo de fineza obtenido es de 3.79, el cual se encuentra dentro de lo permisible a lo esperado, pues el diseño indica un valor máximo de 3.9.

Figura 47

Límites de agregado M1.



Nota: Se muestra la interpretación gráfica de los límites del agregado empleado para el shotcrete. Fuente: Propia.

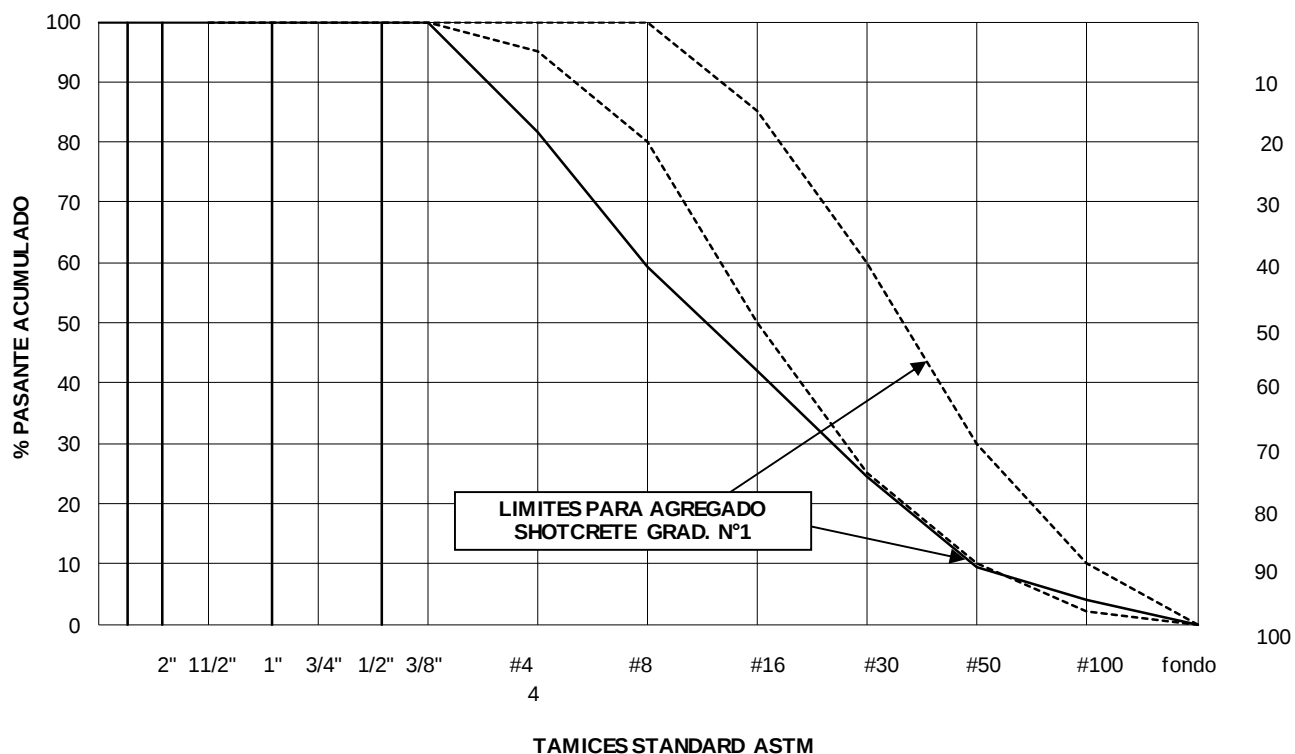
Según la figura 37, se observa que la curva tamiz vs % pasante acumulado, se encuentra dentro de los límites del agregado, el cual es un resultado positivo para nuestra investigación.

Tabla 43*Granulometría 02*

GRANULOMETRIA				
MALLA	PESO RETENIDO en gramos	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMUL.	% PASANTE ACUMUL.
3"				
2 1/2"		0.0	0.0	100.0
2"		0.0	0.0	100.0
1 1/2"		0.0	0.0	100.0
1"		0.0	0.0	100.0
3/4"		0.0	0.0	100.0
1/2"		0.0	0.0	100.0
3/8"		0.0	0.0	100.0
# 4	288.8	18.2	18.2	81.8
# 8	354.5	22.4	40.6	59.4
# 16	274.7	17.3	57.9	42.1
#30	279.9	17.7	75.6	24.4
#50	237.1	15.0	90.5	9.5
#100	86.9	5.5	96.0	4.0
fondo	63.3	4.0	100.0	0.0
TOTAL	1585.2	100.0	MODULO FINEZA	3.79

Nota: Se muestra la interpretación grafica de los límites del agregado empleado para el shotcrete en una muestra 2. Fuente: Propia.

En la tabla 43 se observa la granulometría, con un módulo de fineza también de 3.79, resultado positivo dentro de lo permisible menor a 3.9.

Figura 48*Límites de agregado*

Nota: En la figura se muestra la interpretación grafica de los límites del agregado empleado para el shotcrete en una muestra 2. Fuente: Propia.

5.9.2.2 Prueba de SLUMP (ASTM C143)

Esta prueba nos permite medir la trabajabilidad y fluidez del concreto. En Consorcio Minero Horizonte el diseño de concreto para que el slump baje a 1/2" cada treinta minutos.

Figura 47
Prueba Slump



Nota: En la figura se muestra la prueba Slump realizada en las instalaciones de la compañía minera. Fuente: Propia.

Los instrumentos utilizados para realizar esta evaluación son: un kit de abrams, una barra de hierro liso compactadora que tiene un extremo en forma de semiesfera de 5/8 de pulgada y mide 60 centímetros, así como una base de acero inoxidable de 45x45 cm.

Los utensilios que se utilizan para llevar a cabo esta evaluación son: una carretilla, un flexómetro, un cuaderno para anotaciones y un cucharón de acero inoxidable.

5.9.2.3 Resultados de prueba de SLUMP

Se realizó el seguimiento a las pruebas realizadas a los equipos utilizados en los trabajos de sostenimiento en la rampa 2705.

Tabla 44*Prueba Slump*

EQUIPO	SLUMP PLANTA	SLUMP LABOR	TIEMPO DE LLEGADA A LABOR
Mixer 1	9 ½"	8 ½"	30
Mixer 3	9 ¼"	8 ¾"	40
Mixer 5	9 ½"	8 ½"	60
Mixer 2	9 ½"	8 ¼"	70
Mixer 5	9 ¼"	8 ½"	60
Mixer 1	9 ¼"	7 ½"	80

Nota: En la tabla se observa el Slump según el mixer utilizado y el tiempo de llegada de la unidad a cada frente de trabajo. Fuente: Propia.

En la tabla 44 se presentan los resultados de la prueba de asentamiento, tomando como inicio la planta de hormigón y como final el trabajo que se debe realizar.

5.9.2.4 Prueba de rebote

El rebote como bien sabemos es un indicador de pérdida de concreto que cae al piso y no es utilizado, según el seguimiento que se realizó para la presente tesis el promedio de rebote por operador es de 13% considerando que lo máximo es de 15%. A continuación, se resume los pasos que se realiza para el cálculo de rebote en las labores subterráneas dentro de la operación:

- Delimitar o bloquear el espacio de trabajo antes de comenzar con las pruebas de rebote.
- Asegurarse de que el terreno donde se realizará el lanzamiento sea sólido.
- Verificar que el Slump coincida con la especificación de la mezcla.

- Instalar la lona de polietileno para la evaluación de rebote a 1.5 metros detrás del solapamiento y en línea con el eje del área de lanzamiento, asegurándose de no estar en la zona desprotegida, utilizando la barra de desate de 12 pies hasta el límite.
- Emplear el Penetrómetro para confirmar la fase inicial de fraguado de la capa de Shotcrete (700 libras en 15 minutos) para determinar si se puede acceder al tope.
- Una vez que se haya establecido la fragua y la resistencia inicial, acceder al tope para recoger la lona de polietileno con el rebote y trasladarla a un lugar seguro.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 45

Resultados de rebote por equipo robot lanzador

EQUIPO	OPERADOR	REBOTE (%)
LC 15	O1	11.80%
LC 12	O2	11.70%
LC 15	O1	12.50%
LC 12	O2	12.20%
LC 15	O1	11.90%
LC 12	O2	12.10%
$\bar{x}$		12.03%
σ		0.29%
Máx		12.50%
Min		11.70%

Nota: En la tabla se observa el resumen de rebote según la unidad y el operador. Fuente: Propia.

Se observa en los resultados que los operadores del equipo lanzador se encuentran dentro de lo permitido por compañía que es hasta un 15% de rebote, el diseño de mezcla favorece la adherencia y la capacitación al personal en el correcto lanzamiento ayuda a mejorar estos indicadores.

En la tabla 45 se puede deducir que en promedio el rebote es de 12.03%, lo cual se encuentra permisible según el estándar de la mina.

Figura 48

Boletín de correcto lanzado de shotcrete

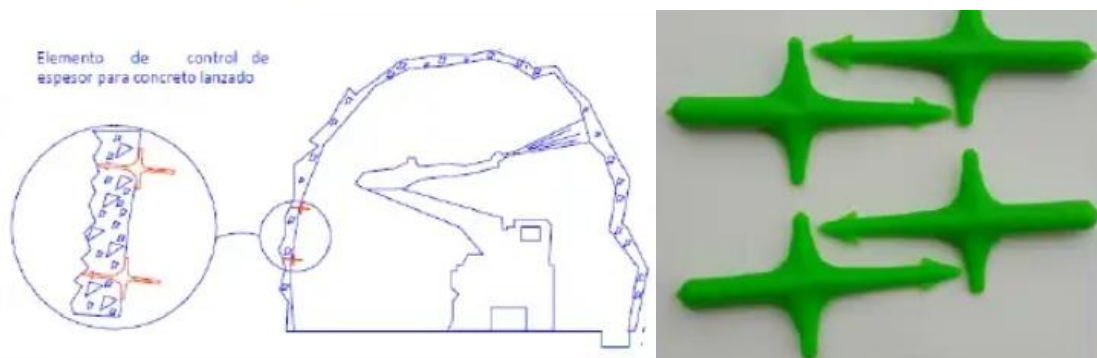


Nota: Se muestra en la figura el boletín difundido y entregado para cada frente de trabajo de sostenimiento en las diferentes labores de la mina. Fuente: Área de Geomecánica CMH (2022).

5.10 Discusión

Zenon (2021), en su investigación “Evaluación de desempeño del concreto lanzado reforzado con fibras en tuneles mediante el ensayo de paneles” para la Universidad Nacional Autónoma de México llevó a cabo pruebas de flexión en paneles para medir el rendimiento del concreto proyectado reforzado con fibras metálicas utilizado en revestimientos de túneles. Zenón concluye que esta investigación se enfocó en crear una relación entre los resultados de la evaluación del rendimiento de una mezcla de concreto proyectado reforzado con fibras metálicas, que se usó como revestimiento principal en un túnel en un ejemplo práctico, a través de la aplicación de dos métodos de ensayo de flexión en paneles. La investigación titulada "Estudio sobre el uso de concreto proyectado para el soporte en trabajos subterráneos según la calidad de la roca en la mina Consorcio Minero Horizonte - La Libertad - 2024", en relación con el trabajo de Zenón, presentó resultados positivos en las pruebas de rotura de paneles de concreto con fibras de 35kg, 40kg y 45kg, alcanzando una resistencia de hasta 1552 Joules.

Villarroel (2022), en su investigación titulada “Sistema que permite monitorear, reconocer, marcar y registrar visualmente el espesor requerido durante la proyección de hormigón en túneles” para la Universidad de Chile, propone un sistema que permita monitorear, reconocer, marcar y registrar visualmente el espesor requerido por el pitonero y el equipo de trabajo, mientras se desarrolla la tarea de proyección de hormigón en túneles, para el caso de nuestra investigación titulada “Análisis de la aplicación del concreto lanzado para el sostenimiento en labores subterráneas según la calidad de roca en la mina Consorcio Minero Horizonte - La Libertad - 2024”, se emplea elementos de control de espesor del shotcrete, visualmente notorios al momento del disparo del concreto lanzado “shotcrete”, este sistema es bastante practico, económico y muy accesible para cualquier tipo de roca.

Figura 49*Elemento de control de espesor*

Fuente: Marinos y Hoek (2000).

Camarena (2016), en su estudio titulado “Mejoramiento del soporte con concreto proyectado en húmedo para reducir costos y optimizar la producción de la E. E. Robocon S. A. C. En la mina San Cristóbal - Cía Minera Volcan S. A. A”, presentado en la Universidad Nacional Del Centro Del Perú. Se enfocó en perfeccionar el método de aplicación del concreto proyectado en húmedo al gestionar el impacto del rebote de fibras y el diseño de la mezcla, con el objetivo de lograr un rendimiento standard en la producción total y disminuir costos operativos. Camarena logró controlar y reducir significativamente el porcentaje de rebote de fibras en la aplicación de concreto proyectado a través de la utilización adecuada de técnicas de proyección y un diseño de mezcla específico, lo que resultó en una disminución de costos por metro cúbico de concreto proyectado. En la investigación actual, titulada “Estudio sobre la implementación del concreto proyectado para el soporte en labores subterráneas según la calidad de la roca en la mina Consorcio Minero Horizonte - La Libertad - 2024”, se obtuvieron resultados favorables en relación con el rebote, alcanzando niveles inferiores al 15%. Estos resultados se lograron teniendo en cuenta un diseño de concreto proyectado adaptado a una

roca de muy baja calidad, con un RQD de 29%, junto con la aplicación de buenas prácticas operativas durante la proyección del concreto.

VI. Conclusiones

1. Respecto a la evaluación de la calidad del macizo rocoso, se realizaron las estimaciones más importantes en las 5 estaciones, tales como: RQD (Rock Quality Designation), Q de Barton, GSI (Geological Strength Index) y RMR (Rock Mass Rating).

1.1 Para la estimación de RQD (Rock Quality Designation), se concluye un valor promedio de 29%, lo que nos da una **roca de calidad Mala**.

1.2 Para la estimación del Q de Barton se concluye un valor en promedio de 0.58, lo que corresponde a clase de roca tipo II, con **calidad del macizo rocoso Pobre** con fracturas abiertas y roca débil.

1.3 Para la estimación del GSI (Geological Strength Index), se concluye un valor promedio de 40.05, el cual corresponde a un macizo de **calidad Mala**, intensamente fracturado y con bloques muy pequeños.

1.4 Para la estimación del RMR (Rock Mass Rating), se concluye un valor promedio de 34.17, por lo tanto, según la tabla 27 se deduce que la roca es de clase IV de **calidad Mala**.

Considerando las 4 estimaciones geomecánicas, todas coinciden en la calificación del macizo rocoso, por lo que se concluye que en la RP 2705 se tiene una roca de mala calidad. La integración de la estimación de la calidad de la roca nos ayuda a tener una mejor precisión en la elección del sostenimiento a emplear.

2. Los resultados en los ensayos de laboratorio fueron favorables, se concluye que:

2.1 Para el caso de los ensayos de compresión simple a los 28 días de edad, se obtuvo un diseño favorable acorde a las normas internacionales y nacionales, pues como sabemos la Cia. Minera Consorcio Minero Horizonte tiene como estándar llegar a un mínimo de 400 kg/cm², y con el diseño propuesto se supera lo mencionado llegando incluso a 582.2kg/cm².

- 2.2 Para el caso de los ensayos de testigos diamantinos de concreto con aditivo acelerante (Sigurit L-30) y la fibra Dramix(65/35), tiene como resultado una resistencia en promedio de 372.33 kg/cm^2 , resultado favorable a la investigación, pues la compañía pide como estándar tener un límite mínimo de 360 kg/cm^2 .
- 2.3 Para la estimación de rango de absorción de energía y resistencia residual que debe tener el shotcrete empleado según la calidad de roca, por tener un valor de Q igual a 0.58, según el Abaco (figura 27) se concluye que el shotcrete debe tener una absorción de energía requerida entre 1000 y 1300 Joules como mínimo para poder resistir un fracturamiento.
- 2.4 Para los ensayos de paneles de concreto se tiene como resultado un promedio de absorción de energía de 1200 Joules considerando fibras de acero de 25 – 45 Kg. Se concluye que el valor de la absorción de energía se encuentra dentro de lo esperado favorable a la presente investigación.
3. La simulación con el software (RocData y Phase 2), cumplieron un papel importante en la toma de decisiones para el diseño de sostenimiento, sobre todo para saber si estas serían efectivas al momento de su aplicabilidad, dándonos como resultados:
- 3.1 El factor de esfuerzo equivalente al factor de seguridad es mayor a 1 empleando el sostenimiento propuesto, llegando incluso a un FS de 2.53, favorable a la investigación.
4. Se concluye que la elección del tipo de sostenimiento según la evaluación geomecánica acorde a la teoría de Barton es:
- 4.1 Usar pernos por fricción tipo swellex de 2 metros que en pies será: $6.56 \text{ pies} \approx 7 \text{ pies}$.
- 4.2 Emplear un distanciamiento entre pernos de 1.2 metros.
- 4.3 Usar shotcrete con fibras sintéticas cuyo espesor será de 5 cm de espesor que en pulgadas será 2 pulgadas.

5. Con la medición de rebote considerando 2 operadores y 2 equipos robot muestra un resultado promedio de 12.03%, se concluye que el indicador es permisible por la compañía siendo favorable para la siguiente investigación, ya que compañía tiene como estándar llegar a un rebote máximo de 15%.

VII. Recomendaciones

1. La caracterización del macizo rocoso después de haber realizado la voladura debe ser obligatoria, por cada tramo avanzado las condiciones geomecánicas siempre tienden a variar y estas podrían ser significativas en lo que respecta un evento no deseado de seguridad (caída de rocas).
2. Realizar un seguimiento continuo a los manómetros de los equipos lanzadores, verificar la presión de aire y agua, con esto se minimiza el rebote en la operación.
3. Realizar capacitación constante a los operadores de mixer y equipo lanzador, pues la técnica de cada operador influye en los rendimientos operativos que se tenga de sostenimiento.
4. Se debe calibrar los equipos que se utilizan para el uso del shotcrete, tales como: el display de aditivo del robot lanzador, ya que este influye de manera significativa para que la dosificación del acelerante no sea variable.
5. Realizar el sostenimiento constante después de la voladura, pues un buen sostenimiento estudiado garantiza una labor segura para poder desarrollar la actividad de extracción del mineral.
6. Capacitar constantemente al personal involucrado en el sostenimiento con shotcrete es fundamental no solo por un tema operativo, sino también por un tema económico, un rebote mínimo involucra un menos gasto.
7. Realizar controles de calidad constantes en la operación, así como la correcta aplicación del concreto lanzado y sus aliados de sostenimiento. Una labor mal sostenida puede ocasionar fatalidad dentro de las operaciones subterráneas a consecuencia de la caída de rocas en la caja techo, es importante

VIII. Referencias bibliográficas

- Aquino, M. (2015). *Universidad Privada Del Norte*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/398489398/Sostenimiento-en-Mineria-Subterranea-1>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Enami. (2020). *Guía de operación para la pequeña minería*. Obtenido de <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/7.fortificacion-acunadura.pdf>
- Magazine, S. (2021). *Shotcrete Magazine*. Obtenido de <https://hormigonaldia.ich.cl/recomendaciones-tecnicas/shotcrete-seco-de-resistencia-temprana-rapida-una-solucion-unica-para-proyectos-de-alta-complejidad/>
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la investigación*. 6ta Edición. México.
- Ludger, O. (2014). *Introducción a la Ingeniería de Rocas de Superficie y Subterránea*. Universidad de Medellín. Medellín. Colombia.
- Roberto H. Sampieri. (2014). *Metodología de la investigación*. 6ta Edición. México.
- Camiper. (2016). *Diplomado: Ingeniería Geotécnica Aplicada en Minería. Modulos I y IV*. Lima.
- Instituto de cemento y del hormigón chileno (2015). *Shotcrete guía chilena del hormigón proyectado*. 2da edición. Santiago – Chile.
- MINEM. (2017). *Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería*. MINEM.
- Muñoz, C. (2011). *Como Elaborar y Asesorar una Investigación de Tesis*. Mexico: Editorial Mexicana
- Suarez, J. (2012). *clasificación del macizo rocoso*. Santiago

- Wilson y Reyes, (1964). *Geología del cuadrángulo de Pataz (Hoja 16-h). Comisión Carta Geológica Nacional.*
- Alarcon (2022). *Optimización de costos mediante reducción del factor de carga en roca mala - RMR 30 - 40 - Unidad San Cristobal Compañía Minera Volcan. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Arequipa : Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2019, 161 pp.*
- Departamento de geomecánica del consorcio minero horizonte (2023). *Caracterización Geomecánica del macizo rocoso zona norte. La Libertad: Unidad minera Parcoy*
- ASTM International. (2019). *ASTM C1602/C1602M-19: Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- AENOR. (2006). *UNE-EN 14487-1:2006. Hormigón proyectado. Parte 1: Definiciones, especificaciones y conformidad. Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).*
- ASTM International. (2021). *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.*
- ASTM International. (2019). *ASTM C1140/C1140M-19: Standard practice for preparing and testing specimens from shotcrete test panels*
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 7500-1:2018. Metallic materials — Calibration and verification of static uniaxial testing machines — Part 1: Tension/compression testing machines — Calibration and verification of the force-measuring system.*

ASTM International. (2021). ASTM E4-21: Standard practices for force verification of testing machines

ASTM International. (2020). ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International.

ASTM International. (2017). ASTM C566-19: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. ASTM International.

ASTM International. (2018). ASTM C117-17: Standard Test Method for Materials Finer Than 75 μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. ASTM International.

Instituto Nacional de Calidad – INACAL. (2016). NTP 400.012: Agregados. Método de análisis granulométrico. INACAL.

Instituto Nacional de Calidad – INACAL. (2016). NTP 400.021: Agregados. Método para determinar el contenido de humedad de agregados. INACAL.

Instituto Nacional de Calidad – INACAL. (2016). NTP 400.011: Agregados. Material más fino que la malla N° 200. INACAL.

ASTM International. (2020). ASTM C143/C143M-20: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International.

ASTM International. (2019). ASTM C1116/C1116M-19: Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete. ASTM International.

European Committee for Standardization. (2006). EN 14487-1: Sprayed Concrete – Part 1: Definitions, Specifications and Conformity. CEN.

Instituto Nacional de Calidad – INACAL. (2016). NTP 339.100: Concreto lanzado. Requisitos. INACAL.

- ASTM International. (2020). *ASTM C42/C42M-20: Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2012). *ASTM C1604/C1604M-12: Standard Test Method for Obtaining Early-Age Strength of Shotcrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2017). *ASTM C138/C138M-17a: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. ASTM International.
- American Concrete Institute. (2016). *ACI 506R-16: Guide to Shotcrete*. American Concrete Institute.
- ASTM International. (2012). *ASTM C1550-12: Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Round Panel)*. ASTM International.
- ASTM International. (2012). *ASTM C1550-12: Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Round Panel)*. ASTM International.
- Instituto Nacional de Calidad – INACAL. (2016). *NTP 339.034: Concreto. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de probetas de concreto*. INACAL.
- Acero Vergara, A. F. (2021). *Propuesta de una malla de perforación y voladura para labores de avance*.
- Agapito, L. (2009). *Principios de voladura para minas a cielo abierto y subterráneas*.
- Camarena Cosme, J. (2016). *Optimización del sostenimiento con shotcrete vía húmeda en mina subterránea*.
- Chiappetta, R. F. (2014). *Vibración por explosión y evaluación*. CRC Pre
- Girmscheid, G., y Moser, R. (2001). *Robot de hormigón proyectado totalmente automatizado para soporte de roca*.

- Hustrulid, W., & Bullock, R. (2001). *Métodos de minería subterránea: Fundamentos de ingeniería y casos de estudio internacionales*. Sociedad de Minería, Metalurgia y Exploración (SME).
- MDPI. (2024). *Emisiones de calor de la maquinaria minera: Implicaciones para las condiciones microclimáticas en explotaciones subterráneas*. MDPI.
- ScienceDirect. (2025). *Investigación del estrés térmico y la respuesta térmica en ambientes subterráneos profundos, cálidos y húmedos*.
- Singh, R., & Sharma, P. (2018). *Voladuras controladas en minas subterráneas: Técnicas y estudios de caso*.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes