



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,

Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Aplicación de la voladura controlada para reducir la
sobreexcavación en las labores lineales de la zona
Española, Minera Aurífera Retamas, 2023**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

AUTOR

Robin Kennedy GONZALES GUILLERMO

ASESOR

Rómulo MUCHO MAMANI

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Gonzales, R. (2025). *Aplicación de la voladura controlada para reducir la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Robin Kennedy Gonzales Guillermo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74073416
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0004-4141-1807
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Rómulo Mucho Mamani
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	01208105
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0003-6893-5718
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Emiliano Mauro Giraldo Paredez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08635711
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Alejandro Mena Ayala
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10451517
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Mario Fernando Cedron Lassus
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08801853

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.1 Desarrollo de modelos, simulación y optimización de procesos.
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: La Libertad Provincia: Pataz Distrito: Parcoy Latitud: -8.058542° Longitud: -77.431508°
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 – 2024
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

En el auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el martes 30, de setiembre del 2025 siendo las 10:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ
Dr. ALEJANDRO MENA AYALA
Mg. MARIO FERNANDO CEDRON LASSUS

(PRESIDENTE)
(SECRETARIO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: "*Aplicación de la voladura controlada para reducir la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023*" presentada por Don: **ROBIN KENNEDY GONZALES GUILLERMO**, Bachiller en Ingeniería Minas, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

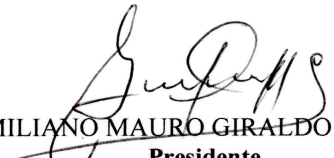
.....*Satisfacción*.....

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de: *16* (*Distinto*).

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**, a Don: **ROBIN KENNEDY GONZALES GUILLERMO**.

Siendo las *11-00* horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 30 de setiembre del 2025


Dr. EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ
Presidente


Dr. ALEJANDRO MENA AYALA
Secretario


Mg. MARIO FERNANDO CEDRON LASSUS
Miembro


Ing. ROMULO MUCHO MAMANI
Asesor de Tesis



Anexo 1
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **RÓMULO MUCHO MAMANI** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° **000002-2025-EPIMI-FIGMMG/UNMSM** de la tesis, cuyo título es **“Aplicación de la voladura controlada para reducir la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023”** presentado por el bachiller **ROBIN KENNEDY GONZALES GUILLERMO** para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 10% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero de Minas.

Lima, 18 de septiembre de 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: **RÓMULO MUCHO MAMANI**

DNI: 01208105

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mi madre, a quien Dios me envió como compañera, fuente inagotable de motivación e inspiración para crecer día a día y ser una mejor persona. Por esos momentos de aliento y apoyo incondicional cuando la senda del camino se tornaba agreste.

A mis familiares, quienes siempre están a mi lado apoyando y aconsejándome. Excelentes maestros de vida, de quienes he aprendido grandes valores y buenos hábitos.

A mi prometida, compañera de vida y amiga incondicional.

Con mucho cariño y gratitud

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi alma mater, la prestigiosa Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por brindarme la formación necesaria para convertirme en un profesional con sólidos valores para la industria minera. También a mis compañeros, con quienes compartí grandes momentos tanto dentro como fuera del aula.

A mi asesor, el ingeniero Rómulo Mucho Mamani, quien fue un pilar fundamental y guía en la realización de esta tesis.

RESUMEN

La sobreexcavación generada por voladuras convencionales representa un problema recurrente en operaciones subterráneas, afectando la estabilidad del macizo rocoso, incrementando los costos operativos y comprometiendo la seguridad del personal situaciones que la Minera Retamas no está exenta. Con el objetivo de mitigar estos efectos, el presente estudio se planteó introducir la técnica de voladuras controladas (recorte, amortiguada, etc) en esta minera.

El estudio fue de tipo aplicado, con diseño experimental y enfoque cuantitativo. Se seleccionaron como labores piloto el crucero XC-8770-SE y la galería GA-8365-S, por presentar altos niveles de sobreexcavación, para luego hacer extensivo a otras labores. Se emplearon perforadoras neumáticas Jackleg (Atlas Copco), con diámetro de perforación 36 mm y 8 pies de profundidad. Se utilizaron explosivos Emulnor 1000 (1 1/8" x 16"), iniciados con faneles de periodo largo (LP), priorizando el desacoplamiento de carga como elemento clave en la voladura controlada. Para el levantamiento de datos antes y después de cada disparo, se emplearon instrumentos topográficos y mediciones directas con winche y cordel. Se realizaron 30 pruebas, cuyos datos fueron registrados en formatos específicos y procesados en Excel para su análisis.

La implementación de voladuras controladas permitió reducir significativamente los niveles de sobreexcavación en las labores piloto con una disminución del 27.77% en la galería GA-8365-S y del 17.63% en el crucero XC-8770-SE. Los resultados confirman que la voladura controlada es una alternativa técnica viable y sostenible para mitigar los efectos negativos de la sobreexcavación en minería subterránea. Se recomienda su aplicación progresiva en otras zonas de la mina, la capacitación del personal operativo y la implementación de sistemas de monitoreo continuo para optimizar resultados y garantizar la sostenibilidad del proceso.

ABSTRACT

Overbreak caused by conventional blasting is a recurring issue in underground mining operations, compromising the stability of the rock mass, increasing operational costs, and endangering personnel safety—conditions from which Minera Aurífera Retamas S.A. is not exempt. To mitigate these effects, this study aimed to introduce controlled blasting techniques (such as trim and cushion blasting) within the operation.

The research followed an applied approach with an experimental design and quantitative methodology. Two headings were selected as pilot cases due to their high levels of overbreak: the XC-8770-SE crosscut and the GA-8365-S drift. Drilling was carried out using Atlas Copco pneumatic jackleg drills, with a hole diameter of 36 mm and a depth of 8 feet. Emulnor 1000 explosives (1 1/8" x 16") were employed, initiated with long-period (LP) delay detonators. Load decoupling was prioritized as a key factor in the controlled blasting design. Pre- and post-blast data were collected using topographic instruments and direct measurements with winch and measuring cord. A total of 30 test blasts were conducted, with data recorded in standardized forms and analyzed using Microsoft Excel.

The implementation of controlled blasting led to a significant reduction in overbreak: 27.77% in the GA-8365-S drift and 17.63% in the XC-8770-SE crosscut. The results confirm that controlled blasting is a technically viable and sustainable alternative to mitigate overbreak in underground mining. Progressive implementation in other areas of the mine is recommended, along with operator training and the adoption of continuous monitoring systems to optimize performance and ensure long-term process sustainability

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	vi
CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
GLOSARIO	xiv
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1.1. Descripción problemática	4
1.1.2. Formulación del problema	5
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	10
2.2. BASES TEÓRICAS.....	15
2.2.1. Voladura controlada	15
2.2.2. Sobreexcavación.....	22
2.2.3. Parámetros de control de voladura	25
2.2.4. Fragmentación	27
2.2.5. Clasificación geomecánica del macizo rocoso.....	29
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	32

3.1. HIPÓTESIS.....	32
3.1.1. <i>Hipótesis General</i>	32
3.1.2. <i>Hipótesis Específicas</i>	32
3.2. VARIABLES E INDICADORES.....	33
3.2.1. <i>Variable Independiente</i>	33
3.2.2. <i>Variable dependiente</i>	33
3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	34
CAPÍTULO IV: MARCO METODOLÓGICO	35
4.1. ÁREA DE PRUEBAS.....	35
4.2. METODOLOGÍA	35
4.2.1. <i>Inspección de la labor, materiales y herramientas</i>	36
4.2.2. <i>Determinación de la calidad del macizo rocoso y marcado de malla y perforación e</i> <i>inspección visual del macizo rocoso</i>	36
4.2.3. <i>Selección de la técnica de voladura controlada, carga explosiva y capacitación del</i> <i>personal de la labor</i>	36
4.2.4. <i>Control, capacitación e identificación de oportunidades en la perforación y</i> <i>aplicación de la voladura controlada</i>	37
4.2.5. <i>Toma de datos y evaluación de resultados post voladura</i>	37
4.2.6. <i>Procesamiento en gabinete, análisis de datos y mejora continua</i>	38
4.3. EQUIPOS, HERRAMIENTAS Y MATERIALES UTILIZADOS.....	38
4.3.1. <i>Equipos</i>	38
4.3.2. <i>Herramientas</i>	39
4.3.3. <i>Materiales</i>	40
4.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	41
4.4.1. <i>Tipo de investigación</i>	41
4.4.2. <i>Enfoque</i>	41
4.5. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	41
4.6. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	42
4.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43

CAPÍTULO V: RESULTADOS DE LA VOLADURA CONVENCIONAL.....	45
5.1. Características del macizo rocoso	45
5.1.1. <i>Parámetros de perforación y voladura convencional en el crucero XC- 8770-SE</i>	46
5.1.2. <i>Parámetro de control de voladura convencional en el crucero XC-8770-SE</i>	52
5.1.3. <i>Parámetros de perforación y voladura convencional en la galería GA-8365-S</i>	53
CAPÍTULO VI: RESULTADOS APLICANDO LA VOLADURA CONTROLADA.....	61
6.1. Resultados aplicando voladura controlada.....	61
6.1.1. <i>Selección de técnicas de voladura controlada</i>	61
6.1.2. <i>Parámetros de perforación y voladura controlada en el crucero XC-8770-SE</i>	61
6.1.3. <i>Criterios de perforación y voladura controlada en la galería GA-8365-S</i>	70
6.1.4. <i>Parámetros de control de voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque</i>	78
CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
7.1. Comparativo de resultados entre la voladura convencional y la voladura controlada.....	83
7.1.1. <i>Comparación de los resultados de la voladura convencional y la voladura controlada en la cantidad de sobreexcavación generada en las labores lineales</i>	83
7.1.2. <i>Las técnicas de voladura controlada y su relación con la calidad del macizo rocoso y los efectos de sobreexcavación</i>	85
7.1.3. <i>Parámetros de control de voladura y su relación con los indicadores de fragmentación</i> ..	88
7.2. Constratación de Hipótesis	92
7.2.1. <i>Planteamiento de la hipótesis</i>	92
7.2.2. <i>Estimación intervalos de confianza y nivel de significancia</i>	92
7.2.3. <i>Validación de la distribución normal de datos</i>	93
7.2.4. <i>Prueba t-Student</i>	94
7.2.5. <i>Decisión estadística</i>	94
7.3. Discusión de resultados.....	96
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
8.1. Conclusiones	99
8.2. Recomendaciones	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
ANEXOS.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la voladura controlada.....	18
Tabla 2. Calidad y estándares de fragmentación en las voladuras	29
Tabla 3. Clasificación geomecánica del macizo rocoso mediante el RMR de Bieniawski	31
Tabla 4. Operacionalización de variables	34
Tabla 5. Población de la zona española	42
Tabla 6. Muestra representativa de la zona Española	42
Tabla 7. Análisis de roca intacta a resistencia a la compresión simple	45
Tabla 8. Parámetros de perforación y voladura convencional en el crucero XC-8770-SE	46
Tabla 9. Explosivos y accesorios de voladura utilizados en el crucero XC-8770-SE en la voladura convencional	46
Tabla 10. Resultados de la voladura en el crucero XC-8770-SE	49
Tabla 11. Distribución porcentual de la fragmentación en el crucero XC-8770-SE con voladura convencional	50
Tabla 12. Factor de energía empleado en el crucero XC-8770 – SE con la voladura convencional	53
Tabla 13. Parámetros de perforación y voladura convencional en la galería GA-8365-S	53
Tabla 14. Explosivos y Accesorios de voladura utilizados en la galería GA-8365-S durante la voladura convencional	53
Tabla 15. Resultados de voladura convencional en la galería GA-8365-S.....	56
Tabla 16. Distribución porcentual de la fragmentación en la galería GA-8365-S con la voladura convencional	57
Tabla 17. Factor de energía empleado en la galería GA-8365-S con la voladura convencional ..	60
Tabla 18. Parámetros de perforación y voladura aplicando voladura controlada en el crucero XC-8770-SE.....	62
Tabla 19. Explosivos y accesorios de voladura aplicando voladura controlada en el crucero XC-8770-SE.....	63
Tabla 20. Distribución de faneles de periodo largo en los taladros del crucero XC-8770-SE	63
Tabla 21. Resultados de sobreexcavación de la voladura en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-	

50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque.....	66
Tabla 22. Resultados de distribución porcentual de la fragmentación en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	67
Tabla 23. Factor de energía en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	70
Tabla 24. Parámetros de perforación y voladura aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S	71
Tabla 25. Explosivos y accesorios de voladura aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S	72
Tabla 26. Accesorios en la distribución de la numeración de faneles de periodo largo en los taladros en la galería GA-8365-S.....	72
Tabla 27. Resultados de sobreexcavación de la voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque.....	75
Tabla 28. Distribución porcentual de la fragmentación en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	76
Tabla 29. Factor de energía en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, desacoupling charging y rimado de taladros de arranque.....	79
Tabla 30. Comparación de resultados en volumen generado por la sobreexcavación (m3).....	83
Tabla 31. Comparación de resultados de los parámetros de control de voladura	88
Tabla 32. Comparación de resultados de los indicadores de fragmentación	89
Tabla 33. Intervalos de tendencia central y desviación estándar de la diferencia de resultados de sobreexcavación.....	92
Tabla 34. Significancia de probabilidad de Shapiro Wilk para diferencia de resultados de sobreexcavación.....	93
Tabla 35. Prueba t-Student de la diferencia de los resultados de sobreexcavación	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquemas típicos de carguío para voladura controlada.....	17
Figura 2. Grado de afectación en la roca remanetente por la voladura controlada.....	18
Figura 3. Sobreexcavación y subexcavación en túneles excavados convencionalmente	23
Figura 4. Curva de distribución acumulativa de fragmentación.....	28
Figura 5. Parámetros para la clasificación geomecánica RMR 89	30
Figura 6. Malla de perforación y voladura convencional del crucero XC-8770-SE	47
Figura 7. Resultados de la voladura convencional en el crucero XC-8770-SE	48
Figura 8. Resultados sobreexcavación en la voladura convencional en el crucero XC-8770-SE	51
Figura 9. Resultados de fragmentación promedio por disparo de la voladura convencional en el crucero XC-8770-SE.....	51
Figura 10. Malla de perforación y voladura convencional de la galería GA-8365-S.....	54
Figura 11. Resultados de la voladura convencional en la galería GA-8365-S	55
Figura 12. Resultados de sobreexcavación en la voladura convencional de la galería GA-8365-S	48
Figura 13. Resultados de fragmentación promedio por disparo en la galería GA-8365-S con voladura convencional	48
Figura 14. Malla de perforación y voladura en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de talados de arranque	64
Figura 15. Resultados de sobreexcavación en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	65
Figura 16. Resultados de sobreexcavación en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	68
Figura 17. Resultados de fragmentación por disparo en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura controlada de recorte y voladura amortiguada	68
Figura 18. Resultados de la voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31- 40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	73
Figura 19. Resultados de la voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31- 40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	74
Figura 20. Resultados de sobreexcavación en la galería GA-8365-S con RMR 41-50 aplicando	

voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque	77
Figura 21. Resultados de fragmentación por disparo en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte y voladura amortiguada	77
Figura 22. Comparativo de la sobreexcavación por disparo aplicando voladura controlada en el crucero XC-8770-S	81
Figura 23. Comparativo de la sobreexcavación por disparo aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S	82
Figura 24. Comparación de volumen de material generado por la sobreexcavación (m3)	83
Figura 25. Comparativo de perfil de excavación resultante aplicando voladura controlada en el crucero XC-8770-SE.....	84
Figura 26. Comparativo de perfil de excavación resultante aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S	85
Figura 27. Aplicación de técnica de voladura amortiguada en la GA-8365-SE	86
Figura 28. Aplicación de técnica de voladura de recorte y rimado de taladros de alivio en el crucero XC-8770-SE.....	87
Figura 29. Resultados del factor de energía y su relación con la sobreexcavación	88
Figura 30. Comparativo de los indicadores de fragmentación promedio por disparo antes y después de la aplicación de voladura controlada en el crucero XC-8770-SE	89
Figura 31. Comparativo de los indicadores de fragmentación promedio por disparo antes y después de la aplicación de voladura controlada en la galería GA-8365-S	90
Figura 32. Resultados de los indicadores de fragmentación y su relación con la sobreexcavación	91
Figura 33. Tendencia central y desviación estándar para la diferencia de resultados de la sobre excavación	93

LISTA DE SÍMBOLOS

%:	Porcentaje
°:	Grado sexagesimal
E:	Energía del explosivo
t:	Tonelada métrica (1000 kg)
γ :	Peso específico del macizo rocoso
ρ :	Densidad de la roca
Φ :	Diámetro
h:	Altura de la labor o banco
Ja:	Número de alteración de fisuras
Jn:	Número de sistemas de fisuras
Jr:	Número de rugosidad de las fisuras
kg/m:	Kilogramo por metro
kg/m ³ :	Kilogramo por metro cúbico
kg/t:	Kilogramo por tonelada
kcal:	Kilocalorías
kcal/t:	Kilocalorías por tonelada
L:	Longitud del taladro
lb:	Libra
m:	Metro
m ³ :	Metro cúbico
mm:	Milímetro
pulg:	Pulgada
MPa:	Megapascal
σ_c :	Resistencia a compresión uniaxial
τ :	Resistencia al corte
Φ :	Ángulo de fricción interna
V _n :	Volumen nominal
VOD:	Velocidad de detonación
V _n :	Volumen nominal
V _r :	Volumen real
V _x :	Volumen sobreexcavado

LISTA DE ABREVIATURAS

ANFO: Nitrato de amonio con fuel oil (Ammonium Nitrate Fuel Oil)
Codelco: Corporación Nacional del Cobre de Chile
EPP: Equipo de Protección Personal
INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática
OSHA: Occupational Safety and Health Administration
PETS: Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro
RMR: Rock Mass Rating
RQD: Rock Quality Designation (Índice de Calidad de la Roca)
S.A.: Sociedad anónima.
SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile)
SPSS: Statistical Package for the Social Sciences
UCS: Resistencia a la compresión uniaxial (Uniaxial Compressive Strength)
UNAMBA: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
UNAP: Universidad Nacional del Altiplano
UNASAM: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo
UNCP: Universidad Nacional del Centro del Perú
UNH: Universidad Nacional de Huancavelica
UNMSM: Universidad Nacional Mayor de San Marcos
UNSA: Universidad Nacional de San Agustín
UTM: Universal Transverse Mercator
VOD: Velocidad de Detonación (Velocity of Detonation)
EU: Escuela Universitaria
m.s.n.m. – metros sobre el nivel del mar
CH: Chimenea
GAL: Galería
XC: Crucero
SN: Subnivel
Fa: Factor de avance (kg/m)
Fc: Factor de carga específica (kg/m³)
Fe: Factor de energía (kcal/t)
Fp: Factor de potencia (kg/t)
LP: Periodo Largo

GLOSARIO

Labores mineras subterráneas:

Las labores mineras subterráneas son aquellas operaciones de excavación que se llevan a cabo debajo de la superficie terrestre con la finalidad de extraer mineral, en contraposición a las labores mineras a cielo abierto. Estas labores implican la excavación de túneles, galerías, chimeneas verticales y otras estructuras subterráneas para acceder y extraer los depósitos minerales. Las labores mineras subterráneas se utilizan comúnmente cuando los depósitos minerales se encuentran a una profundidad considerable o cuando las condiciones geológicas no permiten la explotación a cielo abierto de manera eficiente, segura y económica. Este método de extracción puede requerir técnicas y equipos especializados, así como medidas adicionales de seguridad para proteger la integridad de las estructuras subterráneas y garantizar la seguridad de los trabajadores (Bejarano, 2021).

Perforación:

Es el proceso de crear agujeros en una superficie utilizando herramientas específicas, como taladros, brocas o barrenos. Este proceso se emplea en una amplia diversidad de industrias y aplicaciones, incluyendo la minería, la construcción, la exploración geológica y la ingeniería civil. La perforación puede tener diversos propósitos, como la extracción de minerales, la instalación de cimientos, la exploración de recursos naturales, la creación de pozos de agua, la perforación de túneles o la preparación de superficies para la instalación de equipos o estructuras (Laboratorio de innovación, 2020).

Malla de perforación:

Castillo & Aymara (2022) lo definen como esquemas geométricos. Tienen diferente configuración geométrica según la evaluación de la calidad del macizo rocoso, pueden ser cuadradas, rectangular, triangulares, otros.

Voladura de Rocas:

Según Belito & Belito (2021), es el proceso de utilización de un conjunto de taladros, llenados adecuadamente de carga explosiva, seguido de su detonación de acuerdo con los retardos correspondientes, con el fin de lograr la adecuada fragmentación y desplazamiento del material.

Carga explosiva:

Según Belito & Belito (2021) es la cantidad total de explosivos y agentes de voladura cuantificados al realizar una determinada voladura.

Voladura controlada: Bejarano (2021) define como un conjunto de técnicas que se usan para distribuir eficientemente la energía de las cargas explosivas en una voladura con la finalidad de minimizar el daño al macizo rocoso y obtener superficies lisas, estables y de acuerdo con las secciones iniciales planificadas.

Técnica de voladura controlada de recorte:

Según Bejarano (2021) La detonación de cargas desacopladas en una fila de taladros adyacentes ocurre posterior de la voladura de producción

Técnica de voladura perforación en línea:

Según Exsa (2022) consiste en perforar en el contorno taladros de igual diámetro con un espaciamiento adecuado y sin cargar (vacíos), esto permitirá crear un plano de corte limitando el paso de las ondas explosivas evitando la sobreexcavación o rotura fuera de la sección planificada.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Las empresas mineras que emplean métodos de explotación subterránea realizan una serie de actividades unitarias para la extracción de minerales, siendo una de las más importantes la perforación y voladura. Esta actividad permite fragmentar y desplazar el material para su posterior carguío, transporte y procesamiento. Un desafío recurrente en estas operaciones es la reducción y control de la sobreexcavación, entendida como la remoción de material más allá del límite de diseño. Este fenómeno genera entornos de trabajo inseguros e incrementa los costos operativos generando pérdidas económicas para las operaciones mineras.

Actualmente existen diversas técnicas de voladura controlada en la literatura que describen métodos para minimizar la sobreexcavación, aunque su aplicación práctica en operaciones subterráneas suele limitarse a configuraciones estándar que no siempre consideran las particularidades geomecánicas del macizo, ni las características del explosivo. En la zona Española de Minera Aurífera Retamas S.A., el uso de mallas de perforación y voladura convencionales ha derivado en sobreexcavaciones por encima de los rangos admisibles en las labores lineales, especialmente durante el último trimestre de 2022, donde se alcanzaron niveles promedio de 16,91 %, superando en un 6,91 % el límite planificado de 10 %.

Existe la necesidad de implementar la aplicación de las técnicas de voladura controlada para reducir la sobreexcavación y optimizar las operaciones mineras. Para el cumplimiento de los objetivos del presente estudio se planteó la aplicación de las técnicas de voladura controlada: Voladura de recorte, Voladura amortiguada y la Perforación en línea. Todas estas técnicas fueron aplicadas en conjunto con la voladura en las labores con mayores índices de sobreexcavación de la Zona Española.

Metodológicamente, la investigación se desarrolló en condiciones reales de operación, seleccionando frentes de avance representativos de la zona de estudio: el crucero XC-8770-SE y la galería GA-8365-S. El crucero XC-8770-SE tuvo una sección de 2.4 m x 2.7 m y se encontró en roca granito cuyo RMR se encontraba en el rango de 41-50 clasificándose como una roca III-B; en el caso de la galería GA-8365-S tuvo una sección de 2.4 m x 2.7 m y se encontraba en roca granodiorita con un RMR se encontraba en el rango de 31-40 clasificándose como una roca IV-A. Se utilizó para la perforación perforadoras neumáticas tipo Jackleg con brocas de 36 mm de diámetro y barras cónicas de 8 pies de profundidad; para la voladura se empleó explosivos Emulnor 1000 (1 1/8" x 16") iniciados con faneles de retardo de periodo largo (LP).

El diseño experimental contempló un total de 30 voladuras de prueba donde se aplicaron las diversas técnicas de voladura controlada variando parámetros como el factor de carga lineal, la secuencia de detonación y la disposición de los taladros de contorno. Las mediciones de indicadores clave incluyeron el porcentaje de sobreexcavación, el índice de fragmentación (P80), y la estabilidad del contorno excavado. Todos los datos obtenidos fueron registrados en formatos diseñados y analizados con herramientas estadísticas y hojas de cálculo en Excel. Con los resultados obtenidos, se realizó las discusiones y conclusiones del estudio.

La implementación de voladuras controladas permitió reducir significativamente los niveles de sobreexcavación en las labores piloto con una disminución del 27.77% en la galería GA-8365-S y del 17.63% en el crucero XC-8770-SE. Los resultados confirman que la voladura controlada es una alternativa técnica viable y sostenible para mitigar los efectos negativos de la sobreexcavación en minería subterránea. Se recomienda su aplicación progresiva en otras zonas de la mina, la capacitación del personal operativo y la implementación de sistemas de monitoreo continuo para optimizar resultados y garantizar la sostenibilidad del proceso. Como aporte, la investigación entrega un conjunto de parámetros optimizados de perforación y voladura para condiciones geomecánicas similares, así como lineamientos técnicos para su aplicación progresiva en otras áreas de la mina.

El contenido de la presente tesis está organizado de la siguiente manera: el Capítulo I, presenta la introducción, el planteamiento del problema, los objetivos y los alcances de la investigación. El Capítulo II desarrolla el marco teórico, abordando los fundamentos de la voladura controlada, la sobreexcavación y sus parámetros de control, así como aspectos de fragmentación y clasificación geomecánica del macizo rocoso. El Capítulo III, describe las hipótesis, variables y operacionalización de las variables. El Capítulo IV, detalla la metodología seguida en la investigación, el diseño de investigación y técnicas de recolección de datos. El Capítulo V, presenta los resultados encontrados en la aplicación de la voladura convencional. El Capítulo VI, presenta los resultados optimizados mediante la aplicación de la voladura controlada. El Capítulo VII, discute y compara los resultados obtenidos antes y después de la aplicación de la voladura controlada. El Capítulo VIII, formula las conclusiones y recomendaciones. Finalmente, se incluyen las referencias y anexos que respaldan el trabajo seguido en la investigación.

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1 Descripción del Problema

La voladura controlada es una técnica crucial en la minería moderna, diseñada para minimizar la sobreexcavación, optimizar la fragmentación de la roca y obtener superficies lisas y estables. Sin embargo, en la zona Española de la división Chilcas Bajo la Minera Aurífera Retamas S.A., se ha evidenciado un problema significativo en la aplicación de esta técnica. Durante el año 2022, especialmente en el último trimestre, con un promedio de todas las labores lineales en operación, alcanzando un 16.91%, lo que representa un 6.91% por encima de lo planificado por la compañía en 10 %. Este aumento no solo compromete la eficiencia operativa, sino que también incrementa los costos de estabilización y sostenimiento de la roca remanente, para garantizar la seguridad del personal y maquinarias.

El análisis de los resultados en los parámetros de control de voladura reveló un aumento en el factor de avance lineal (Kg de explosivo por metro de avance) a 19.49 kg/m en el crucero XC-8770-SE y 18.53 kg/m en la galería GA-8365-S, en secciones de 2.40 m x 2.70 m. Además, la fragmentación resultante de las voladuras no cumple con los estándares óptimos, ya que gran parte del material posterior a la voladura presenta un tamaño de fragmentación de $P_{80} = 2$ pulg, en comparación con el óptimo de $P_{80} = 4-6$ pulg. Esta ineficiencia en la fragmentación y en los parámetros de control de voladura se debe a la falta de aplicación, lo que provoca un mayor daño al macizo rocoso y genera contornos inestables en las labores.

La situación actual pone de manifiesto la necesidad urgente de replantear la investigación en torno a la voladura controlada. Es fundamental implementar en el daño por voladura, tales como las características. Solo mediante un enfoque integral y optimizado se

podrá reducir la sobreexcavación en las operaciones y garantizar un ambiente de trabajo más seguro para el personal y equipos para mantener la productividad de la operación. Este replanteamiento no solo busca cumplir con los objetivos de esta compañía, sino también contribuir a la sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones mineras en general.

1.1.2 Formulación del Problema

1.1.2.1 Problema General. ¿Cómo afecta la aplicación de la voladura controlada en la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?

1.1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la relación entre la técnica de voladura controlada y la cantidad de sobreexcavación generada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?
- ¿Qué impacto tiene la calidad del macizo rocoso en la selección de la técnica de voladura controlada utilizada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?
- ¿Cómo se relacionan los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura con la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

- Aplicar voladura controlada para reducir la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar la relación entre la técnica de voladura controlada y la cantidad de sobreexcavación generada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.
- Investigar el impacto de la calidad del macizo rocoso en la selección de la técnica de voladura controlada utilizada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.
- Evaluar la relación entre los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura con la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

1.3 Importancia de la investigación

El estudio sobre la aplicación de la voladura controlada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, es de suma importancia por varias razones que abarcan aspectos técnicos, económicos, de seguridad y medioambientales. A continuación, se detallan estos aspectos:

Mejora de la Eficiencia Operativa

La voladura controlada permite optimizar el proceso de extracción de mineral al reducir la sobreexcavación. Se puede interpretar por la forma en la que se minimiza la cantidad de material no deseado que se extrae. Al aplicar técnicas adecuadas, se puede lograr un avance más rápido y efectivo en las labores lineales, lo que mejora la productividad general de la operación minera.

Reducción de Costos

La sobreexcavación implica costos adicionales de recursos. Al reducir la cantidad de material extraído innecesariamente, se disminuyen los costos asociados con el carguío, acarreo y

sostenimiento. Esto es especialmente crítico en rocas de mala calidad, donde los costos pueden incrementarse significativamente. La investigación permitirá identificar las técnicas de voladura más efectivas, lo que puede resultar en ahorros sustanciales para la empresa.

Seguridad en el Trabajo

La correcta aplicación de la voladura controlada contribuye a crear entornos de trabajo más seguros. La reducción de la sobreexcavación minimiza el riesgo de colapsos y deslizamientos en las labores. Al establecer prácticas de voladura que consideren la calidad del macizo rocoso, se puede mejorar la estabilidad de las excavaciones, lo que es fundamental para la seguridad operativa.

Impacto Ambiental

La minería aporta en la sobreexcavación puede agravar este problema al alterar el paisaje y afectar la biodiversidad debido a la cantidad de material adicional extraído y depositado. Al reducir la sobreexcavación mediante técnicas de voladura controlada, se puede mitigar el impacto ambiental de las operaciones mineras. Esto es especialmente relevante en un contexto donde las regulaciones ambientales son cada vez más estrictas y donde las empresas buscan mejorar su sostenibilidad.

Contribución al Conocimiento Técnico

Los resultados del presente estudio son valiosos en base a las técnicas de voladura. Este conocimiento puede ser utilizado no solo por la Minera Aurífera Retamas, sino también por otras empresas del sector, contribuyendo al desarrollo de mejores prácticas en la industria minera. Además, la investigación puede servir como base para futuros estudios y desarrollos tecnológicos en el campo de la voladura controlada.

La investigación sobre la aplicación de la voladura controlada para reducir la sobreexcavación es para garantizar la seguridad de los trabajadores, minimizar el impacto ambiental y contribuir al conocimiento técnico en la industria. Estos factores hacen que la investigación sea relevante y necesaria en el contexto actual de la minería, donde la sostenibilidad y la eficiencia son prioridades clave.

1.4 Alcance de la investigación

Los alcances de esta investigación se refieren a los límites y las áreas específicas que se abordarán, así como a los resultados esperados y su aplicabilidad. A continuación, se detallan los principales alcances de la investigación:

Ámbito Geográfico

La investigación se centró en las labores lineales de la zona Española, específicamente en la división Chilcas Bajo de la Minera Aurífera Retamas, ubicada en el anexo Llacuabamba, distrito de Parcoy, provincia de Pataz, departamento de La Libertad, Perú. Este enfoque geográfico permitió un análisis detallado de las condiciones específicas del macizo rocoso y de las técnicas de voladura que fueron aplicadas en dicha área.

Aplicabilidad de los Resultados

Los hallazgos de la investigación no solo resultaron relevantes para la Minera Aurífera Retamas, sino que también pudieron ser aplicados en otras operaciones mineras que enfrentan problemas similares de sobreexcavación. Además, los resultados contribuyeron al desarrollo de mejores prácticas en la industria minera, promoviendo la seguridad y la sostenibilidad.

Los alcances de esta investigación abarcaron un enfoque geográfico específico, un período de estudio definido, una población y muestra seleccionadas, técnicas de recolección de datos bien

establecidas, resultados esperados claros y la aplicabilidad de los hallazgos en el contexto de la minería. Estos alcances permitieron que la investigación fuera relevante y útil tanto para la empresa en cuestión como para el sector minero en general.

1.5 Limitaciones de la investigación

Limitaciones Reconocidas: Fue importante reconocer que la investigación enfrentó limitaciones, como la disponibilidad de datos, la calidad de la información sobre prácticas de voladura y las condiciones geológicas complejas.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Internacionales

Silva (2022) en su estudio “*Análise de overbreak/underbreak e de rendimento de desmonte em desenvolvimento de mina subterrânea*” tuvo como objetivo analizar los impactos negativos de los índices de sobreexcavación y subexcavación en el desarrollo de galerías subterráneas. Realizó una investigación de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y método experimental en la cual la muestra seleccionada estuvo compuesta de 61 frentes de desarrollo distribuidos en cinco niveles de la mina estudiada. Los resultados mostraron una correlación entre la litología y los índices de excavación, identificando que las litologías más competentes presentan menores tasas de sobreexcavación; además, se estimó que la sobreexcavación aumenta los costos de transporte en un 8%, pudiendo elevarse hasta un 19% en ciertas litologías. El autor concluye que la optimización de las voladuras, basada en las características litológicas y geomecánicas del macizo rocoso, contribuye a reducir los impactos negativos de la sobreexcavación y subexcavación, como la dilución y los costos operativos.

Varela (2022) en su estudio “*Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa*” tuvo como

objetivo evaluar el impacto técnico y económico de la reducción del factor de carga en las voladuras de labores subterráneas horizontales. Realizó una investigación de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y método experimental, en la que la muestra representativa estuvo compuesta por un conjunto específico de voladuras en labores subterráneas. Los resultados mostraron que la reducción del factor de carga mejora el control de la sobreexcavación y la fragmentación; lo cual tiene un impacto positivo al reducir los costos de voladura y transporte de materiales. Concluye que la reducción del factor de carga es viable, tanto económica como técnicamente, mediante la aplicación de técnicas de voladura controlada bajo condiciones específicas del macizo rocoso, en las que una evaluación precisa de las condiciones geológicas permite adaptar el factor de carga de manera óptima.

López (2020), en estudio *“Estudio sobre las principales voladuras de contorno, optimización y desarrollo de una metodología de cálculo relacionada con los parámetros geomecánicos del terreno”* tuvo como objetivo evaluar la voladura de contorno como una técnica eficaz en el cuidado del macizo rocoso cercano a la excavación. Realizó una investigación de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y método experimental, en la que la muestra representativa consistió en un conjunto específico de voladuras de contorno realizadas en varias operaciones mineras. Los resultados demostraron que la correcta aplicación de la voladura de contorno mejora la precisión del contorno, reduce significativamente la sobreexcavación y disminuye los daños en las estructuras circundantes, contribuyendo a entornos de trabajos seguros y eficientes. El autor concluye que la aplicación de las voladuras de contorno, considerando los parámetros geomecánicos del área de trabajo, permite mejorar la precisión de la excavación y reducir el impacto al macizo rocoso circundante a labores de excavación.

Hernández (2019) en su investigación “Estudio comparativo de la sobreexcavación en desarrollos horizontales con ANFO versus desarrollos realizados con emulsión en la mina Esmeralda, división el Teniente, Codelco Chile”, tuvo como objetivo comparar la sobreexcavación producida en los desarrollos horizontales durante la preparación de la mina, en relación al uso de ANFO o emulsión en las tronaduras de avance. Utilizó un estudio de tipo aplicado, con un enfoque cuantitativo y empleando un método experimental, donde la muestra estuvo conformada por 6 desarrollos horizontales: 4 labores en el nivel de hundimiento, 2 en el nivel de producción. Los resultados muestran una mayor reducción de la sobreexcavación mediante la aplicación de emulsión, con un promedio de 18%, frente al ANFO, que registró un promedio de 30.19%, lo que representa una diferencia de 12.19%. Esta optimización al 18% mediante el uso de emulsión, representa una reducción del 40% en el material sobreexcavado. Concluye que la emulsión presenta un mejor desempeño en la reducción de la sobreexcavación en comparación con el ANFO en los desarrollos de la mina Esmeralda, subrayando así la importancia de seleccionar el explosivo adecuado para un control efectivo de la sobreexcavación.

Nacionales

Castillo & Aymara (2022), en su estudio de investigación denominada “*Aplicación de voladura controlada con recorte para reducir la sobrerotura en el crucero 2682 del nivel 1815 de la UM acumulación Parcoy N° 01, consorcio minero horizonte – 2021*”, tuvieron como objetivo principal disminuir la sobrerotura mediante la aplicación de la voladura controlada de recorte. Su estudio fue de tipo explicativo, enfoque cuantitativo y método experimental donde la muestra estuvo representada por el crucero 2682. Los resultados mostraron que una adecuada aplicación de la voladura controlada de recorte permitió reducir la sobrerotura promedio a 6.72%, lo cual

representa una reducción en 8.79% en el volumen de material fragmentado por disparo. Concluyen que la aplicación de voladura controlada de recorte con disposición de cargas desacopladas y espaciadas permite reducir y controlar el porcentaje de sobrerotura.

Callupe (2022) en su estudio denominado "*Determinación de parámetros de voladura controlada para reducir la sobrerotura en la cortada Carlos de la mina San Roque FM - 2021*" tuvo como propósito identificar los parámetros de voladura controlada para disminuir la sobrerotura. Realizó una investigación aplicada, de nivel descriptivo, enfoque cuantitativo y método experimental en la que la muestra se compone de las progresivas 0+ 050, 0 + 100 y 0 + 150. Los resultados muestran que un hallazgo significativo es que en la planificación de excavaciones y voladuras, las propiedades mecánicas, físicas y químicas, así como las características físicas del terreno, desempeñan un papel importante. Por ese motivo, el éxito del método de ondas sónicas radica en una óptima disposición y la dirección efectiva del sistema de perforación. Concluye que la determinación de parámetros de voladura controlada y su aplicación permite reducir la sobrerotura en 15.21%, lo cual mejora las condiciones de estabilidad en el techo de la labor y reduce costos por eliminación de material excedente a causa de la sobrerotura.

Belito & Belito (2021), En su estudio titulado "*Reducción de sobrerotura mediante el uso de voladura controlada del Precorte en el crucero CX 1160 del Nivel 2360 de la zona candelaria de la Cia. Consorcio Minero Horizonte – 2019*", tuvieron como objetivo investigar como influye la aplicación de la voladura controlada de precorte en la reducción de los indicadores de sobrerotura. El estudio fue de tipo descriptivo-correlacional, con un enfoque cuantitativo y método experimental donde la muestra estuvo representada por el Crucero CX 1160. Los resultados del estudio revelaron una disminución de la sobrerotura mediante la aplicación de voladura controlada con la técnica de precorte a un valor promedio de 7.8 m³/disparo, lo cual equivale a una reducción

de 17.87% en volumen. Concluyen que la aplicación de la voladura controlada de precorte y el uso de cargas desacopladas influye positivamente en la reducción de los indicadores de sobrerotura.

Fernández & Castro (2021), en su estudio denominado *"Adaptación de Técnicas de Voladura Controlada según la Calidad del Macizo Rocosó en Labores Mineras Subterráneas "*, tuvieron como objetivo analizar la efectividad de distintas técnicas de voladura controlada en relación con la calidad del macizo rocoso, buscando reducir la sobreexcavación y minimizar el daño en el entorno inmediato en labores mineras subterráneas. El estudio fue de tipo aplicada, de nivel explicativo, método experimental y enfoque cuantitativo, en el cual la muestra seleccionada en el estudio corresponde a una serie de frentes de trabajo específicos en una mina subterránea. Los resultados mostraron que, en macizos rocosos de Baja Calidad ($RMR < 30$), se logró una disminución significativa en la sobreexcavación, entre un 25% y un 35% en comparación con voladuras convencionales, al emplear técnicas de voladura controlada como la voladura de contorno y el precorte; en macizos de calidad media (RMR entre 30-50), se alcanzó hasta un 30% de reducción en la sobreexcavación, mejorando la fragmentación y el factor de carga mediante el uso de voladura amortiguada (cushion blasting) y voladura en abanico, junto con una optimización específica en el patrón de retardo. Por último, en macizos de alta calidad ($RMR > 50$), la sobreexcavación disminuyó entre un 15% y un 20% gracias a la voladura en abanico con tiempos de retardo, cargas escalonadas y mayores cargas explosivas, aprovechando la alta resistencia y cohesión de este tipo de macizo. Concluyen que la adaptación de técnicas de voladura en función de la clasificación del macizo rocoso resulta ser un enfoque práctico y eficaz para minimizar la sobreexcavación y mantener la estabilidad en labores subterráneas bajo diversas condiciones geotécnicas.

Bejarano (2021), en su estudio denominado "*Voladura controlada y su influencia en la disminución de sobrerotura en labores subterráneas - Minera Aurífera Retamas S.A* ", tuvo como objetivo analizar cómo la voladura controlada influye en la reducción de la sobrerotura en las labores subterráneas. El estudio fue de tipo aplicada, con un nivel de investigación descriptivo-explicativo y enfoque cuantitativo, en el cual la muestra incluyó 1 galería y 3 chimeneas en operación con altos índices de porcentaje de sobrerotura. Los resultados del estudio mostraron que en la galería GA 9103 – SE (XC 9103 – S (RP)) la sobrerotura se redujo del 12,30% al 8,5%; en las chimeneas CH 9103 – 8AS (EST8 (XC 9103 – S)), se redujo del 20,72% al 12%; CH 9110 – 18AS (GA 9110 – AS) disminuyó del 32.12% al 14% y en la CH 9103 – 16S (GA 9103 – S (XC)) se redujo del 57,75% al 19%. Adicionalmente, el factor de carga disminuyó en forma porcentual al 22% en promedio en todas las labores. Concluye que la voladura controlada influye positivamente en la reducción de la sobrerotura y permite disminuir el factor de carga.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 *Voladura controlada*

Definición

Según Exsa (2022), este método implica el uso de explosivos de baja potencia, que se cargan de manera estratégica con espaciadores y se detonan simultáneamente para generar planos de rotura específicos. Los métodos de voladura controlada se emplean para gestionar los efectos provocados por la explosión, tales como la rotura excesiva, las fracturas en las paredes de roca que quedan y las vibraciones del suelo, entre otros.

2.2.1.1 Técnicas de voladura controlada

En la literatura, se han desarrollado diversas técnicas de voladura controlada con el fin de optimizar la estabilidad de las excavaciones finales, especialmente en minería subterránea. De acuerdo con Exsa (2022), en este ámbito, las técnicas más empleadas en los últimos años son las siguientes: Voladura de precorte (Presplitting), voladura de recorte (Smooth blasting), voladura amortiguada (Buffer blasting) y la Perforación en línea (Line drilling).

1. **Voladura de precorte (Presplitting):** Según Exsa (2022), se elabora un plano de fractura disparando cargas desacopladas en perforaciones realizadas con brocas de menor diámetro, las cuales pueden detonarse simultáneamente antes de iniciar la voladura de producción. Esta técnica es eficaz en situaciones donde el control del perfil de la excavación es crítico.
2. **Voladura de recorte (Contour Blasting):** De acuerdo con Exsa (2022), consiste en una fila de taladros con carga desacoplada que son detonadas después de la voladura principal. El material fragmentado se produce hacia la cara libre, lo que da como resultado un mayor espaciamiento taladro a taladro.
3. **Voladura amortiguada (Cushion Blasting):** Según Exsa (2022), también denominada voladura suave, consiste en modificar la última fila de taladros con geometría más reducida y cargas desacopladas. En la voladura amortiguada, el disparo se ejecuta en una sola etapa y después de la voladura de producción.
4. **Perforación en línea (Line Drilling):** Según Exsa (2022), consiste en perforar en el contorno taladros de igual diámetro con un espaciamiento adecuado y sin cargar (vacíos), esto permitirá crear un plano de corte evitando la sobreexcavación o rotura fuera de la sección planificada.

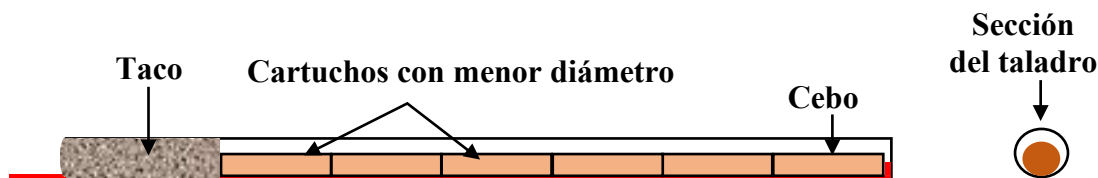
La selección y combinación de estas técnicas depende de exigencias específicas de cada proyecto.

La “Figura 1” muestra gráficamente la manera en que los taladros se organizan en voladura controlada

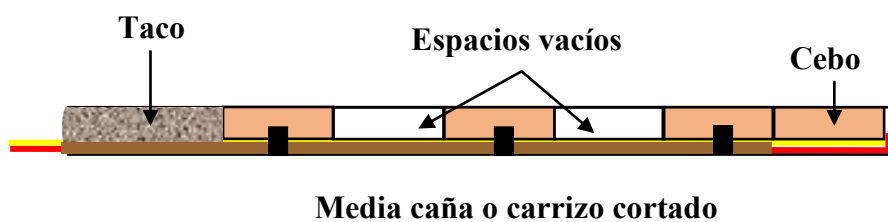
Figura 1

Esquemas típicos de carguío para voladura controlada

1. Explosivo de baja potencia de pequeño diámetro en columna continua sin atacar



2. Cartuchos espaciados sobre una media caña para facilitar el carguío y condón detonante para asegurar la iniciación



Nota: Extraído de Vilca (2019)

2.2.1.2 Ventajas y Desventajas de la Voladura Controlada

Exsa (2022) describe las ventajas y desventajas de aplicar la técnica de voladura controlada. Esta técnica ajusta las concentraciones de carga explosiva para reducir la formación de grietas y mantener la estabilidad de las paredes, ofrece diversos beneficios y limitaciones. La “Tabla 1” muestra el resumen.

Tabla 1*Ventajas de la voladura controlada*

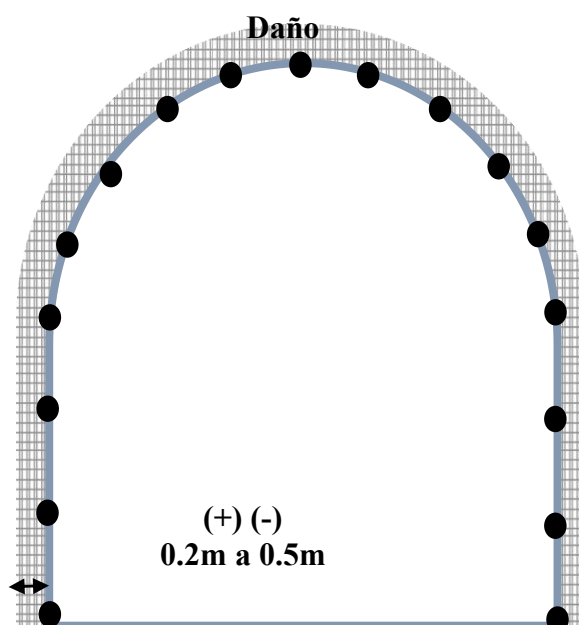
Beneficios	Limitaciones
• Genera superficies rocosos estables. • Ayuda a disminuir tanto la vibración como la sobreexcavación. • Facilita el transporte del material fragmentado al evitar excesos. • Reducen la grietas de las rocas circundante • Contribuye al autosostenimiento de las excavaciones • Mejorar la seguridad en el entorno de trabajo	• El costo relativamente mayor que la voladura convencional • Requiere uso de explosivos especiales y mano de obra calificada. • En ciertos tipos de terreno, los resultados no alcanzan las expectativas previstas.

Nota: Extraído de Exsa (2022)

La “Figura 2” muestra el resultado de una voladura aplicando voladura controlada donde se observa el perfil de excavación final y el grado rango en la afectación al macizo rocoso.

Figura 2

Grado de afectación en la roca remanente por voladura controlada



Nota: Extraído de Exsa (2022)

2.2.1.3 Parámetros que intervienen en una voladura controlada

a) Características de la masa rocosa.

Famesa (2019), Manifiesta que las características físicas y mecánicas de las formaciones rocosas en un área específica. Estas propiedades pueden incluir la resistencia, la porosidad, la fracturación, la densidad, la presencia de fallas geológicas, la permeabilidad, entre otras. Comprender las propiedades de los macizos rocosos es crucial para la planificación y ejecución efectiva de operaciones de voladura.

b) Propiedades y distribución de los explosivos.

Langefors, U., & Kihlström, B. (1978), Las propiedades y la distribución de los explosivos son factores críticos en una voladura controlada. La correcta selección y distribución de los explosivos no solo determina la eficiencia de la voladura, sino también la seguridad y la minimización de impactos no deseados.

Propiedades de los Explosivos:

Velocidad de detonación (VOD): Esta propiedad define la velocidad a la que se propaga la onda de choque a través del explosivo. Un VOD alto es deseable para materiales duros, ya que facilita una fractura eficiente.

Densidad: La densidad del explosivo afecta la cantidad de energía disponible por unidad de volumen. Una mayor densidad proporciona más energía que es útil para romper rocas duras.

Sensibilidad: Se refiere a la facilidad con la que un explosivo puede ser detonado. Explosivos con alta sensibilidad se utilizan para iniciar la voladura, mientras que los menos sensibles se usan en la columna de carga.

Estabilidad: Los explosivos deben ser estables bajo las condiciones de almacenamiento y manipulación para prevenir detonaciones accidentales.

Distribución de los Explosivos: La distribución de los explosivos en los barrenos debe ser uniforme para asegurar una fragmentación homogénea. La carga de los barrenos se realiza en función de la geología del terreno y el diseño del patrón de voladura.

Carga en Columna y Tapón:

La carga en columna se utiliza para maximizar la energía en la zona más baja del barreno, mientras que el tapón (parte superior del barreno) se usa para contener la explosión y mejorar la fragmentación.

La combinación adecuada de las propiedades del explosivo y su distribución estratégica dentro de los barrenos es esencial para alcanzar los objetivos de la voladura controlada, minimizando el impacto ambiental y mejorando la seguridad.

c) Precisión de la perforación

Para Famesa (2019), en la voladura, la calidad de la perforación se refiere a la capacidad de los equipos de perforación para realizar taladros con una ubicación, orientación, profundidad y diámetro precisos en el macizo rocoso. La precisión de la perforación es fundamental en las operaciones de voladura controlada, ya que afecta directamente la eficacia y seguridad de la voladura. La precisión de la perforación puede lograrse mediante la selección adecuada de equipos de perforación, el entrenamiento de los operadores y el monitoreo continuo de la calidad de las perforaciones.

d) Diseño y ejecución de las voladuras.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995) El diseño y la ejecución de voladuras son factores esenciales para asegurar la eficacia, seguridad y minimización de impactos negativos en una voladura controlada. Estos aspectos determinan cómo se aplicará la energía explosiva al macizo rocoso, influenciando la fragmentación, las vibraciones y los efectos secundarios.

Diseño del Patron de Voladura:

Un diseño adecuado involucra la disposición, espaciamiento, y profundidad de los barrenos, considerando la geología del terreno y los objetivos de la voladura. Un patrón bien diseñado maximiza la eficiencia de la energía explosiva, asegurando una fragmentación óptima y reduciendo la generación de proyecciones y vibraciones.

Secuencia de Retardo: La implementación de retardos entre las detonaciones de barrenos permite controlar la dirección y la acumulación de energía, lo que es crucial para prevenir efectos indeseados como vibraciones excesivas o daños a estructuras cercanas.

Ejecución de la Voladura: La ejecución precisa de la voladura, de acuerdo con el diseño preestablecido, es crítica. Esto incluye la correcta perforación de los barrenos, la carga de explosivos en la cantidad y ubicación determinadas, y el uso adecuado de sistemas de iniciación. La ejecución debe seguir estrictamente los estándares de seguridad.

Monitoreo en Tiempo Real: Durante la ejecución, es vital monitorear parámetros como las vibraciones y el desplazamiento de fragmentos en tiempo real, para realizar ajustes si es necesario y garantizar el control del proceso.

El diseño cuidadoso y la ejecución precisa son fundamentales para una voladura controlada eficaz, minimizando riesgos y asegurando un resultado que cumpla con los objetivos técnicos y de seguridad.

2.2.2 Sobreexcavación

Definición

La sobreexcavación en minería subterránea se define como la remoción de material excedente más allá de los límites del diseño planificado. Este fenómeno ocurre durante la construcción de excavaciones y, si no se controla, puede afectar negativamente los costos operativos y la eficiencia.

Causas de la sobreexcavación

Se presentan las causas principales de la generación de sobreexcavación:

- Burden y espaciamentos mal dimensionados
- Desviación del paralelismo en los taladros de perforación y la alineación
- Exceso de carga de explosiva y distribución incorrecta de la energía de los explosivos.

Según Famesa (2019), algunos efectos negativos de la sobreexcavación en la operación minera incluyen:

- Problema de dilución del mineral con estéril.
- Aumento de volumen del material volado, que influye en el aumento del costo de carguío y transporte. Además, provoca las demoras en el ciclo de producción.

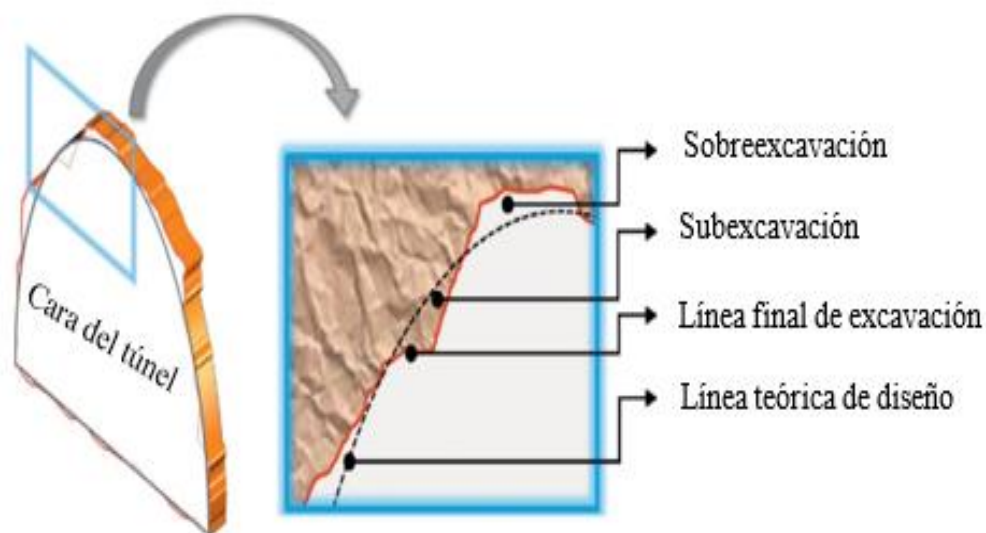
2.2.2.1 Reducción de la Sobreexcavación

Según Salcedo (2019), La reducción de la sobreexcavación se refiere al proceso de disminuir o minimizar la cantidad de material excavado en exceso durante la construcción, excavación o minería. Este término se utiliza comúnmente en ingeniería civil, construcción subterránea y minería. La sobreexcavación puede ocurrir cuando se excava más material del necesario para una determinada estructura o proyecto, lo que puede llevar a desperdicio

de recursos, costos adicionales y riesgos de seguridad. Por lo tanto, la reducción de la sobreexcavación implica tomar medidas para controlar y optimizar la cantidad de material excavado, asegurando que se ajuste a las necesidades y especificaciones del proyecto, minimizando así los costos y el impacto ambiental.

Figura 3

Sobreexcavación y subexcavación en túneles excavados convencionalmente



Nota: Extraído de Erkan (2013)

2.2.2.2 Cálculo de la Sobreexcavación

En minería subterránea, calcular la sobreexcavación es crucial para optimizar la eficiencia operativa, ya que este indicador permite evaluar la efectividad de los resultados de la voladura. En Minera Aurífera Retamas, se emplean fórmulas específicas para calcular la sobreexcavación, que puede expresarse en porcentaje (%) o en metros cúbicos (m³).

Volumen de material sobreexcavado (m³):

El volumen de material sobreexcavado representa la cantidad adicional de material, en metros cúbicos (m³), excavada más allá de los límites establecidos en el diseño planificado.

$$V_n = \left[\left(\frac{a * h * (\pi + 8)}{12} \right) \right] * L$$

$$V_r = \left[\left(\frac{a' * h' * (\pi + 8)}{12} \right) \right] * L$$

$$V_x = V_r - V_n$$

Donde:

a = Ancho programado (m)

h = Alto programado (m)

L = Avance ejecutado (m)

a' = Ancho ejecutado (m)

h' = Alto ejecutado (m)

V_n = Volumen nominal (m³)

V_r = Volumen real (m³)

V_x = Volumen sobreexcavado (m³)

Porcentaje de sobreexcavación (%):

El porcentaje de sobreexcavación es un indicador del material excavado en exceso respecto al volumen proyectado en el diseño de una excavación minera. Se calcula como la proporción entre el volumen sobreexcavado y el volumen nominal.

$$S_{exc} = \left(\frac{V_x}{V_n} \right) * 100\%$$

Donde:

V_n = Volumen nominal (m³)

V_r = Volumen real (m^3)

S_{exc} = sobreexcavación (%)

2.2.3 *Parámetros de control de voladura*

Los parámetros de control de voladura son aquellos factores clave que se seleccionan y ajustan para lograr una fragmentación eficiente del macizo rocoso y minimizar efectos negativos como la sobreexcavación y vibraciones. Estos parámetros buscan optimizar el uso de explosivos, mejorar la estabilidad de las paredes y garantizar condiciones seguras en el entorno de trabajo subterráneo (López, 2019). Si bien existe una serie de parámetros de control de voladura para la presente investigación se seleccionaron a los siguientes parámetros:

Factor de carga Específica (Fc): Según Del Carpio (2021), es el parámetro que indica la cantidad de carga explosiva requerida necesaria para fracturar 1 metro cúbico de roca. Se expresa en (kg/m^3). Se calcula de la siguiente manera:

$$Fc = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{m^3 \text{ de roca}}$$

Factor de potencia (Fp): Es el parámetro que indica la cantidad de explosivo requerido para fracturar 1 tonelada de roca. Se expresa en (kg/tn).

Se calcula de la siguiente manera:

$$Fp = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{tonelada de roca}}$$

Factor de avance (Fa): Es el parámetro que indica la cantidad de explosivo requerido por cada metro de avance lineal. Se expresa en (kg/m).

Se calcula de la siguiente manera:

$$Fa = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{promedio de avance (m)}}$$

Factor de Energía (Fe): Es el parámetro que se refiere a la cantidad de energía requerida para romper una TM de roca por unidad de masa de roca fragmentada. Se expresa en (kcal/t).

$$Fe = \frac{\text{Energía del Explosivo (kcal)}}{\text{tonelada de roca (t)}}$$

Este concepto es crucial para la planificación y ejecución de voladuras eficientes y seguras en minería y obras civiles.

Factores que afectan el Cálculo:

Tipo de Roca: La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) y la calidad de la roca (clasificada mediante RMR o Q de Barton) afectan la cantidad de energía necesaria.

Tipo de Explosivo: Explosivos con mayor VOD y mayor densidad energética pueden liberar más energía por kilogramo, pero su efectividad depende de las condiciones de la roca.

Patrón de Perforación y Carga: Un diseño adecuado reduce el desperdicio de energía y mejora la eficiencia de la fragmentación.

Aplicación Práctica: El objetivo del cálculo del factor de energía es optimizar la voladura para maximizar la eficiencia energética, minimizar la sobreexcavación, y reducir los costos operativos. Una voladura bien diseñada asegura que la mayor parte de la energía se utiliza para la fragmentación deseada, con pérdidas mínimas en energía residual.

2.2.4 Fragmentación

Definición

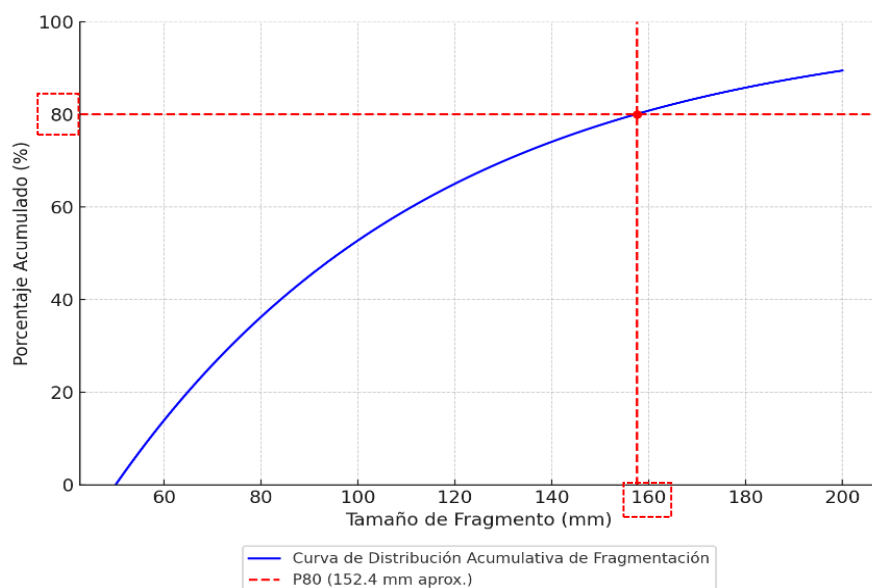
La fragmentación en voladuras de minas subterráneas es el proceso mediante el cual se fractura la roca en fragmentos más pequeños utilizando explosivos. Este proceso es fundamental en las operaciones mineras, ya que impacta significativamente en la eficiencia operativa y en los costos.

2.2.4.1 Parámetro P80

El parámetro P80 es uno de los valores más utilizados para evaluar la eficacia de una voladura, especialmente en lo que respecta a la conminución en minería subterránea. P80 representa el tamaño de malla por el cual pasa el 80% del material fragmentado, lo cual proporciona una referencia sobre el tamaño dominante de los fragmentos tras la voladura (Rodríguez et al., 2020). Este parámetro es fundamental porque afecta directamente las etapas posteriores de procesamiento, como la molienda y el transporte. Un P80 adecuado significa que el material está suficientemente fragmentado para que las etapas de trituración y molienda sean más eficientes (Gómez & Pérez, 2022).

Figura 4

Curva de distribución acumulativa de fragmentación



Según los estándares de fragmentación P80 esperado en la voladura (4 "- 6") en voladuras de roca en Minera Aurífera Retamas, se espera que el tamaño óptimo de los fragmentos sea de 4 a 6 pulgadas: 4 pulgadas para la voladura en mineral y hasta 6 pulgadas para la voladura en desmonte. Esto permite que el 80% de los fragmentos pasantes se mantengan dentro de este rango.

2.2.4.2 Calidad de la Fragmentación

La calidad de la fragmentación se refiere al grado en que el material rocoso se ha dividido en fragmentos de un tamaño óptimo para su manejo y procesamiento. Una buena fragmentación es aquella que reduce al mínimo el tamaño de las partículas sin exceder los límites que puedan afectar o aumentar los costos de transporte y procesamiento (Rodríguez et al., 2020). En la práctica, la calidad de fragmentación depende de factores como el diseño de la voladura, la naturaleza del macizo rocoso y las características del explosivo utilizado. (Gómez & Pérez, 2022).

Una fragmentación fina indica un exceso de carga explosiva y un uso ineficiente de la energía, mientras que una fragmentación gruesa sugiere una posible deficiencia.

Tabla 2

Calidad y estándares de fragmentación en las voladuras

Material	Tamaño (Pulg.)	Categoría
Mineral	< 2"	Fina
	4"	Óptima
	>6"	Gruesa
Desmonte	< 2"	Fina
	6"	Óptima
	>8"	Gruesa

2.2.5 *Clasificación geomecánica del macizo rocoso*

Clasificación geomecánica de Bieniawski

Bieniawski (1989) considera que la geomecánica es un enfoque utilizado en ingeniería geotécnica para evaluar y predecir el análisis de las rocas. Fue desarrollado por el ingeniero polaco Z.T. Bieniawski en la década de 1960. Esta metodología se basa en el estudio geológico de las rocas, así como en la interacción entre las características del terreno y las acciones aplicadas sobre él.

El enfoque de Bieniawski se centra en la clasificación de macizos rocosos mediante sistemas de índices, como la calidad de la Roca (RQD por sus siglas en inglés) y el Índice de Calificación de la Masa de Roca (Q), que permiten estimar la calidad y la estabilidad de los macizos rocosos. Estos sistemas de clasificación ayudan en la selección de métodos de excavación, diseño de soportes y estabilidad de túneles, pilares y otros trabajos subterráneos. Los 5 parámetros son:

- Resistencia de la Roca (R)
- Índice de Calidad de la Roca (RQD)
- Espaciamiento de las Juntas (J)
- Bloques (B)
- Relleno de las Juntas (F)

Figura 5*Parámetros para la clasificación geomecánica RMR 89*

Parámetro			Rango de valores						
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo puntual carga	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	valor		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	<25%		
	valor		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de las discontinuidades		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
	valor		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		Valor	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valor	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Valor	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		valor	6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condiciones Generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	valor		15	10	7	4	0		

Nota: Bieniawski 1989(R.M.R. Rock Mass Rating)

Para emplear la clasificación RMR, se segmenta el macizo rocoso en sectores o segmentos que exhiban atributos geológicos relativamente homogéneos, conforme a las observaciones realizadas en terreno. Durante este proceso, se recopilan datos y medidas acerca de las propiedades y características tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades.

Calificando cada uno de estos factores con un puntaje, se suma la valoración para evaluar la calidad del terreno rocoso (RMR estándar), representada mediante un índice de excelencia llamado RMR (Índice de Evaluación de Masa Rocosa), cuyo rango oscila entre 0 y 100. Luego de evaluar los resultados de los cinco criterios de evaluación, se ajusta el valor considerando la orientación de las discontinuidades, obteniendo así un valor numérico que clasifica la calidad del terreno rocoso. La “Tabla 3” representa la adaptación de la clasificación geomecánica de RMR.

Tabla 3

Clasificación geomecánica del macizo rocoso mediante el RMR de Bieniawski

Tipo de roca	RMR (89)	Clasificación de roca
II - A	71 - 80	Buena "A"
II - B	61 - 70	Buena "B"
III - A	51 - 60	Regular "A"
III - B	41 - 50	Regular "B"
IV - A	31 - 40	Mala "A"
IV - B	21 - 30	Mala "A"
V	< 20	Muy mala

Nota: Extraído del Área de Geomecánica, Minera Aurífera Retamas

CAPÍTULO III:

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

HG1: La aplicación de la voladura controlada permitirá disminuir significativamente la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

3.1.2 Hipótesis Específicas

- HE1 (Descriptiva): Existe una relación directa entre la técnica de voladura controlada aplicada y la cantidad de sobreexcavación generada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.
- HE2 (Explicativa): La calidad del macizo rocoso tiene un impacto significativo en la selección de la técnica de voladura controlada y en la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.
- HE3 (Predictiva): Los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura están relacionados con la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

3.2 Las variables e indicadores

3.2.1 *Variable Independiente*

Voladura controlada

Indicadores importantes:

- P80 (Pulgadas)
- Factor de carga (kg/m^3)
- Factor de potencia (kg/t)
- Factor de avance (kg/m)
- Factor de energía (kcal/t)
- Índice RMR (Rock Mass Rating)

3.2.2 *Variable dependiente*

- Reducción de la sobreexcavación en las labores en la zona Española de la Minera Aurífera Retamas.

Indicadores importantes:

- Volumen de material sobreexcavado (m^3)
- Porcentaje de sobreexcavación (%)

3.3 Operacionalización de variables

Tabla 4
Operacionalización de variables

<i>Variables</i>	<i>Definición Conceptual</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Técnica</i>	<i>Instrumento</i>
<i>Independiente:</i> Voladura Controlada	La voladura controlada es un conjunto de técnicas cuya finalidad es evitar daños al macizo rocoso. obtener superficies óptimas y estables mediante el uso óptimo de la energía del explosivo (Exsa, 2022)	P80 (Pulgadas)	Observación directa	Registros Diarios
		Factor de carga (kg/m ³)	Registro Fotográfico	Cámara Fotográfica
		Factor de potencia (kg/t)		Ficha de observación
		Factor de avance(kg/m)	Muestreo de Fragmentación	
		Factor de energía (kcal/t)	Análisis de Registros de Voladura	Hojas de cálculo (Excel)
		Índice RMR (Rock Mass Rating)		
<i>Dependiente:</i> Reducción de la sobreexcavación	Sobreexcavación es la rotura fuera de los límites de una sección o perfil establecida. Se mide en volumen según el avance del disparo y se compara en porcentaje respecto al volumen ideal a obtener. (Famesa, 2019)	Volumen de material sobre excavado (m3)	Observación directa	Cámara Fotográfica
		Porcentaje de sobreexcavación (%)	Levantamiento Topográfico	Wincha y cordel
			Revisión de Registros de Voladura	Hojas de cálculo (Excel)

CAPÍTULO IV:

MARCO METODOLÓGICO

4.1 Área de pruebas

Para materializar las pruebas, se seleccionó la zona Española de la división Chilcas Bajo, la cual formó parte de la operación minera San Andrés, operada por Minera Aurífera Retamas. Esta área estuvo ubicada en el anexo Llacuabamba, en el distrito de Parcoy, dentro de la provincia de Pataz, en el departamento de La Libertad. Se localizó entre las coordenadas 9 108 500 N y 230 500 E, según la proyección UTM. Minera Aurífera Retamas estuvo situada a una altitud de aproximadamente 3900 m.s.n.m. y formó parte del complejo geológico del Maraón, con su yacimiento denominado “Cerro el Gigante”. Minera Aurífera Retamas S.A. fue una mina subterránea que explotó vetas auríferas (pirita aurífera) con buzamientos promedio de 30°, emplazada en el batolito de Pataz, dentro del yacimiento El Gigante.

4.2 Metodología:

Diseño Experimental: El diseño experimental permitió probar diferentes técnicas de voladura controlada y observar su impacto en la sobre excavación de pruebas de voladura en las labores lineales de la mina, y la medición de la sobreexcavación en cada prueba. La metodología

de trabajo para la aplicación de voladura controlada y reducción de la sobreexcavación se dará en la siguiente secuencia de pasos:

4.2.1. Inspección de la labor, materiales y herramientas

La inspección de la labor se dio a cada inicio de guardia y posterior a la culminación de la limpieza y el sostenimiento mediante formatos preparados para este fin. Se realizó inspecciones visuales validando que todos los materiales requeridos para la aplicación de voladura controlada como las barras, brocas, tuberías seccionadas y herramientas se encuentren ubicados en el perchero de la labor y esten en óptimas condiciones (sin daños o desgastes).

4.2.2. Determinación de la calidad del macizo rocoso y marcado de malla de perforación e inspección visual del macizo rocoso

Posteriormente a la inspección de la labor, se procedió a la revisión de la calidad del macizo rocoso y las recomendaciones geomecánicas. En caso de no contar con la calidad del macizo rocoso actualizada, se estima con base en las cartillas geomecánicas y parámetros del macizo rocoso. Obtenida la calidad del macizo rocoso, se procede al marcado de malla de perforación mediante el uso de Sprays, cordel y flexómetro. Esta malla de perforación, según la calidad del macizo rocoso, contiene el número de taladros, el tipo de arranque, burden, espaciamiento, etc.

4.2.3 Selección de la técnica de voladura controlada, carga explosiva y capacitación del personal de la labor

Posteriormente al marcado de la malla de perforación se coordinó con la supervisión de turno y los colaboradores de la labor la técnica de voladura controlada a emplearse y la cantidad de explosivos y secuencia de salida en la detonación para el disparo específico. Dos labores pueden tener la misma malla de perforación, pero se diferencian en la técnica de voladura controlada a

emplearse, así como la cantidad y tipo de explosivo. Por ejemplo, un macizo rocoso de cuya calidad de roca fue de IV – A, según la cantidad de fracturas y la calidad de roca en el techo de la labor, podría emplearse la técnica de voladura controlada de perforación en línea (Dejar taladros vacíos sin cargar) o la voladura amortiguada con explosivo Emulnor 500 1 1/8" x 24". Parte del éxito de la investigación fue la mejora continua y coordinación constante entre la supervisión y los colaboradores.

4.2.4 Control, capacitación e identificación de oportunidades en la perforación y aplicación de la voladura controlada

Posterior a las actividades anteriores, se dio seguimiento a la correcta perforación de los taladros, el carguío óptimo de los taladros y la aplicación de la técnica de voladura controlada seleccionada anteriormente. Algunas actividades claves para el éxito fueron las siguientes:

- Perforación de los taladros en la malla de perforación contorneada
- Control del paralelismo de la perforación mediante el empleo de guías de aluminio
- Medición continua de las longitudes efectivas de perforación
- Uso del cordón detonante para el carguío de cargas desacopladas y espaciadas
- Aplicación de la técnica de voladura controlada seleccionada
- Evitar el uso adicional o excesivo de carga explosiva que no esté de acuerdo con la distribución de carga explosiva seleccionada.

4.2.5 Toma de datos y evaluación de resultados post voladura

Posteriormente al disparo de la labor, se ingresó en la siguiente guardia y se tomó evidencias fotográficas de la carga para medir la fragmentación, se midió mediante el flexómetro la longitud efectiva de avance. Cuando existía alguna deficiencia en los resultados de la voladura como tacos o fragmentos en los hastiales fueron anotados para analizar la malla de perforación.

4.2.6 *Procesamiento en gabinete, análisis de datos y mejora continua*

Con los datos obtenidos en campo se realizó los trabajos en gabinete mediante el uso de tablas, indicadores y gráficos contruidos usando el programa Excel. El análisis de fragmentación se realizó usando el software Wipfrag 6.1 y el análisis Estadístico mediante el uso del programa IBM SPSS Statistics 23. Toda esta data recopilada permitió obtener información para realizar simulaciones y analizar los nuevos resultados al variar algunos parámetros en la malla de perforación y voladura.

4.3 Equipos, herramientas y materiales utilizados

Los equipos y herramientas utilizados en el presente estudio, desde las pruebas iniciales y la optimización en la reducción de la sobreexcavación fueron los siguientes:

4.3.1 Equipos

- a) Perforadoras neumáticas Jackleg RNP/RN-250X: Este equipo se usó para la perforación de taladros y sus especificaciones son la siguientes:

Consumo de aire: 90 PSI

Frecuencia de impacto: 2200 gpm

Revoluciones: 225 rpm

Torque: 90 lb-pie

Peso: 36.10 kg

Longitud: 711 mm

- b) Cámara fotográfica: Equipo utilizado en la toma de fotos de los resultados de los disparos para la evaluación y seguimiento de la fragmentación resultante.

- c) Laptop portátil Lenovo Legion Y540: Equipo utilizado para el procesamiento y análisis de los resultados disparo a disparo. Permitió el tratamiento, limpieza y presentación de datos e información mediante softwares especializados.

4.3.2 Herramientas

- Flexómetro STANLEY 5m/16'
- Cucharrilla de fierro de 5/16"
- Guiadores de aluminio de 5 pies y Ø 25 mm
- Spray ABRO de 400 ml para el marcado de mallas de perforación
- Caballetes y plataformas de perforación
- Jebes de caucho para la perforación
- Brocas cónicas de 36 mm
- Brocas cónicas de 38 mm
- Barras cónicas de 4 pies
- Barras cónicas de 6 pies
- Barras cónicas de 8 pies
- Brocas rimadora de 64 mm
- Barras piloto de 4 pies
- Barras piloto de 6 pies
- Barras piloto de 8 pies

En la perforación de taladros se utilizó las barras cónicas de 4 y 6 pies con las brocas de 38 mm, mientras la barra cónica de 8 pies se trabaja con la broca de 36 mm. En la perforación de los taladros de alivio (Rimados) se utilizan las brocas rimadoras de 64 mm y las barras piloto. Se inicia

con la barra piloto de 4 pies, posteriormente se perforan con las barras piloto de 6 pies y finalmente con la de 8 pies.

4.3.3 Materiales

- Mecha rápida Z-18
- Carmex
- Cordón detonante 5P
- Fanel LP
- Emulnor 3000 1 1/8" x 16"
- Emulnor 1000 1 1/8" x 16"
- Emulnor 500 1 1/8" x 12"
- Emulnor 500 1" x 24"
- Tubería seccionada de PVC Ø 3/4"
- Tacos de arcilla 1" x 8"
- Útiles de escritorio (Marcadores, lápiz, agenda, etc.)

Posterior la perforación de los taladros, se utilizaron para la voladura materiales explosivos que incluyen accesorios y agentes de voladura. Se describe brevemente la secuencia de carguío e iniciación de los taladros de voladura: Se utilizó como carga explosiva a las emulsiones Emulnor 3000 1 1/8" x 16, Emulnor 1000 1 1/8" x 16 y Emulnor 500 1 1/8" x 12" que son iniciados mediante los faneles de periodo largo LP que cuentan con fulminantes de retardos de diversas numeraciones a los cuales la onda llega mediante el cordón detonante 5P. Para la iniciación del cordón detonante se requiere de una guía armada (Carmex), el cual a su vez se inicia con la mecha rápida Z-18.

En los capítulos V, VI y VII se describen y muestran mediante gráficos, tablas y esquemas la distribución de materiales de voladura en las mallas de perforación por tipo de labor y calidad de roca.

4.4 Diseño de investigación

4.4.1 Tipo de Investigación:

Experimental: Este estudio fue de tipo experimental, ya que buscó manipular la variable independiente (técnica de voladura controlada) para observar su efecto en la variable dependiente (cantidad de sobreexcavación). Se realizaron pruebas controladas para evaluar la efectividad de diferentes técnicas de voladura.

Descriptivo-correlacional: Adicionalmente, fue un estudio descriptivo-correlacional porque se describieron las características de las técnicas de voladura y se estableció la relación entre estas técnicas y la sobreexcavación.

4.4.2 Enfoque:

Cuantitativo: El enfoque fue cuantitativo, ya que se recopilaban datos numéricos y medibles para analizar las relaciones entre las variables. Se aplicaron técnicas estadísticas para evaluar los resultados obtenidos, como el análisis de la relación entre la voladura controlada y la sobreexcavación.

4.5 Población y Muestra

Población de Estudio: La población de estudio estuvo compuesta por todas las labores lineales en la zona Española de la Minera Aurífera Retamas. Estas incluyeron todas las labores donde se pudo aplicar la voladura controlada y evaluar la sobreexcavación, como se muestra en la “Tabla 5”.

Tabla 5*Población de la zona Española*

LABOR	SECCIÓN
GA-8365-S	2.4 m x 2.7 m
XC-8770-SE	2.4 m x 2.7 m
EST 2 (GA-8875-SE (XC)	2.4 m x 2.7 m
GA-8950-AS (XC-8950-S (XC-NE)	2.4 m x 2.7 m
GA-8792-N (EST 1 (GA-8875-SE)	2.4 m x 2.7 m
S/N-3842-S (CHI-8950-12S (XC)	1.2 m x 1.8 m
EST 2 (S/N-3842-S (CHI)	1.2 m x 1.8 m

Muestra Recomendada: La muestra estuvo constituida por un conjunto representativo de labores lineales seleccionadas de la zona Española, que incluyó un número específico de labores con diversas condiciones del macizo rocoso. La selección del tamaño muestral fue no probabilística, utilizando como criterio aquellas labores que permitieran realizar comparaciones entre diferentes técnicas de voladura y condiciones geológicas. Se eligieron dos labores: XC-8770-SE y GA-8365-S. Ver “Tabla 6”.

Tabla 6*Muestra representativa de la zona Española*

LABOR	SECCIÓN
GA-8365-S	2.4 m x 2.7 m
XC-8770-SE	2.4 m x 2.7 m

4.6 Técnicas de Recolección de Datos:

Observación Directa y Mediciones: Se emplearon técnicas de medición directa para cuantificar la sobreexcavación en cada labor después de la voladura. Además, se recopilaron datos, los parámetros de la voladura y la fragmentación. Los instrumentos que se utilizaron incluyeron registros diarios mediante formatos personalizados diseñados

específicamente para este fin, así como evidencias fotográficas para evaluar los resultados de la voladura.

4.7 Análisis Estadístico

Posterior al recojo de los datos, para el procesamiento de la información se utilizaron los programas estadísticos IBM SPSS Statistics 23 y Excel, los cuales permitieron generar tablas, cuadros y gráficos que ayudaron a comprender mejor los hallazgos y responder las preguntas e hipótesis planteadas en el estudio.

Estimación de intervalos de confianza y nivel de significancia:

Un intervalo de confianza definió un rango en el que, con cierto grado de seguridad, se esperó que se encontrara el valor verdadero de un parámetro poblacional, comúnmente con un nivel de confianza del 95% (Triola, 2018). Por su parte, el nivel de significancia, usualmente representado por $\alpha = 0.05$, reflejó la probabilidad de rechazar incorrectamente una hipótesis nula verdadera, lo cual permitió a los investigadores determinar si un resultado fue estadísticamente significativo o producto del azar (Triola, 2018). Ambos conceptos fueron fundamentales para realizar inferencias sobre la población a partir de la muestra.

Validación de la distribución normal de datos usando la prueba de Shapiro-Wilk:

La prueba de Shapiro-Wilk fue una de las más utilizadas para verificar la normalidad, siendo especialmente eficaz para muestras pequeñas y medianas (Triola, 2018). Esta prueba evaluó si los datos diferían significativamente de una distribución normal, generando un valor p que indicó si se podía aceptar la hipótesis de normalidad. Si el valor p fue menor al nivel de significancia común de 0.05, se rechazó la hipótesis nula de normalidad, lo cual sugirió que los datos no presentaban una distribución normal (Triola, 2018).

Validación de la distribución normal de datos usando la prueba de Shapiro-Wilk:

La prueba t de Student fue una técnica estadística clave para validar o rechazar hipótesis dentro de la investigación, especialmente útil cuando se compararon medias en estudios con muestras pequeñas y la desviación estándar de la población fue desconocida (Triola, 2018). En esta investigación, la prueba permitió evaluar si las diferencias entre grupos fueron estadísticamente significativas o si pudieron deberse al azar. Así, la prueba t se convirtió en una herramienta fundamental para sustentar o rechazar hipótesis mediante la comparación de medias.

CAPÍTULO V:

RESULTADOS DE LA VOLADURA CONVENCIONAL

5.1. Características del macizo rocoso

La roca predominante en el sector La Española correspondió a rocas ígneas intrusivas tonalitas, granodioritas y diorita de textura fanerítica, con abundante contenido de minerales máficos (micas y anfíboles) que presentaron un grado medio de alteración por humedad. Las plagioclasas (feldespatos Ca/Na) mostraron blanqueamiento, disolución y destrucción progresiva, con formación de venillas de arcilla en microfracturas y diaclasas, lo que redujo la calidad y competencia del macizo rocoso. Según la clasificación RMR de Bieniawski, se caracterizó como roca tipo III-B a IV-A, con un rango de 31 a 50, correspondiente a roca regular “B” a mala “A”. La “Tabla 7” presenta los resultados de los ensayos realizados en la zona de estudio.

Tabla 7

Análisis de roca intacta a resistencia a la compresión simple

ANALISIS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE

NORMA ASTM D2938

<i>MUESTRA</i>	<i>DIAMETROS (CM)</i>	<i>ALTURA (CM)</i>	<i>CARGA (KN)</i>	<i>RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE (Kg/Cm2)</i>	<i>RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE (Mpa)</i>
<i>DIORITA</i>	<i>6.29</i>	<i>12.03</i>	<i>293.3</i>	<i>653.79</i>	64.07
<i>DIORITA ALTERA₁</i>	<i>6.33</i>	<i>11.68</i>	<i>202.7</i>	<i>651.41</i>	63.84
<i>GRANITO</i>	<i>6.32</i>	<i>11.78</i>	<i>332.2</i>	<i>1072.74</i>	<i>105.13</i>
<i>TONALITAS</i>	<i>6.33</i>	<i>11.98</i>	<i>120.9</i>	<i>390.49</i>	38.27

5.1.1. *Parámetros de perforación y voladura convencional en el crucero XC- 8770-SE*

La perforación en el crucero XC-8770-SE se realizó con equipo Jackleg RP 500, siguiendo mallas establecidas en el ciclo de perforación y voladura. No obstante, estas presentaron deficiencias en su diseño y ejecución. Los parámetros se muestran en la “Tabla 8”.

Tabla 8

Parámetros de perforación y voladura convencional en el crucero XC-8770-SE

Parámetros	Unidad	Descripción
Tipo de roca	-	Granito
Clase de roca	-	III-B
Densidad roca	ton/m3	2.7
Equipo de perforación	-	Jackleg RNP/RN-250X
Tipo de corte	-	Corte cilíndrico Hexagonal
Tamaño de barra	m	2.40
Eficiencia en la perforación	%	95
Perforación efectiva promedio	m	2.28
Eficiencia en la voladura	%	91
Avance promedio real	m	2.08
Taladros rimados	cant.	0

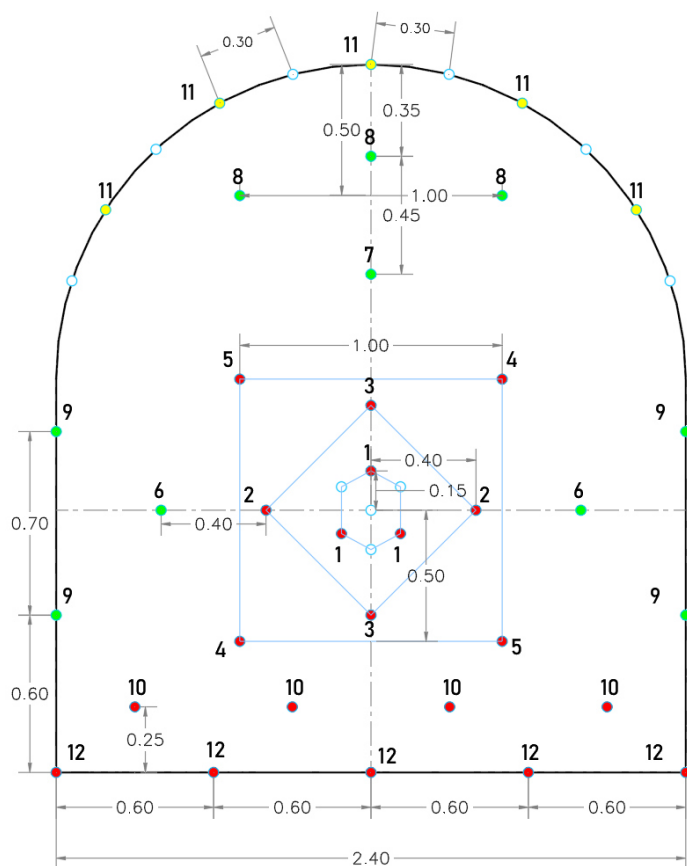
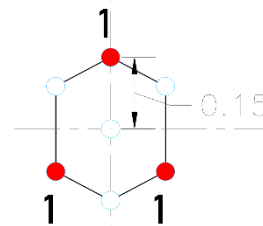
Los accesorios de voladura utilizados se presentan en la “Tabla 9”

Tabla 9

Explosivos y accesorios de voladura utilizados en el crucero XC-8770-SE en la voladura convencional

Parámetros	Unidad	Descripción
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	cartuchos	91
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	cartuchos	41
Emulnor 500 1 1/8" x 12"	cartuchos	15
Cordón detonante	m	10
Carmex	piezas	2
Faneles LP	piezas	35
Tacos de arcilla	cant.	0

La “Figura 6” muestra gráficamente la malla de perforación y voladura convencional utilizada en el crucero XC-8770-SE para secciones de 2.4 m x 2.7 m

Figura 6*Malla de perforación y voladura convencional del crucero XC-8770-SE***DETALLE DE LA CARGA EXPLOSIVA****Arranque****Primera Ayuda****Segunda Ayuda****Hastiales y Ayuda de Hastial****Arrastre y Ayuda de arrastre****Ayuda de corona****Corona****DETALLES DEL ARRANQUE****DISTRIBUCIÓN DE CARGA EXPLOSIVA**

TALADROS		Emulnor 3000 1 1/8" x 16	Emulnor 1000 1 1/8" x 16	Emulnor 500 1" x 12
Arranque	3	15		
1ª Ayuda	4	20		
2ª Ayuda	4	16		
Ayuda de Hastial	2		8	
Hastiales	4		16	
Ayuda de corona	4	4	12	
Corona	5		5	15
Ayuda de arrastre	4	16		
Arrastre	5	20		
Total	35	91	41	15

PERFORACIÓN

Taladros de alivio	8 und.
Taladros rimados	0 und.
Diámetro de broca	36 mm
Diámetro de rimadora	64 mm

VOLADURA

Total Explosivo	40.54 kg
Cordón detonante 5 p	10.00 m
Mecha rápida	1.00 m
Fanel ensamblado 9'	35 und.
Tacos de Arcilla	0 und.

RESULTADOS

Avance	2.08 m
Volumen	12.49 m3
Tonelaje	34 t
Eficiencia de avance	86.5%
Factor de carga	3.25 kg/m3
Factor de potencia	1.20 kg/t
Factor de avance	19.50 kg/ml

En la “Figura 6” se muestra el tipo de arranque, la cantidad de taladros en el arranque, Burden, Espaciamiento y otros parámetros importantes resumidos en las “Tabla 8” y “Tabla 9”.

Figura 7

Resultados de la voladura convencional en el crucero XC-8770-SE



Como se observó en la “Figura 7”, los resultados de fragmentación en el crucero XC-8770-SE muestran una granulometría excesivamente fina, con un 55% de los fragmentos en el rango < 0.5 pulgadas, un 23% en el rango < 1 pulgada y un 11% en el rango < 2 pulgadas. La fragmentación restante se encuentra en un rango de 3 a 5 pulgadas, representando el 11% del volumen total. Además, en el crucero XC-8770-SE, la voladura realizada alcanzó un porcentaje promedio de sobreexcavación del 24.88%. Se adjuntan los resultados de los 30 disparos durante el 2023. Ver “Tabla 10” y “Tabla 11”.

Tabla 10*Resultados de voladura convencional en el crucero XC-8770-SE*

N° Disparo	Ancho Nominal	Altura Nominal	Volumen Nominal	Ancho Real	Altura Real	Avance	Volumen Real	Sobreexcavación
	(m)	(m)	(m3)	(m)	(m)	(m)	(m3)	(%)
1	2.40	2.70	12.49	2.78	2.85	2.08	15.30	22.52%
2	2.40	2.70	12.49	2.80	2.90	2.10	15.83	26.78%
3	2.40	2.70	12.49	2.89	2.92	2.06	16.14	29.25%
4	2.40	2.70	12.49	2.75	2.85	2.09	15.21	21.78%
5	2.40	2.70	12.49	2.82	2.86	2.08	15.58	24.72%
6	2.40	2.70	12.49	2.89	2.92	2.05	16.06	28.62%
7	2.40	2.70	12.49	2.84	2.80	2.09	15.43	23.56%
8	2.40	2.70	12.49	2.77	2.89	2.12	15.76	26.18%
9	2.40	2.70	12.49	2.84	2.91	2.10	16.11	29.03%
10	2.40	2.70	12.49	2.79	2.87	2.05	15.24	22.04%
11	2.40	2.70	12.49	2.78	2.85	2.08	15.30	22.52%
12	2.40	2.70	12.49	2.80	2.90	2.06	15.53	24.36%
13	2.40	2.70	12.49	2.85	2.89	2.09	15.98	27.98%
14	2.40	2.70	12.49	2.77	2.85	2.05	15.03	20.32%
15	2.40	2.70	12.49	2.82	2.85	2.08	15.52	24.29%
16	2.40	2.70	12.49	2.88	2.92	2.05	16.01	28.17%
17	2.40	2.70	12.49	2.84	2.80	2.06	15.21	21.79%
18	2.40	2.70	12.49	2.77	2.88	2.08	15.41	23.37%
19	2.40	2.70	12.49	2.85	2.85	2.05	15.46	23.80%
20	2.40	2.70	12.49	2.80	2.87	2.04	15.22	21.88%
21	2.40	2.70	12.49	2.76	2.85	2.08	15.19	21.64%
22	2.40	2.70	12.49	2.81	2.90	2.08	15.74	26.02%
23	2.40	2.70	12.49	2.87	2.92	2.05	15.95	27.73%
24	2.40	2.70	12.49	2.76	2.85	2.08	15.19	21.64%
25	2.40	2.70	12.49	2.81	2.85	2.05	15.24	22.06%
26	2.40	2.70	12.49	2.89	2.92	2.09	16.38	31.13%
27	2.40	2.70	12.49	2.84	2.89	2.08	15.85	26.92%
28	2.40	2.70	12.49	2.77	2.91	2.10	15.72	25.85%
29	2.40	2.70	12.49	2.81	2.85	2.08	15.47	23.85%
30	2.40	2.70	12.49	2.79	2.88	2.12	15.82	26.65%
Promedio	2.40	2.70	12.49	2.81	2.88	2.08	15.60	24.88%

Tabla 11

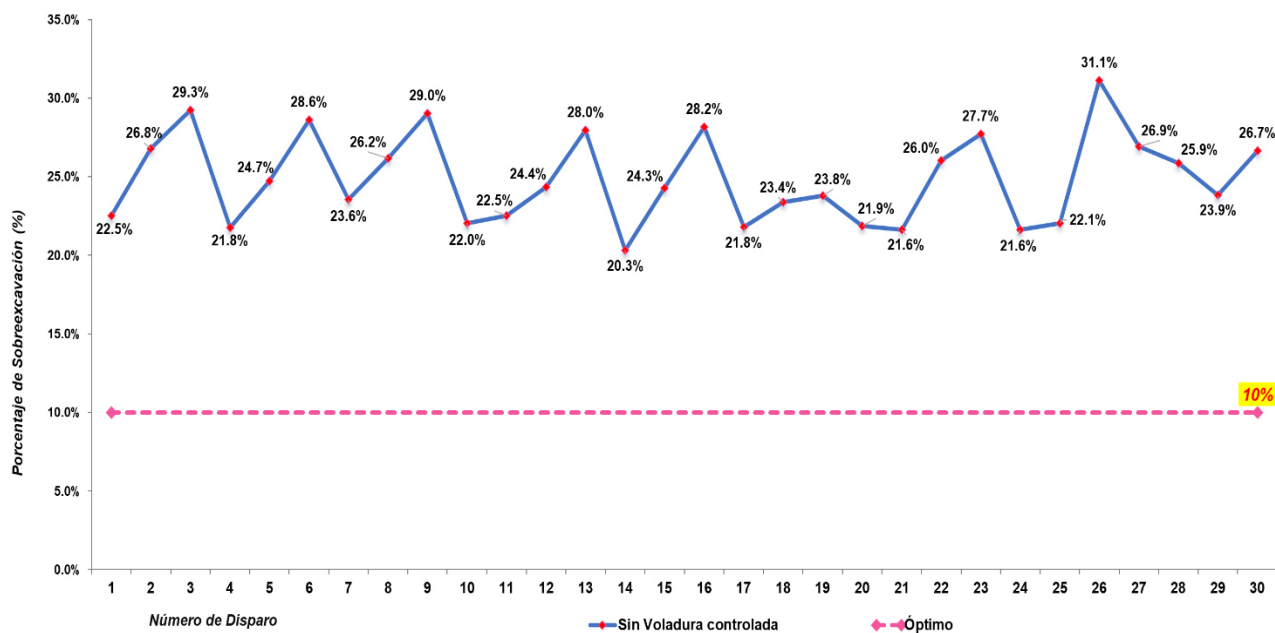
Distribución porcentual de la fragmentación en el crucero XC-8770-SE con voladura convencional

N° Disparo	TAMAÑO DE FRAGMENTOS (Pulg.)						Volumen Total
	0.50	1	2	3	4	5	(m3)
1	50%	25%	10%	8%	4%	3%	15.30
2	55%	20%	12%	6%	5%	2%	15.83
3	50%	25%	15%	7%	2%	1%	16.14
4	60%	20%	10%	4%	3%	3%	15.21
5	50%	30%	12%	2%	2%	1%	15.58
6	55%	20%	12%	5%	4%	4%	16.06
7	60%	20%	10%	4%	3%	3%	15.43
8	50%	30%	10%	4%	4%	2%	15.76
9	60%	20%	10%	7%	2%	1%	16.11
10	50%	30%	10%	5%	2%	3%	15.24
11	55%	20%	10%	6%	5%	4%	15.30
12	60%	20%	10%	5%	3%	2%	15.53
13	50%	25%	15%	5%	3%	2%	15.98
14	60%	20%	10%	4%	3%	3%	15.03
15	60%	20%	10%	7%	2%	1%	15.52
16	55%	20%	10%	7%	5%	3%	16.01
17	50%	30%	10%	6%	3%	1%	15.21
18	55%	20%	10%	7%	5%	3%	15.41
19	60%	20%	10%	5%	3%	2%	15.46
20	60%	20%	10%	5%	3%	2%	15.22
21	55%	20%	10%	10%	4%	1%	15.19
22	60%	20%	10%	5%	3%	2%	15.74
23	55%	25%	10%	6%	3%	1%	15.95
24	55%	20%	10%	6%	5%	4%	15.19
25	50%	25%	12%	7%	4%	2%	15.24
26	60%	20%	10%	3%	3%	4%	16.38
27	50%	30%	12%	5%	2%	1%	15.85
28	55%	20%	10%	7%	5%	3%	15.72
29	50%	25%	15%	6%	2%	2%	15.47
30	60%	20%	10%	5%	3%	2%	15.82
Promedio	55%	23%	11%	6%	3%	2%	15.60

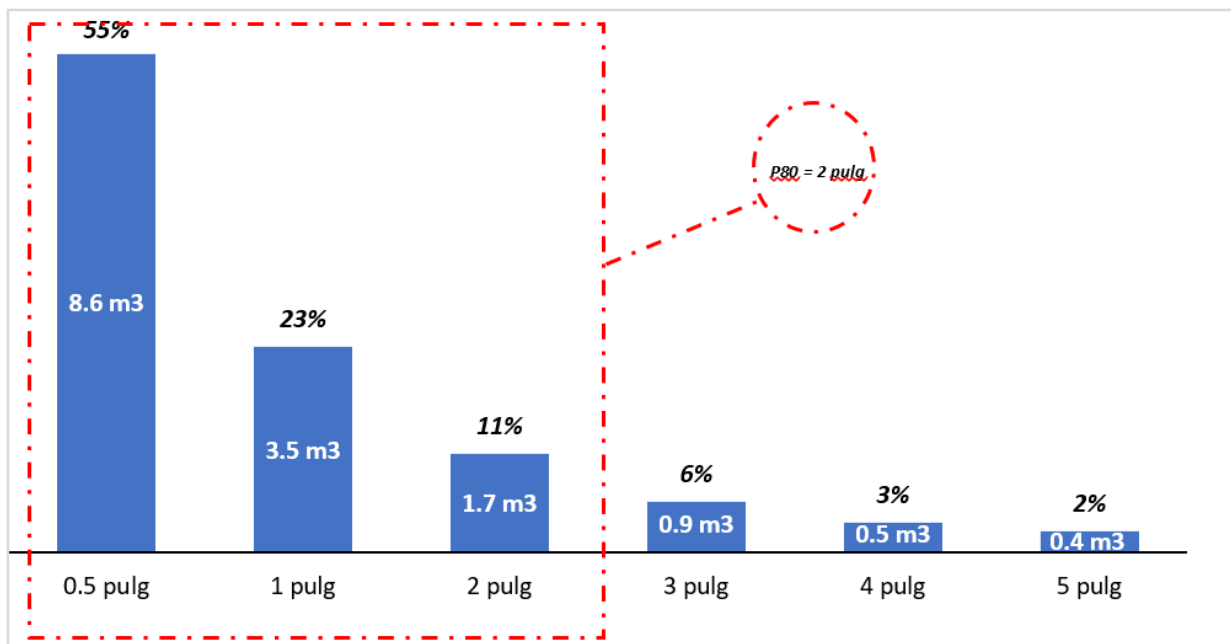
Se adjuntan los gráficos de los 30 disparos realizados, en los cuales se muestra la variación porcentual de la sobreexcavación y la fragmentación (en pulgadas), expresada en volumen, metros cúbicos por cada disparo. Ver “Figura 8” y “Figura 9”.

Figura 8

Resultados de sobreexcavación en la voladura convencional del crucero XC-8770-SE

**Figura 9**

Resultados de fragmentación promedio por disparo de la voladura convencional en el crucero XC-8770-SE



5.1.2. Parámetros de control de voladura convencional en el crucero XC-8770-SE

La cantidad promedio de explosivo utilizado por disparo se detalla en la malla de perforación y voladura presentada en la “Figura 6”.

Se muestra a continuación los parámetros de control de voladura

Factor de carga (Fc):

$$Fc = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{m^3 \text{ de roca}}$$

La cantidad promedio de explosivo por voladura (kg)= 40.54

Volumen de roca promedio por disparo (m3) = 12.49

$$Fc \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{40.54}{12.49} = 3.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Factor de potencia (Fp):

$$Fp = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{tonelaje de roca}}$$

Tonelaje promedio de roca por disparo (t)= 12.49 m3 x 2.70 t/ m3 = 34

$$Fp \text{ (kg/t)} = \frac{40.54}{34} = 1.20 \frac{\text{kg}}{\text{t}}$$

Factor de avance (Fa):

$$Fa = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{promedio de avance (m)}}$$

Avance promedio por disparo (m) = 2.08

$$Fa \text{ (kg/m)} = \frac{40.54}{2.08} = 19.50 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Factor de energía (Fe)

Se consideraron los datos técnicos de las emulsiones empleadas en la voladura del XC-8770-SE. De la “Figura 6” se tiene la malla de perforación y la distribución de carga lineal.

Tabla 12*Factor de energía empleado en el crucero XC-8770 – SE con la voladura convencional*

Emulsiones	Densidad relativa (g/cm3)	Energía (kcal/kg)	Unidades	Peso (Kg/Unid)	Peso total (Kg)	Energía (Kcal)	Tonelaje (t)	Factor de energía (kcal/tn)
Emulnor 500 1 1/8" x 12'	0.9	628	15	0.162	2.43	1,529		
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	1.13	785	41	0.284	11.65	9,144	34	1,043
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	1.14	920	91	0.296	26.95	24,789		

5.1.3. Parámetros de perforación y voladura convencional en la galería GA-8365-S

La perforación en la galería GA-8365-S se realizó con perforadoras neumáticas Jackleg RP 500, siguiendo mallas establecidas en el ciclo de perforación y voladura, las cuales presentaban deficiencias. Los parámetros de perforación y voladura se detallan en la “Tabla 13”.

Tabla 13*Parámetros de perforación y voladura convencional en la galería GA-8365-S*

Parámetros	Unidad	Descripción
Tipo de roca	-	Granodiorita
Clase de roca	-	IV-A
Densidad roca	ton/m3	2.70
Equipo de perforación	-	Jackleg RNP/RN-250X
Tipo de corte	-	Corte en V
Tamaño de barra	m	2.40
Eficiencia en la perforación	%	93
Perforación efectiva promedio	m	2.23
Eficiencia en la voladura	%	93
Avance promedio real	m	2.06
Taladros cargados	cant.	33
Taladros de alivio arranque	cant.	3
Taladros de alivio corona	cant.	6
Taladros rimados	cant.	0

Tabla 14*Explosivos y Accesorios de voladura utilizados en la galería GA-8365-S durante la voladura convencional*

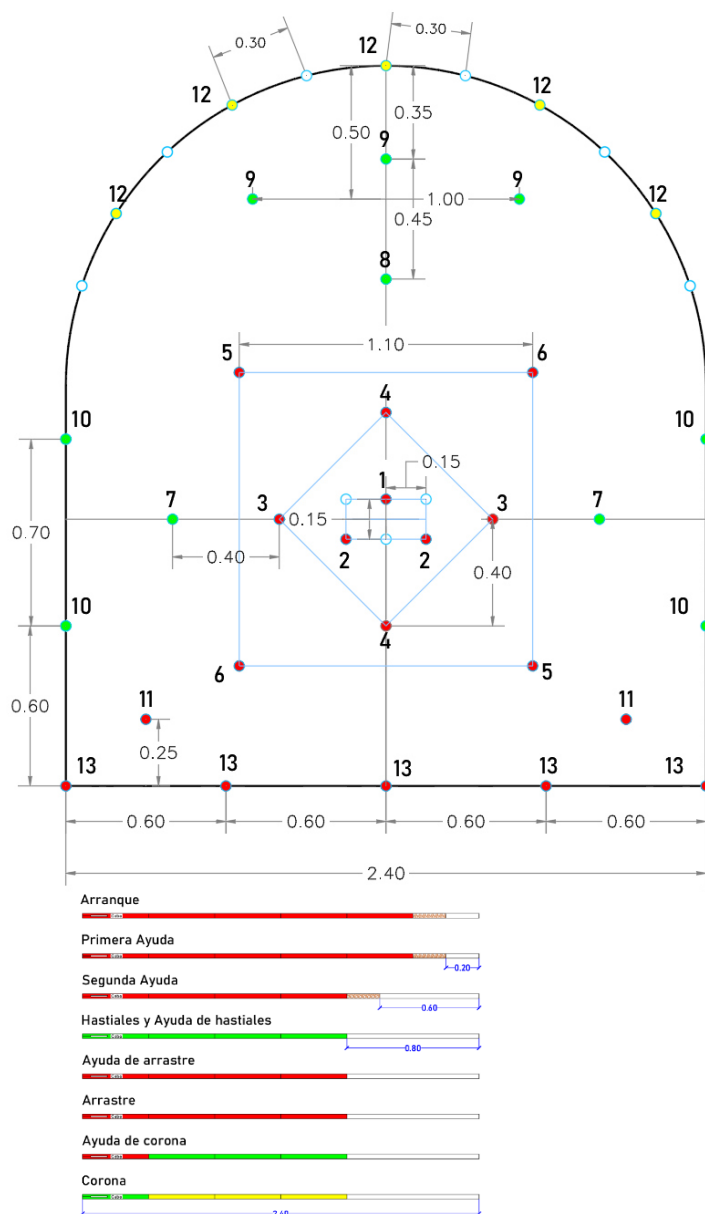
Parámetros	Unidad	Cantidad
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	cartuchos	79
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	cartuchos	45

Emulnor 500 1 1/8" x 12"	cartuchos	15
Cordón detonante (m)	m	10
Carmex	piezas	2
Faneles LP	piezas	33
Tacos de arcilla	cant.	0

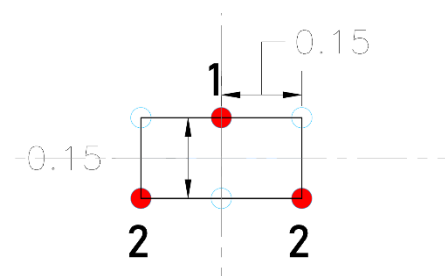
La “Figura 10” presenta la malla de perforación y voladura aplicada usada en la galería GA-8365-S para secciones de 2.4 m x 2.7 m con la voladura convencional antes de ser optimizada. La figura muestra el tipo de arranque, la cantidad de taladros en el arranque, Burden, Espaciamiento y otros parámetros importantes resumidos en las “Tabla 13” y “Tabla 14”

Figura 10

Malla de perforación y voladura convencional de la galería GA-8365-S



DETALLES DEL ARRANQUE



DISTRIBUCIÓN DE CARGA EXPLOSIVA

TALADROS		Emulnor 3000 1 1/8" x 16	Emulnor 1000 1 1/8" x 16	Emulnor 500 1" x 12
Arranque	3	15		
1° Ayuda	4	20		
2° Ayuda	4	16		
Ayuda de Hastial	2		8	
Hastiales	4		16	
Ayuda de corona	4		16	
Corona	5		5	15
Ayuda de arrastre	2	8		
Arrastre	5	20		
Total	33	79	45	15

DETALLE DE LA CARGA EXPLOSIVA

PERFORACIÓN	
Taladros de alivio	7 und.
Taladros rimados	0 und.
Diámetro de broca	36 mm
Diámetro de rimadora	64 mm

VOLADURA	
Total Explosivo	38.18 kg
Cordón detonante 5 p	10.00 m
Mecha rápida	1.00 m
Fanel ensamblado 9'	33 und.
Tacos de Arcilla	11 und.

Figura 11

Resultados de la voladura convencional en la galería GA-8365-S



Los resultados de fragmentación muy menuda por la excesiva carga explosiva en la galería GA-8365-S indican una granulometría excesivamente fina, con un 74 % de los fragmentos en el rango de < 0.5 pulg., un 11 % en el rango promedio de 1 pulg., y un 6 % en el rango de < 2 pulg. Los fragmentos restantes se encuentran en el rango de 3 a 5 pulg., representando el 9 % del volumen total.

En la galería GA-8365-S la voladura realizada alcanzó un porcentaje de sobreexcavación promedio debido a excesiva carga explosiva de 37.17%. Se adjunta los resultados de los 30 disparos durante el 2023. Ver “Tabla 15” y “Tabla 16”.

Tabla 15*Resultados de voladura convencional en la galería GA-8365-S*

N° Disparo	Ancho Nominal (m)	Altura Nominal (m)	Volumen Nominal (m3)	Ancho Real (m)	Altura Real (m)	Avance (m)	Volumen Real (m3)	Sobreexcavación (%)
1	2.40	2.70	12.40	2.98	3.09	2.08	17.78	43.39%
2	2.40	2.70	12.40	2.90	3.10	2.05	17.11	37.97%
3	2.40	2.70	12.40	2.89	3.05	2.04	16.70	34.62%
4	2.40	2.70	12.40	2.85	2.98	2.08	16.40	32.25%
5	2.40	2.70	12.40	2.88	3.00	2.05	16.44	32.60%
6	2.40	2.70	12.40	2.92	3.04	2.04	16.81	35.57%
7	2.40	2.70	12.40	2.95	3.05	2.08	17.38	40.11%
8	2.40	2.70	12.40	2.89	3.08	2.05	16.94	36.61%
9	2.40	2.70	12.40	2.89	3.08	2.10	17.36	39.94%
10	2.40	2.70	12.40	3.00	3.12	2.05	17.82	43.65%
11	2.40	2.70	12.40	2.98	3.15	2.04	17.78	43.36%
12	2.40	2.70	12.40	2.90	3.00	2.08	16.80	35.48%
13	2.40	2.70	12.40	2.88	3.02	2.08	16.80	35.44%
14	2.40	2.70	12.40	2.86	2.98	2.05	16.22	30.80%
15	2.40	2.70	12.40	2.85	3.05	2.08	16.79	35.36%
16	2.40	2.70	12.40	2.98	3.04	2.05	17.24	39.03%
17	2.40	2.70	12.40	2.96	3.10	2.04	17.38	40.14%
18	2.40	2.70	12.40	3.00	3.05	2.08	17.67	42.48%
19	2.40	2.70	12.40	3.00	3.11	2.05	17.76	43.19%
20	2.40	2.70	12.40	2.88	3.05	2.04	16.64	34.15%
21	2.40	2.70	12.40	2.89	2.98	2.08	16.63	34.11%
22	2.40	2.70	12.40	2.87	3.00	2.08	16.63	34.07%
23	2.40	2.70	12.40	2.90	3.04	2.05	16.78	35.30%
24	2.40	2.70	12.40	2.87	3.05	2.08	16.90	36.31%
25	2.40	2.70	12.40	2.88	3.10	2.05	16.99	37.02%
26	2.40	2.70	12.40	2.85	3.07	2.04	16.57	33.63%
27	2.40	2.70	12.40	2.90	3.04	2.08	17.03	37.28%
28	2.40	2.70	12.40	2.96	3.00	2.05	16.90	36.28%
29	2.40	2.70	12.40	2.89	2.98	2.04	16.31	31.53%
30	2.40	2.70	12.40	2.97	3.10	2.08	17.78	43.37%
Promedio	2.40	2.70	12.40	2.91	3.05	2.06	17.01	37.17%

Tabla 16

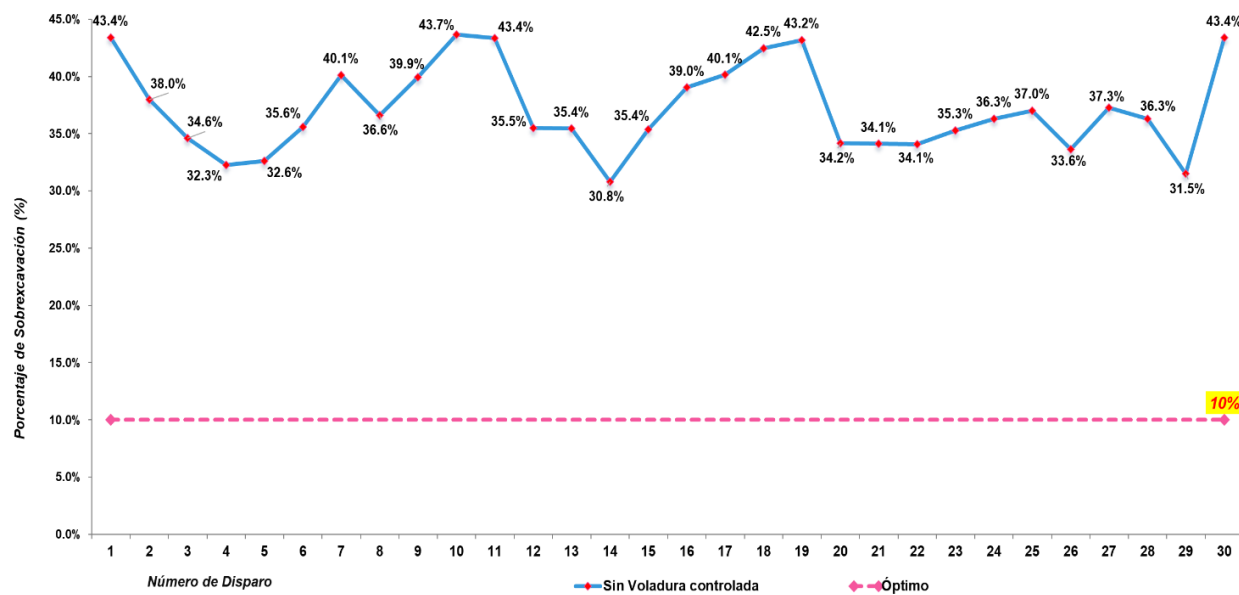
Distribución porcentual de la fragmentación en la galería GA-8365-S con la voladura convencional

N° Disparo	TAMAÑO DE FRAGMENTOS						Volumen
	0.50	1	2	3	4	5	Total (m3)
1	70%	10%	9%	6%	3%	2%	17.78
2	80%	10%	4%	3%	2%	1%	17.11
3	75%	12%	6%	3%	2%	2%	16.70
4	75%	10%	7%	4%	3%	1%	16.40
5	72%	13%	6%	5%	2%	2%	16.44
6	72%	12%	6%	4%	3%	3%	16.81
7	72%	10%	7%	5%	4%	2%	17.38
8	75%	10%	8%	3%	2%	2%	16.94
9	80%	10%	4%	3%	2%	1%	17.36
10	80%	10%	4%	3%	2%	1%	17.82
11	75%	10%	8%	3%	2%	2%	17.78
12	80%	10%	4%	3%	2%	1%	16.80
13	74%	12%	5%	4%	3%	2%	16.80
14	70%	14%	6%	4%	3%	3%	16.22
15	75%	10%	5%	5%	3%	2%	16.79
16	80%	10%	4%	3%	2%	1%	17.24
17	75%	15%	4%	3%	2%	1%	17.38
18	70%	10%	10%	5%	3%	2%	17.67
19	70%	14%	6%	4%	3%	3%	17.76
20	75%	10%	7%	5%	2%	1%	16.64
21	70%	15%	8%	3%	2%	2%	16.63
22	80%	10%	4%	3%	2%	1%	16.63
23	76%	10%	5%	4%	3%	2%	16.78
24	70%	10%	10%	5%	3%	2%	16.90
25	80%	10%	4%	3%	2%	1%	16.99
26	70%	15%	6%	4%	3%	2%	16.57
27	70%	14%	6%	4%	3%	3%	17.03
28	80%	10%	4%	3%	2%	1%	16.90
29	70%	10%	10%	5%	3%	2%	16.31
30	70%	14%	6%	4%	3%	3%	17.78
Promedio	74%	11%	6%	4%	3%	2%	17.01

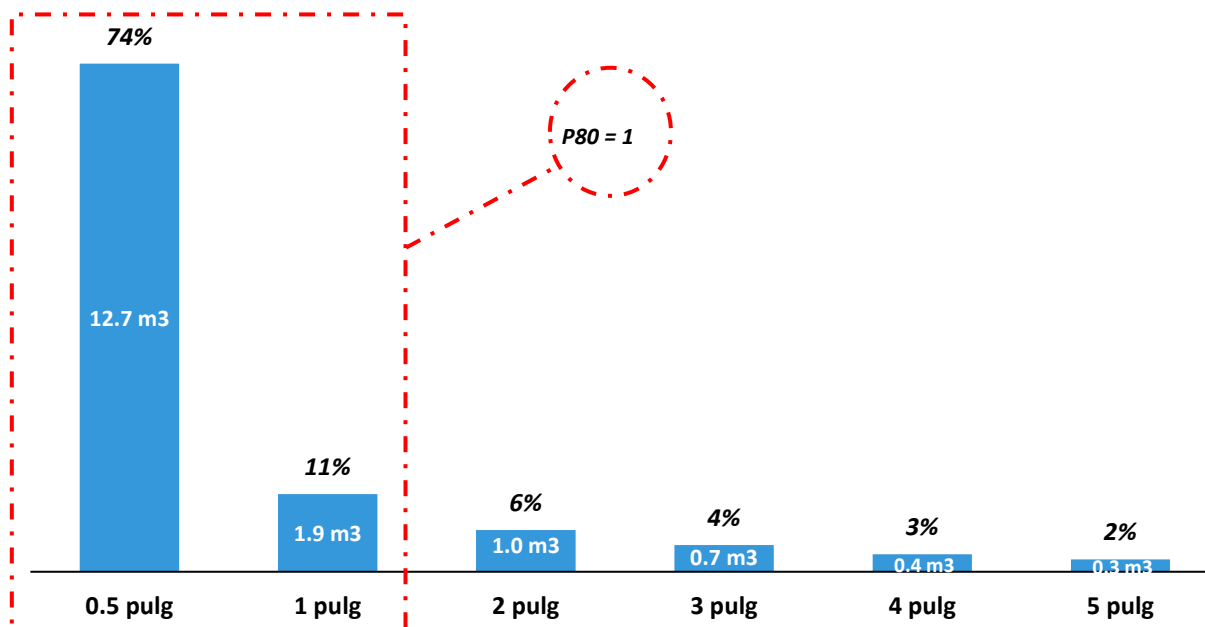
Se adjuntan los gráficos correspondientes a los 30 disparos realizados, en los cuales se muestra la variación de la sobreexcavación (%) y la diferencia granulométrica (Pulg.) expresado en volumen en metros cúbicos por cada disparo. Ver “Figura 12” y “Figura 13”.

Figura 12

Resultados de sobreexcavación en la voladura convencional de la galería GA-8365-S

**Figura 13**

Resultados de fragmentación promedio por disparo en la galería GA-8365-S con voladura convencional



5.1.2.1 Parámetros de control de voladura convencional en la galería GA-8365-S

El detalle de la cantidad promedio de explosivo empleado se muestran en la malla de perforación y voladura de la “Figura 10”.

Se muestra a continuación, los parámetros de control de voladura:

Factor de carga (Fc):

$$Fc = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{m^3 \text{ de roca}}$$

La cantidad promedio de explosivo por voladura (kg)= 38.18

Volumen de roca promedio por disparo (m³) = 12.40

$$Fc \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{38.18}{12.40} = 3.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Factor de potencia (Fp):

$$Fp = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{tonelaje de roca}}$$

Tonelaje promedio de roca por disparo (t)= 12.40 m³ x 2.70 t/ m³ = 34

$$Fp \text{ (kg/t)} = \frac{38.18}{34} = 1.12 \frac{\text{kg}}{\text{t}}$$

Factor de avance (Fa):

$$Fa = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{promedio de avance (m)}}$$

Avance promedio por disparo (m) = 2.06

$$Fa \text{ (kg/m)} = \frac{38.18}{2.06} = 18.53 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Factor de energía (Fe):

Para la estimación del factor de energía se han considerado los datos técnicos de las emulsiones utilizadas en la voladura de la GA-8365-S. En la “Figura 10” se presenta la malla de perforación y la distribución de carga lineal.

Tabla 17

Factor de energía empleado en la galería GA-8365-S con la voladura convencional

Emulsiones	Densidad relativa (g/cm ³)	Energía (kcal/kg)	Unidades	Peso (Kg/Unid)	Peso total (Kg)	Energía (Kcal)	Tonelaje (t)	Factor de energía (kcal/tn)
Emulnor 500 1 1/8" x 12"	0.9	628	15	0.162	2.43	1,529		
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	1.13	785	45	0.284	12.78	10,036	34	973
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	1.14	920	79	0.296	23.39	21,521		

CAPÍTULO VI:

RESULTADOS APLICANDO VOLADURA CONTROLADA

6.1 Resultados aplicando voladura controlada

6.1.1 Selección de las técnicas de voladura controlada

Según la calidad del macizo rocoso se seleccionó las técnicas de voladura controlada de recorte (Contour Blasting) y voladura amortiguada (Cushion Blasting). Adicionalmente, se implementó el rimado de taladros del arranque como taladros de alivio, se estandarizó el uso de tacos de arcilla, control de la carga explosiva y se optimizó la distribución de la numeración de faneles de período largo.

6.1.2 Parámetros de perforación y voladura controlada en el crucero XC-8770-SE

6.1.2.1 Perforación

La malla de perforación se optimizó según la calidad del macizo rocoso, con un rango de 41 a 50, y las propiedades de los explosivos utilizados. Se emplearon guidores de barras de aluminio para controlar el paralelismo de los taladros y brocas escariadoras de 64 mm para rimar los taladros de alivio del arranque. Los parámetros de perforación y voladura se presentan en la “Tabla 18”.

Tabla 18*Parámetros de perforación y voladura aplicando voladura controlada en el crucero XC-8770-SE*

Parámetros	Unidad	Descripción
Tipo de roca	-	Granito
Clase de roca	-	III-B
Densidad roca	ton/m ³	2.7
Equipo de perforación	-	Jackleg RNP/RN-250X
Tipo de corte	-	Corte cilíndrico Hexagonal
Tamaño de barra	m	2.40
Eficiencia en la perforación	%	95
Perforación efectiva promedio	m	2.28
Eficiencia en la voladura	%	95
Avance promedio Real	m	2.17
Taladros cargados	cant.	32
Taladros de alivio arranque	cant.	4
Taladros de alivio corona	cant.	6
Taladros rimados	cant.	4

6.1.2.2 Voladura

Se implementaron mejoras en el carguío de explosivos para la voladura. Se cambió la distribución de las emulsiones en las mallas de voladura por sectores: En el arranque, se redujo de 5 a 4 cartuchos por taladro de Emulnor 3000 1 1/8" x 16"; en las ayudas de arranque, se reemplazó Emulnor 3000 1 1/8" x 16" por Emulnor 1000 1 1/8" x 16". En los hastiales y ayudas de hastiales, se mantuvo el cebo con Emulnor 1000 1 1/8" x 16", mientras que la carga cambió de Emulnor 1000 1 1/8" x 16" a carga desacoplada de Emulnor 500 1" x 24". En el arrastre o zapateras y ayuda de zapateras, se utilizó Emulnor 3000 1 1/8" x 16" solo como cebo, y Emulnor 1000 1 1/8" x 16" como carga explosiva. En la corona, el cebo de Emulnor 1000 1 1/8" x 16" y la carga de Emulnor 500 de 1 1/8" x 12", se reemplazó a una carga desacoplada de Emulnor 500 1" x 24".

Se estandarizó el uso de tacos de arcilla de 1" x 20" en los taladros con carga explosiva y uso del cordón detonante para la implementación y carguío de voladura amortiguada con cargas desacopladas. Los accesorios de voladura utilizados se presentan en la "Tabla 19".

Tabla 19

Explosivos y accesorios de voladura aplicando voladura controlada en el crucero XC-8770-SE

Parámetros	Unidad	Cantidad
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	cartuchos	27
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	cartuchos	54
Emulnor 500 1 1/8" x 24"	cartuchos	33
Cordón detonante	m	25
Carmex	piezas	2
Faneles LP	piezas	32
Tacos de arcilla	cant.	32

Se realizó una optimización en la distribución de la numeración de los faneles. La “Tabla 20” muestra el resumen de la distribución de numeración de faneles en cada taladro.

Tabla 20

Distribución de faneles de periodo largo en los taladros del crucero XC-8770-SE

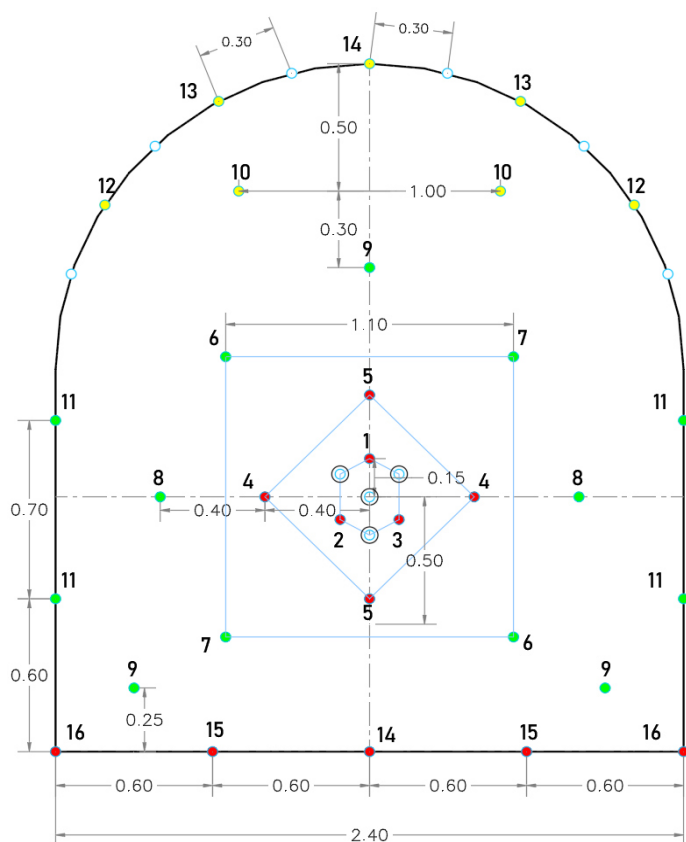
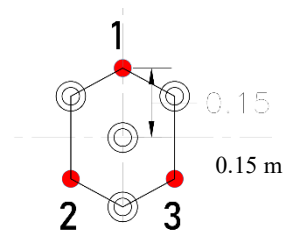
Taladros	Voladura Controlada (No LP)				
Arranque	1	2	3	---	---
1° Ayuda	4	4	5	5	---
2° Ayuda	6	6	7	7	---
Ayuda Hastiales	8	8	---	---	---
Ayuda de Corona	9	10	----	10	---
Hastiales	11	11	11	11	---
Ayuda de Arrastre	9	----	----	9	---
Corona	12	12	13	13	14
Arrastre	14	15	15	16	16

Como muestra la “Tabla 20” se redistribuyó la numeración de los faneles en la malla de perforación por sectores aumentando la numeración de los Faneles LP hasta número 16, lo cual permitió optimizar la secuencia de salida en la detonación y disminuir la carga operante.

La “Figura 14” muestra la malla de perforación y voladura utilizada en el crucero XC-8770-SE aplicando voladura controlada según la calidad del macizo rocoso para secciones de 2.4m x 2.7m. Esquematiza gráficamente las mejoras implementadas.

Figura 14

Malla de perforación y voladura en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros alivio de arranque

**DETALLES DEL ARRANQUE****DISTRIBUCIÓN DE CARGA EXPLOSIVA**

TALADROS		Emulnor 3000 1 1/8" x 16	Emulnor 1000 1 1/8" x 16	Emulnor 500 1" x 24
Arranque	3	12		
1ª Ayuda	4	4	12	
2ª Ayuda	4	4	12	
Ayuda de Hastial	2		2	4
Hastiales	4		4	8
Ayuda de corona	3		3	6
Corona	5			15
Ayuda de arrastre	2	2	6	
Arrastre	5	5	15	
Total	32	27	54	33

PERFORACIÓN

Taladros de alivio	5 und.
Taladros rimados	3 und.
Diámetro de broca	36 mm
Diámetro de rimadora	64 mm

VOLADURA

Total Explosivo	31.65 kg
Cordón detonante 5 p	25.00 m
Mecha rápida	2.00 m
Fanel ensamblado 9'	32 und.
Tacos de Arcilla	32 und.

RESULTADOS

Avance	2.17 m
Volumen	13.03 m ³
Tonelaje	35 t
Eficiencia de avance	90.2%
Factor de carga	2.43 kg/m ³
Factor de potencia	0.90 kg/t
Factor de avance	14.59 kg/ml

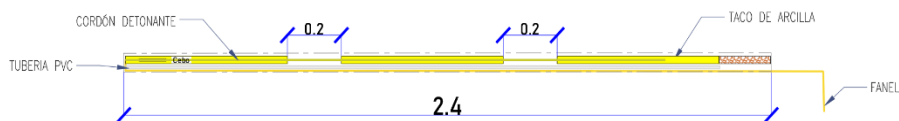
DETALLE DE LA CARGA EXPLOSIVA**Arranque****Primera Ayuda****Segunda Ayuda****Hastiales y Ayuda de Hastial****Arrastre y Ayuda de arrastre****Ayuda de corona****Corona****CARGA DESACOPLADA Y ESPACIADA EN LOS HASTIALES**

Figura 15

Resultados de la voladura en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros alivio de arranque



Los resultados de fragmentación al aplicar voladura controlada en el crucero XC-8770-SE muestran una mejora significativa en la distribución y fragmentación. Los fragmentos de 1 a 3 pulgadas representan el 18 % del volumen total; los de 4 pulgadas constituyen el 15 %; mientras que los de 5 pulgadas abarcan un 20 %. La mayor parte de la distribución corresponde a fragmentos de 6 pulgadas, que representan un 30 % del total. Finalmente, los fragmentos de 7 pulgadas o más constituyen el porcentaje restante, equivalente al 17 % del volumen.

En el crucero XC-8770-SE la aplicación de técnicas de voladura controlada realizada alcanzó un porcentaje de sobreexcavación promedio del 7.25 %. Se adjuntan los resultados de los 30 disparos durante el 2023. Ver “Tabla 21” y “Tabla 22”.

Tabla 21

Resultados de sobreexcavación de la voladura en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque

N° Disparo	Ancho Nominal	Altura Nominal	Volumen Nominal	Ancho Real	Altura Real	Avance	Volumen Real	Sobreexcavación
	(m)	(m)	(m3)	(m)	(m)	(m)	(m3)	(%)
1	2.40	2.70	13.03	2.61	2.79	2.16	14.60	12.08%
2	2.40	2.70	13.03	2.60	2.80	2.17	14.67	12.57%
3	2.40	2.70	13.03	2.50	2.79	2.16	13.99	7.36%
4	2.40	2.70	13.03	2.45	2.75	2.14	13.39	2.74%
5	2.40	2.70	13.03	2.48	2.82	2.18	14.16	8.64%
6	2.40	2.70	13.03	2.46	2.74	2.16	13.52	3.75%
7	2.40	2.70	13.03	2.49	2.75	2.18	13.86	6.37%
8	2.40	2.70	13.03	2.55	2.81	2.18	14.50	11.31%
9	2.40	2.70	13.03	2.59	2.80	2.17	14.61	12.14%
10	2.40	2.70	13.03	2.50	2.79	2.19	14.18	8.85%
11	2.40	2.70	13.03	2.44	2.72	2.18	13.43	3.10%
12	2.40	2.70	13.03	2.48	2.74	2.17	13.69	5.07%
13	2.40	2.70	13.03	2.46	2.80	2.18	13.94	7.00%
14	2.40	2.70	13.03	2.50	2.76	2.14	13.71	5.22%
15	2.40	2.70	13.03	2.45	2.82	2.16	13.86	6.34%
16	2.40	2.70	13.03	2.48	2.74	2.18	13.75	5.56%
17	2.40	2.70	13.03	2.55	2.78	2.16	14.22	9.11%
18	2.40	2.70	13.03	2.49	2.82	2.15	14.02	7.58%
19	2.40	2.70	13.03	2.55	2.74	2.15	13.95	7.04%
20	2.40	2.70	13.03	2.52	2.78	2.16	14.05	7.83%
21	2.40	2.70	13.03	2.42	2.80	2.15	13.53	3.81%
22	2.40	2.70	13.03	2.45	2.82	2.16	13.86	6.34%
23	2.40	2.70	13.03	2.55	2.79	2.17	14.33	10.01%
24	2.40	2.70	13.03	2.54	2.77	2.18	14.24	9.30%
25	2.40	2.70	13.03	2.51	2.82	2.15	14.13	8.44%
26	2.40	2.70	13.03	2.44	2.84	2.16	13.90	6.66%
27	2.40	2.70	13.03	2.49	2.74	2.18	13.81	5.98%
28	2.40	2.70	13.03	2.45	2.77	2.17	13.67	4.94%
29	2.40	2.70	13.03	2.50	2.81	2.15	14.02	7.63%
30	2.40	2.70	13.03	2.48	2.72	2.18	13.65	4.79%
Promedio	2.40	2.70	13.03	2.50	2.78	2.17	13.97	7.25%

Tabla 22

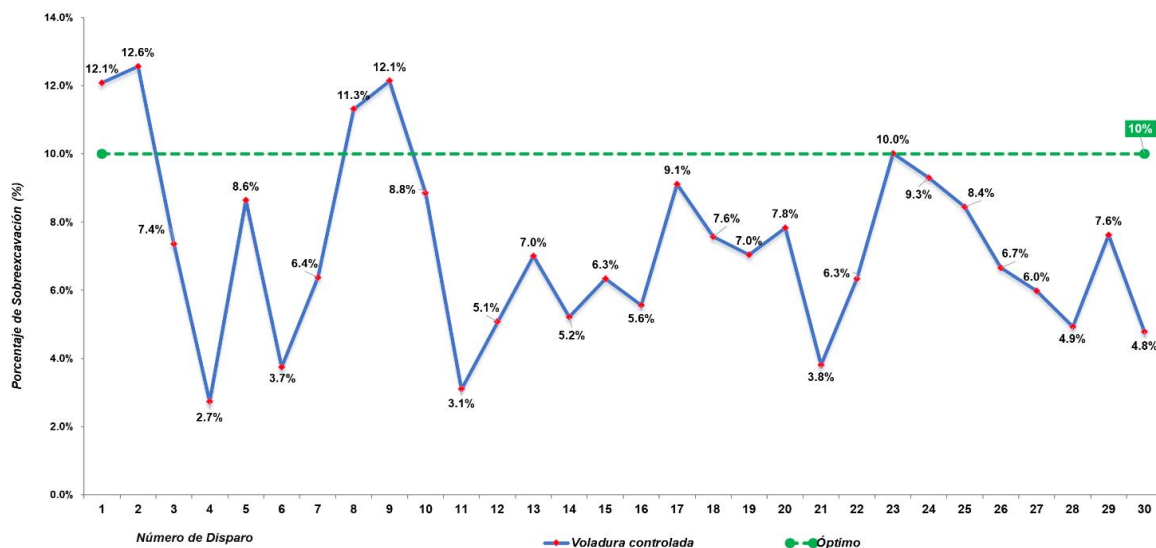
Resultados de distribución porcentual de la fragmentación en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque

N° Disparo	TAMAÑO DE FRAGMENTOS (Pulg.)								Volumen Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	(m3)
1	6%	8%	6%	14%	20%	30%	11%	5%	14.60
2	5%	7%	7%	15%	15%	32%	12%	7%	14.67
3	5%	6%	5%	17%	20%	28%	14%	5%	13.99
4	6%	7%	6%	13%	22%	30%	13%	3%	13.39
5	5%	6%	5%	11%	20%	35%	8%	10%	14.16
6	5%	8%	7%	17%	20%	25%	13%	5%	13.52
7	6%	7%	6%	13%	22%	30%	13%	3%	13.86
8	6%	8%	6%	14%	20%	30%	11%	5%	14.50
9	5%	6%	5%	16%	22%	30%	13%	3%	14.61
10	5%	6%	5%	17%	20%	28%	14%	5%	14.18
11	6%	7%	6%	13%	22%	30%	13%	3%	13.43
12	5%	6%	5%	11%	20%	35%	8%	10%	13.69
13	7%	8%	7%	14%	20%	28%	11%	5%	13.94
14	6%	7%	6%	13%	22%	30%	13%	3%	13.71
15	6%	8%	6%	14%	20%	30%	11%	5%	13.86
16	5%	7%	7%	15%	15%	32%	12%	7%	13.75
17	5%	6%	5%	17%	20%	28%	14%	5%	14.22
18	6%	7%	6%	13%	22%	30%	13%	3%	14.02
19	5%	7%	7%	19%	15%	25%	15%	7%	13.95
20	5%	8%	6%	14%	20%	30%	12%	5%	14.05
21	6%	8%	6%	14%	20%	30%	11%	5%	13.53
22	5%	6%	5%	16%	22%	30%	13%	3%	13.86
23	5%	6%	5%	17%	20%	28%	14%	5%	14.33
24	5%	7%	5%	15%	22%	30%	13%	3%	14.24
25	5%	6%	5%	11%	20%	35%	8%	10%	14.13
26	5%	7%	7%	15%	15%	32%	12%	7%	13.90
27	5%	6%	5%	17%	20%	28%	14%	5%	13.81
28	5%	8%	6%	15%	20%	30%	13%	3%	13.67
29	5%	6%	5%	11%	20%	35%	8%	10%	14.02
30	5%	7%	7%	15%	15%	32%	12%	7%	13.65
Promedio	5%	7%	6%	15%	20%	30%	12%	5%	13.97

Se adjuntan los gráficos correspondientes a los 30 disparos realizados, con el detalle de la variación de sobreexcavación por disparo y el promedio de fragmentación (en pulgadas) por disparo, expresado en volumen (m³). Ver “Figura 16” y “Figura 17”.

Figura 16

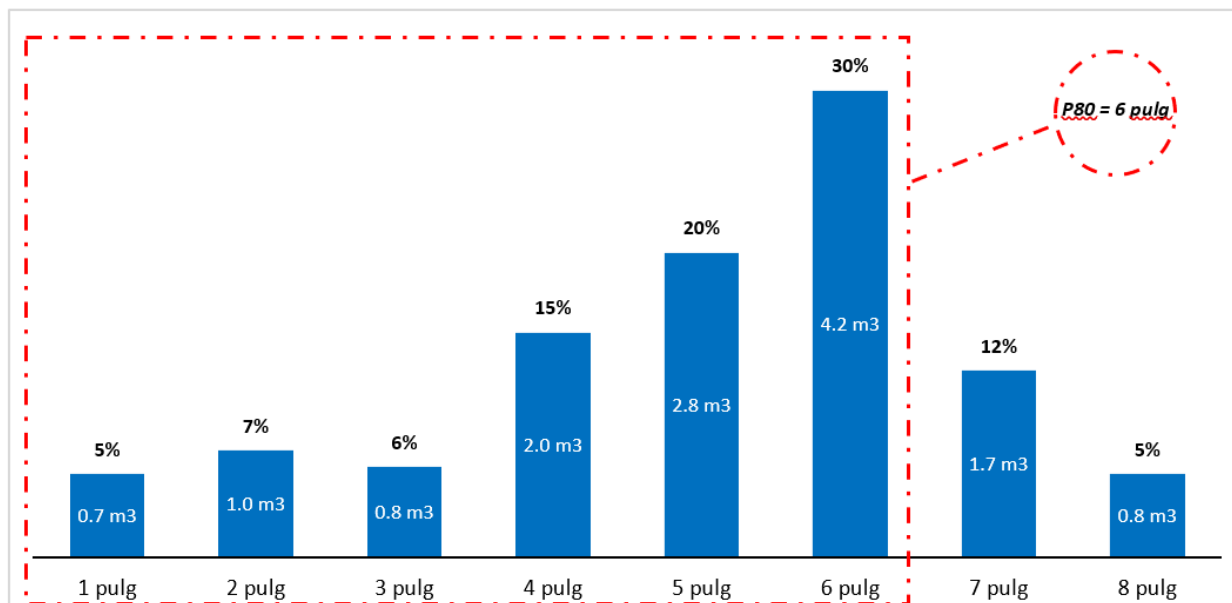
Resultados de sobreexcavación en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque



La fragmentación y distribución del material en volumen, resultantes de la aplicación de técnicas de voladura controlada en el crucero XC-8770-SE, se presentan en la “Figura 17”.

Figura 17

Resultados de fragmentación por disparo en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura controlada de recorte y voladura amortiguada.



6.1.2.3 Parámetros de control de voladura en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque.

La cantidad promedio de explosivo utilizado por disparo se detalla en la malla de perforación y voladura presentada en la “Figura 14”.

Se muestra a continuación, los parámetros de control de voladura

Factor de carga (Fc):

$$Fc = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{m^3 \text{ de roca}}$$

La cantidad de explosivo por voladura (kg)=31.65

Volumen de roca por disparo (m3)= 13.03

$$Fc \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{31.65}{13.03} = 2.43 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Factor de potencia (Fp):

$$Fa = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{tonelaje de roca}}$$

Tonelaje promedio de roca por disparo (t)= 13.03 m3 x 2.70 t/ m3 = 35

$$Fp \text{ (kg/t)} = \frac{31.65}{37} = 0.90 \frac{\text{kg}}{\text{t}}$$

Factor de avance (Fa):

$$Fa = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{promedio de avance (m)}}$$

Avance promedio por disparo (m) = 2.25

$$Fa \text{ (kg/m)} = \frac{31.65}{2.17} = 14.59 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Factor de energía (Fe):

Para el cálculo del factor de energía se han considerado los datos técnicos de las emulsiones empleadas en la voladura del crucero XC-8770-SE y la cantidad de carga explosiva de la la malla de perforación y voladura de la “Figura 14”.

Tabla 23

Factor de energía en el crucero XC-8770-SE con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque

Emulsiones	Densidad relativa (g/cm ³)	Energía (kcal/kg)	Unidades	Peso (Kg/Unid)	Peso total (Kg)	Energía (Kcal)	Tonelaje (t)	Factor de energía (kcal/tn)
Emulnor 500 1 " x 24"	0.9	628	33	0.256	8.44	5,299		
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	1.13	785	54	0.284	15.34	12,043	35	706
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	1.14	920	27	0.296	7.99	7,355		

6.1.3 Criterios de perforación y voladura controlada en la galería GA-8365-S

6.1.3.1 Perforación

La malla de perforación se diseñó en función de la calidad del macizo rocoso y las propiedades de los explosivos utilizados. El análisis del macizo rocoso en el GA-8365-S determinó que su calidad se encuentra en el rango RMR de 31 a 40, influenciada por fallas estructurales puntuales, presencia de agua y una alteración general del macizo rocoso.

Se realizó una capacitación del uso de la cartilla RMR, la presentación e implementación de los nuevos estándares en la malla de perforación y voladura según el valor RMR del macizo rocoso a los trabajadores. Se continuó con la implementación de los guiadores de aluminio para el control de paralelismo y rimadores de 64 mm para el rimado de los taladros de arranque. Los parámetros técnicos de perforación y voladura promedio utilizados se presentan y resumen en la “Tabla 24”.

Tabla 24*Parámetros de perforación y voladura aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S*

Parámetros	Unidad	Descripción
Tipo de roca	-	Granodiorita
Clase de roca	-	IV-A
Densidad roca	ton/m3	2.70
Equipo de perforación	-	Jackleg RNP/RN-250X
Tipo de corte	-	Corte en V
Tamaño de barra	m	2.40
Eficiencia en la perforación	%	95
Perforación efectiva promedio	m	2.28
Eficiencia en la voladura	%	95
Avance promedio Real	m	2.17
Taladros cargados	cant.	28
Taladros de alivio arranque	cant.	3
Taladros de alivio corona	cant.	6
Taladros rimados	cant.	3

6.1.3.2 Voladura

Se realizó una optimización de la malla de perforación y voladura donde se cambió la distribución de explosivos por sectores. En las ayudas de los arranques, se reemplazó Emulnor 3000 de 1 1/8" x 16" por Emulnor 1000 de 1 1/8" x 16". Los cebos con Emulnor 3000 de 1 1/8" x 16" se mantuvieron solo en el arranque, ayuda de arranque, arrastres y ayuda de arrastres. En los hastiales y ayudas de hastiales, se mantuvo el cebo de Emulnor 1000 de 1 1/8" x 16", mientras que la carga pasó de Emulnor 1000 de 1 1/8" x 16" a una carga desacoplada de Emulnor 500 de 1" x 24". En la corona, el cebo de Emulnor 1000 de 1 1/8" x 16" se reemplazó por Emulnor 500 de 1" x 24", y la carga lineal, antes realizada con Emulnor 500 de 1 1/8" x 12", se cambió a una carga desacoplada de Emulnor 500 de 1" x 24".

Similar al crucero XC-8770, se estandarizó el uso de tacos de arcilla de 1" x 20" en los taladros con carga explosiva y el cordón detonante para el carguío de voladura amortiguada con cargas desacopladas. Los accesorios de voladura utilizados se presentan en la "Tabla 25"

Tabla 25

Explosivos y accesorios de voladura aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S

Parámetros	Unidad	Cantidad
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	cartuchos	25
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	cartuchos	42
Emulnor 500 1" x 24"	cartuchos	33
Cordón detonante	m	25
Carmex	piezas	2
Faneles LP	piezas	28
Tacos de arcilla	cant.	28

La “Tabla 26” muestra la optimización en la distribución de la numeración de faneles de Periodo largo en la galería GA-8365-S.

Tabla 26

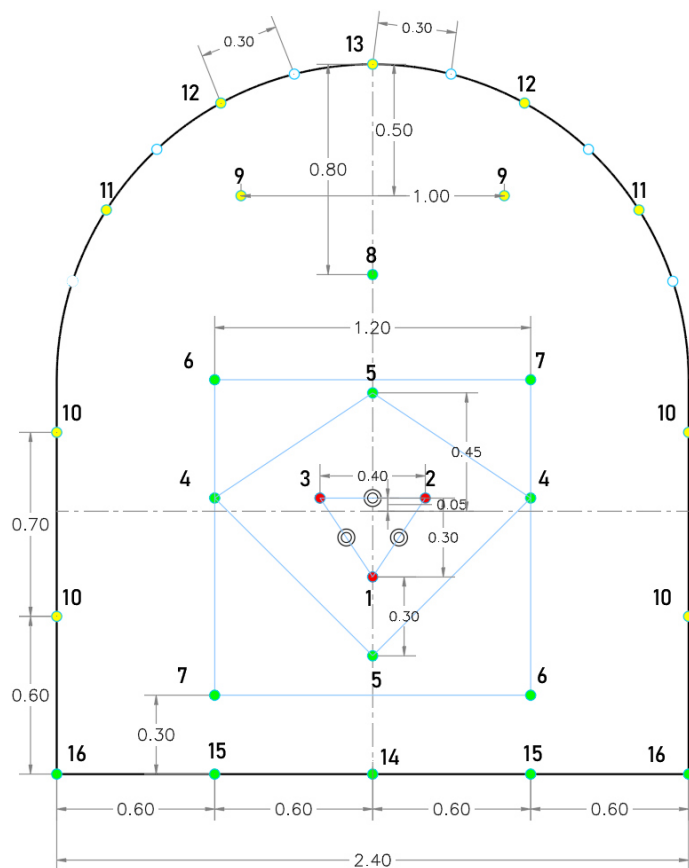
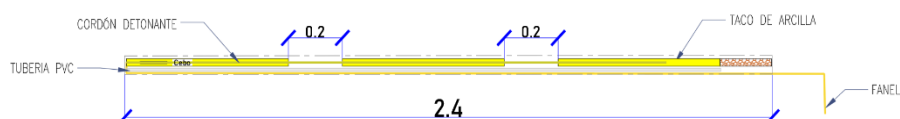
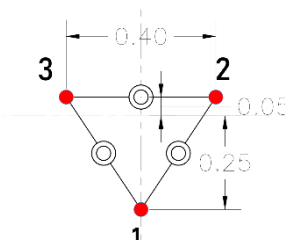
Accesorios en la distribución de la numeración de faneles de periodo largo en los taladros en la galería GA-8365-S

Taladros	Voladura Controlada (No LP)				
Arranque	1	2	3	---	---
1° Ayuda	4	4	5	5	---
2° Ayuda	6	6	7	7	---
Ayuda Hastiales	---	---	---	---	---
Ayuda de Corona	8	9	----	9	---
Hastiales	10	10	10	10	---
Ayuda de Arrastre	----	----	----	----	---
Corona	11	11	12	12	13
Arrastre	14	15	15	16	16

Como se observa en la “Tabla 26” se optimizó la numeración de los faneles en la malla de perforación por sectores, se le dio la secuencia del Fanel LP 1,2 y 3 en el arranque y se aumentó hasta el Fanel LP número 16 , lo cual permitió optimizar la secuencia de salida de los taladros en la detonación y disminuir la carga operante. La “Figura 18” muestra la malla de perforación y voladura usada en la galería GA-8365-S aplicando voladura controlada con la redistribución en la numeración de los faneles según la calidad del macizo rocoso para secciones de 2.4m x 2.7m.

Figura 18

Malla de perforación y voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque

**DETALLE DE LA CARGA EXPLOSIVA****Arranque****Primera Ayuda****Segunda Ayuda****Hastiales****Arrastre****Ayuda de corona****Corona****CARGA DESACOPLADA Y ESPACIADA EN LOS HASTIALES Y CORONA****DETALLES DEL ARRANQUE**

Nota: 1,2,3 son la numeración de los faneles LP

DISTRIBUCIÓN DE CARGA EXPLOSIVA

TALADROS		Emulnor 3000 1 1/8" x 16	Emulnor 1000 1 1/8" x 16	Emulnor 500 1" x 24
Arranque	3	12		
1ª Ayuda	4	4	12	
2ª Ayuda	4	4	12	
Hastiales	4			12
Ayuda de corona	3		3	6
Corona	5			15
Arrastre	5	5	15	
Total	28	25	42	33

PERFORACIÓN

Taladros de alivio	4 und.
Taladros rimados	3 und.
Diámetro de broca	36 mm
Diámetro de rimadora	64 mm

VOLADURA

Total Explosivo	27.66 kg
Cordón detonante 5 p	25.00 m
Mecha rápida	1.00 m
Fanel ensamblado 9'	28 und.
Tacos de Arcilla	28 und.

RESULTADOS

Avance	2.12 m
Volumen	12.77 m3
Tonelaje	34 t
Eficiencia de avance	88.4%
Factor de carga	2.17 kg/m3
Factor de potencia	0.81 kg/t
Factor de avance	13.05 kg/ml

Figura 19

Resultados de la voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31- 40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque



Los resultados de fragmentación al aplicar voladura controlada en la galería GA-8365-S muestran una mejora significativa en la distribución y tamaño de los fragmentos. Los fragmentos de 1 pulgada representan un 8 % del volumen total, los de 2 pulgadas constituyen el 12 %; mientras que los de 3 pulgadas, un 25 %. La mayor parte de la distribución corresponde a fragmentos de 4 pulgadas, que representan un 35 % del total, los de 5 pulgadas constituyen el 8 %; el 12 % restante se encuentra en el rango de 6 a 8 pulgadas o más.

Se adjuntan los resultados de los 30 disparos realizados en 2023 aplicando técnicas de voladura controlada. En la “Tabla 26” se presentan los resultados de los 30 disparos, con una media de sobreexcavación del 8.72 %. Ver “Tabla 27” y “Tabla 28”.

Tabla 27

Resultados de sobreexcavación de la voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque

N° Disparo	Ancho Nominal (m)	Altura Nominal (m)	Volumen Nominal (m3)	Ancho Real (m)	Altura Real (m)	Avance (m)	Volumen Real (m3)	Sobreexcavación (%)
1	2.40	2.70	12.77	2.70	2.73	2.11	14.44	13.04%
2	2.40	2.70	12.77	2.60	2.83	2.12	14.48	13.37%
3	2.40	2.70	12.77	2.58	2.82	2.11	14.25	11.57%
4	2.40	2.70	12.77	2.47	2.81	2.13	13.73	7.45%
5	2.40	2.70	12.77	2.48	2.82	2.15	13.96	9.28%
6	2.40	2.70	12.77	2.48	2.79	2.14	13.75	7.62%
7	2.40	2.70	12.77	2.48	2.81	2.10	13.59	6.36%
8	2.40	2.70	12.77	2.50	2.81	2.14	13.96	9.26%
9	2.40	2.70	12.77	2.62	2.84	2.15	14.85	16.27%
10	2.40	2.70	12.77	2.52	2.77	2.12	13.74	7.55%
11	2.40	2.70	12.77	2.47	2.79	2.13	13.63	6.68%
12	2.40	2.70	12.77	2.45	2.78	2.15	13.60	6.43%
13	2.40	2.70	12.77	2.46	2.74	2.10	13.14	2.88%
14	2.40	2.70	12.77	2.56	2.80	2.14	14.24	11.49%
15	2.40	2.70	12.77	2.45	2.82	2.13	13.66	6.96%
16	2.40	2.70	12.77	2.48	2.80	2.13	13.73	7.50%
17	2.40	2.70	12.77	2.55	2.81	2.11	14.04	9.88%
18	2.40	2.70	12.77	2.49	2.84	2.12	13.92	8.96%
19	2.40	2.70	12.77	2.60	2.85	2.11	14.52	13.63%
20	2.40	2.70	12.77	2.52	2.78	2.11	13.72	7.43%
21	2.40	2.70	12.77	2.42	2.80	2.12	13.34	4.40%
22	2.40	2.70	12.77	2.45	2.82	2.15	13.79	7.96%
23	2.40	2.70	12.77	2.55	2.78	2.10	13.82	8.20%
24	2.40	2.70	12.77	2.51	2.76	2.11	13.57	6.24%
25	2.40	2.70	12.77	2.59	2.82	2.09	14.17	10.94%
26	2.40	2.70	12.77	2.46	2.84	2.10	13.62	6.63%
27	2.40	2.70	12.77	2.49	2.79	2.13	13.74	7.54%
28	2.40	2.70	12.77	2.47	2.81	2.16	13.92	8.96%
29	2.40	2.70	12.77	2.50	2.84	2.12	13.98	9.40%
30	2.40	2.70	12.77	2.48	2.82	2.12	13.77	7.76%
Promedio	2.40	2.70	12.77	2.51	2.80	2.12	13.89	8.72%

Tabla 28

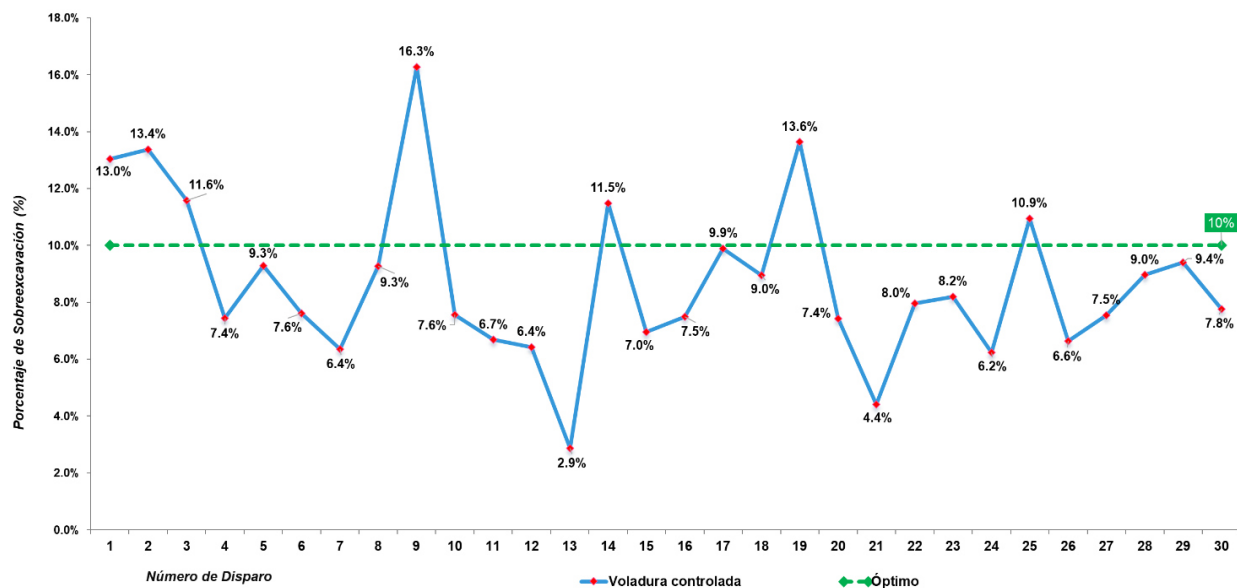
Distribución porcentual de la fragmentación en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque

N° Disparo	TAMAÑO DE FRAGMENTOS (Pulg.)								Volumen Total (m3)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	8%	11%	24%	34%	10%	7%	4%	2%	14.44
2	8%	12%	26%	35%	8%	3%	5%	3%	14.48
3	9%	13%	25%	34%	6%	5%	4%	4%	14.25
4	9%	13%	25%	38%	6%	3%	4%	2%	13.73
5	7%	11%	27%	34%	8%	5%	4%	4%	13.96
6	9%	16%	24%	35%	8%	3%	3%	2%	13.75
7	7%	11%	25%	34%	10%	7%	3%	3%	13.59
8	8%	12%	25%	38%	8%	3%	3%	3%	13.96
9	10%	12%	26%	34%	6%	5%	5%	2%	14.85
10	9%	15%	23%	38%	6%	3%	3%	3%	13.74
11	8%	12%	24%	36%	8%	5%	4%	3%	13.63
12	9%	13%	26%	35%	8%	3%	3%	3%	13.60
13	7%	12%	23%	34%	10%	7%	5%	2%	13.14
14	7%	12%	24%	34%	10%	7%	4%	2%	14.24
15	8%	12%	27%	34%	6%	5%	5%	3%	13.66
16	9%	14%	26%	35%	8%	3%	3%	2%	13.73
17	8%	12%	25%	34%	10%	5%	4%	2%	14.04
18	8%	11%	24%	34%	10%	7%	4%	2%	13.92
19	8%	12%	26%	35%	8%	3%	5%	3%	14.52
20	9%	13%	25%	34%	6%	5%	4%	4%	13.72
21	9%	13%	25%	38%	6%	3%	4%	2%	13.34
22	8%	14%	26%	36%	6%	5%	3%	2%	13.79
23	8%	11%	27%	38%	6%	5%	3%	2%	13.82
24	8%	13%	24%	38%	6%	3%	5%	3%	13.57
25	9%	13%	25%	35%	6%	7%	3%	2%	14.17
26	10%	12%	24%	35%	8%	3%	5%	3%	13.62
27	6%	11%	29%	34%	8%	5%	5%	2%	13.74
28	8%	12%	27%	36%	8%	3%	3%	3%	13.92
29	7%	11%	25%	34%	10%	7%	3%	3%	13.98
30	8%	12%	25%	38%	8%	3%	3%	3%	13.77
Promedio	8%	12%	25%	35%	8%	5%	4%	3%	13.89

Se adjuntan los gráficos correspondientes a los 30 disparos realizados, con el detalle de la variación de sobreexcavación por disparo y el promedio de fragmentación (en pulgadas) por disparo, expresado en volumen (m³). Ver “Figura 20” y “Figura 21”.

Figura 20

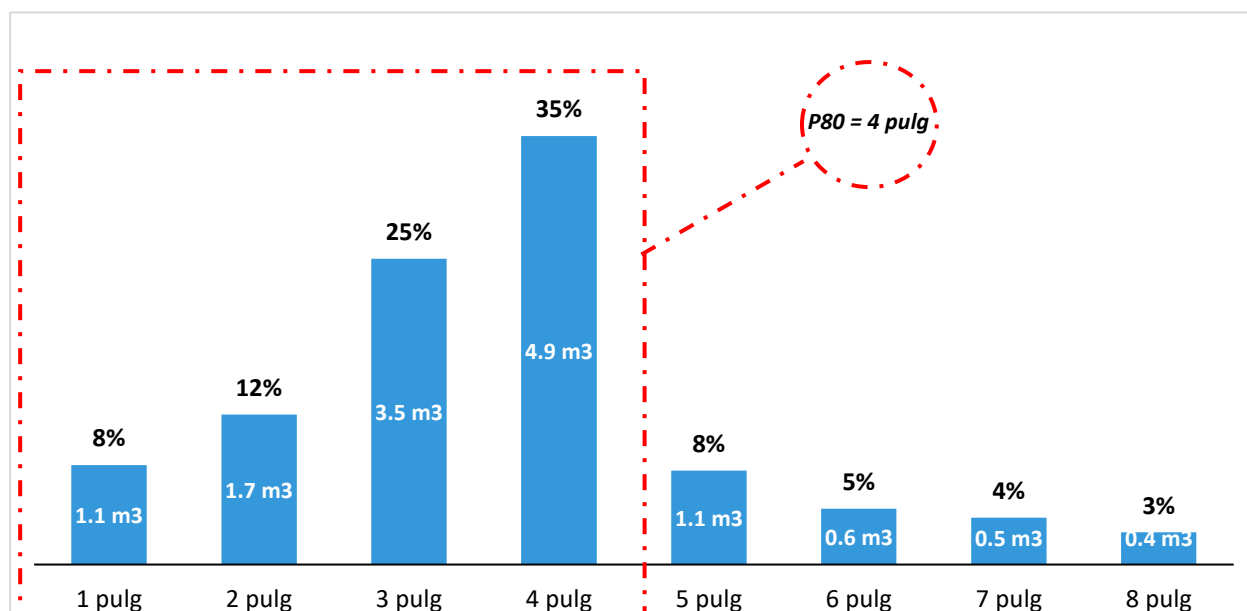
Resultados de sobreexcavación en la galería GA-8365-S con RMR 41-50 aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque



La fragmentación y distribución del material en volumen, resultantes de la aplicación de técnicas de voladura controlada en la galería GA-8365-S, se presentan en la “Figura 21”.

Figura 21

Resultados de fragmentación por disparo en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte y voladura amortiguada



6.1.4. Parámetros de control de voladura en la galería GA-8365-S con RMR 31-40

aplicando voladura de recorte, voladura amortiguada y rimado de taladros de arranque

La cantidad promedio de explosivo utilizado por disparo se detalla en la malla de perforación y voladura presentada en la “Figura 18”.

Factor de carga (Fc):

$$Fc = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{m^3 \text{ de roca}}$$

La cantidad promedio de explosivo por voladura (kg)= 27.66 kg

Volumen de roca promedio por disparo (m3) = 12.77

$$Fc \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{27.66}{12.77} = 2.17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Factor de potencia (Fp):

$$Fp = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{tonelaje de roca}}$$

Tonelaje promedio de roca por disparo (t) = 12.77 m3 x 2.70 t/ m3 = 34

$$Fp \text{ (kg/t)} = \frac{27.66}{34} = 0.81 \frac{\text{kg}}{\text{t}}$$

Factor de avance (Fa):

$$Fa = \frac{\text{kg de explosivo consumido}}{\text{promedio de avance (m)}}$$

Avance promedio por disparo (m) = 2.12

$$Fa \text{ (kg/m)} = \frac{27.66}{2.12} = 13.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Factor de energía (Fe):

Para la estimación del factor de energía se han considerado los datos técnicos de las emulsiones empleadas en la voladura de la galería GA-8365-S y la cantidad de carga explosiva de la la malla de perforación y voladura de la “Figura 18”.

Tabla 29

Factor de energía en la galería GA-8365-S con RMR 31-40 aplicando voladura de recorte, desacoupling charging y rimado de taladros de arranque

Emulsiones	Densidad relativa (g/cm ³)	Energía (kcal/kg)	Unidades	Peso (Kg/Unid)	Peso total (Kg)	Energía (Kcal)	Tonelaje (t)	Factor de energía (kcal/tn)
Emulnor 500 1 " x 24"	0.9	628	33	0.255	8.42	5,287		
Emulnor 1000 1 1/8" x 16"	1.13	785	42	0.284	11.93	9,367	34	631
Emulnor 3000 1 1/8" x 16"	1.14	920	25	0.296	7.40	6,810		

CAPÍTULO VII:

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

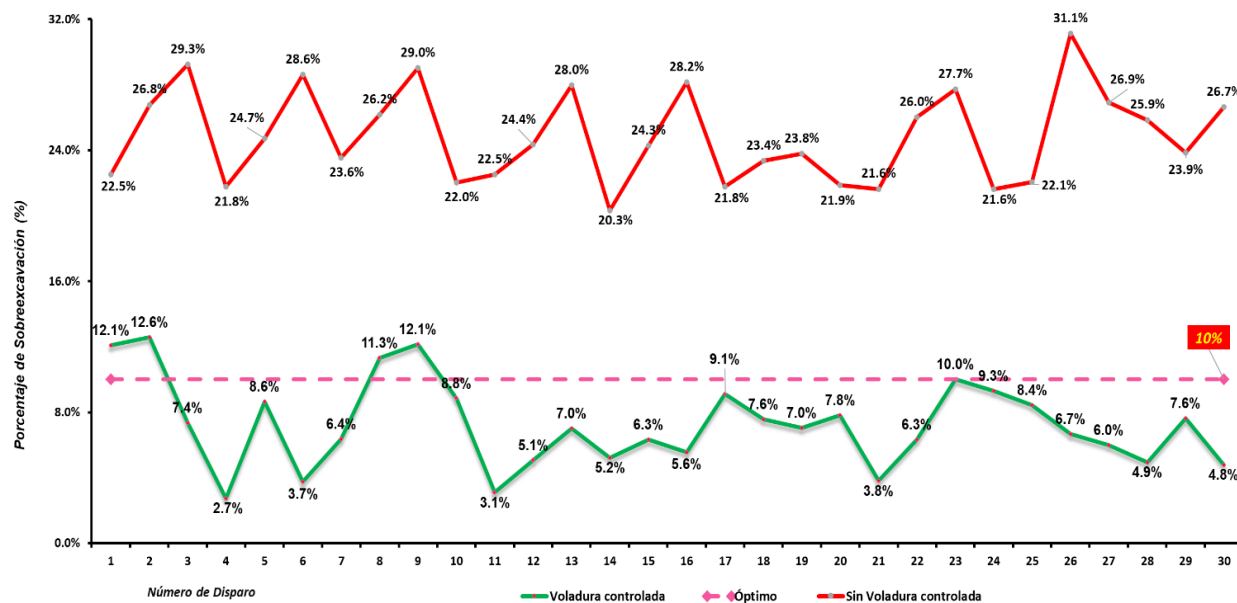
7.1 Comparativo de resultados entre la voladura convencional y la voladura controlada

En nuestra población de estudio, que comprende las labores XC-8770-SE y GA-8365-S, se realizó una comparación de los resultados obtenidos de la aplicación de técnicas de voladura controlada para medir el impacto de la optimización. Previamente, en el crucero XC-8770-SE, para una sección planeada de 2.40 m x 2.70 m, se alcanzaba una sección de 2.81 m x 2.88 m, lo que representaba una sobreexcavación promedio del 24.88 %. Si se considera que los parámetros estandarizados en la unidad minera son de 10%, la diferencia de 14.88% significa un mal uso de los recursos. (\$/m³).

Durante el estudio, se observó que la aplicación de técnicas de voladura controlada, como la voladura de recorte, la carga desacoplada y el rimado en el arranque, generó una mejora sustancial en la reducción de la sobreexcavación, que es el objetivo principal. La “Figura 22” muestra los resultados de la sobreexcavación antes (voladura convencional) y después de la aplicación de voladura controlada en el crucero XC-8770-SE.

Figura 22

Comparativo de la sobreexcavación por disparo aplicando voladura controlada en el cruceo XC-8770-SE



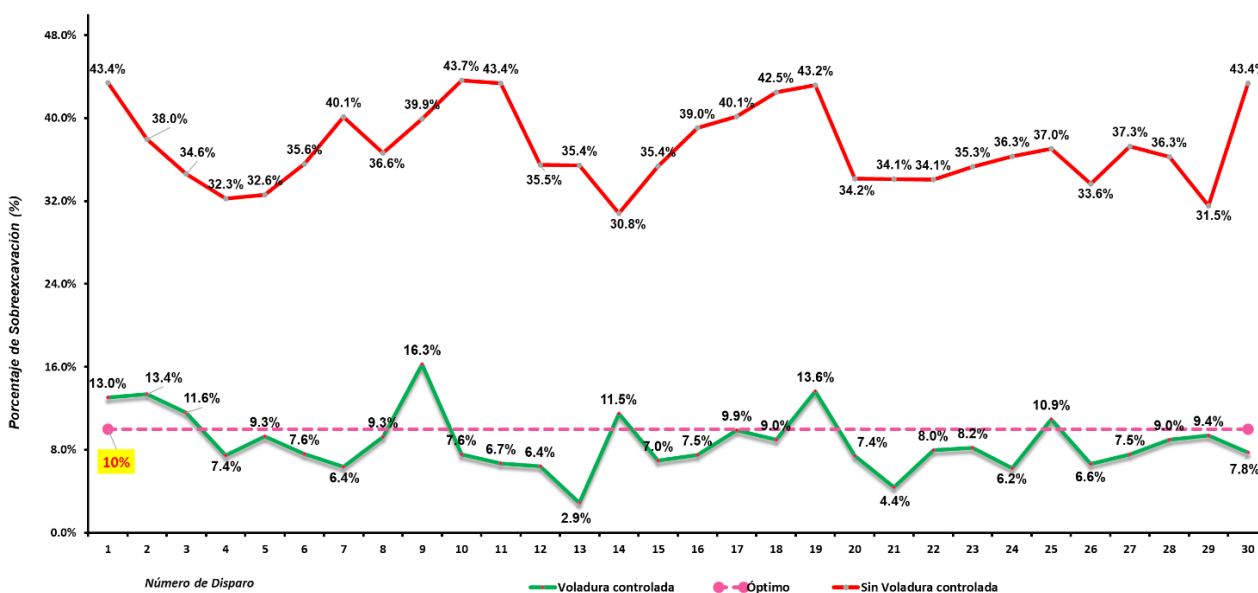
La aplicación de técnicas de voladura controlada permitió reducir la sobreexcavación promedio a un 7.25 % y optimizar la sección final (2.50 m x 2.78 m), logrando excavaciones más estables en comparación con las secciones resultantes sin voladura controlada (2.81 m x 2.88 m).

En la galería GA-8365-S, para una sección planificada de 2.40 m x 2.70 m, se obtenía en la práctica una sección de 2.91 m x 2.85 m, lo cual representaba una sobreexcavación promedio del 37.17 %. Dado que el límite de sobreexcavación establecido en la unidad minera es del 10 %, esta diferencia del 27.17 % implica una pérdida significativa de recursos (\$/m³) y una utilización ineficiente de los explosivos y otros materiales. Durante el estudio, se observó que la implementación de técnicas de voladura controlada, como la voladura de recorte, voladura amortiguada, rimado de arranque y una distribución adecuada de la energía del explosivo, contribuyó de manera sustancial a la reducción de la sobreexcavación. La “Figura 23” muestra los

resultados de la sobreexcavación antes (voladura convencional) y después de la aplicación de voladura controlada en la galería GA-8365-S.

Figura 23

Comparativo de la sobreexcavación por disparo aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S



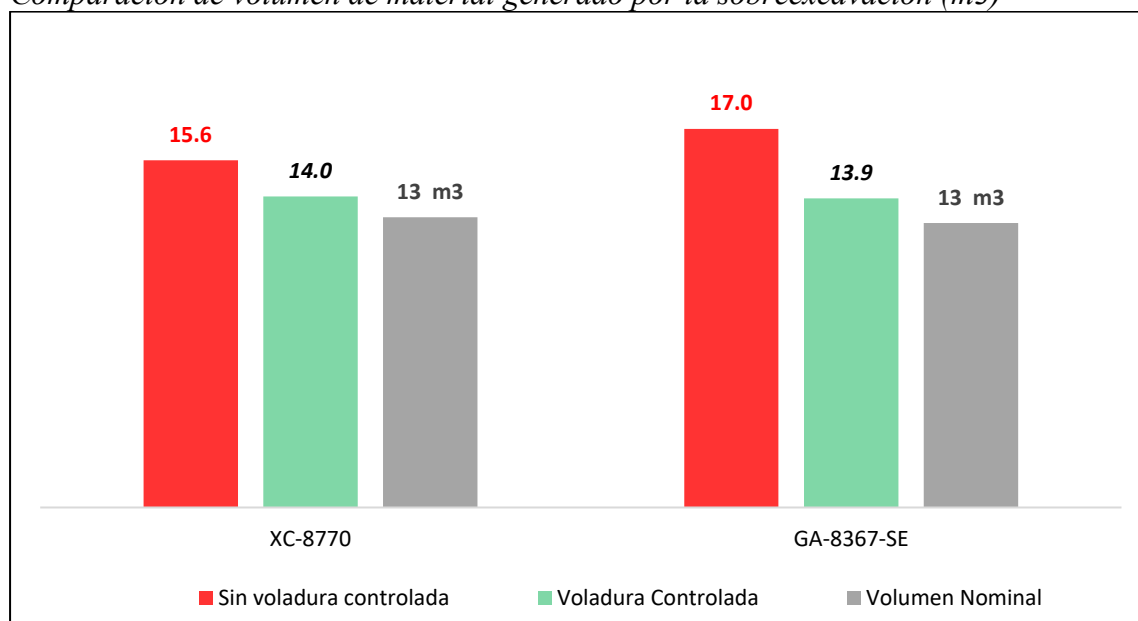
La aplicación de técnicas de voladura controlada permitió reducir la sobreexcavación promedio a 8.72% y mejorar la sección final (2.50 m x 2.78 m) logrando excavaciones más estables en comparación con las secciones resultantes de la aplicación de voladura convencional (2.91 m x 2.85 m).

7.1.1 Comparación de los resultados de la voladura convencional y la voladura controlada en la cantidad de sobreexcavación generada en las labores lineales.

La aplicación de técnicas de voladura controlada permitió reducir la cantidad adicional de material sobreexcavado en volumen (m³), lo cual permitió optimizar el uso los recursos. La “Tabla 30” muestra las cantidades iniciales de material excavado con voladura convencional, las nuevas cantidades excavadas aplicando voladura controlada y las respectivas variaciones.

Tabla 30*Comparación de resultados en volumen generado por la sobreexcavación (m³)*

<i>Labor</i>	<i>Volumen Nominal</i>	<i>Sin voladura controlada</i>	<i>Voladura Controlada</i>	<i>Variación Sin voladura controlada</i>	<i>Variación con voladura controlada</i>
XC-8770	13 m ³	16 m ³	14 m ³	3 m ³	1 m ³
GA-8367-SE	13 m ³	17 m ³	14 m ³	4 m ³	1 m ³

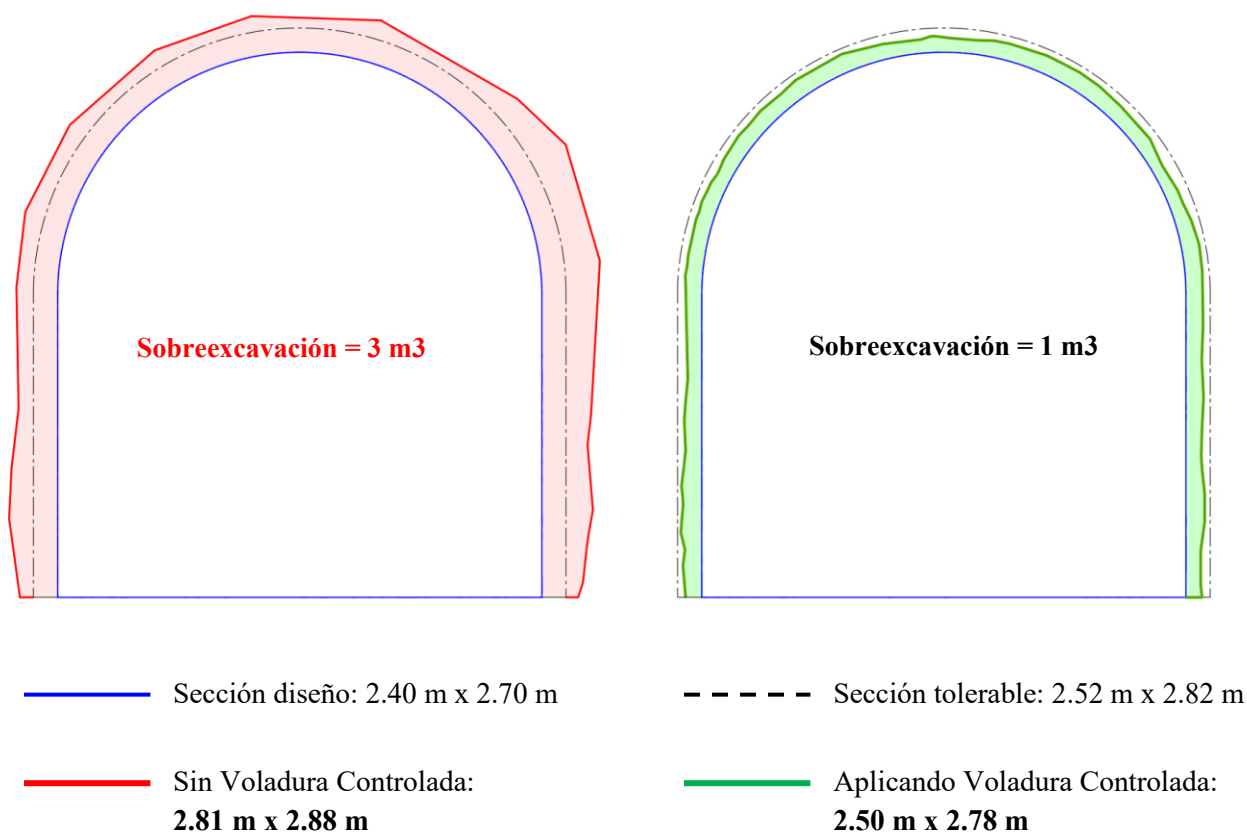
Figura 24*Comparación de volumen de material generado por la sobreexcavación (m³)*

En la “Figura 24” se observa que, la aplicación de voladura controlada en el crucero XC-8770-SE, redujo la sobreexcavación a 14 m³, en comparación con el valor promedio anterior de 16 m³, lo cual representó una disminución de 2 m³ por disparo. En la galería GA-8365-S, la aplicación de voladura controlada también permitió reducir la sobreexcavación a 14 m³, mientras que con voladura convencional el valor era de 17 m³, observándose así una reducción de 3 m³.

La “Figura 25” muestra de manera gráfica los perfiles del contorno de la excavación resultantes de la voladura, antes (voladura convencional) y después de la aplicación de voladura controlada en el crucero XC-8770-SE.

Figura 25

Comparativo de perfil de excavación resultante aplicando voladura controlada en el crucero XC-8770-SE

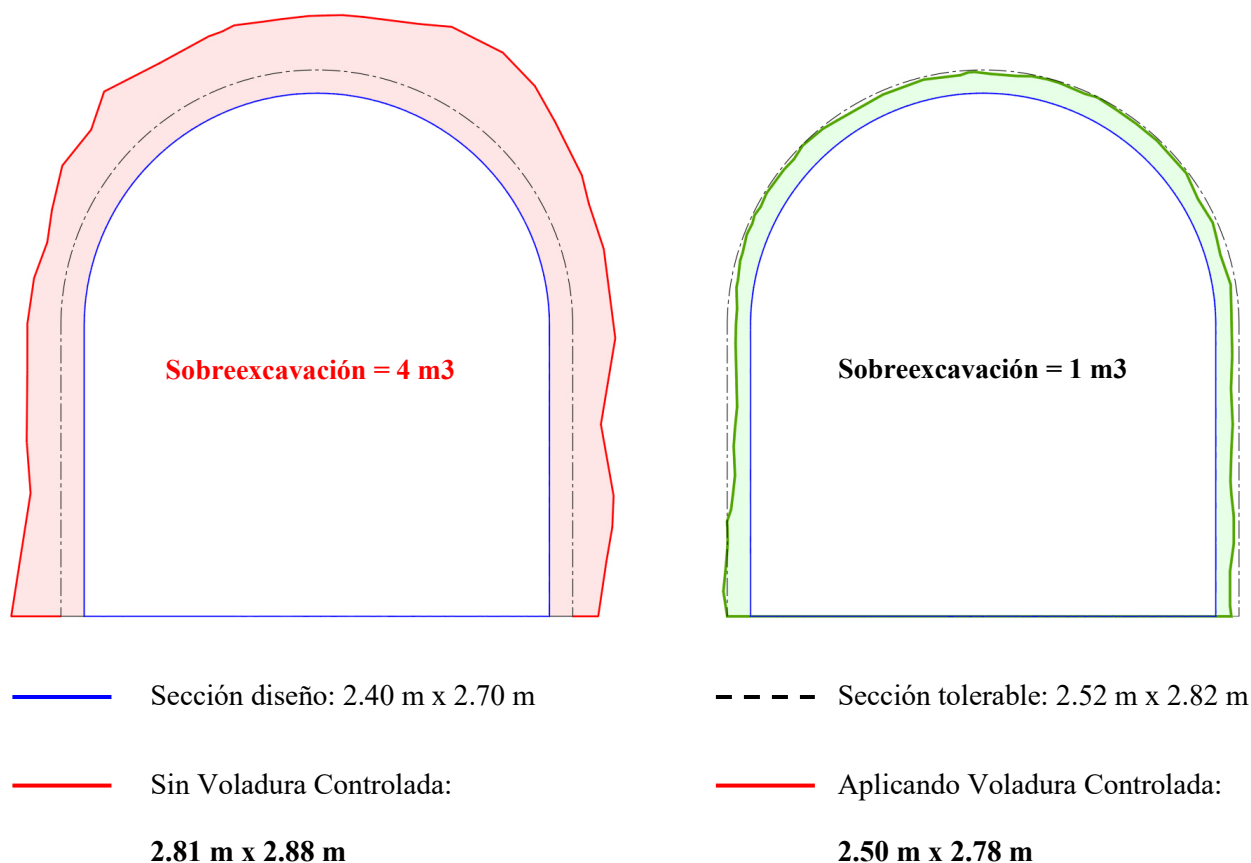


Al comparar la sobreexcavación antes (voladura convencional) y después de la aplicación de la voladura controlada, se observó que el incremento en el volumen se debía al aumento de la sección real en el crucero XC-8770-SE. La diferencia inicial entre la sección nominal y la sección real era de aproximadamente 3 m³ por disparo, pero con la aplicación de voladura controlada, esta diferencia se optimizó a 1 m³.

La “Figura 26” muestra de manera gráfica los perfiles del contorno de la excavación resultantes de la voladura, antes (voladura convencional) y después de la aplicación de voladura controlada en la galería GA-8365-S.

Figura 26

Comparativo de perfil de excavación resultante aplicando voladura controlada en la galería GA-8365-S



Al comparar la sobreexcavación antes (voladura convencional) y después de la aplicación de la voladura controlada, se observó que el incremento del volumen se debía al aumento de la sección real en galería GA-8365-S. La diferencia entre la sección real y nominal inicialmente era de aproximadamente 4 m³ por disparo, lo cual se optimizó a 1 m³ aplicando voladura controlada.

7.1.2 Las técnicas de voladura controlada y su relación con la calidad del macizo rocoso y los efectos de sobreexcavación

La relación entre la calidad de la roca y la selección óptima de la técnica de voladura controlada a aplicar es clave para garantizar la eficiencia operativa y la seguridad en el entorno de trabajo. El índice de calidad de la roca RMR (Rock Mass Rating) evalúa las características

geomecánicas del macizo rocoso, lo cual permite seleccionar la técnica de voladura adecuada para minimizar la sobreexcavación y reducir el daño en la roca circundante. Para rocas con un RMR de 30-41 (Mala "A") como la galería GA-8365-S, se tiende a utilizar técnicas de voladura amortiguada y precorte. Ver “Figura 27”.

Figura 27

Aplicación de técnica de voladura amortiguada en la GA-8365-S



Aunque la voladura controlada de precorte es una opción viable debido a la calidad del macizo rocoso, en la GA-8365-S las pruebas piloto no dieron los resultados esperados, por lo que se optó por la voladura controlada de recorte y la voladura amortiguada. Estas técnicas fueron esenciales debido a la baja resistencia y cohesión de la roca, que la hace vulnerable a daños

estructurales si no se controla adecuadamente la energía de voladura. La voladura amortiguada minimiza la transmisión de energía a las zonas periféricas, reduciendo el riesgo de colapsos.

Para rocas con un RMR de 41-50 (Regular "B"), es viable la aplicación de técnicas de voladura controlada con mayor flexibilidad. En este rango, la resistencia moderada de la roca permite una mayor adaptación en el uso de explosivos sin generar tanto daño a la estructura remanente. El uso de explosivos de velocidad moderada y diseños de voladura controlada resultan efectivos. En el XC-8770-SE, se aplicaron técnicas de voladura de recorte, voladura amortiguada. Ver "Figura 28".

Figura 28

Aplicación de técnica de voladura de recorte y rimado de taladros de alivio en el crucero XC-8770-SE



7.1.3 Parámetros de control de voladura y su relación con los indicadores de fragmentación

La “Tabla 31” presenta un resumen de los parámetros promedio de control de voladura por disparo, antes (voladura convencional) y después de la aplicación de voladura controlada en la población de estudio (XC-8770-SE y GA-8365-S).

Tabla 31

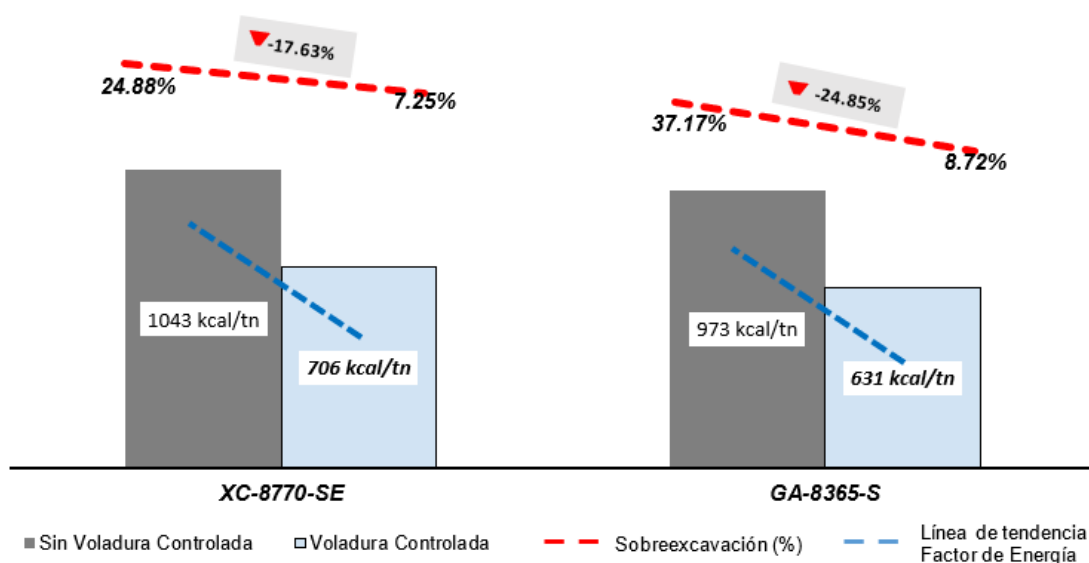
Comparación de resultados de los parámetros de control de voladura

Labor	Aplicación	Factor de carga	Factor de potencia	Factor de avance	Factor de energía	Sobreexca- vación (%)
XC-8770-SE	Sin voladura controlada	3.25 kg/m ³	1.20 kg/t	19.50 kg/ml	1043 kcal/t	24.88%
	Voladura controlada	2.43 kg/m ³	0.90 kg/t	14.59 kg/ml	706 kcal/t	7.25%
	Variación (▼)	0.82 kg/m ³	0.31 kg/t	4.91 kg/ml	337 kcal/t	17.63%
GA-8365-S	Sin voladura controlada	3.08 kg/m ³	1.12 kg/t	18.53 kg/ml	973 kcal/t	37.17%
	Voladura controlada	2.17 kg/m ³	0.81 kg/t	13.05 kg/ml	631 kcal/t	8.72%
	Variación (▼)	0.91 kg/m ³	0.31 kg/t	5.48 kg/ml	342 kcal/t	24.85%

La “Figura 29” muestra la variación del factor de energía promedio por disparo y la tendencia de la sobreexcavación antes y después de la aplicación de la voladura controlada en la población de estudio (XC-8770-SE y GA-8365-S).

Figura 29

Resultados del factor de energía y su relación con la sobreexcavación



La “Tabla 32” muestra un resumen de la fragmentación promedio por disparo resultante de la voladura, antes (voladura convencional) y después de aplicar voladura controlada en la población de estudio (XC-8770-SE y GA-8365-S).

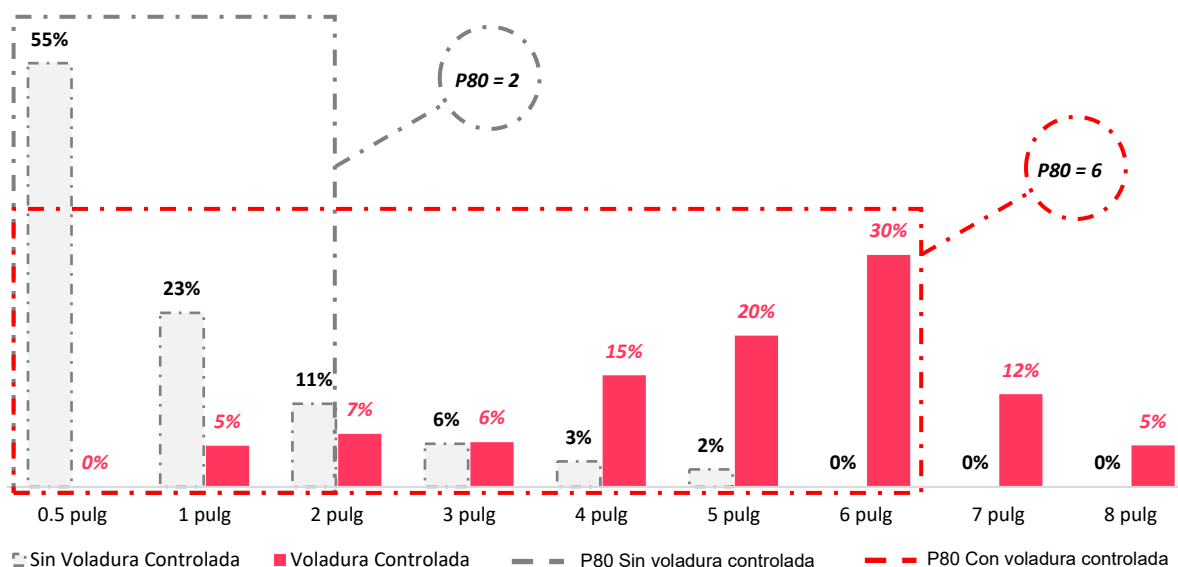
Tabla 32

Comparación de resultados de los indicadores de fragmentación

<i>Labor</i>	<i>Granulometría óptima</i>	<i>Sin Voladura Controlada</i>	<i>Voladura Controlada</i>	<i>Variación</i>
XC-8770-SE	6 pulg	2 pulg	6 pulg	4 pulg
GA-8365-S	4 pulg	1 pulg	4 pulg	3 pulg

Figura 30

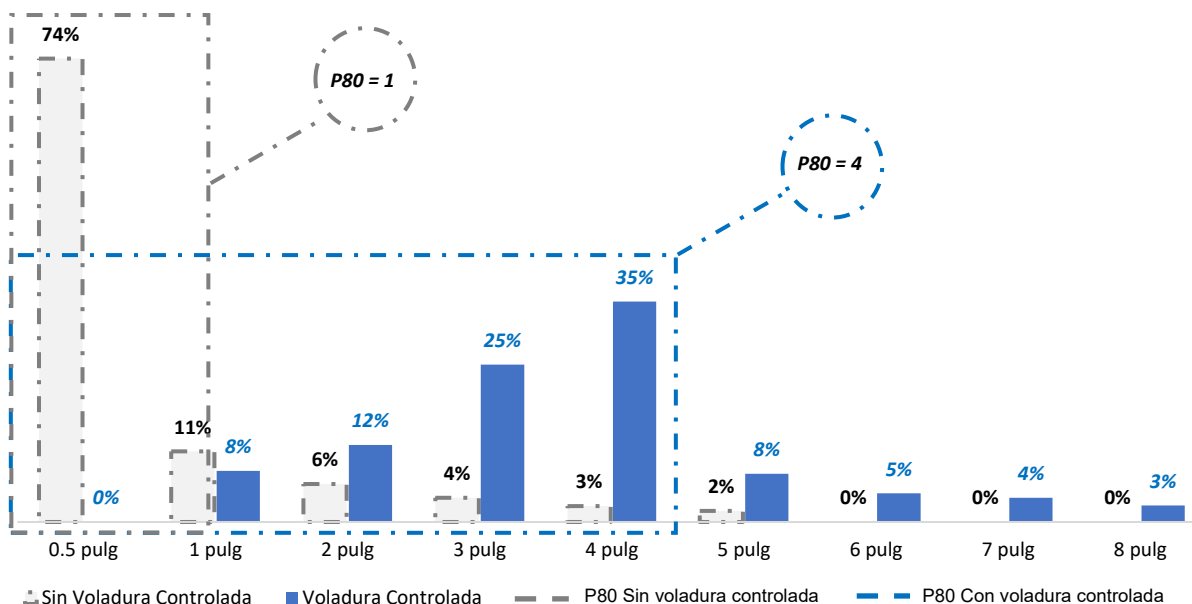
Comparativo de los indicadores de fragmentación promedio por disparo antes y después de la aplicación de voladura controlada en el cruce XC-8770-SE



En la “Figura 30”, se observa que, sin la aplicación de voladura controlada, se obtenía un P80 de 2 pulgadas, sin fragmentos mayores a 6 pulgadas y con un 55 % de fragmentos menores a 1 pulgada del volumen total de la carga. Con la aplicación de voladura controlada, el P80 aumentó a 6 pulgadas, se redujo el porcentaje de finos menores a 2 pulgadas, y los fragmentos de 6 pulgadas representaron el mayor volumen de la carga (30 %).

Figura 31

Comparativo de los indicadores de fragmentación promedio por disparo antes y después de la aplicación de voladura controlada en la galería GA-8365-S

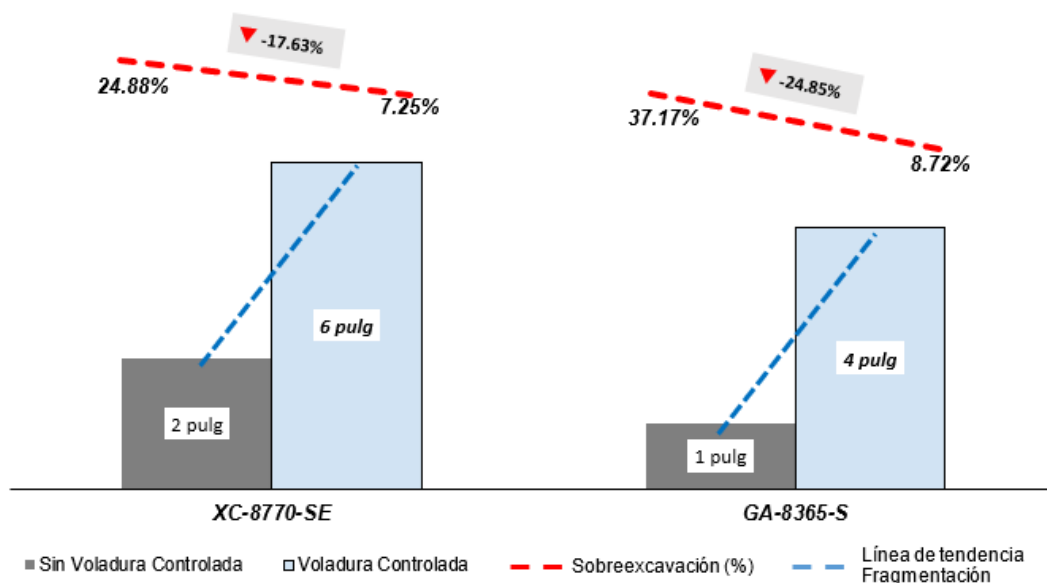


En la “Figura 31”, se observa que, sin la aplicación de voladura controlada, el P80 era de 1 pulgada, no hubo fragmentos mayores a 5 pulgadas y con un 74 % de fragmentos menores a 1 pulgada del volumen total de la carga. Tras la aplicación de voladura controlada, el P80 aumentó a 6 pulgadas, se redujo el porcentaje de finos menores a 2 pulgadas, y los fragmentos de 4 pulgadas representaron el mayor volumen de la carga (35 %).

La “Figura 32” presenta un resumen de los indicadores de fragmentación y la tendencia de la sobreexcavación antes (voladura convencional) y después de la aplicación de voladura controlada en la población de estudio (XC-8770-SE y GA-8365-S).

Figura 32

Resultados de los indicadores de fragmentación y su relación con la sobreexcavación



Del análisis de los indicadores de fragmentación y sobreexcavación en la “Figura 32” se observa una tendencia inversamente proporcional en la población de estudio (XC-8770-SE y GA-8365-S). En el crucero XC-8770-SE, con un P80 promedio de 2 pulgadas, se registraba una sobreexcavación promedio de 24.88 %. Tras la aplicación de voladura controlada, el P80 aumentó a 6 pulgadas y la sobreexcavación se redujo a 7.25 %

Esta tendencia se repite en la galería GA-8365-S, donde inicialmente, sin voladura controlada, el P80 promedio era de 1 pulgada, acompañado de una sobreexcavación promedio de 37.17 %. La aplicación de voladura controlada aumentó el P80 a 4 pulgadas, mientras que la sobreexcavación se redujo a 8.72 %.

7.2 Contrastación de Hipótesis

7.2.1 Planteamiento de hipótesis

Hipótesis nula (Ho): La aplicación de la voladura controlada no permitirá disminuir significativamente la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

Hipótesis alterna (Hi): La aplicación de la voladura controlada permitirá disminuir significativamente la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

7.2.2 Estimación intervalos de confianza y nivel de significancia

Para validar la distribución de los datos en la prueba de T-Student, uno de los supuestos es que estos deben seguir una distribución normal. Se utilizó una muestra de 30 datos de voladura antes de la optimización y 30 datos aplicando voladura controlada. Con estas muestras, se validó la distribución de los datos con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia de 5% ($\alpha = 0.05$), como se muestra a continuación:

Tabla 33

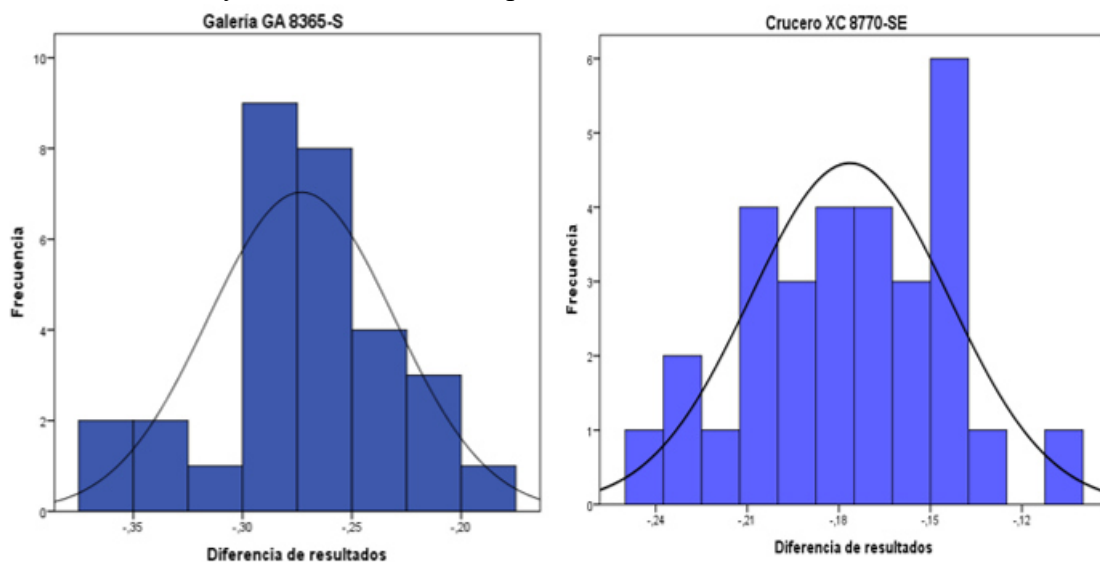
Intervalos de tendencia central y desviación estándar de la diferencia de resultados de sobreexcavación.

Medidas	Diferencia de resultados GA-8365-S	Diferencia de resultados XC 8770-SE
Media	-27.31%	-17.64%
Desviación estándar	0.425	0.032
Error estándar	0.077	0.005
IC al 95% Límite inferior	-28.90%	-18.86%
IC al 95% Límite superior	-25.73%	-16.43%

Nota: Resultado de análisis mediante IBM SPSS Statistics 2023

Figura 33

Tendencia central y desviación estándar para la diferencia de resultados de la sobre excavación



Nota: Resultado de análisis mediante IBM SPSS Statistics 2023

7.2.3 Validación de la distribución normal de datos

A continuación, analizamos el valor p resultante de la diferencia de resultados de sobreexcavación en el crucero XC-8770-SE y la galería GA-8365-S, y posteriormente comparamos los resultados con el nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 34

Significancia de probabilidad de Shapiro Wilk para diferencia de resultados de sobreexcavación

Shapiro-Wilk	Estadístico	N° de muestras	Sig. de probabilidad
Diferencia galería GA-8365-S	0.126	30	0.635*
Diferencia crucero XC 8770-SE	0.090	30	0.756*

Nota: Resultado de la probabilidad de Shapiro Wilk en IBM SPSS Statistics 2023

Para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad en la distribución de los datos, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk como se muestra en la “Tabla 34”. Los valores de probabilidad obtenidos fueron $p = 0.635$ para la galería GA-8365-S y $p = 0.756$ para el crucero XC-8770-SE, siendo ambos valores mayores que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$. En consecuencia, se verifica que los datos de sobreexcavación siguen una distribución normal. Este resultado permite continuar

con el análisis estadístico, dado que el supuesto de normalidad es un requisito fundamental para la aplicación de pruebas paramétricas como la prueba de T-Student.

7.2.4 *Prueba t-Student de la diferencia de los resultados de sobreexcavación*

Tras validar la normalidad de los datos de sobreexcavación mediante la prueba de Shapiro-Wilk, se procedió a aplicar la prueba paramétrica de T-Student utilizando un enfoque bilateral (dos colas). Esta prueba permite determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa en los niveles de sobreexcavación antes y después de la aplicación de la voladura controlada. Los resultados obtenidos se muestran en la “Tabla 35”

Tabla 35

Prueba t-Student de la diferencia de los resultados de sobreexcavación

	Nº muestras	Desviación estándar	t	Sig.(bilateral)
Diferencia galería GA-8365-S	30	0.425	35.169	0.000
Diferencia crucero XC-8770-SE	30	0.032	29.665	0.000

Nota: Resultado de la prueba t-Student en IBM SPSS Statistics 2023

Dado que el valor p obtenido fue igual a 0.000 en ambos casos, menor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la **hipótesis alterna H_1** : La aplicación de la voladura controlada permitirá disminuir significativamente la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

7.2.5 *Decisión estadística*

Conclusiones estadísticas

Mediante el análisis estadístico realizado con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia del 5%, utilizando la prueba T-Student, se ha confirmado que la

implementación de voladura controlada permite reducir significativamente la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.

Contrastación de las hipótesis específicas

El uso de cargas desacopladas y espaciadas, fue clave para reducir la sobreexcavación. En el crucero XC-8770-SE, la sobreexcavación registró una disminución significativa de 3.08 kg/m³ a 2.17 kg/m³, representando una reducción del 29.5%. Por su parte, en el crucero XC-8770-SE se redujo de 3.25 kg/m³ a 2.43 kg/m³, lo que equivale a una reducción del 25.2%.

Mediante el índice RMR, fue determinante para la selección de la técnica de voladura controlada. Para un RMR de 31-40 en la galería GA-8365-S, se seleccionó y aplicó las técnicas de voladura de recorte y voladura amortiguada mientras que en el crucero XC-8770-SE, con un RMR de 41-50, se usaron técnicas similares adaptadas a una mayor resistencia de la roca. La reducción observada en la sobreexcavación en ambas labores confirma que la calidad del macizo rocoso es un factor clave en la selección y efectividad de la técnica de voladura.

Se ha demostrado que, al reducir el factor de carga, se logró no solo una fragmentación más uniforme, sino también una disminución de la sobreexcavación. En el crucero XC-8770-SE, el factor de carga se ajustó de 3.25 kg/m³ a 2.43 kg/m³ (25.2% de reducción), mientras que en la galería GA-8365-S se redujo de 3.08 kg/m³ a 2.17 kg/m³ (29.5% de reducción). Además, los tamaños de fragmentación mejoraron de 2 a 6 pulgadas en el crucero XC-8770-SE y de 1 a 5 pulgadas en la galería GA-8365-S. La reducción observada en la sobreexcavación en ambas labores estudiadas corrobora que tanto los indicadores de fragmentación como los parámetros de control de voladura están relacionados con la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales.

7.3 Discusión de resultados

Callupe (2022) que logró una reducción del 15.21% en la sobrerotura mediante la implementación de parámetros de diseño de voladura controlada y su aplicación considerando las propiedades del macizo rocoso.

La selección y aplicación específica de técnicas de voladura controlada como la voladura de recorte mediante cargas desacoplada, espaciadas y rimado de los taladros de arranque fue fundamental para el éxito en la reducción de la sobreexcavación. Estos resultados están alineados con los hallazgos de **Castillo y Aymara (2022)** quienes encontraron que al aplicar la voladura controlada de recorte se logró una sobrerotura promedio de 6.72%, de una sobrerotura inicial de 15.51% reduciendo el volumen de material fragmentado en un 8.79% por disparo. Esta mejora se debe a la correcta aplicación de voladura de recorte mediante cargas desacopladas, espaciadas y la distribución óptima de carga explosiva en las voladuras.

A diferencia de los resultados obtenidos por **Belito & Belito (2021)** quien reportó mejora en la reducción de la sobreexcavación de 17.87% mediante la aplicación de la técnica de voladura controlada de Precorte, en nuestro estudio esta técnica no tuvo éxito en su aplicación. Esta diferencia puede explicarse por la alta especialización en la perforación mediante los equipos de jumbos, respecto a las perforadoras manuales JackLeg.

En el presente estudio, la identificación y caracterización de la calidad del macizo rocoso fue crucial para seleccionar la técnica adecuada de voladura controlada. Se determinó que para un RMR 31-40 en la galería GA-8365-S era recomendable utilizar las técnicas de voladura de recorte y voladura con carga desacoplada y espaciadas (amortiguada), mientras que para un RMR 41-50 en el XC-8770-SE se sugirió el uso de las mismas técnicas, siendo la diferencia entre ambas la disposición de la cantidad de carga explosiva, la distribución de retardos y la secuencia de salida

de la voladura según la malla de perforación. Estos resultados son congruentes con los de **Fernández y Castro** (2021) que para macizos rocosos de calidad media (RMR entre 30-50), recomiendan la aplicación de técnicas de voladura controlada como la voladura amortiguada (cushion blasting) y voladura en abanico, junto con una optimización específica en el patrón de retardos lo que permite una reducción en la sobreexcavación de hasta 30%, mejorando la fragmentación y el factor de carga.

La aplicación de técnicas de voladura controlada permitió optimizar los parámetros de control de voladura y mejorar la fragmentación. En la galería GA-8365-S, el factor de carga promedio se redujo de 3.08 kg/m^3 a 2.17 kg/m^3 , logrando una disminución del 29.5%. En el crucero XC-8770-SE, el factor de carga se ajustó de 3.25 kg/m^3 a 2.43 kg/m^3 , lo que representa una reducción del 25.2%. Estos resultados son similares a los obtenidos por **Bejarano** (2022), que mediante la aplicación de voladura controlada logró reducir el factor de carga en un 22%.

En cuanto a la fragmentación, factor de carga y su relación con la sobreexcavación, según **Varela** (2022) la reducción del factor de carga, disminuye la sobreexcavación y mejora la fragmentación. La sobreexcavación, así como la fragmentación deficiente estuvieron relacionadas con los factores de carga, debido al empleo de una carga excesiva de explosivos, lo cual generó un incremento en la sobreexcavación, La mejora significativa se logró al ajustar la carga explosiva de 40.5 kg a 38.18 kg en el crucero XC-8770-SE y de 31.65 kg a 27.66 kg en la galería GA-8365-S, lo que carga en 0.82 kg/m^3 en el crucero y en 0.91 kg/m^3 en la galería. Esta variación permitió mejorar la fragmentación de 2 pulgadas a 6 pulgadas en el crucero XC-8770-SE y optimizar la distribución del material P80 en volumen, donde inicialmente el 55% de la carga era menor a 0.5 pulgadas; con la optimización, la mayor parte (70%) de la carga se encontraba entre 6 y 7 pulgadas. Esta tendencia se repitió en la GA-8365-S, donde la fragmentación mejoró de 1 pulgada a 5

pulgadas, la carga inicial menor a 0.5 pulgadas que representaba el 75% del total cambió, de modo que, el material de 4 a 5 pulgadas representó el 65% de la carga total.

CAPÍTULO VIII:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de voladura controlada ha permitido una disminución significativa de la sobreexcavación, validando la hipótesis de que su aplicación optimiza y controla los límites de excavación.
- La aplicación de técnicas de voladura controlada, como la voladura de recorte y la voladura amortiguada redujo la sobreexcavación en 17.63% en la galería GA-8365-S y del 27.77% en el crucero XC-8770-SE, esto demuestra que existe una relación positiva entre la técnica de voladura controlada y la cantidad de sobreexcavación generada.
- La calidad del macizo rocoso, medida en términos de RMR, influyó directamente en la selección de la técnica de voladura controlada. Para macizos de calidad media (RMR 31-50), técnicas como la voladura de recorte y la voladura amortiguada permitieron controlar la sobreexcavación y optimizar la fragmentación.
- Los resultados en la optimización del factor de carga de 3.08 kg/m³ a 2.17 kg/m³ en el crucero XC-8770-SE y de 3.25 kg/m³ a 2.43 kg/m³ en la galería GA-8365-S, mejoraron la fragmentación de 2 pulgadas a 6 pulgadas en el crucero XC-8770-SE y de 1 pulgada a 5 pulgadas en la GA-8365-S; lo cual permitió una reducción de 17.63% en la galería GA-8365-

S y del 27.77% en el crucero XC-8770-SE. Estos resultados demuestran que existe una relación positiva entre los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura con la reducción de la sobreexcavación

8.2. Recomendaciones

- Monitorear la capacitación al personal involucrado en las operaciones mineras, mediante talleres interactivos, así como implementar programas de capacitación haciendo énfasis en los beneficios técnicos, operativos y de seguridad que garanticen la continuidad y éxito en las operaciones mineras.
- Establecer las técnicas de voladura controlada en función de la calidad del macizo rocoso. Para macizos de calidad media (RMR 31-50), es conveniente emplear voladura de recorte y amortiguada, mientras que, para macizos de alta calidad, la voladura en abanico y otras técnicas específicas podrían maximizar la estabilidad y eficiencia. Esto debe estar con un análisis detallado de las características del macizo rocoso, así como una actualización constante de la calidad de roca por el área especializada. La capacitación constante in situ del personal sobre la identificación y caracterización del macizo rocoso asegurará el éxito en las operaciones.
- Monitorear y ajustar constantemente el factor de carga para minimizar la sobreexcavación. Esto implica adaptar la cantidad y distribución de carga explosiva según las condiciones del macizo rocoso y los requisitos de fragmentación. Para mejorar el control y la precisión, se recomienda la incorporación de sistemas de voladura electrónica avanzada que permitan un control fino de los tiempos de detonación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Belito, Y., & Belito, J. (2021). *Reducción de sobrerotura mediante el uso de voladura controlada del Precorte en el crucero CX 1160 del Nivel 2360 de la zona candelaria de la Cia. Consorcio Minero Horizonte – 2019 [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional UNH. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3907>*
- Bejarano, J. (2021). *Voladura controlada y su influencia en la disminución de sobrerotura en labores subterráneas - Minera Aurífera Retamas S.A. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7887>*
- Callupe, T. (2022). *Determinación de parámetros de voladura controlada para reducir la sobrerotura en la cortada carlos de la mina San Roque FM – 2021 [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional UNASAM. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5027>*
- Chiappetta, R. F. (1990). *Energy Partitioning and Optimization in Blasting. Proceedings of the 16th Annual Conference on European Agency for Safety and Health at Work [EU-OSHA]. (2020). Mining and quarrying: Safe work for youth. Luxembourg: Publications Office of the European Union.*
- Explosives and Blasting Technique. International Society of Explosives Engineers.*
- Castillo, E., & Aymara, I. (2022). *Aplicación de voladura controlada con recorte para reducir la sobrerotura en el crucero 2682 del nivel 1815 de la um. acumulación parcoy n°01. consorcio minero horizonte – 2021 [Tesis de grado. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio Institucional UNAMBA. <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1119>*
- Del Carpio, J. (2021). *Mejora de la fragmentación de roca mediante el uso de carga explosiva en El Taco – Sociedad Minera Cerro Verde [Tesis de pregrado. Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional de UNSA. Arequipa. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/13056>*
- Erkan, H. (2013). *Optimizing overbreak prediction based on geological parameters comparing multiple regression analysis and artificial neural network. Tunnelling and Underground Space Technology(38). 161-169. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.06.003>*
- Exsa. (2022). *Manual práctico de voladura (Quinta ed.). Lima. <https://minedeskcorp.com/libro-manual-practico-de-voladura-exsa/>*

- Famesa. (2019). *Manual de perforación y voladura*. Surco: Letras e Imágenes.
<https://www.mineriadelibrosycursos.com/2020/01/manual-de-perforacion-y-voladura-2019.html>
- Gómez, L., & Pérez, D. (2022). *Evaluación de la fragmentación en voladuras subterráneas*. *Revista de Minería y Geología*.
- Hustrulid, W. A. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining. Vol. 1: General Design Concepts*. A. A. Balkema.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. CRC Press.
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (2003). *Surface Blast Design*. Prentice Hall.
- Langefors, U., & Kihlström, B. (1978). *The modern technique of rock blasting*. John Wiley & Sons.
- López, D. (2020). *Estudio sobre las principales voladuras de contorno. optimización y desarrollo de una metodología de cálculo relacionada con los parámetros geomecánicos del terreno [Tesis de maestría. Universidad de Cantabria]*. Repositorio Abierto de la UC. Cantabria. <http://hdl.handle.net/10902/19151>
- Persson, P., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press.
- Rodríguez, A., Fernández, J., & Vega, P. (2020). *Optimización de la fragmentación en voladuras subterráneas mediante P80*. *Revista Ingeniería Minera*.
- Rojas, M. (2019). *Estudio comparativo de la sobreexcavación en desarrollos horizontales con ANFO versus desarrollos realizados con emulsión en la mina esmeralda. división el teniente. Codelco Chile. Trabajo de titulación. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile*.
- Salcedo, P. (2019). *Control de las operaciones unitarias de perforación y voladura. mediante la reducción de la carga explosiva y optimización del diseño. Unidad Minera MACDESA. [Tesis de pregrado. UNSA]. Repositorio Institucional UNSA. Arequipa*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10962>
- Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid.
- Vilca, J. (2019). *Voladura controlada y reducción porcentual de dilución y costos en tajeo con uso de exsablock en la minera aurífera retamas S.A. - 2019 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]*. Repositorio Institucional UNAP, Puno. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3221288>

ANEXO A

A-1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

A-2: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

A-3: FORMATOS DE CONTROL

A-4: EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS

A-5: ESTÁNDAR DE PERFORACIÓN

A-6: PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS

A-7: VOLADURA EN LABORES MINERAS

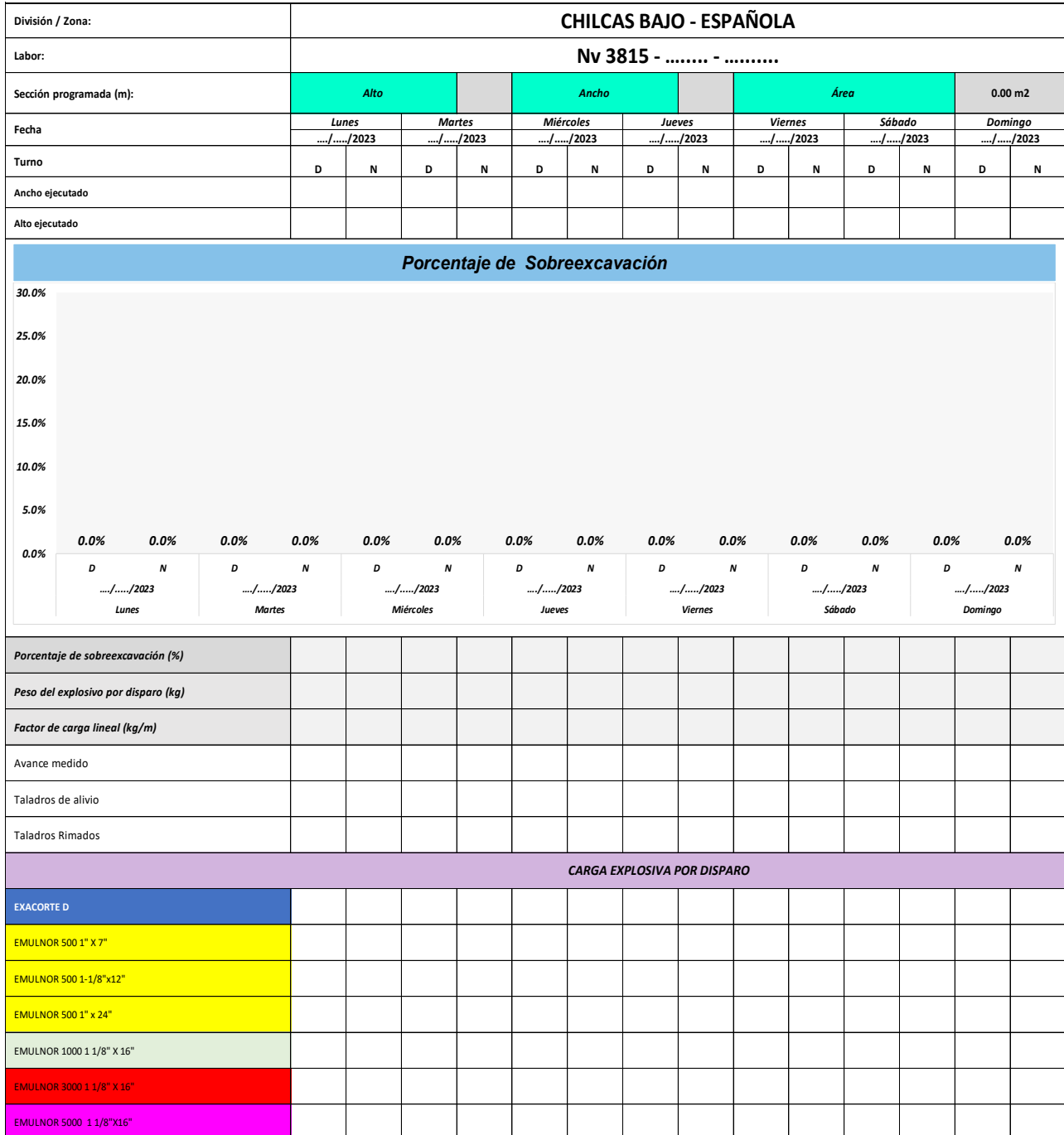
A-1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
General	General	General	<u>Independiente:</u> Voladura controlada <u>Dependiente:</u> Reducción de la sobreexcavación	P80 (Pulgadas) Factor de carga (kg/m³) Factor de potencia (kg/t) Factor de avance(kg/m) Factor de energía (KCAL/t) RMR Volumen de material sobre excavado (m3) Porcentaje de sobreexcavación (%)	Tipo de investigación: Aplicada Diseño de investigación: Experimental Enfoque: Cuantitativo Población: 7 labores lineales en operación de la zona Española Muestra: XC-8770-SE GA-8365-S
¿Cómo afecta la aplicación de la voladura controlada en la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?	Aplicar voladura controlada para reducir la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.	La aplicación de la voladura controlada permitirá disminuir significativamente la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.			
Específicos	Específicos	Específicos			
¿Qué impacto tiene la calidad del macizo rocoso en la selección de la técnica de voladura controlada utilizada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?	Analizar la relación entre la técnica de voladura controlada y la cantidad de sobreexcavación generada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.	Existe una relación directa entre la técnica de voladura controlada aplicada y la cantidad de sobreexcavación generada en las labores lineales.			
¿Cómo se relacionan los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura con la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?	Investigar el impacto de la calidad del macizo rocoso en la selección de la técnica de voladura controlada utilizada en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.	La calidad del macizo rocoso tiene un impacto significativo en la selección de la técnica de voladura controlada y en la reducción de la sobreexcavación.			
¿Cómo se relacionan los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura con la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023?	Evaluar la relación entre los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura con la reducción de la sobreexcavación en las labores lineales de la zona Española, Minera Aurífera Retamas, 2023.	Los indicadores de fragmentación y los parámetros de control de voladura están relacionados con la reducción de la sobreexcavación en las labores			

A-2: MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

<i>Variables</i>	<i>Definición Conceptual</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Técnica</i>	<i>Instrumento</i>
<i>Independiente:</i> Voladura Controlada	La voladura controlada es un conjunto de técnicas cuya finalidad es evitar daños al macizo rocoso. obtener superficies óptimas y estables mediante el uso óptimo de la energía del explosivo (Exsa, 2022)	P80 (Pulgadas) Factor de carga (kg/m ³) Factor de potencia (kg/t) Factor de avance(kg/m) Factor de energía (kcal/t) Índice RMR (Rock Mass Rating)	Observación directa Registro Fotográfico Muestreo de Fragmentación Análisis de Registros de Voladura	Registros Diarios Cámara Fotográfica Ficha de observación Hojas de cálculo (Excel)
<i>Dependiente:</i> Reducción de la sobreexcavación	Sobreexcavación es la rotura fuera de los límites de una sección o perfil establecida. Se mide en volumen según el avance del disparo y se compara en porcentaje respecto al volumen ideal a obtener. (Famesa, 2019)	Volumen de material sobreexcavado (m3) Porcentaje de sobreexcavación (%)	Observación directa Levantamiento Topográfico Revisión de Registros de Voladura	Cámara Fotográfica Wincha y cordel Hojas de cálculo (Excel)

[illegible]



A-4: EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS



A-4: EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS



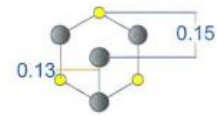
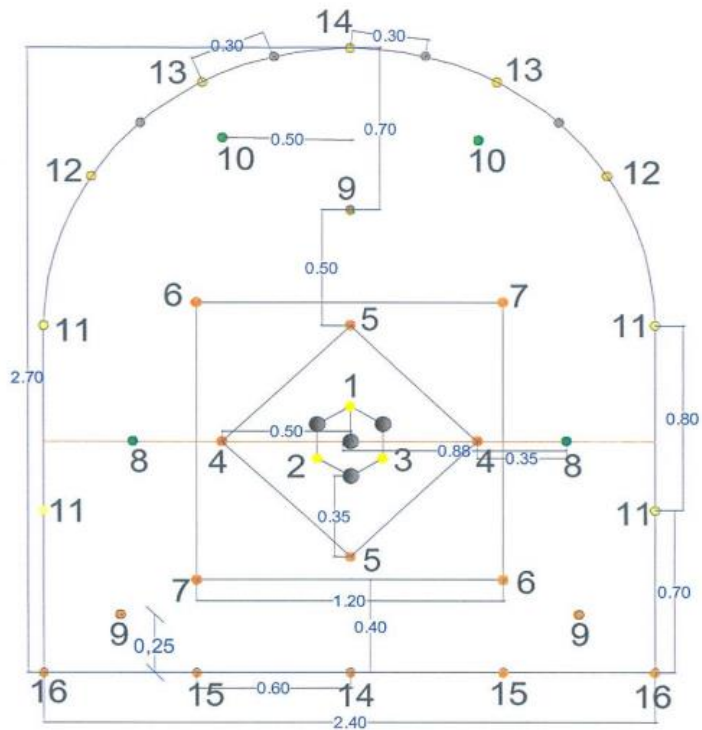
A-4: EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS



A-4: EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS



A-5: ESTÁNDAR DE PERFORACIÓN



●●● Taladros cargados
● Taladros de alivio

FANEL LP	
Número	Cantidad
1	1
2	1
3	1
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	3
10	2
11	4
12	2
13	2
14	2
15	2
16	2

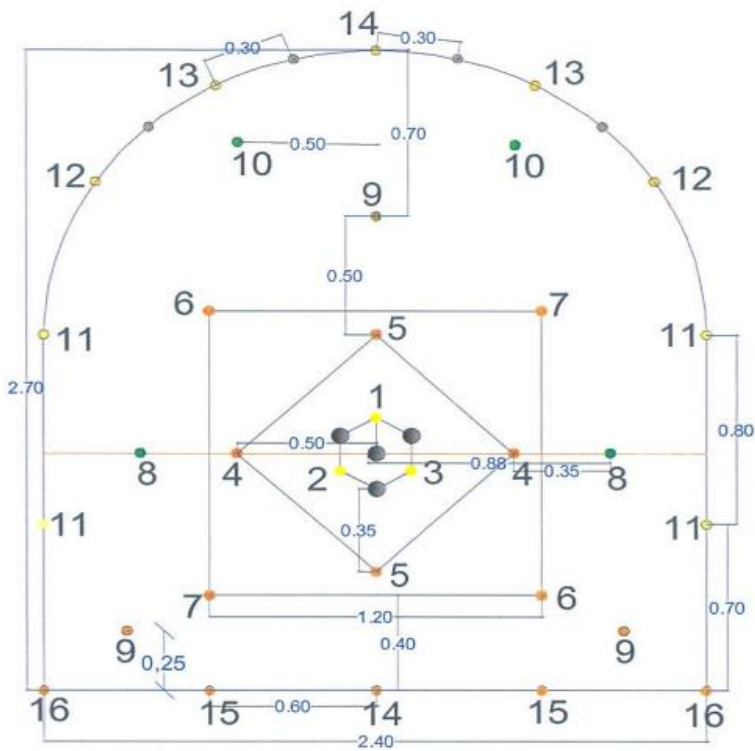
RESULTADOS	UND.	8ft
Avance	mts.	2.3
Eficiencia de Avance	%	100.0
Densidad del mineral	Tn/m3	2.85
Factor de Avance	Kg/m	14.4
Factor de carga	Kg/m3	2.5
Factor de potencia	Kg/tn.	0.9

DISTRIBUCIÓN DE CARGA EXPLOSIVA POR TALADRO					
		8 ft			
TIPO	CANTIDAD TALADROS	EMULNOR 5000 1 1/8 x 16	EMULNOR 3000 1 1/8 x 16	EMULNOR 1000 1 1/8 x 16	EMULNOR 500 1 1/8 x 12
Arranque	3	12			
1° Ayuda	4		16		
2° Ayuda	4		16		
3° Ayuda	1		2	2	
Ayuda cuadrador	2			8	
Ayuda corona	2			8	
Hastial	4			4	12
Ayuda arrastre	2		8		
Corona	5				20
Arrastre	5		20		
TOTAL	32	12	62	22	32

PERFORACIÓN	UND	8 ft
Longitud de perforación	mts.	2.3
Taladros cargados	und.	32
Taladros rimados	und.	4
Taladros alivio	und.	4
Diámetro de broca	mm.	38
Diámetro Rimado	mm.	64

VOLADURA	UND.	8ft
Emulsió 5000 1/8x16	cart.	12
Emulsió 3000 1/8x16	cart.	62
Emulsió 1000 1/8x16	cart.	75
Emulsió 500 1/8x12	cart.	32
Total explosivos	Kg	33.1
Cordón detonante 5p	mts.	35
Mecha rápida	mts.	0.1
Fanel LP 3.0m	Pzas.	32
Carmex 7	Pzas	2

A-5: ESTÁNDAR DE PERFORACIÓN



FANEL UP	
Numero	Cantidad
1	1
2	1
3	1
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	3
10	2
11	4
12	2
13	2
14	2
15	2
16	2

RESULTADOS	UND.	8ft
Avance	mts.	2.3
Eficiencia de Avance	%	100.0
Densidad del mineral	Tn/m3	2.85
Factor de Avance	Kg/m	14.4
Factor de carga	Kg/m3	2.5
Factor de potencia	Kg/tn.	0.9

DISTRIBUCIÓN DE CARGA EXPLOSIVA POR TALADRO					
TIPO	CANTIDAD TALADROS	8 ft			
		EMULNOR 5000 1 1/8 x 16	EMULNOR 3000 1 1/8 x 16	EMULNOR 1000 1 1/8 x 16	EMULNOR 500 1 1/8 x 12
Arranque	3	12			
1° Ayuda	4		16		
2° Ayuda	4		16		
3° Ayuda	1		2	2	
Ayuda cuadrador	2			8	
Ayuda corona	2			8	
Hastial	4			4	12
Ayuda arrastre	2		8		
Corona	5				20
Arrastre	5		20		
TOTAL	32	12	62	22	32

PERFORACIÓN	UND.	8 ft
Longitud de perforación	mts.	2.3
Taladros cargados	und.	32
Taladros rimados	und.	4
Taladros alivio	und.	4
Diámetro de broca	mm.	38
Diámetro Rimado	mm.	64

VOLADURA	UND.	8ft
Emulnor 5000 1 1/8x16	cart.	12
Emulnor 3000 1 1/8x16	cart.	62
Emulnor 1000 1 1/8x16	cart.	22
Emulnor 500 1 1/8x12	cart.	32
Total explosivos	Kg	33.1
Cordón detonante 5p	mts.	35
Mecha rápida	mts.	0.1
Fanel UP 3.0m	Pzas.	32
Carmex 7	Pzas.	2

A-6: PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS

A. Densidad relativa (g/cm³)

Producto	Resultado	Promedio	Ficha técnica
Emulnor 500 1 1/4" x 12"	0.89	0.87	0.90 ± 0.15
	0.85		
Emulnor 1000 1 1/4" x 16"	1.16	1.17	1.13 ± 0.10
	1.18		
Emulnor 3000 1 1/4" x 16"	1.21	1.20	1.14 ± 0.10
	1.19		
Emulnor 5000 1 1/4" x 16"	1.22	1.23	1.16 ± 0.10
	1.23		

B. Velocidad de detonación

Producto	Resultado	Promedio	Ficha técnica
Emulnor 500 1" x 24"	3.610	3.678	3500 ± 300
	3.745		
Emulnor 500 1 1/8" x 12"	3.558	3.546	
	3.533		
Emulnor 1000 1 1/4" x 16"	4.424	4.455	4500 ± 300
	4.485		
Emulnor 3000 1 1/4" x 16"	4.651	4.558	4400 ± 300
	4.464		
Emulnor 5000 1 1/4" x 16"	4.494	4.469	4200 ± 300
	4.444		

A-7: VOLADURA EN LABORES MINERAS

1. PERSONAL

- 1.1. Maestro 1 o 2 mina perforista
- 1.2. Ayudante 1 o 2 mina perforista

2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

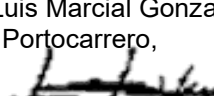
Mameluco con cintas reflectivas o camisaco y pantalón con cintas reflectivas. protector tipo sombrero. barbiquejo. lentes de seguridad. respirador. cartucho para polvo y/o gases. protector auditivo. guantes de nitrilo. botas jebe con punta de acero. correa porta lámpara.

3. EQUIPO / HERRAMIENTAS / MATERIALES.

Lámpara minera. Punzón de madera o cobre. Cucharilla. 02 juegos de barretillas. Pico. Lampa. Cuchillo. Fósforos. Atacadores de madera. Escalera. Explosivos y accesorios. Soplete. Empalmes. Plataforma. Soga de 1" para la línea de vida. Cinta aislante.

4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Verificar y registrar en la Inspección Diaria de Labores (Check List) y desarrollar el Iperc Continuo. las condiciones de la labor. con el fin de también verificar las condiciones del terreno antes de entrar en la zona de trabajo si fuese el caso.
- 4.2 Verificar la ventilación mediante el monitoreo donde las concentraciones de gases deberán estar por debajo de los Límites Máximos Permisibles. de lo contrario instalar la manga de ventilación **(Exposición a Gases)**.
- 4.3 Garantizar el orden y la limpieza en el área de trabajo.
- 4.4 El maestro y ayudante deben contar con fósforos.
- 4.5 Realizar el desate de rocas siguiendo los pasos descritos en el PETS-MIN-1 de Desatado de Rocas **(Desprendimiento de rocas)**.
- 4.6 En caso se requiera. proteger las instalaciones de agua. aire comprimido. mangas de ventilación y equipos o tableros usar tablas y/o cortinas protectoras ante el impacto; en el caso de cable eléctrico hacer anticipadamente una orden de trabajo para el personal de mantenimiento eléctrico. quienes desenergizarán el cable **(Golpeado por) (Contacto con Energía Eléctrica)**.
- 4.7 El supervisor responsable debe coordinar con las labores vecinas la secuencia de disparo respetando el horario establecido.

Preparado por: Ángel Huayra Rojas 	Revisado por: Jorge Zúñiga Castellares 	Revisado por: Pablo Arca Cordero 	Suscrito por: Ing. Luis Marcial Gonzales Vera Portocarrero, 
Cargo: Asistente Residente	Cargo: Residente	Ing. Jefe de Seguridad	Cargo: Gerente General
Fecha: 01/01/2023			Fecha: 02/01/2023

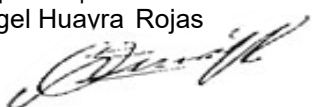
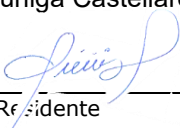
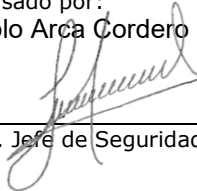
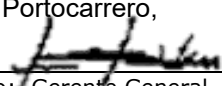
- 4.8 Trasladar la dinamita y los accesorios en mochilas por separado. a una distancia mínima de 10 m **(Explosión)**.
- 4.9 Colocar los explosivos y accesorios en la labor separados a una distancia mínima de 3 m **(Explosión)**.
- 4.10 Sopletear los taladros:
 - Empalmar la manguera de aire al soplete utilizando empalmes.
 - Usar obligatoriamente los lentes de seguridad.
- 4.11 En caso los taladros queden obstruidos. limpiarlos con cucharilla.
- 4.12 Desatar la roca suelta **(Desprendimiento de Rocas)**.
- 4.13 Preparar el cebo (cartucho de dinamita con "armada") con punzón de madera o cobre. Asegurarse que el hueco donde se alojará el fulminante coincida lo más cerca posible con el eje longitudinal del cartucho **(Explosión)**.
- 4.14 Cargar los taladros colocando primero los cebos haciendo que el fulminante tenga vista hacia la columna del explosivo **(Explosión)**.
- 4.15 Utilizar atacador de madera y atacar en la columna cada 2 cartuchos **(Explosión)**.
- 4.16 Colocar espaciadores de carrizo en la corona. intercalándolos con cartuchos explosivos.
- 4.17 Colocar tacos de detritos al final de la carga de columna procurando que éste quede en la boca del taladro.
- 4.18 Utilizar atacador de madera para confinar los detritos **(Explosión)**.

Voladura no eléctrica con guía de seguridad (Carmex):

- 4.19 Usar guías no menores a un metro ochenta (6') de longitud.
- 4.20 Amarrar los conectores con mecha rápida utilizando el gancho de plástico anaranjado y manteniendo una distancia mínima de 0.2 m de amarre a amarre para garantizar la secuencia de salida.
- 4.21 Encender la mecha rápida entre dos personas.

Voladura no eléctrica (FANEL y MININEL)

- 4.22 Enganchar los conectores "J" al cordón detonante. manteniendo ángulos rectos del circuito de cordón detonante. el cual hace un circuito cerrado y se hace un puente horizontal central.
- 4.23 Amarrar dos "Carmex" al cordón detonante utilizando la cinta aislante y debe estar libre del contacto con la roca **(Explosión)**.
- 4.24 Encender las mechas simultáneamente.
- 4.25 Abrir la línea de aire comprimido (tercera línea) en las labores que no cuentan con mangas de ventilación. **(Proyección de Partículas). (Golpeado por)**.

Preparado por: Ángel Huayra Rojas 	Revisado por: Jorge Zúñiga Castellares 	Revisado por: Pablo Arca Cordero 	Suscrito por: Ing. Luis Marcial Gonzales Vera Portocarrero, 
Cargo: Asistente Residente	Cargo: Residente	Ing. Jefe de Seguridad	Cargo: Gerente General
Fecha: 01/01/2023			Fecha: 02/01/2023

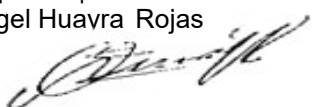
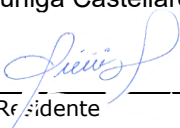
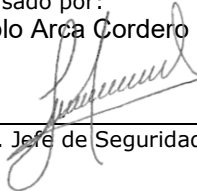
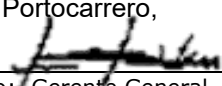
- 4.26 Bloquear el acceso principal con avisos de "Peligro Disparo".
- 4.27 El explosivo sobrante se retorna al polvorín principal **(Explosión)**.
- 4.28 La inspección del disparo se realizará en la siguiente guardia entrante. para poder verificar posibles fallas de la voladura. previo a ello. la labor a inspeccionar debe estar ventilada y regado la carga. **(Explosión)**.

5. RESTRICCIONES

- 5.1 No realizar la voladura si las instalaciones de cable eléctrico y/o tuberías de aire y agua no estén protegidas adecuadamente o desinstaladas.
- 5.2 No se realizará la voladura si no se coordinó la secuencia de disparo con las labores adyacentes.
- 5.3 No manipular explosivos y accesorios de voladura si no se cuenta con el carnet de SUCAMEC.
- 5.4 No realizar el disparo fuera del horario establecido.
- 5.5 No se debe retornar a la labor luego del chispeo hasta la siguiente guardia.
- 5.6 No utilizar elementos metálicos para el cebado de los cartuchos de dinamita.
- 5.7 En el amarre de los conectores no se debe morder el conector. ni se debe presionar el conector con la roca.
- 5.8 En el caso de chimeneas. el personal no deberá ingresar después del disparo ni después de uno (1) o más días de estar paralizada. sin contar con el Permiso Escrito de Trabajo Alto Riesgo (PETAR). La autorización de ingreso se hará previa medición de gases y oxígeno.
- 5.9 No salir de prisa después de realizar el chispeo.

CAMBIOS RESPECTO A LA VERSIÓN ANTERIOR

Punto	Cambios realizados
4.21	Se modifíco
5.9	Se agrego

Preparado por: Ángel Huayra Rojas 	Revisado por: Jorge Zúñiga Castellares 	Revisado por: Pablo Arca Cordero 	Suscrito por: Ing. Luis Marcial Gonzales Vera Portocarrero, 
Cargo: Asistente Residente	Cargo: Residente	Ing. Jefe de Seguridad	Cargo: Gerente General
Fecha: 01/01/2023			Fecha: 02/01/2023