REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Optimización de costos operativos en el crucero CX-2040 mediante un modelo de malla de perforación y voladura en la labor convencional Candelaria Alto Molino - Nicolás Valcárcel

Tesis presentada por el Bachiller:

Mamani Quispe, Luis Fernando

ORCID: 0009-0008-9672-9531

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor (a):

Mg. Montesinos Solorzano, Cesar Gerardo

ORCID: 0009-0001-8007-7862

Arequipa - Perú

2026

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 14 de Diciembre del 2025

Dictamen: 014274-C-EPIM-2025

Visto el borrador del expediente 014274, presentado por:

2017100761 - **MAMANI QUISPE LUIS FERNANDO**

Titulado:

OPTIMIZACIÓN DE COSTOS OPERATIVOS EN EL CRUCERO CX-2040 MEDIANTE UN MODELO DE MALLA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN LA LABOR CONVENCIONAL CANDELARIA ALTO MOLINO - NICOLÁS VALCÁRCEL

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

40902304 - **LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK**
DICTAMINADOR

40379481 - **PAREDES SALAS OMAR WILLY**
DICTAMINADOR

29635304 - **MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO**
DICTAMINADOR

OPTIMIZACIÓN DE COSTOS OPERATIVOS EN EL CRUCERO CX-2040 MEDIANTE UN MODELO DE MALLA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN LA LABOR CONVENCIONAL CANDELARIA ALTO MOLINO - NICOLÁS VALCÁRCEL

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	9%	1%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	4%
2	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	bibliotecas.unsa.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	1library.co Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

DEDICATORIA

A mi familia, por ser mi refugio constante y la fuente de mi fortaleza.

A mi madre, por su amor infinito y por creer en mí incluso en los momentos de mayor incertidumbre.

A mi padre, por su esfuerzo incansable y por sostener a nuestra familia con entrega y sacrificio, hasta donde Dios se lo permitió.

A todas las personas que confiaron en mí cuando yo mismo dudé, y a quienes me acompañaron con palabras, silencios y gestos de apoyo sincero.

A los sueños que se transformaron en metas, y a las metas que hoy se materializan en logros.

Finalmente, a la versión de mí que perseveró y no se rindió.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de la presente tesis.

A mis padres, en especial a mi madre, por su amor, comprensión y sacrificio constantes, por creer siempre en mí y motivarme a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Este logro es tan suyo como mío.

A mi padre, por su esfuerzo y dedicación, que me permitieron acceder a la educación que hoy hace posible el cumplimiento de este sueño profesional.

A mis hermanos, por ser mi motivación permanente y recordarme que, con perseverancia, los sueños pueden hacerse realidad.

A Alejandra, mi compañera, por estar siempre a mi lado, brindándome apoyo, ánimo y confianza en cada etapa de este proceso, especialmente cuando más lo necesitaba.

A la Universidad Católica de Santa María, por la formación académica y profesional brindada a lo largo de mis años de estudio, la cual ha sido fundamental para consolidar los conocimientos y competencias que se reflejan en el presente trabajo de investigación.

Finalmente, agradezco de manera especial a la empresa Labor Convencional Candelaria, por la confianza y el apoyo brindados, así como por los recursos y conocimientos proporcionados, que hicieron posible el desarrollo de esta tesis y contribuyeron a mi crecimiento profesional.

.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

RESUMEN

El presente estudio se centró en optimizar los procesos de perforación y voladura en una mina subterránea con el objetivo de reducir los costos operativos. A través de un análisis detallado de la malla de perforación existente, se identificaron diversas ineficiencias que afectaban directamente los costos de producción. Estas ineficiencias incluían una distribución no óptima de los taladros, falta de paralelismo y un consumo excesivo de explosivos. Para solucionar estas problemáticas, se implementó un modelo matemático de Roger Holmberg, el cual permitió rediseñar la malla de perforación y optimizar la distribución de los taladros. Los resultados obtenidos demostraron una reducción significativa en el consumo de explosivos y en los costos por metro de avance, lo que se traduce en una mejora sustancial en la eficiencia del proceso de fragmentación de la roca. La investigación se llevó a cabo en una sección específica de la mina, caracterizada por un tipo de roca de dureza media y donde se utilizaron equipos de perforación convencionales, lo que valida la aplicabilidad de esta propuesta en condiciones reales de operación.

Palabras claves: *Perforación, voladura, optimización.*

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ABSTRACT

This study focused on optimizing the drilling and blasting processes in a subway mine with the objective of reducing operating costs. Through a detailed analysis of the existing drilling grid, several inefficiencies were identified that directly affected production costs. These inefficiencies included non-optimal drill hole distribution, lack of parallelism and excessive explosives consumption. To solve these problems, a Roger Holmberg mathematical model was implemented to redesign the drilling grid and optimize drill hole distribution. The results obtained showed a significant reduction in the consumption of explosives and in the costs per meter of advance, which translates into a substantial improvement in the efficiency of the rock fragmentation process. The research was carried out in a specific section of the mine, characterized by a medium hard rock type and where conventional drilling equipment was used, which validates the applicability of this proposal in real operating conditions.

Keywords: *Drilling, blasting, optimization.*

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 2

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION 3
   1.1. Planteamiento del problema 3
   1.2. Objetivos de investigación 3
      1.2.1. Objetivo general 3
      1.2.2. Objetivos específicos 4
   1.3. Preguntas de investigación 4
      1.3.1. Pregunta general 4
      1.3.2. Pregunta especificas 4
   1.4. Línea de investigación 4
      1.4.1. Optimización de Procesos Mineros 5
      1.4.2. Ingeniería de Perforación y Voladura 5
      1.4.3. Seguridad Operativa y Control de Riesgos en Minería Subterránea 5
      1.4.4. Gestión de Costos y Eficiencia Económica en la Minería 5
   1.5. Palabras clave 6
   1.6. Aporte del desarrollo de la tesis 6
   1.7. Justificación 6
      1.7.1. Justificación académica 6
      1.7.2. Justificación económica 6
      1.7.3. Justificación ambiental 7

CAPÍTULO II 8

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 9
   2.1. Bases teóricas de la investigación 9
      2.1.1. Perforación y voladura 9
      2.1.2. Clasificación Geomecánica del Macizo Rocoso 9
      2.1.3. Perforación de rocas 9

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.1.4. Ingeniería para esquematizar la malla de perforación 9
2.1.5. Dibujo de arranques 10
2.1.6. Configuración geométrica de la malla de perforación 13
2.1.7. Voladura 13
2.1.8. Ventilación 14
2.1.9. Ventilación subterránea 14
2.1.10. Clasificación geomecánica 15
2.2. Antecedentes 17
2.2.1. Internacionales 17
2.2.2. Nacionales 18
2.3. Hipótesis 19
2.4. Variables 19
2.4.1. Variable independiente 19
2.4.2. Variable dependiente 19

CAPÍTULO III 20

3. MARCO METODOLÓGICO 21
3.1. Naturaleza y alcance de la investigación 21
3.2. Procedimiento de investigación 21
3.3. Población y muestra de estudio 21
3.3.1. Población 21
3.3.2. Muestra 21
3.4. Herramientas y procedimientos de recopilación de datos 21
3.4.1. Técnicas de recopilación de datos 21
3.4.2. Procedimiento de recopilación de datos 21
3.4.3. Herramientas de recopilación de datos 22
3.5. Métodos para procesar la información 22
3.6. Métodos de comparación de datos 22
3.6.1. Registro directo 22
3.6.2. Análisis de registros 22
3.6.3. Validación de Datos 22
3.6.4. Análisis de Datos 22
3.6.5. Trabajo de Campo 23
3.6.6. Trabajo de Gabinete 23
3.6.7. Resultados y Validación de Hipótesis 23

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO IV 24

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES 25
4.1. Problemática e informe técnico en las labores de desarrollo 25
4.1.1. Datos 25
4.1.2. Cálculo de RMR para cada tipo de roca en los frentes de avance 25
4.1.3. Ventilación en los frentes de avance 27
4.1.4. Evaluación de la malla antes de realizar la reducción 28
4.1.4.1. Diseño empírico de la malla 28
4.1.4.2. Factor de carga lineal 31
4.2. Análisis durante el diseño empírico de la malla 33
4.2.1. Presencia de irregularidades en el frente de avance 33
4.2.2. Marcado de malla de perforación 34
4.2.3. Mal secuenciamiento de la voladura 34
4.2.4. Uso excesivo de explosivo 34
4.2.5. Falta de uso de tacos 35
4.2.6. Mal diseño de arranque 35
4.2.7. Mala distribución de taladros 36
4.2.8. Falta de capacitación en software JK Simblast 36
4.3. Optimización de malla de perforación y voladura para reducir costos operativos 36
4.3.1. Diseño mediante el método matemático de Roger Holmberg 36
4.3.2. Resultados en los cálculos por la teoría de Holmberg 46
4.4. Pruebas de voladura con datos de la nueva malla 51
4.4.1. Diseño y Cálculo de la Nueva Malla 51
4.4.1.1. Cálculos previos 51
4.4.1.2. Peso del explosivo 52
4.4.1.3. Parámetros de voladura 52
4.5. Pruebas de voladura en campo 53
4.5.1. Pintado de la malla de perforación 53
4.5.2. Información obtenida 53
4.5.2.1. Parámetros obtenidos en la nueva malla 53
4.5.2.2. Perforación del frente 54
4.5.2.3. Carguío e inicio del chispeo en el frente de trabajo 55
4.5.2.4. Supervisión del frente después de la voladura 57
4.5.2.5. Avance lineal por campaña de optimización 57
4.6. Optimización de costos con la nueva malla de perforación 60
4.6.1. Costos unitarios de P y V 60

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

4.6.2. Costos de las herramientas 60
4.6.3. Costos de EPPS 61
4.6.4. Costos de explosivos y accesorios 61
4.7. Comparación de información en el diseño de la malla 62
4.7.1. Análisis del diseño de malla usado en la mina 62
4.7.2. Análisis del diseño de malla rediseñada 63
4.8. Discusión de resultados en la perforación 63
4.8.1. Perforación antes del rediseño 63
4.8.2. Perforación después de rediseño 63
4.9. Discusión de resultados de la voladura 66
4.9.1. Carga lineal antes del rediseño de la malla 66
4.9.2. Carga lineal después de rediseñar 66
4.9.3. Resultado de voladura en CX-2040 67
4.10. Análisis de costos 68
4.10.1. Costos anteriores al rediseño de la malla 68
4.10.2. Reducción de costos con el rediseño de la malla 71
4.10.3. Comparación de costos anteriores y posteriores al rediseño 74
CONCLUSIONES 75
RECOMENDACIONES 76
GLOSARIO 77
REFERENCIAS 78

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos del crucero 25
Tabla 2 Resumen de puntuación rmr roca tipo II, III y IV 26
Tabla 3 Resumen de parámetros en malla antigua 31
Tabla 4 Cálculos de antigua malla 33
Tabla 5 Parámetros de diseño en la malla 46
Tabla 6 Datos para el cálculo de rediseño de malla 53
Tabla 7 Parámetros obtenidos en el rediseño de malla 54
Tabla 8 Parámetros de voladura 54
Tabla 9 Avance lineal mes de setiembre 58
Tabla 10 Costos en herramientas 60
Tabla 11 Costos en EPP 61
Tabla 12 Costos de explosivos y accesorios 62
Tabla 13 Cantidad de talados antes del rediseño 62
Tabla 14 Parámetros de voladura para cada tipo de roca 66
Tabla 15 Parámetros de perforación para cada tipo de roca 67
Tabla 16 Costos unitarios de perforación y voladura antes del rediseño 69
Tabla 17 Costos unitarios de perforación y voladura después del rediseño 71

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de perforación rotopercutiva 10
Figura 2 Muestra la generación de la apertura en un frente 10
Figura 3 Localización de arranque corte en pirámide 11
Figura 4 Corte en pirámide o diamante 11
Figura 5 Corte en cuña de arrastre (drag or draw cut) 12
Figura 6 Corte en cuña de arrastre 12
Figura 7 Corte quemado 13
Figura 8 Distribución de taladros 13
Figura 9 Vista frontal del sistema de ventilación 28
Figura 10 Diseño antiguo de malla de perforación 29
Figura 11 Mala distribución de taladros 29
Figura 12 Diseño empírico de malla para los frentes, tipo de arranque rompe boca 30
Figura 13 Irregularidades en el diseño de malla 34
Figura 14 Carguío sin taco 35
Figura 15 Carguío sin taco 35
Figura 16 Plano rediseño de malla en tipo de roca II 48
Figura 17 Plano rediseño de malla en tipo de roca III 49
Figura 18 Plano rediseño de malla en tipo de roca IV 50
Figura 19 Pintado de malla en frente 53
Figura 20 Arranque tipo corte quemado 55
Figura 21 Columna explosiva antes del rediseño 55
Figura 22 Columna explosiva después del rediseño- roca tipo II 55
Figura 23 Columna explosiva después del rediseño- roca tipo III 56
Figura 24 Columna explosiva después del rediseño- roca tipo IV 56
Figura 25 Inicio del disparo 56
Figura 26 Voladura 57
Figura 27 Asimetría en los taladros de arranque 63
Figura 28 Arranque con taladros simétricos 64
Figura 29 Avance diario antes del rediseño 64
Figura 30 Avance diario después del rediseño 65
Figura 31 Avances comparados con la planificación 65
Figura 32 Avances comparados con la planificación 68
Figura 33 Comparación de costos antes y después del rediseño 74
Figura 34 Gráfico de comparación de costos 74

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

INTRODUCCIÓN

La perforación y voladura, a pesar de ser procesos indispensables en la minería, presentan desafíos significativos en términos de costos y eficiencia. La optimización de las mallas de perforación y voladura busca abordar estos desafíos mediante la identificación de la configuración óptima de taladros y la cantidad de explosivo requerida. Al lograr una optimización adecuada, se pueden obtener múltiples beneficios, como la reducción de costos, la mejora en la fragmentación de la roca, el aumento de la productividad y la disminución del impacto ambiental, contribuyendo así a una operación minera más sostenible y rentable.

El optimizar las mallas involucra un enfoque multidisciplinario que combina geomecánica, ingeniería de explosivos y simulación numérica. Al estudiar las propiedades mecánicas de las rocas y simular el proceso de fragmentación, se puede diseñar mallas de perforación y voladura más eficientes. Esta optimización permite obtener múltiples beneficios, como la reducción del consumo de explosivos, la disminución del número de taladros necesarios y la obtención de un tamaño de partícula más adecuado para las operaciones posteriores.

Los beneficios de optimizar las mallas de P y V son multifacéticos. Más allá de la reducción de costos, esta práctica mejora significativamente la seguridad en las operaciones mineras, disminuye la generación de residuos y prolonga la vida útil de los equipos. Al optimizar la fragmentación del material, se incrementa la eficiencia de los procesos posteriores, contribuyendo a una mayor rentabilidad y sostenibilidad de la operación minera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO I

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del problema

En la unidad minera Candelaria Alto Molino – Nicolás Varcácel, el desarrollo del crucero CX-2040 se ejecuta mediante el método convencional de perforación y voladura. Sin embargo, en los últimos periodos operativos se han identificado incrementos significativos en los costos asociados a estas actividades, principalmente debido a una baja eficiencia en la malla de perforación empleada, variabilidad en el consumo de explosivos y sobre–roturas que repercuten en el rendimiento general del ciclo de minado. Actualmente, la malla de perforación utilizada en el crucero CX-2040 no presenta un diseño optimizado en relación con las condiciones geomecánicas del macizo rocoso ni con los requerimientos geométricos de la labor. Esta deficiencia genera problemas como: avance efectivo por disparo inferior al planificado, elevado factor de carga, consumo excesivo de accesorios (tacos, cordón detonante, booster), incremento de la sobrerotura y daños en el contorno, lo que deriva en mayores costos de fortificación y limpieza posterior. A ello se suma la falta de un modelo técnico-económico que permita evaluar, comparar y seleccionar la malla de perforación más eficiente para la labor, teniendo en cuenta tanto los parámetros de ingeniería como los costos asociados. La ausencia de un modelo de optimización ha ocasionado que las labores de perforación y voladura en el crucero CX-2040 operen con un enfoque empírico, lo que dificulta el control de indicadores clave como: avance por disparo, costo por metro lineal, costo por tonelada fracturada, eficiencia del explosivo y estabilidad del contorno. Como consecuencia, los costos operativos se incrementan y el rendimiento del desarrollo disminuye, afectando la productividad del turno y retrasando el cumplimiento del programa de labores.

Por lo expuesto, surge la necesidad de desarrollar un modelo de malla de perforación y voladura optimizada que permita reducir los costos operativos en el crucero CX-2040, incrementando la eficiencia del ciclo perforación–voladura–desatado–limpieza. Este modelo deberá considerar las características geomecánicas del macizo rocoso, los parámetros de perforación, el tipo y cantidad de explosivo, así como la geometría y estabilidad de la labor, con el fin de obtener avances sostenidos, menor sobrerotura y costos controlados.

1.2. Objetivos de investigación

1.2.1. Objetivo general

Optimizar las operaciones de perforación y voladura mediante un análisis para reducir los costos de minado en el frente del Crucero CX-2040 de la labor minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la situación actual de las operaciones de perforación y voladura en el crucero CX-2040 de la labor minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.
- Maximizar el avance en el crucero, minimizando costos aplicando modelo matemático en la labor minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.
- Determinar la cantidad de carga explosiva adecuada para reducir los costos de voladura en el frente de las labores de desarrollo en la minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.
- Evaluar los costos unitarios de perforación y voladura en el crucero 2040 en un antes y después de implementar mejoras en perforación y voladura en la minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.

1.3. Preguntas de investigación

1.3.1. Pregunta general

¿Cómo se pueden optimizar las operaciones de perforación y voladura en el frente del Crucero CX-2040 de la labor minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel para reducir los costos de minado de manera eficiente y segura?

1.3.2. Pregunta especificas

- ¿Es posible mejorar la perforación y voladura para maximizar el avance en el crucero, minimizando costos de la convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel?
- ¿Cuáles deben ser las habilidades de medición y verificación en las operaciones unitarias que se deben analizar con la finalidad de mejorar la productividad en la labor minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel?
- ¿Cuál es la forma de desarrollar un estándar en las operaciones de perforación y voladura en minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel?
- ¿Cuál es el diseño de malla más eficiente en la Veta Verónica convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel?

1.4. Línea de investigación

Optimización de costos operativos en el crucero CX-2040 mediante un modelo de malla de perforación y voladura en la labor convencional Candelaria Alto Molino - Nicolás de Piérola Varcárcel", se enmarca dentro de las líneas de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

de Minas de la Universidad Católica de Santa María, orientadas al desarrollo sostenible, innovación tecnológica y eficiencia productiva en las operaciones mineras.

De acuerdo con la naturaleza del estudio, este trabajo se vincula directamente con las siguientes líneas de investigación:

1.4.1. Optimización de Procesos Mineros

Esta línea está orientada al análisis técnico y económico de los procesos unitarios de la minería con el fin de incrementar la productividad y reducir los costos operativos.

La investigación se adscribe a esta línea al diseñar y evaluar un modelo de malla de perforación y voladura que permita optimizar el consumo de explosivos, reducir el sobre quiebre y mejorar el avance lineal, generando eficiencia económica en la labor convencional del crucero CX-2040.

1.4.2. Ingeniería de Perforación y Voladura

Esta línea comprende el estudio técnico de los métodos de arranque de roca, parámetros de perforación, secuencias de voladura y control de fragmentación.

La tesis contribuye a esta línea mediante la evaluación y modelamiento de la malla de perforación y voladura, ajustando los parámetros geométricos y de carga explosiva en función de las condiciones geomecánicas de la labor, lo cual permitirá minimizar trabajos y maximizar el rendimiento operativo.

1.4.3. Seguridad Operativa y Control de Riesgos en Minería Subterránea

Esta línea busca garantizar la seguridad de las operaciones mineras mediante la gestión de riesgos asociados a procesos de perforación y voladura.

El estudio se relaciona con esta línea al proponer un modelo de optimización que mejore la estabilidad de la labor, reduzca proyecciones, vibraciones, gases residuales y posibles incidentes durante la voladura, en cumplimiento con el D.S. N° 024-2016-EM y normas internacionales de seguridad minera (OSHA, NIOSH).

1.4.4. Gestión de Costos y Eficiencia Económica en la Minería

Esta línea se enfoca en la administración de recursos, control presupuestal y análisis de costos en los procesos extractivos.

La presente tesis aporta a esta línea al evaluar el costo-beneficio del modelo propuesto, determinando la reducción de costos por metro perforado, la disminución del consumo unitario de

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

explosivos, y la mejora del rendimiento operativo global, en concordancia con los principios de gestión minera moderna y sostenibilidad económica.

1.5. Palabras clave

Perforación, voladura, optimización.

1.6. Aporte del desarrollo de la tesis

El desarrollo de este proyecto aporta significativamente a la optimización de las operaciones de perforación y voladura en la labor minera convencional del Crucero CX-2040. Mediante el diseño e implementación de un modelo matemático riguroso para la malla de perforación, se logra una reducción directa en los costos operativos al maximizar la eficiencia en el uso de explosivos y mejorar la fragmentación de la roca.

Además, contribuye a incrementar el avance productivo de la labor minera, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de los recursos y menor tiempo de explotación.

Desde el punto de vista técnico, el proyecto incorpora técnicas avanzadas de diseño y simulación, apoyadas en análisis estadísticos y geomecánicos, que permiten un control más preciso y confiable de las voladuras. Esto mejora la estabilidad del frente de trabajo y asegura operaciones más seguras para los trabajadores.

En términos sociales y ambientales, el proyecto impulsa prácticas más responsables al minimizar el impacto ambiental asociado con las voladuras, reduciendo vibraciones y emisiones contaminantes, lo que favorece la sostenibilidad de la mina y la relación con la comunidad.

Finalmente, se fortalece la capacidad de innovación tecnológica y gestión operativa en la empresa minera, potenciando la rentabilidad y competitividad a largo plazo mediante la aplicación de modelos de mejora continua basados en resultados científicos y técnicos.

1.7. Justificación

1.7.1. Justificación académica

La presente investigación se justifica desde el punto de vista académico, porque el proceso de desarrollo y resultados servirán como un referente para otras investigaciones que aborden el mismo problema, pudiéndose aplicar en otras empresas mineras, quedando el presente estudio como un aporte al conocimiento académico ya que podrá ser utilizado como un antecedente para futuras investigaciones.

1.7.2. Justificación económica

La reducción de costos operativos es un factor clave para la viabilidad y rentabilidad del proyecto minero. Al optimizar el diseño de malla y proceso de voladura, se maximiza el aprovechamiento del mineral con menor gasto en explosivos, maquinaria y tiempo de operación. Esto no solo mejora

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

la productividad, sino que permite reinvertir en innovación y responsabilidad ambiental, asegurando la continuidad del negocio en un mercado competitivo.

1.7.3. Justificación ambiental

Aunque la investigación se centra en la optimización de costos, también presenta una justificación ambiental importante. Una malla de perforación mal diseñada suele generar sobrerotura, incremento de finos, mayor producción de gases de voladura y un consumo excesivo de explosivos, lo que impacta indirectamente en el ambiente de trabajo subterráneo.

La optimización de la malla permitirá:

* Reducir el volumen de roca fracturada innecesariamente, disminuyendo la generación de materiales excedentes.

- Minimizar el uso de explosivos y, por tanto, la emisión de gases post-voladura que afectan la calidad del aire en la labor.
- Disminuir el impacto sobre el contorno de la labor, reduciendo la necesidad de fortificación adicional y el uso de materiales como pernos, malla metálica y shotcrete.
- Fomentar prácticas de perforación más eficientes y sostenibles, alineadas con la minería responsable.

Estos beneficios contribuyen a mejorar las condiciones ambientales internas y reducen la huella operativa, en concordancia con estándares de seguridad y sostenibilidad ambiental en minería subterránea.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO II

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Bases teóricas de la investigación

2.1.1. Perforación y voladura

La P y V son procesos fundamentales en la minería subterránea que requieren una comprensión profunda de los principios geomecánicos y de los métodos de excavación. (López Jimeno, 2005)

2.1.2. Clasificación Geomecánica del Macizo Rocoso

Los comportamientos mecánicos de los macizos rocosos están influenciados por diversos factores: propiedades de la matriz rocosa (resistencia, dureza, porosidad), discontinuidades (fracturas, juntas, fallas), grado de alteración, tensiones in situ y existencia de agua (Urzúa, Alejano, & Pérez, 2010). Mediante la clasificación geomecánica se evalúa la calidad del macizo rocoso, lo que posibilita elegir los métodos de excavación más adecuados y eficientes (Urzúa et al., 2010).

2.1.3. Perforación de rocas

La perforación es el proceso de creación de orificios en la roca para introducir explosivos (Artigas, 2011). Existen diferentes métodos de perforación: percusión (adecuada para rocas duras y fracturadas), rotación (eficiente en rocas blandas y homogéneas) y rotopercusión (versátil y adaptable) (Artigas, 2011).

Para elegir el método de perforación depende del tipo de roca, la profundidad de los barrenos, la producción requerida y las condiciones geomecánicas del macizo rocoso (Artigas, 2011).

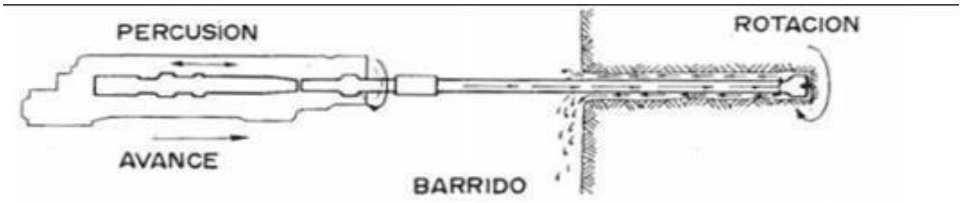
2.1.4. Ingeniería para esquematizar la malla de perforación

El diseño de la malla de perforación debe ser personalizado para cada situación, considerando las características geomecánicas del macizo rocoso y los objetivos específicos de producción (López Jimeno, 2005). Parámetros como la densidad de taladros, el diámetro de los barrenos, el patrón de perforación, la carga de explosivos y la secuencia de detonación deben ser cuidadosamente seleccionados para optimizar la fragmentación y reducir los costos (López Jimeno, 2005). Un diseño de malla adecuado garantizará una operación segura y eficiente (López Jimeno, 2005).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 1 *Representación de perforación rotopercutiva*



Nota. Obtenido de López Jimeno Carlos Ramón (2005)

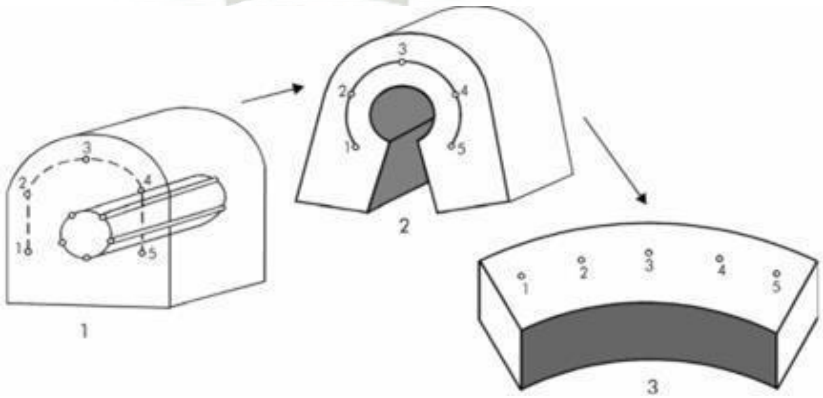
2.1.5. Dibujo de arranques

Es una etapa crucial en la excavación de túneles, ya que condiciona el éxito de las voladuras posteriores (Exsa, 2001). Consiste en la excavación de una cavidad inicial que facilita la fragmentación de la roca y la remoción del material (Exsa, 2001).

La ubicación y dimensiones del trazo de arranque influyen directamente en la facilidad de excavación, consumo de explosivos y estabilidad de la excavación (Exsa, 2001).

La determinación de la ubicación óptima del trazo de arranque requiere un análisis detallado de las características geomecánicas del macizo rocoso, las dimensiones del túnel y las capacidades de los equipos de perforación (Exsa, 2001). Generalmente, se sugiere ubicarlo en la parte central inferior de la sección para facilitar la extracción del material y reducir los riesgos de inestabilidad (Exsa, 2001).

Figura 2 *Muestra la generación de la apertura en un frente*



Nota. Obtenido de Manual práctico de voladura Exsa (2001)

El corte es la primera fase de la voladura y tiene como objetivo crear una cavidad inicial que facilite la fragmentación de la roca y la remoción del material (Exsa, 2001). Existen diferentes técnicas de

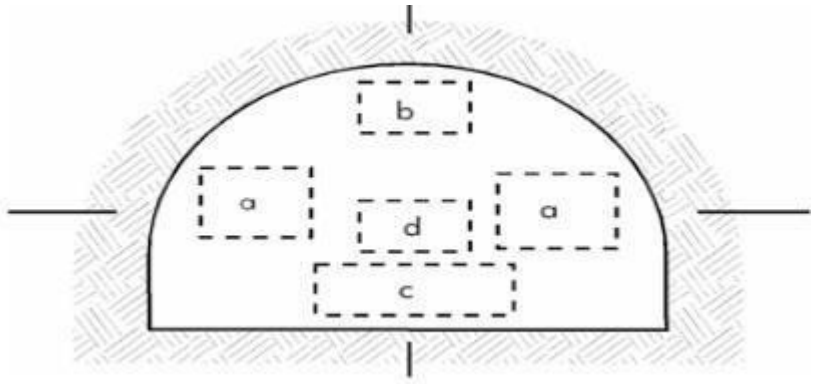
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

corte, que se clasifican según la disposición de los taladros. Los cortes en ángulo, como el corte en V o en pirámide, se utilizan para generar una concentración de esfuerzos en la zona de arranque (Exsa, 2001). Los cortes paralelos, como el corte quemado, se emplean cuando se busca una fragmentación más uniforme (Exsa, 2001).

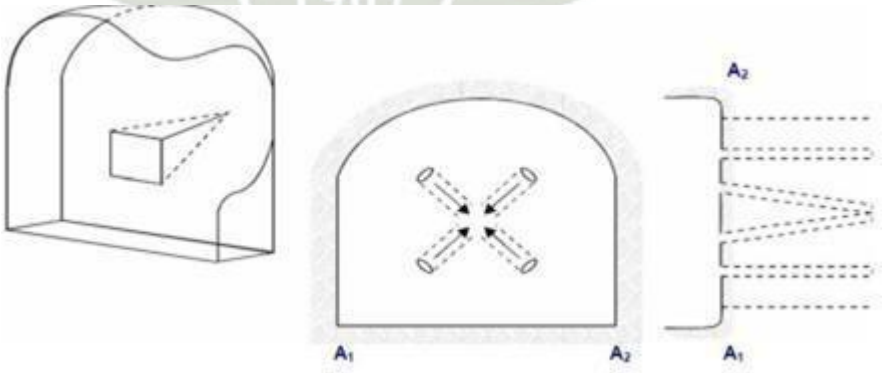
Figura 3 *Localización de arranque Corte en pirámide*



Nota. Obtenido de Manual práctico de voladura Exsa (2001).

El corte en pirámide se caracteriza por una disposición convergente de taladros hacia un punto común en el fondo de la excavación. Al detonar simultáneamente estos taladros, se genera una cavidad de forma piramidal que facilita la fragmentación de la roca y la extracción del material. Esta técnica es ideal para excavaciones de sección reducida, como piques y chimeneas, donde se requiere una concentración de energía en un punto específico.

Figura 4 *Corte en pirámide o diamante*



Nota. Obtenido de Manual práctico de voladura Exsa (2001)

- **Corte en cuña o en "V" (wedge cut).**

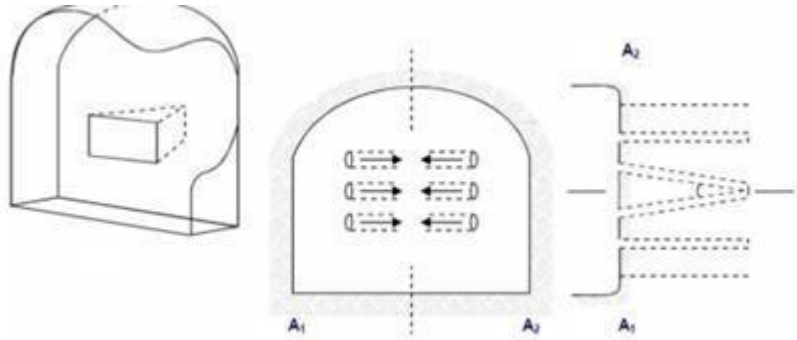
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Consiste en una disposición radial de taladros que convergen en un punto común, formando una cavidad con forma de cuña. Esta técnica es ideal para túneles de sección reducida, ya que facilita la fragmentación de la roca y permite un avance controlado. Sin embargo, requiere equipos especializados para perforar los taladros en ángulo.

Figura 5 *Corte en cuña de arrastre (Drag or draw cut)*



Nota. Obtenido de Exsa (2001).

La voladura en cuña es una técnica de excavación que consiste en perforar taladros en la base de la galería para generar una cavidad y facilitar el desplome del techo. Es ideal para secciones pequeñas y rocas relativamente blandas, pero su aplicación está limitada por el riesgo de inestabilidad en el techo. (Exsa, 2001).

Figura 6 *Corte en cuña de arrastre*

Nota. Obtenido de Manual práctico de voladura Exsa (2001)

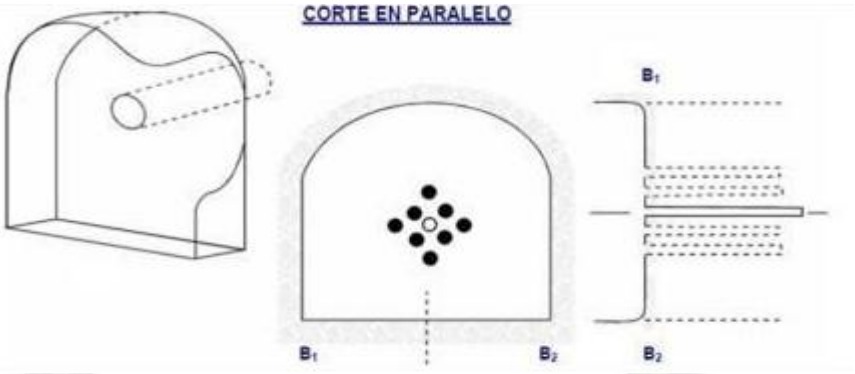
- **Corte en abanicos (Fan cut).**

  El corte en abanico, adecuado para rocas de mediana dureza, ofrece un avance moderado y una fragmentación controlada. El corte de destrozo, a pesar de su eficiencia en la fragmentación, puede generar problemas de sinterización y limitar el avance. El corte quemado, por su flexibilidad, permite adaptarse a diversas condiciones, pero su diseño puede ser más complejo. (Exsa, 2001).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 7 *Corte quemado*

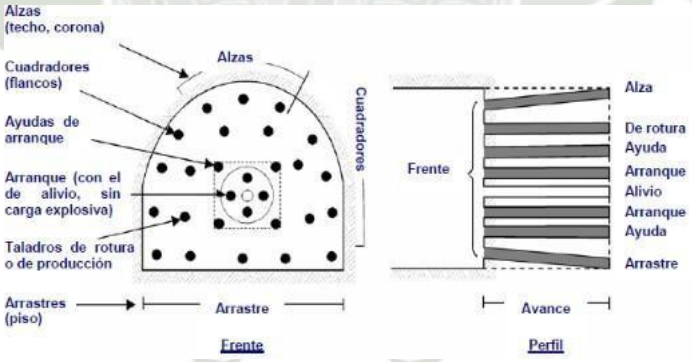


Nota. Obtenido de Manual práctico de voladura Exsa (2001)

2.1.6. Configuración geométrica de la malla de perforación

La voladura ofrece una amplia gama de técnicas, siendo el diseño de la malla de perforación y la secuencia de detonación elementos clave. La disposición de los taladros puede variar desde patrones concéntricos hasta radiales, adaptándose a las características de la roca y los objetivos de la excavación. Los taladros de arranque, ayuda y alza permiten controlar la fragmentación y el avance de la excavación. (Exsa, 2001).

Figura 8 *Distribución de taladros*



Nota. Obtenido de Manual práctico de voladura Exsa (2001)

2.1.7. Voladura

La voladura, un proceso fundamental en la minería, implica la fragmentación de la roca mediante detonaciones controladas (López Jimeno, 2005). La eficiencia de esta operación depende de una planificación cuidadosa y de la selección adecuada de parámetros como la cantidad y tipo de explosivo, la geometría de la malla de perforación y las características geomecánicas del macizo rocoso (López Jimeno, 2005).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La detonación genera ondas de choque que fragmentan la roca y desplazan el material, siendo el tamaño y distribución de los fragmentos un resultado directo de estos factores (López Jimeno, 2005).

Un diseño de voladura eficiente debe garantizar una fragmentación óptima de la roca, considerando las características geomecánicas del macizo rocoso y los objetivos de producción (López Jimeno, 2005). La selección adecuada de explosivos, la densidad de carga y la secuencia de detonación son clave para lograr una fragmentación que facilite las operaciones posteriores y minimice los costos (López Jimeno, 2005).

Además, es fundamental evaluar el impacto ambiental y las restricciones operativas para garantizar una explotación segura y sostenible (López Jimeno, 2005).

La planificación de una voladura es una tarea compleja debido a la multitud de factores interrelacionados que influyen en su resultado (López Jimeno, 2005). El diseño de la malla de perforación y la selección del explosivo son decisiones críticas, pero también es fundamental considerar las características geológicas del macizo rocoso, que son inherentemente variables (Urzúa et al., 2010).

La optimización de una voladura exige una planificación detallada y un profundo conocimiento de los factores que influyen en su desempeño (López Jimeno, 2005)

2.1.8. Ventilación

La legislación peruana, específicamente el Decreto Supremo Nº 024-2016-EM, establece requisitos estrictos para la ventilación en labores mineras (Ministerio de Energía y Minas, 2016). Estos incluyen el suministro de aire limpio y la limitación de contaminantes como polvo, gases y vapores (Ministerio de Energía y Minas, 2016).

Los límites máximos permisibles para estos contaminantes, como el polvo respirable (3 mg/m³), el monóxido de carbono (25 ppm) y el dióxido de carbono (5000 ppm), entre otros, garantizan la salud y seguridad de los trabajadores (Ministerio de Energía y Minas, 2016). Además, se exige una concentración de oxígeno mínima del 19.5% y un caudal de aire adecuado según la altitud y el número de trabajadores (Ministerio de Energía y Minas, 2016).

En otras altitudes la cantidad de aire será de acuerdo a la siguiente escala:

- De 1,500 a 3,000 msnm aumentará en 40% que será igual a 4 m³/min (Ministerio de Energía y Minas, 2016)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- De 3,000 a 4,000 msnm aumentará en 70% que será igual a 5 m³/min (Ministerio de Energía y Minas, 2016)
- Sobre los 4,000 msnm aumentará en 100% que será igual a 6 m³/min (Ministerio de Energía y Minas, 2016)

La velocidad del aire en las labores mineras es un factor crítico para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores (Ministerio de Energía y Minas, 2016; De la Cuadra, 1974). Según el Decreto Supremo Nº 024-2016-EM, esta velocidad debe mantenerse entre 20 y 250 m/min (Ministerio de Energía y Minas, 2016). En el caso de utilizar explosivos como el ANFO, la velocidad mínima se incrementa a 25 m/min para asegurar una adecuada dilución de los gases (Ministerio de Energía y Minas, 2016).

2.1.9. Ventilación subterránea

Un sistema de ventilación en minería subterránea se compone de una red de conductos y túneles por los que circula el aire, impulsado por ventiladores (De la Cuadra, 1974). Este sistema tiene como objetivo renovar el aire viciado, eliminar contaminantes y garantizar un suministro adecuado de oxígeno para los trabajadores (De la Cuadra, 1974).

La eficiencia de este sistema depende de diversos factores, como la disposición de las labores y la capacidad de los ventiladores (De la Cuadra, 1974).

- **Ventilación natural**

  Se produce debido a diferencias de presión y temperatura entre el interior y el exterior de la mina (De la Cuadra, 1974). Factores como la altura de las chimeneas, la orientación de las galerías y las condiciones climáticas externas influyen en el flujo de aire (De la Cuadra, 1974).

  Sin embargo, este tipo de ventilación es impredecible y puede ser insuficiente para garantizar condiciones de trabajo seguras (De la Cuadra, 1974).

- **Ventilación mecánica**

  Utiliza equipos como ventiladores para impulsar el aire a través de la mina, asegurando un flujo constante y controlado (De la Cuadra, 1974). Los sistemas de ventilación mecánica pueden ser principales, que abarcan toda la mina, o auxiliares, que se utilizan en áreas específicas (De la Cuadra, 1974).

  La elección del sistema de ventilación depende de factores como la geología de la mina, la profundidad de las labores, la cantidad de aire requerida y las condiciones climáticas (De la Cuadra, 1974).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.1.10. Clasificación geomecánica

Según Correa (2009) los elementos que afectan la perforación serán las características físicas y mecánicas de las rocas, la presencia de estratos resistentes y rasgos estructurales, además las propiedades físicas y mecánicas importantes de las rocas que afectan la perforación serían:

a) Densidad

Existen dos tipos de densidades, unas menos densas y otras más densas, las primeras se deforman y se rompen con facilidad, los que necesitan un factor de energía relativamente bajo, en las rocas con alta densidad necesitan una cantidad elevada de energía para lograr una fragmentación en la roca (Correo, 2009).

b) Resistencias estáticas

Son parámetros que indican la condicion de la roca a la voladura, siendo la relación resistente a la compresión, resistencia a la tracción, estando relacionado a una mayor facilidad para fragmentar la roca (Correa, 2009).

c) Tenacidad

Muestra la capacidad de un material para poder absorber energía en el momento de la deformación plástica, esta energía se mide por debajo de la curva esfuerzo/deformación, el módulo de tenacidad, es el límite máximo de energía de deformación por unidad de volumen que el material puede absorber sin fracturarse (Correa, 2009).

d) Resiliencia

Es la capacidad de los materiales de absorber energía en el rango elástico, es el límite máximo de energía de deformación por unidad de volumen que el material puede absorber hasta el límite elástico, en un alto unidad de resiliencia el material exhibe un alto esfuerzo en el límite elástico (Correa, 2009).

e) Rigidez

Es un factor de proporcionalidad entre el esfuerzo normal y la deformación relativa que sufre una muestra de roca, dependiendo contenido que tiene, como la composición mineralógica, porosidad, tipo de deformación y magnitud de la carga aplicada (Correa, 2009).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

f) Resistencias dinámicas

Las resistencias de las rocas se incrementan con la velocidad de carga y pueden llegar en algunos casos alcanzar valores entre 5 y 13 veces superiores a las estáticas, siendo beneficioso determinar en laboratorio las resistencias al impacto, con el fin de elegir los explosivos que desarrollen esfuerzos inferiores o iguales a la resistencia de la compresión dinámica de la roca (Correa, 2009).

g) Porosidad

Es la porosidad intergranular primaria o de formación, su distribución en el macizo rocoso se puede considerar uniforme y que provoque efectos como la atenuación de la energía de la onda de choque, disminuyendo de la resistencia dinámica a la compresión y un incremento de la trituración (Correa, 2009).

h) Dureza y penetración

En este factor la eficiencia y economía del proceso de fracturación del macizo rocoso, se basa en gran parte por la aplicación exitosa de taladros perforadores, ya sean de percusión o rotación, se presentan casos en los que ciertos tipos de roca dura resultan más fáciles de perforar que rocas de menor dureza, por sus características de fragilidad y desmoronamiento (Correa, 2009).

2.2. Antecedentes

2.2.1. Internacionales

- **"Blasting Principles for Open Pit Mining"**

  Autores: Jimeno et al. (1995)

  Resumen: A través de un modelo teórico riguroso, esta investigación ha desarrollado una propuesta innovadora para optimizar la perforación y voladura en la minería. Al analizar los parámetros clave de la voladura, se han diseñado nuevas estrategias que permiten mejorar la fragmentación del material y reducir costos operativos.

- "**Blasting Technology for Mining Operations**"

  Autores: Hustrulid (2006)

  Resumen: La optimización de los procesos de voladura es fundamental para mejorar la eficiencia y seguridad en la minería subterránea. Este estudio presenta una herramienta matemática que permite analizar y seleccionar los patrones de perforación más adecuados, maximizando la fragmentación de la roca y minimizando los riesgos asociados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- **"Numerical Simulation in Blast Optimization"**

  Autores: Singh et al. (2012)

  Resumen: Gracias a la implementación de simulaciones numéricas, este estudio ha logrado optimizar el diseño de las mallas de perforación. Al analizar diversos escenarios, se han identificado configuraciones que maximizan la fragmentación de la roca y minimizan los costos, contribuyendo a una mayor eficiencia en las operaciones mineras.

- **"Rock Mass Properties and Blasting Efficiency"**

  Autores: Nielsen y Kristiansen (2015)

  Resumen: La caracterización detallada del macizo rocoso ha sido fundamental para establecer una correlación entre las propiedades geomecánicas y la eficiencia de las voladuras en minas profundas. Los resultados obtenidos han permitido diseñar mallas de perforación y seleccionar explosivos más adecuados, optimizando así la fragmentación de la roca y reduciendo los costos.

- **"Emerging Technologies in Blasting Design"**

  Autores: Chitombo (2018)

  Resumen: En este estudio, se desarrolló una herramienta innovadora basada en algoritmos de aprendizaje automático y modelos de simulación numérica para predecir el comportamiento de la roca durante la voladura. Esta herramienta permitió optimizar el diseño de las mallas de perforación, maximizando la fragmentación y minimizando el consumo de explosivos.

2.2.2. Nacionales

- **Optimización de Mallas de Perforación en Minas Subterráneas del Perú**

  Autores: Castro et al. (2008)

  Resumen: El estudio exploró la adaptación de diferentes diseños de mallas de perforación a las condiciones geológicas y mineras peruanas. Se analizaron los efectos de variables como la orientación de los taladros, el espaciamiento y la carga de explosivos en la fragmentación de la roca, con el objetivo de desarrollar soluciones personalizadas para cada yacimiento.

- **Aplicación de Software de Simulación para el Diseño de Voladuras**

  Autor: Vera (2015)

  Resumen: La investigación se centró en evaluar la eficacia de la simulación numérica como herramienta para optimizar el diseño de voladuras. A través de modelos numéricos detallados, se pudo analizar el impacto de diferentes parámetros de diseño en la fragmentación de la roca, permitiendo identificar las configuraciones más eficientes y seguras.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- **Uso de Emulsiones Encartuchadas en Voladuras Mineras**

  Autor: Gutiérrez y Salinas (2019)

  Resumen: Al comparar las emulsiones encartuchadas con los explosivos tradicionales, este estudio ha demostrado que las primeras ofrecen ventajas significativas. Las emulsiones permiten una mejor fragmentación de la roca, generan menores vibraciones y reducen los costos operativos, contribuyendo a un entorno de trabajo más seguro y eficiente.

- **Impacto de la Optimización de Mallas de Perforación en Minas Artesanales**

  Autor: Rojas (2022)

  Resumen: El estudio detallado de las mallas de perforación en minas artesanales de Cusco ha permitido identificar oportunidades para optimizar la fragmentación de la roca, considerando las características geomecánicas específicas de cada yacimiento y las limitaciones de los equipos utilizados. Al evaluar variables como el espaciamiento de los taladros, la carga de explosivos y la secuencia de detonación, se han propuesto mejoras que maximizan la eficiencia y reducen los costos.

2.3. Hipótesis

La adopción de estándares técnicos en la gestión de la perforación y voladura es fundamental para mejorar la eficiencia y la seguridad en la mina Candelaria Alto Molino. Al establecer protocolos claros para el diseño de mallas de perforación, la selección de explosivos y la secuencia de detonación, se garantizará una mayor consistencia en los resultados y se reducirán los riesgos asociados a estas operaciones.

2.4. Variables

2.4.1. Variable independiente

Malla y voladura

2.4.2. Variable dependiente

Costos operativos del crucero CX2040

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO III

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Naturaleza y alcance de la investigación

Mediante un enfoque descriptivo, este estudio se centra en identificar y analizar las deficiencias en las operaciones unitarias de P y V. A través de una observación detallada de los procesos, se busca comprender las causas de dichas deficiencias y proponer recomendaciones para optimizar las operaciones.

3.2. Procedimiento de investigación

Mediante un riguroso análisis de datos cuantitativos, este estudio evaluó la influencia de diferentes diseños de mallas de perforación en los costos de producción. Al comparar variables como el número de taladros y el consumo de explosivos, se estableció una relación causal entre el diseño de la malla y la eficiencia de la operación.

3.3. Población y muestra de estudio

3.3.1. Población

Labor minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.

3.3.2. Muestra

La muestra de estudio se centró en el Crucero CX-2040 de la labor minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.

3.4. Herramientas y procedimientos de recopilación de datos

3.4.1. Técnicas de recopilación de datos

Se realizó un análisis retrospectivo de los registros de voladura de los últimos 12 meses, utilizando el software estadístico SPSS. Los datos recopilados incluyeron el avance lineal, el consumo de explosivos, la frecuencia de incidentes y las condiciones geomecánicas. Este análisis permitió identificar patrones y tendencias en los procesos de voladura.

3.4.2. Procedimiento de recopilación de datos

Para evaluar las labores de desarrollo, se recopiló una amplia gama de datos, incluyendo el avance diario de cada disparo, incidencias, resultados de inspecciones semanales, registros de producción e informes geotécnicos. Esta información detallada permitió realizar un análisis exhaustivo de las operaciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

3.4.3. Herramientas de recopilación de datos

Los datos recopilados incluyeron información detallada sobre el número de taladros, el avance lineal por disparo y el consumo de explosivos. Además, se realizaron mediciones geomecánicas en terreno para caracterizar las propiedades de la roca. Toda esta información fue registrada y analizada estadísticamente para optimizar los procesos de voladura.

3.5. Métodos para procesar la información

A través de inspecciones visuales y mediciones precisas, complementadas con el análisis de registros históricos y datos geotécnicos, se identificaron las deficiencias en la malla de perforación. La utilización de instrumentos como teodolitos y distanciómetros, junto con el análisis estadístico de los datos, permitió establecer una relación entre las desviaciones en la perforación y las condiciones geológicas.

3.6. Métodos de comparación de datos

3.6.1. Registro directo

Con el fin de obtener datos precisos y confiables, se realizó una supervisión detallada de las actividades de P y V en minera convencional Candelaria Alto Molino-Nicolás-Valcárcel.

3.6.2. Análisis de registros

Se revisaron los reportes diarios de las guardias, incluyendo datos sobre avance de la labor, consumo de explosivos y ocurrencias.

3.6.3. Validación de Datos

Con el fin de asegurar la precisión de los datos, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de todos los registros por parte de los jefes de guardia y el jefe de mina.

3.6.4. Análisis de Datos

- Análisis descriptivo: Se caracterizaron los datos mediante estadísticas descriptivas para identificar patrones y tendencias en las operaciones de perforación y voladura.
- Análisis comparativo: Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos y los estándares de la industria, así como con datos históricos de la mina.
- Modelado: Se desarrollaron modelos de simulación para evaluar diferentes escenarios de perforación y voladura y optimizar los procesos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.6.5. Trabajo de Campo

- Inspección de las labores: Se realizaron inspecciones visuales de las labores para identificar las condiciones existentes y evaluar la calidad de las perforaciones.
- Recopilación de datos in situ: Se registraron datos sobre las dimensiones de las perforaciones, el tipo de explosivo utilizado y otros parámetros relevantes.

3.6.6. Trabajo de Gabinete

- Análisis de datos: Se procesaron los datos recopilados en el campo utilizando software estadístico y de simulación.
- Diseño de mallas de perforación: Se desarrollaron diferentes diseños de malla de perforación y se evaluó su impacto en los costos y la eficiencia de la voladura.

3.6.7. Resultados y Validación de Hipótesis

Los hallazgos de esta investigación confirman que la optimización del diseño de la malla de perforación tiene un impacto directo en la reducción de los costos de voladura.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO IV

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Problemática e informe técnico en las labores de desarrollo

A través de un análisis detallado y la aplicación de modelos matemáticos, esta investigación busca optimizar el diseño de la malla de perforación en el crucero 2040 del nivel 0 de la labor minera Candelaria Alto Molino. El objetivo es superar las ineficiencias observadas en el diseño actual y reducir los costos de producción.

4.1.1. Datos

Tabla 1 *Datos del crucero*

Ítem	Datos
Sección	2.1 x 2.4 m
Ancho	2.1 m
Altura	2.4 m
Longitud de barreno	5 pies
Tipo de roca	II
Tipo de explosivo	ANFO
Peso específico de roca	2.5 g/cm3
Peso del cartucho	0.81g
Rendimiento de avance	90%
Ø de explosivo	7/8"
ρ específica del explosivo	0.8
Ø de perforación	36 mm

Nota. Elaboración propia

4.1.2. Cálculo de RMR para cada tipo de roca en los frentes de avance

Mediante la aplicación del sistema RMR, se caracterizaron geomecánicamente frentes de avance de 2.1m x 2.4m. La evaluación de parámetros como la resistencia de la roca y la fracturación permitió clasificar las rocas en tipos II, III y IV. Esta información fue crucial para ajustar el diseño de la malla de perforación y optimizar las operaciones de voladura.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 2 *Resumen de puntuación RMR roca tipo II, III Y IV*

CLASIFICACIÓN GEOMECANICA RMR PARA LOS 3 TIPOS DE ROCA									
PARAMETROS DE CLASIFICACIÓN									
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de Carga puntual	>10	10 - 4	4 - 2	2 -1	Compresión simple (Mpa)		
		Compresión simple	>250	250 -100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100 %	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2m	0.6 – 2m	0.2 - 0.6m	0.06 – 0.2 m	< 0.06m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1m	1 – 3m	3 – 10m	10 -20m	> 20m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1mm	0.1 – 1.0mm	1 – 5mm	>5mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno no duro <5mm	Relleno duro >5mm	Relleno no blando <5mm	Relleno blando >5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

		Puntuación	6	5	3	1	0
		Caudal por 10m de túnel	Nulo	<10 litros/min	10 25 litros/min	25 -125 litros/min	> 125 litros/min
5	Agua freática	Relación: Presión/Tensión	0	0 – 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
	Puntuación		15	10	7	4	0
CORRECCIÓN POR ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES							
Dirección y buzamiento			Muy favorable	Favorable	Medias	Desfavorable	Muy desfavorable
Puntuación		Túneles	0	-2	-5	-10	-12
		Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
		Taludes	0	-2	-25	-50	-60
PUNTUACIÓN GENERAL DE TIPO DE ROCA II							80
PUNTUACIÓN GENERAL DE TIPO DE ROCA III							60
PUNTUACIÓN GENERAL DE TIPO DE ROCA IV							39

Nota. Elaboración propia

4.1.3. Ventilación en los frentes de avance

Se proporciona todos los días después de cada disparo con un aproximado de 2 horas por guardia en el que en el interior de la mina no se encuentra personal en la labor debido a que los gases están recirculando.

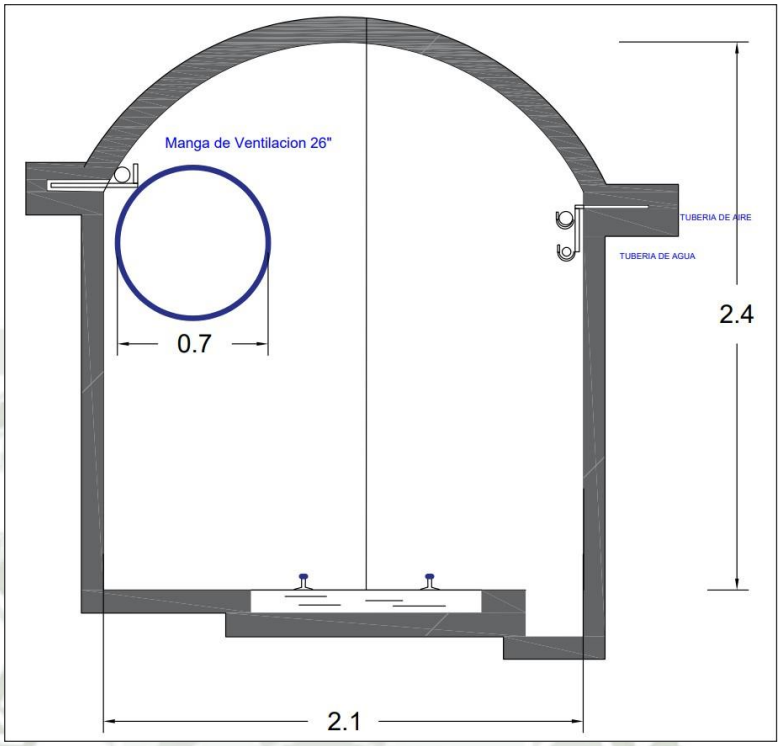
En la figura podemos observar el lugar donde se coloca la manga de ventilación y el espacio que ocupa en la galería principal.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 9 *Vista frontal del sistema de ventilación*



Nota. Elaboración propia

El ventilador en interior mina está conectado por medio de una cámara que recepciona el aire para inmediatamente mandarse a las labores de mayor profundidad o frentes de avance en este caso a la zona de estudio el cual es el crucero 2040 – Verónica, donde por medio de conexión de mangas de ventilación llega el aire hasta unos 40 metros antes del frente como se muestra en el plano.

El frente es ventilado después de cada disparo por un tiempo de 2 horas, para luego apagar los ventiladores y amarrar las mangas para no obstruir con las siguientes operaciones.

4.1.4. Evaluación de la malla antes de realizar la reducción

4.1.4.1. Diseño empírico de la malla

La falta de un diseño estandarizado y basado en cálculos técnicos en la malla de perforación generaba inconsistencias en los resultados de las voladuras, lo que se traducía en disparos fallidos y condiciones inseguras. Esta práctica empírica aumentaba los costos operativos y afectaba la eficiencia de la producción. La imagen muestra un ejemplo de las mallas de perforación utilizadas antes de implementar las mejoras propuestas en este estudio.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 10 *Diseño antiguo de malla de perforación*

Nota. Elaboración propia

Un análisis detallado de los hastiales y la corona de tiros ha puesto de manifiesto las consecuencias de un diseño de malla de perforación inadecuado. La presencia de pechos de roca y una fragmentación excesiva, producto de la falta de adaptación a las condiciones geológicas, ha generado un aumento en los costos, dificultado las operaciones y comprometido la seguridad en el frente de trabajo.

Figura 11 *Mala distribución de taladros*

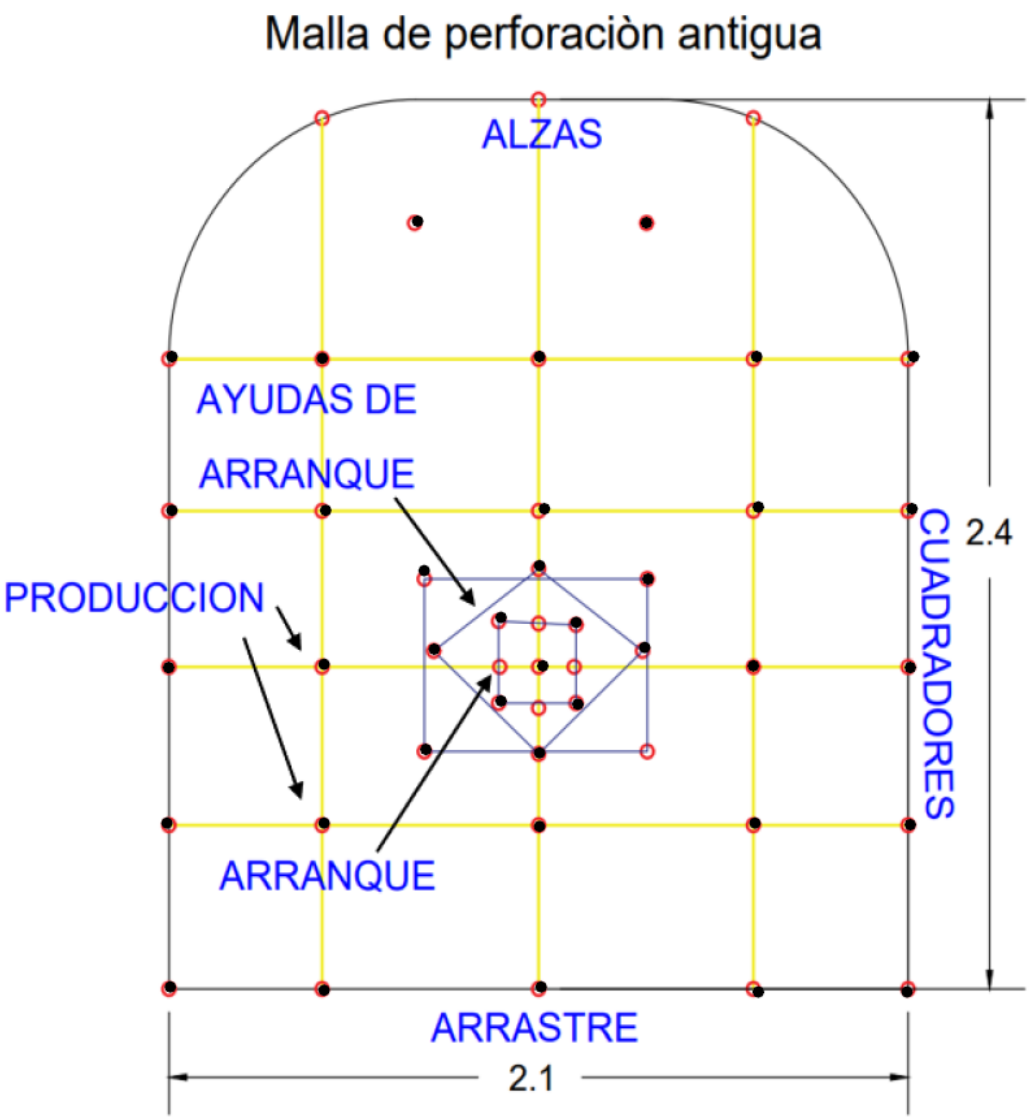
Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 12 *Diseño empírico de malla para los frentes, tipo de arranque Rompe Boca*



Nota. Elaboración propia

La figura 19 muestra un diseño idealizado de la malla de perforación. Sin embargo, en la práctica, la distribución de los taladros no siempre se ajusta a este diseño teórico. Se observan irregularidades en el espaciamiento y un exceso de taladros, lo que puede generar una sobrecarga de explosivos y dañar la roca, afectando la eficiencia de la voladura.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 3 *Resumen de parámetros en malla antigua*

Tipo de taladro	N.º de tal.	Cartucho/taladro	Mecha en pies	Fulminante	Columna explosiva
Ø DE TAL. DE ALIVIO				36mm	
Ø de tal. de producción				36mm	
L de taladros				1.5m	
N.º de tal. perforados				42	
N.º de tal. de alivio				4	
N.º de tal. de producción				42	
Arranque	9	5	30	5	1.5 m
Ayudas de arranque	9	9	54	9	1.5 m
Auxiliares de corona	5	5	30	5	1.5 m
Auxiliares de cuadradores	6	6	36	6	1.5 m
Auxiliares de arrastre	1	1	6	1	1.5 m
Corona	5	5	30	5	1.5 m
Cuadradores	6	6	36	6	1.5 m
Arrastre	5	5	30	5	1.5 m
TOTAL	46	42	252	42	

Nota. Elaboración propia

4.1.4.2. Factor de carga lineal

Se observó que el consumo de explosivos en las voladuras anteriores era excesivo, lo que generaba una fragmentación excesiva de la roca y daños en las paredes del túnel. En algunos casos, incluso era necesario el uso de sostenimiento adicional para garantizar la estabilidad del frente de avance

Datos generales del frente para hallar el factor de carga lineal

- Sección del frente: 2.1 x 2.4 m
- Longitud de taladro: 1.5 m
- Densidad del explosivo: 0.8 g/cm3
- Densidad de la roca : 2.5 g/cm3
- Numero de perforaciones cargadas: 42
- Radio de taladro: 0.018m.

a) Hallar el volumen que se removerá en el frente

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\boldsymbol{V} = Area\ de\ seccion\ x\ long\ Taladro$$

$$\boldsymbol{V} = (2.1\ m\ x\ 2.4\ m)1.5\ m$$

$$\boldsymbol{V} = 7.56\ m^3$$

b) Hallar el volumen que ocupara el explosivo en taladros (1 taladro)

*Longitud real del taladro perforado es igual al 90% de 1.5 m por temas operativos

$$\boldsymbol{V} = (\ \pi x r^2)x(1.17\ m)$$

$$\boldsymbol{V} = (\ \pi x 0.018^2)x(1.17\ m)$$

$$\boldsymbol{V} = 0.001190\ m^3$$

En 42 taladros

$$\boldsymbol{V} = 0.001342 m^3 x 42$$

$$\boldsymbol{V} = 0.0500 m^3$$

Nota: La longitud del taladro que ocupa el explosivo esta dado por 1.17m ya que se carga todo el taladro sin el uso de taco y la longitud restante es el cebo que se coloca de dinamita con tamaño de 0.1778 m, ambos completarían la totalidad del taladro.

c) Peso del explosivo

$$\boldsymbol{Peso} = Volumen\ de\ 42\ taladros\ x\ densidad\ del\ explosivo$$

$$\boldsymbol{Peso} = 0.0500 m^3 x\ 720\ kg/m^3$$

$$\boldsymbol{Peso} = 36\ kg$$

d) Factor de carga

$$\boldsymbol{Fc} = \frac{Peso\ de\ explosivo}{Volumen\ volado}$$

$$\boldsymbol{Fc} = \frac{36\ kg}{7.56\ m^3}$$

$$\boldsymbol{Fc} = 4.76\ kg/m^3$$

e) Factor de carga lineal

$$\boldsymbol{Fc\ lineal} = \frac{Peso\ de\ explosivo}{Longitud\ del\ taladro}$$

$$\boldsymbol{Fc\ lineal} = \frac{36\ kg}{1.5\ m}$$

$$\boldsymbol{Fc\ lineal} = 24.00\ kg/m$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

f) Factor de potencia

$$\boldsymbol{Fp} = \frac{Peso\ de\ explosivo}{peso\ del\ material\ volado}$$

$$\boldsymbol{Fp} = \frac{36}{volumen\ volado\ \ x\ \ peso\ especifico}$$

$$\boldsymbol{Fp} = \frac{36}{7.56\ m^3\ x\ \ 2.5\ ton/m^3}$$

$$\boldsymbol{Fp} = \frac{36}{18.9\ ton}$$

$$\boldsymbol{Fp} = 1.90\ kg/ton$$

Tabla 4 *Cálculos de antigua malla*

Parámetros de voladura	Valor	Unidad
Cantidad de explosivo usado	36.00	Kg
Factor de carga	4.76	Kg/m^3
Factor de Carga lineal	24.00	Kg/m
Factor de potencia	1.90	Kg/ton

Nota. Elaboración propia

4.2. Análisis durante el diseño empírico de la malla

4.2.1. Presencia de irregularidades en el frente de avance

La preparación adecuada del frente de avance es esencial para garantizar la eficiencia y seguridad de las operaciones de voladura. Un frente irregular, con pechos de roca y zonas sin fragmentar, dificulta la ejecución de una malla de perforación precisa y aumenta los riesgos. Estas irregularidades pueden ser causadas por una voladura anterior inadecuada y tienen un impacto directo en la productividad y seguridad de las operaciones mineras.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 13 *Irregularidades en el diseño de malla*

Nota. Elaboración propia

La figura muestra de manera gráfica las consecuencias de un diseño de malla de perforación deficiente. La fragmentación irregular de la roca, los tiros fallidos y los problemas de carga han generado un aumento en los costos de producción y han comprometido la seguridad de las operaciones. Estas deficiencias son el resultado directo de una falta de planificación y diseño adecuado de la malla de perforación.

4.2.2. Marcado de malla de perforación

La falta de precisión en el marcado de la malla de perforación, realizado de manera empírica, ha generado una serie de problemas como disparos irregulares, sobredimensionamiento de cargas y un mayor riesgo de accidentes. Esta situación ha evidenciado la necesidad de adoptar un diseño de malla más riguroso y estandarizado.

4.2.3. Mal secuenciamiento de la voladura

Una secuencia de detonación inadecuada generaba diversos problemas en las voladuras, como tiros cortados, fragmentación irregular y un mayor consumo de explosivos. La detonación de los taladros en un orden no óptimo también aumentaba el riesgo de accidentes y las vibraciones, afectando la estabilidad de las estructuras subterráneas.

4.2.4. Uso excesivo de explosivo

Se detectó un sobredimensionamiento en las cargas de explosivo, utilizando ANFO sin tacos de fondo. Esta práctica generaba una fragmentación excesiva de la roca en los hastiales y la corona, aumentando el riesgo de desprendimientos y comprometiendo la estabilidad del frente de avance.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

4.2.5. Falta de uso de tacos

Se identificó que una práctica común era cargar los taladros sin utilizar tacos, lo cual es una infracción a los procedimientos de seguridad y eficiencia. La ausencia de tacos impedía un confinamiento adecuado de los gases de la explosión, lo que resultaba en una fragmentación irregular de la roca y un aumento en el riesgo de tiros soplados.

Figura 14 *Carguío sin taco*

Nota. Elaboración propia

4.2.6. Mal diseño de arranque

La inadecuada ubicación y tamaño de los arranques generaba una serie de problemas durante las voladuras. La falta de espacio para la expansión de los gases producía tiros fallidos y una fragmentación irregular de la roca, afectando la eficiencia y seguridad de las operaciones.

Figura 15 *Carguío sin taco*

Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.2.7. Mala distribución de taladros

La técnica de cuadrantes, basada en estimaciones visuales, no garantizaba una distribución uniforme de los taladros. Esta falta de precisión en el marcado de la malla provocaba variaciones en el espaciamiento y el burden, lo que afectaba la fragmentación de la roca y la eficiencia de las voladuras.

4.2.8. Falta de capacitación en software JK Simblast

Se observó también que el personal no estaba calificado para el uso de herramientas informáticas como software JK Simblast lo que hace que el modelado de la malla sea más didáctico gráficamente y espacialmente además del uso de software de dibujo como el de AutoCAD.

4.3. Optimización de malla de perforación y voladura para reducir costos operativos

Un diseño optimo de una malla requiere de herramientas precisas y confiables. Los modelos matemáticos ofrecen una solución basada en cálculos rigurosos para determinar la ubicación ideal de cada taladro y garantizar una distribución uniforme. Los sistemas de perforación y voladura son complejos e involucran múltiples variables. Mientras que los métodos empíricos se basan en la experiencia, los modelos matemáticos permiten analizar de forma más detallada y cuantitativa el impacto de variables como las características geomecánicas de la roca, el tipo de explosivo y la geometría del frente de trabajo.

4.3.1. Diseño mediante el método matemático de Roger Holmberg

Este modelo matemático es muy aplicable ya que se toma mucho en cuenta el formulismo planteado por el autor donde ya están establecidos los parámetros en cada zona de un frente, es decir cada parte tiene su propio formulismo lo que hace que la distribución de taladros para cada área sea homogénea.

I. <u>Determinamos el largo de perforación según el diámetro del tiro de alivio</u>

$$\boldsymbol{H} = 0.15 + 34.1\ x\ \theta - 39.4\ x\ \theta^2$$

Donde:

- H*:* Longitud del disparo
- θ*:* Diámetro del tiro de alivio(m)

Nota: En este caso no se usará una sola perforación de alivio sino 4, entonces se calculará el diámetro ficticio que reemplazaría a los 4 de alivio para poder resolver la ecuación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\boldsymbol{Df} = d\sqrt{n}$$

- *Df:* Diámetro ficticio de la perforación de alivio
- *d:* Diámetro de los taladros perforados (m)
- *n:* Numero de taladros de alivio

$$\boldsymbol{Df} = 0.036\sqrt{4}$$

$$\boldsymbol{Df} = 0.072$$

Este sería el diámetro que reemplazaría a los 4 de alivio, es decir su equivalente para las fórmulas siguientes.

Entonces aplicando la formula

$$\boldsymbol{H} = 0.15 + 34.1\ x\ \theta - 39.4\ x\ \theta^2$$

$$\boldsymbol{H} = 0.15 + 34.1\ x\ 0.072 - 39.4\ x\ (0.06235)^2$$

$$\boldsymbol{H} = 2.4$$

Los cálculos realizados indican que para los taladros de alivio utilizados (4 taladros de 3.6 cm de diámetro), la profundidad máxima recomendada sería de 2.4 metros. Dado que la profundidad actual de los taladros es de 1.5 metros, se encuentra dentro del rango calculado, lo que sugiere que el diseño de los taladros de alivio es adecuado.

II. Cálculos en el primer cuadrante

$$\boldsymbol{Ep} = (\alpha * H + \beta)$$

- Ep: Error de perforación
- α: Desviación angular (m/m)
- β: Error de emboquille o empate
- H: Profundidad del barreno de perforación

a) Hallamos el error de perforación para proceder hacer los cálculos de los cuadrantes

- α = 0.005 m/m
- H= 1.5 m
- β= 0.005 m

$$\boldsymbol{Ep} = (\alpha\ x\ H\ x\ \beta)$$

$$\boldsymbol{Ep} = (0.005\ x\ 1.5\ x\ 0.005)$$

$$\boldsymbol{Ep} = 0.0125$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- Hallamos el burden y espaciamiento del primer cuadrante

$$\boldsymbol{Burden\ máximo} = 1.7\ x\ 0.0623$$

$$\boldsymbol{Burden\ máximo} = 0.1224$$

$$\boldsymbol{Burden\ practico} = 0.1224 - 0.0125$$

$$\boldsymbol{Burden\ practico} = 0.1099$$

$$\boldsymbol{Distancia\ entre\ taladros\ (W1)} = Burden\ practico * \sqrt{2}$$

$$\boldsymbol{(W1)} = 0.1554$$

b) Hallamos la concentración de carga con la siguiente formula

$$\boldsymbol{Cc} = (55\ x\ d1)x(\frac{B1max}{d2})^{1.5}\ x\ \left(B1\max - \frac{d2}{2}\right)x\left(\frac{c}{0.4}\right)x\left(\frac{1}{Sanfo}\right)kg/m$$

Donde:

- Cc: Concentración lineal de carga (kg/m)
- $d1$: Diámetro del taladro cargado (m)
- $d2$: Diámetro del taladro de alivio (m)
- c: Constante de la roca 0.3-0.4
- $S\ anfo$: Potencia relativa en peso del explosivo referido al ANFO. En tanto por uno

$$\boldsymbol{Cc} = (55\ x\ 0.036)x(\frac{0.1224}{0.072})^{1.5}\ x\ \left(0.1224\frac{0.072}{2}\right)x\left(\frac{0.4}{0.4}\right)x\left(\frac{1}{1}\right)kg/m$$

$$\boldsymbol{Cc} = 0.3791\ kg/m$$

$$\boldsymbol{Carga\ de\ ANFO\ en\ un\ taladro\ (Q)} = (1.5 - 0.36) * (0.3791)$$

$$\boldsymbol{(Q)} = 0.4321$$

Nota: En el carguío de los taladros normalmente usamos una dinamita como cebo la cual tiene una longitud de 7" y 0.81gr de peso, esto sumado con el taco corresponderían al 50 cm es decir en todo el taladro se cargaría netamente con ANFO 1m se cargará 1/3 del taladro. Lo que se traduciría en la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{(Q)} = \big((1.5 - 0.50) * (0.3791)\big) + (peso\ del\ cartucho)$$

$$\boldsymbol{(Q)} = 0.3791\ solo\ de\ ANFO + (81gr)$$

$$\boldsymbol{(Q)} = 0.4601\ gr\ en\ todo\ un\ taladro\ cargado$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

III. Cálculo del segundo cuadrante

a) Hallar la abertura rectangular del primer cuadrante

$$(\boldsymbol{Ah}) = (Bp - Ep) * \sqrt{2}\,(Ah) = (0.1099 - 0.0125) * \sqrt{2}$$

$$(\boldsymbol{Ah}) = 0.1377$$

b) Hallar el burden del segundo cuadrante

$$\boldsymbol{B2max} = (8.8\ x\ 10^{-2})x(\sqrt{\frac{Ah\ x\ Cc\ x\ S}{d1\ x\ c}})$$

$$\boldsymbol{B2max} = (8.8\ x\ 10^{-2})x(\sqrt{\frac{0.1377\ x\ 0.3791\ x1}{0.036\ x\ 0.4}})$$

$$\boldsymbol{B2max} = 0.1675$$

$$\boldsymbol{B2prac} = (B2\ \max - Ep)$$

$$\boldsymbol{B2prac} = (0.1675 - 0.0125)$$

$$\boldsymbol{B2prac} = 01551$$

c) Hallar la distancia entre taladros del segundo cuadrante

$$\boldsymbol{Distancia\ entre\ taladros}\ (\boldsymbol{w2}) = \sqrt{2}\ x\ [B2\ prac + (\tfrac{w1}{2})]$$

$$(\boldsymbol{w2}) = \sqrt{2}\ x\ [0.1551 + (\tfrac{0.1554}{2})]$$

$$(\boldsymbol{w2}) = 0.329$$

IV. Cálculo del tercer cuadrante

a) Hallar la abertura rectangular del segundo cuadrante

$$\boldsymbol{Ah} = ([B_2 prac + \frac{w_1}{2} - Ep]) \times \sqrt{2}$$

$$\boldsymbol{Ah} = ([0.1551 + \frac{0.1554}{2} - 0.0125]) \times \sqrt{2}$$

$$\boldsymbol{Ah} = 0.3116$$

$$\boldsymbol{B_3 max} = (8.8 \times 10^{-2})(\sqrt{\frac{Ah \times Cc \times S}{d1 \times c}})$$

$$\boldsymbol{B_3 max} = (8.8 \times 10^{-2})(\sqrt{\frac{0.3116 \times 0.3791 \times 1}{0.036 \times 0.4}})$$

$$\boldsymbol{B_3 max} = 0.2520$$

$$\boldsymbol{B_3 prac} = (B_3 max - Ep)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\boldsymbol{B_3prac} = (0.2520 - 0.0125)$$

$$\boldsymbol{B_3prac} = 0.2395$$

b) Hallar la distancia entre taladros del tercer cuadrante

$$\boldsymbol{Distancia\ entre\ taladros(W3)} = \sqrt{2} \times [B_3prac + \left(\frac{W2}{2}\right)]$$

$$(\boldsymbol{W3}) = \sqrt{2} \times [0.2395 + \left(\frac{0.329}{2}\right)]$$

$$(\boldsymbol{W3}) = 0.572$$

V. Cálculo del cuarto cuadrante

a) Hallar a abertura rectangular del tercer cuadrante

$$\boldsymbol{Ah} = ([B_3prac + \frac{w_2}{2} - Ep]) \times \sqrt{2}$$

$$\boldsymbol{Ah} = ([0.2395 + \frac{0.329}{2} - 0.0125]) \times \sqrt{2}$$

$$\boldsymbol{Ah} = 0.5536$$

$$\boldsymbol{B_4max} = (8.8 \times 10^{-2})(\sqrt{\frac{Ah \times Cc \times S}{d1 \times c}})$$

$$\boldsymbol{B_4max} = (8.8 \times 10^{-2})(\sqrt{\frac{0.5536 \times 0.3791 \times 1}{0.036 \times 0.4}})$$

$$\boldsymbol{B_3max} = 0.3359$$

$$\boldsymbol{B_4prac} = (B_4max - Ep)$$

$$\boldsymbol{B_4prac} = (0.3359 - 0.0125)$$

$$\boldsymbol{B_4prac} = 0.3235$$

b) Hallar la distancia entre taladros del cuarto cuadrante

$$\boldsymbol{Distancia\ entre\ taladros(W4)} = \sqrt{2} \times [B_4prac + \left(\frac{W3}{2}\right)]$$

$$(\boldsymbol{W4}) = \sqrt{2} \times [0.3235 + \left(\frac{0.572}{2}\right)]$$

$$(\boldsymbol{W4}) = 0.8619$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

VI. Diseño de los taladros de arrastre

$$\boldsymbol{Relación\ burden - espaciamiento(S/B)} = 1(se\ suele\ tomar\ ese\ valor)$$

$$\boldsymbol{Factor\ de\ fijación} = 1.45\ (se\ suele\ tomar\ ese\ valor)$$

a) Hallar el burden de los taladros de arrastre

$$\boldsymbol{BmaxA} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{Cc \times Sanfo}{c \times f \times \frac{S}{B}}}\right)$$

$$\boldsymbol{BmaxA} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{0.3791 \times 1}{0.4 \times 1 \times 1.45}}\right.$$

$$\boldsymbol{BmaxA} = 0.7276$$

$$\boldsymbol{C\ corregido} = C + 0.07/B$$

$$\boldsymbol{C\ corregido} = 0.4 + 0.07/0.7276$$

$$\boldsymbol{C\ corregido} = 0.4962$$

$$\boldsymbol{BmaxAcorregido} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{Cc \times Sanfo}{ccorregido \times f \times \frac{S}{B}}}\right)$$

$$\boldsymbol{BmaxAcorregido} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{0.3791 \times 1}{0.4962 \times 1 \times 1.45}}\right)$$

$$\boldsymbol{BmaxAcorregido} = 0.653$$

$$\boldsymbol{BpracA} = Bmax - H \times sen(y)$$

$$\boldsymbol{BpracA} = Bmax - H * sen(y)$$

Donde:

- *(y)* = Angulo vigía

$$\boldsymbol{BpracA} = 0.653 - 1.5 * sen(1.5°)$$

$$\boldsymbol{BpracA} = 0.6137)$$

* Por fines prácticos tomaremos el valor de 0.46m como burden de los taladros de arrastre.

b) Hallar el número de taladros para el arrastre

$$\boldsymbol{N°Arrastre(Entero)} = \left[\frac{Ancho\ de\ labor + (2 \times H \times sen(y))}{BpracA} + 2\right]$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\boldsymbol{N°Arrastre(Entero)} = [\frac{2.1 + (2 \times 1.5 \times 0.026)}{0.6137} + 2]$$

$$\boldsymbol{N°Arrastre(Entero)} = 5.54$$

Nota: 5.54 se redondea a un entero que en este caso seria 5 por fines prácticos.

c) Hallar es espaciamiento teórico

$$\boldsymbol{Sz} = \frac{(AnchoLabor + (2 * H * \sin(y))}{(N° Entero - 1)}$$

$$\boldsymbol{Sz} = \frac{2.1 + (2 * 1.5 * 0.026}{(5 - 1)}$$

$$\boldsymbol{Sz} = 0.5445$$

d) Hallar el espaciamiento de esquina

$$\boldsymbol{Se} = Sz - H * Sen(y)$$

$$\boldsymbol{Se} = 0.5445 - 1.5 * 0.026$$

$$\boldsymbol{Se} = 0.5055$$

VII. Diseño de los taladros de corona

$$\boldsymbol{Sc} = K \times d$$

Donde

- K: es una constante que varía entre 15 y 16, más común 15

$$\boldsymbol{Sc} = 15 \times 0.036$$

$$\boldsymbol{Sc} = 0.54$$

a) Hallar el burden de los taladros de corona

$$\boldsymbol{BmaxC} = \frac{Sc}{0.8}$$

$$\boldsymbol{BmaxC} = \frac{0.54}{0.8}$$

$$\boldsymbol{BmaxC} = 0.675$$

$$\boldsymbol{BpracC} = \boldsymbol{BmaxC} - (\boldsymbol{H} \times \boldsymbol{SenY})$$

$$\boldsymbol{BpracC} = 0.0675 - (1.5 \times 0.026)$$

$$\boldsymbol{BpracC} = 0.636$$

*Por fines prácticos tomaremos el valor de 0.30 m como burden de los barrenos de corona.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

b) Hallar el número de taladros para la corona

$$\boldsymbol{NC} = Redondear(\frac{AnchoLabor}{Sc} + 1)$$

$$\boldsymbol{NC} = Redondear(\frac{2.1}{0.54} + 1)$$

$$\boldsymbol{NC} = Redondear(4.88)$$

$$\boldsymbol{NC} = 5$$

VIII. Diseño de los taladros en caja o cuadradores

a) Hallar el espacio libre en las cajas

$$\boldsymbol{Ecajas} = AlturaLabor - BpracA - BpracC$$

$$\boldsymbol{Ecajas} = 2.4 - 0.6137 - 0.636$$

$$\boldsymbol{Ecajas} = 1.15$$

b) Hallar el espaciamiento en los taladros de caja

$$\boldsymbol{Scajas} = K * d$$

Donde

- k:es una constante que varía entre 15 y 16, más común 15

$$\boldsymbol{Scajas} = 15 * 0.036$$

$$\boldsymbol{Scajas} = 0.54$$

c) Hallar el espaciamiento en los taladros de caja

$$\boldsymbol{BmaxCajas} = \frac{Scajas}{0.8}$$

$$\boldsymbol{BmaxCajas} = \frac{0.54}{0.8}$$

$$\boldsymbol{BmaxCajas} = 0.675$$

$$\boldsymbol{BpracCajas} = BmaxCajas - (H \times SenY)$$

$$\boldsymbol{BpracC} = 0.0675 - (1.5 \times 0.026)$$

$$\boldsymbol{BpracC} = 0.636$$

d) Hallar el número de taladros en las cajas

$$\boldsymbol{Ncajas} = REDONDEAR(\frac{El\ de\ cajas}{Scajas} + 1)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\boldsymbol{Ncajas} = REDONDEAR(\frac{1.15}{0.54} + 1)$$

$$\boldsymbol{Ncajas} = 3$$

3 taladros en un solo lado del hastial

IX. Cálculo de taladros auxiliares de la corona

a) Hallar el espaciamiento máximo que tendrán los taladros auxiliares de corona

$$\boldsymbol{Emax} = \frac{K}{50} \times D\sqrt{\frac{PD}{RT}}$$

- K: Factor de voladura, roca difícil (0.7) roca media (0.8) roca fácil (1)
- D: Diámetro del taladro en cm
- PD: Presión de detonación en Kg/cm^2
- RT: Resistencia de la roca Kg/cm^2(122.36)

Nota: para hallar PD se usa la siguiente formula

$$\boldsymbol{PD} = 2.5 * 10 - 6 * (dens.explosivo) * (VOD)2\ Kbar$$

$$\boldsymbol{PD} = 2.5 * 10 - 6 * (0.8) * (3000)2\ Kbar$$

$$\boldsymbol{PD} = 18\ Kbar$$

Nota: Esta en Kbar lo convertimos a Kg/cm^2multiplicándolo por el numero 1019

$$\boldsymbol{PD} = 18\ Kbar * 1019$$

$$\boldsymbol{PD} = 18\ 342\ Kg/cm2$$

b) Aplicamos la fórmula para hallar el espacio en los taladros auxiliares de corona

$$\boldsymbol{Emax} = \frac{0.75}{50} \times 3.6\sqrt{\frac{PD}{RT}}$$

$$\boldsymbol{Emax} = \frac{0.75}{50} \times 3.6\sqrt{\frac{18342}{122.36}}$$

$$\boldsymbol{Emax} = 0.66$$

c) Hallar el número de filas o hileras donde se podrán disponer los taladros

$$\boldsymbol{EspacioDisponible} = AltoLabor - (BurdenArrastre + BurdenCorona + ancchoDelUltimoCuadrante + BurdenAuxiArrastre)$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\boldsymbol{EspacioDisponible} = 2.4 - (0.45 + 0.35 + 1.19 + 0) = 2.4$$

$$\boldsymbol{EspacioDisponible} = 0.41$$

$$\boldsymbol{Numero\ de\ filas} = \frac{Espacio\ disponible}{Emax}$$

$$\boldsymbol{Numero\ de\ filas} = \frac{0.41}{0.65}$$

$$\boldsymbol{Numero\ de\ filas} = 0.63 = 1$$

d) Hallar el espacio libre horizontal de corona

$$\boldsymbol{EspacioDisponiHorizontal} = LongArco - (2 * BurdenCaja)$$

$$\boldsymbol{EspacioDisponiHorizontal} = 2.898 - (2 * 0.36)$$

$$\boldsymbol{EspacioDisponiHorizontal} = 2.08$$

e) Hallar el burden de los taladros de corona

$$\boldsymbol{EspacioLibre} = AnchoLabor - 2 * (BurdenCajas)$$

$$\boldsymbol{EspacioLibre} = 2.1 - (2 * 0.64)$$

$$\boldsymbol{EspacioLibre} = 0.82$$

f) Hallar el burden de taladros auxiliares en corona

$$\boldsymbol{BmaxAuxi - corona} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{Cc \times Sanfo}{c \times f \times \frac{S}{B}}}\right)$$

$$\boldsymbol{BmaxAuxi - corona} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{0.3791 \times 1}{0.4 \times 1.2 \times 1.25}}\right)$$

$$\boldsymbol{BmaxAuxi - cajas} = 0.72$$

$$\boldsymbol{BmaxAuxi - coronacorregido} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{Cc \times Sanfo}{ccorregida \times f \times \frac{S}{B}}}\right)$$

$$\boldsymbol{BmaxAuxi - coronacorregido} = 0.9 \times \left(\sqrt{\frac{0.3791 \times 1}{0.4961 \times 1.20 \times 1.25}}\right)$$

$$\boldsymbol{BmaxAuxi - coronacorregido} = 0.64$$

$$\boldsymbol{BurdenPractico} = (BmaxAuxicoronacorregido) - (errorPerfor)$$

$$\boldsymbol{Burden\ Practico} = 0.64 - 0.0125$$

$$\boldsymbol{Burden\ Practico} = 0.63$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Nota: Los cálculos de burden en corona se basan en el formulismo en la práctica no se podrá tomar en cuenta ya que no queda espacio suficiente en la corona como para dejar burden, los cálculos quedan, pero no se aplica dichas distancias.

g) Hallar el número de taladros auxiliares en la corona

$$\boldsymbol{N°TaladrosAuxiliarDeCorona} = N$$

$$\boldsymbol{N} = [(Entero)(\frac{E}{Bmax \times \left(\frac{S}{B}\right)}) + 2$$

$$\boldsymbol{N} = [(Entero)(\frac{2.08}{0.64 \times (1.25)}) + 2$$

$$\boldsymbol{N} = 4.6 = 4$$

h) hallar el espaciamiento entre coronas

$$\boldsymbol{Espaciamientocoronas} = \frac{Espaciolibre}{N°Taladros}$$

$$\boldsymbol{Espaciamientocoronas} = \frac{2.08}{4}$$

$$\boldsymbol{Espaciamientocoronas} = 0.52$$

4.3.2. Resultados en los cálculos por la teoría de Holmberg

Tabla 5 *Parámetros de diseño en la malla*

Ubicación del taladro	N° de taladros	Burden (m)	Espaciamiento (m)
Alivio	4	0.07	0.10
Primer cuadrante	4	0.11	0.16
Segundo cuadrante	4	0.15	0.33
Tercer cuadrante	4	0.24	0.57
Cuarto cuadrante	4	0.32	0.86
Hastiales	6	0.64	0.54
Arrastre	5	0.45	0.54
Corona	5	0.68	0.54
Auxiliares de corona	4	0.63	0.57

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

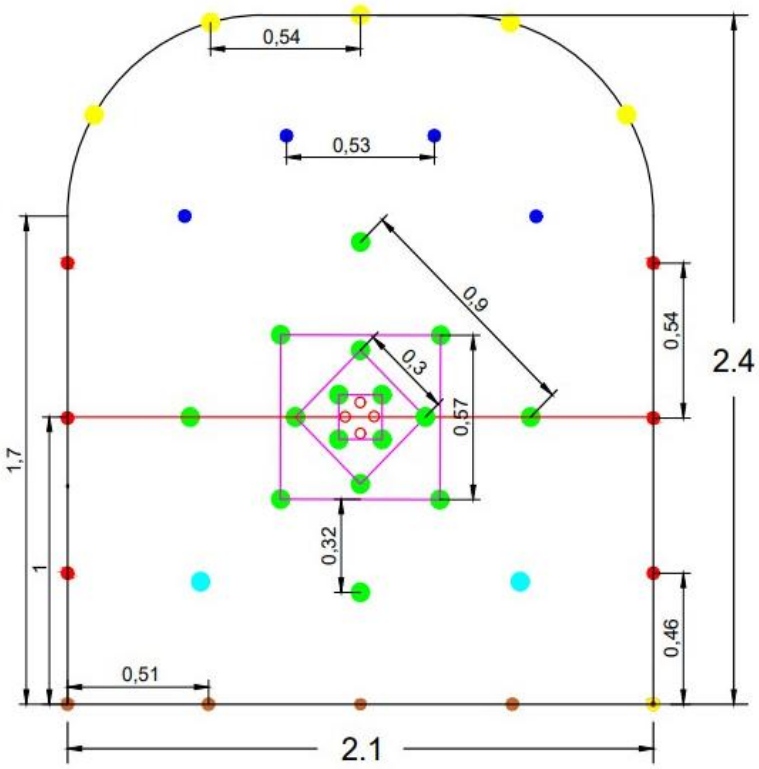
Auxiliar de arrastre	2	0.42	0.57
	TOTAL		42 TALADROS

Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

Figura 16 *Plano Rediseño de malla en tipo de roca II*

MALLA DE PERFORACION, PARAMETROS DE DISEÑO Y NRO TALADROS
JACKLEG–SECCION 2.1X2.4m EN TIPO DE ROCA II
(Arranque tipo corte quemado rompe boca)I

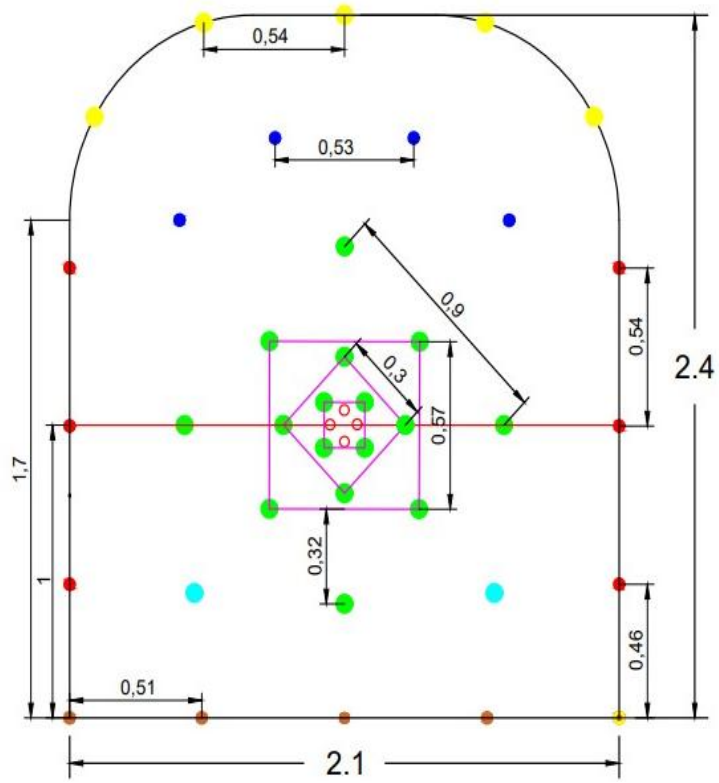


TIPO DE TALADRO	N° DE TALADRO	BURDEN	ESPACIA.	COLOR
ALIVIO	4	0.07	0.10	
AYUDAS				
PRIMER CUADRANTE	4	0.11	0.16	
SEGUNDO CUADRANTE	4	0.15	0.33	
TERCER CUADRANTE	4	0.24	0.57	
CUARTO CUADRANTE	4	0.32	0.86	
CUADRADORES/HASTIAL	6	0.64	0.54	
ARRASTRE	5	0.45	0.54	
CORONA	5	0.68	0.54	
AUXILIAR DE CORONA	4	0.63	0.57	
OTROS AUXILIARES	2	0.42	0.57	
TOTAL	42 TALADROS PERFORADOS			

Nota. Elaboración propia

Figura 17 *Plano Rediseño de malla en tipo de roca III*

MALLA DE PERFORACION, PARAMETROS DE DISEÑO Y NRO TALADROS
JACKLEG–SECCION 2.1X2.4m EN TIPO DE ROCA III
(Arranque tipo corte quemado rompe boca)

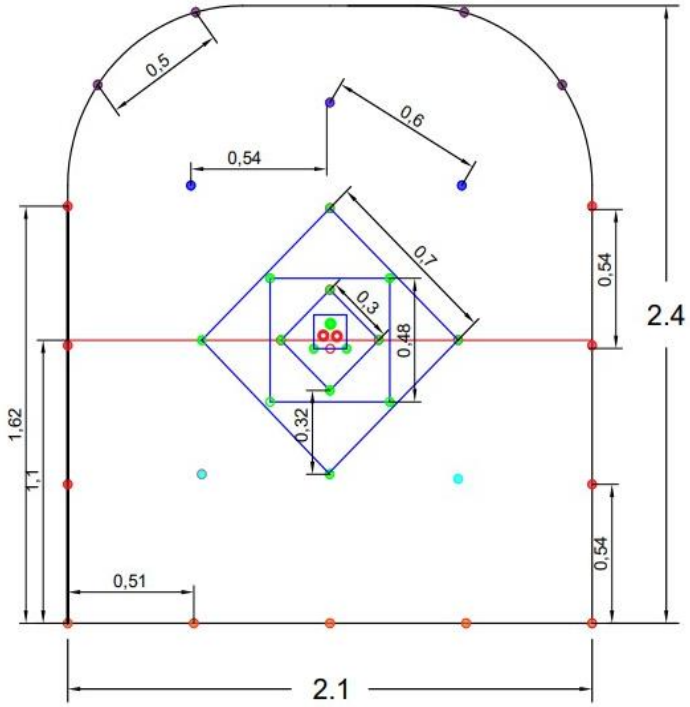


TIPO DE TALADRO	N° DE TALADRO	BURDEN	ESPACIA.	COLOR
ALIVIO	4	0.07	0.10	○
AYUDAS				
PRIMER CUADRANTE	4	0.11	0.16	●
SEGUNDO CUADRANTE	4	0.15	0.33	●
TERCER CUADRANTE	4	0.24	0.57	●
CUARTO CUADRANTE	4	0.32	0.86	●
CUADRADORES/HASTIAL	6	0.64	0.54	●
ARRASTRE	5	0.45	0.54	●
CORONA	5	0.68	0.54	●
AUXILIAR DE CORONA	4	0.63	0.57	●
OTROS AUXILIARES	2	0.42	0.57	●
TOTAL	42 TALADROS PERFORADOS			

Nota. Elaboración propia

Figura 18 *Plano Rediseño de malla en tipo de roca IV*

MALLA DE PERFORACION, PARAMETROS DE DISEÑO Y NRO TALADROS
JACKLEG–SECCION 2.1X2.4m EN TIPO DE ROCA IV
(tipo de arranque corte quemado Dan Kun)



TIPO DE TALADRO	N° DE TALADRO	BURDEN	ESPACIA.	COLOR
ALIVIO	3	0.03	0.06	
AYUDAS				
PRIMER CUADRANTE	3	0.09	0.13	
SEGUNDO CUADRANTE	4	0.13	0.30	
TERCER CUADRANTE	4	0.20	0.48	
CUARTO CUADRANTE	4	0.32	0.70	
CUADRADORES/HASTIAL	6	0.51	0.54	
ARRASTRE	5	0.54	0.51	
CORONA	4	0.68	0.50	
AUXILIAR DE CORONA	3	0.50	0.60	
OTROS AUXILIARES	2	0.54	0.51	
TOTAL	38 TALADROS PERFORADOS			

Nota. Elaboración propia

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.4. Pruebas de voladura con datos de la nueva malla

4.4.1. Diseño y Cálculo de la Nueva Malla

Se rediseñó la malla de perforación, considerando las características geomecánicas del frente de avance (2.1m x 2.4m) y los resultados de los análisis previos. Se calcularon parámetros como el factor de carga lineal, considerando una longitud de taladro de 1.5m, una densidad de explosivo de 0.8 g/cm³ y un peso específico de la roca de 2.5 g/cm³. El objetivo fue optimizar la distribución de los taladros y garantizar una fragmentación adecuada de la roca.

4.4.1.1. Cálculos previos

a) Hallar el volumen que se removerá en el frente

El volumen que se removerá es el mismo puesto que no se modificó la sección ni el avance**.**

$$\boldsymbol{V} = \textit{Area de seccion x long Taladro}$$

$$\boldsymbol{V} = (2.1\ m\ x 2.4\ m) x 1.5\ m$$

$$\boldsymbol{V} = 7.56\ m^3$$

b) Hallar el volumen que ocupara el explosivo en taladros

*Longitud real del taladro perforado es igual al 90% de 1.5 m por temas operativos

En 1 taladro

$$\boldsymbol{V} = \textit{Area de la circunferencia del taladro x Long Explosivo}$$

$$\boldsymbol{V} = (\pi\ x\ r2) x (1\ m\ x\ 90\%)$$

$$\boldsymbol{V} = (\pi\ x\ 0.0182) x (0.9\ m)$$

$$\boldsymbol{V} = 0.000916m3$$

En 27 taladros

$$\boldsymbol{V} = 0.00916\ m3x\ 27$$

$$\boldsymbol{V1} = 0.0247m3$$

En 11 taladros de contorno menos carga

$$\boldsymbol{V} = (\pi\ x\ 0.0182) x (0.72\ m)$$

$$\boldsymbol{V} = 0.0007328\ X\ 11$$

$$\boldsymbol{V2} = 0.00806$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

$$\boldsymbol{V1} + \boldsymbol{V2} = 0.0327m3$$

Nota: La longitud del taladro que ocupa el explosivo está dado por 1m (90%) ya que se carga el taladro con el uso de taco y la longitud restante es el cebo que se coloca de dinamita con tamaño de 0.1778 m, la longitud del taco y la dinamita (0.5m) completarían la totalidad del taladro.

4.4.1.2. Peso del explosivo

$$\boldsymbol{Peso} = Volumen\ de\ 38\ taladros\ x\ densidadExplosivo$$

$$\boldsymbol{Peso} = 0.0327\ x\ 720\ kg/m3$$

$$\boldsymbol{Peso} = 23.587\ kg$$

4.4.1.3. Parámetros de voladura

- **Factor de carga**

$$\boldsymbol{Fc} = \frac{Peso\ del\ explosivo}{Volumen\ removido}$$

$$\boldsymbol{Fc} = \frac{23.587\ kg}{7.56\ m^3}$$

$$\boldsymbol{Fc} = 3.12\ kg/\ m^3$$

- **Factor de carga lineal**

$$\boldsymbol{FcLineal} = \frac{Peso\ del\ explosivo}{Long\ del\ taladro}$$

$$\boldsymbol{FcLineal} = \frac{23.587\ kg}{1.5\ m}$$

$$\boldsymbol{FcLineal} = 15.725\ kg/m$$

- **Factor de potencia**

$$\boldsymbol{Fp} = \frac{Peso\ del\ explosivo}{Peso\ del\ material\ roto}$$

$$\boldsymbol{Fp} = \frac{23.587\ kg}{volumen\ roto\ \times\ peso\ especifico}$$

$$\boldsymbol{Fp} = \frac{23.587\ kg}{7.56\ m^3\ \times 2.5\ ton/\ m^3}$$

$$\boldsymbol{Fp} = 1.25\ kg/ton$$

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.5. Pruebas de voladura en campo

4.5.1. Pintado de la malla de perforación

Para garantizar la precisión de la prueba, se prestó especial atención al diseño de la malla de perforación. Se establecieron espaciamientos precisos entre los taladros y se realizó un marcado claro en la roca para minimizar errores durante la perforación. El objetivo era optimizar el avance del frente y obtener resultados confiables.

Figura 19 *Pintado de malla en frente*

Nota. Elaboración propia

En la figura se observa la implementación de la nueva malla, donde se ha buscado mantener una simetría lo más precisa posible entre los taladros. A pesar de las irregularidades del terreno, se ha realizado un esfuerzo por lograr una distribución uniforme de los taladros, lo que permitirá obtener una fragmentación más controlada de la roca.

4.5.2. Información obtenida

4.5.2.1. Parámetros obtenidos en la nueva malla

Tabla 6 *Datos para el cálculo de rediseño de malla*

Diámetro de taladro de alivio	36mm
Diámetro de taladros de producción	36mm
Longitud de taladros	1.5m
N° de taladros perforados	38
N° de taladros de alivio	4
N° de taladros de producción	38

Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 7 *Parámetros obtenidos en el rediseño de malla*

Tipo de taladro	N° de taladros	Cart/talad	Mechas en pies	Fulminante	Columna de explosivo
Arranque	8	4	24	4	1.14m
Ayudas de arranque	12	12	72	12	1.14m
Auxiliares de corona	4	4	24	4	1.14m
Auxiliar de cuadrador	0	0	0	0	1.14m
Auxiliares de arrastre	2	2	12	2	1.14m
Corona	5	5	30	5	1.14m
Cuadradores	6	6	36	6	1.14m
Arrastre	5	5	30	5	1.14m
TOTAL	42	38	228	38	

Nota. Elaboración propia

Tabla 8 *Parámetros de voladura*

Parámetros de voladura	Valor	Unidad
Cantidad de explosivo	23.59	Kg
Factor de carga	3.12	Kg/m^3
Factor de Carga lineal	15.73	Kg/m
Factor de potencia	1.25	Kg/ton

Nota. Elaboración Propia

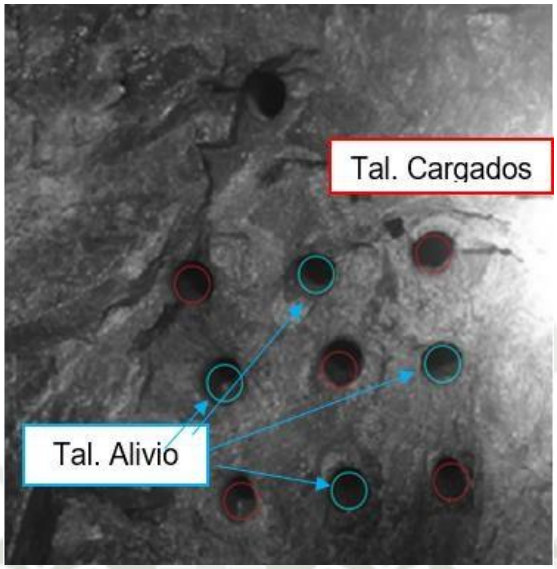
4.5.2.2. Perforación del frente

Para garantizar la precisión del diseño, se realizó un seguimiento riguroso de las operaciones de perforación, asegurando el cumplimiento estricto de los parámetros establecidos en la malla. Se verificó constantemente el espaciamiento y la simetría de los taladros.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 20 *Arranque tipo corte quemado*



Nota. Elaboración propia

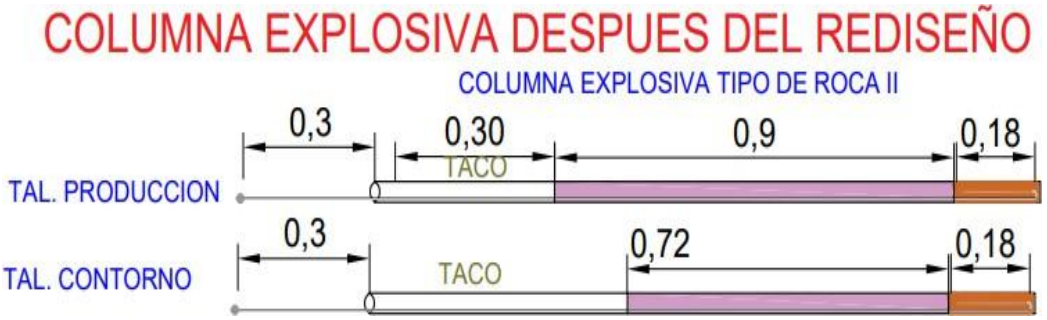
4.5.2.3. Carguío e inicio del chispeo en el frente de trabajo

Una vez finalizada la perforación, se realizará una inspección detallada de cada taladro para garantizar que estén completamente limpios y libres de detritos. Esta medida es fundamental para asegurar una carga de explosivos eficiente y segura.

Figura 21 *Columna explosiva antes del rediseño*

Nota. Elaboración propia, *el taladro fue tapado con taco en base de detritus (roca triturada)*

Figura 22 *Columna explosiva después del rediseño- Roca tipo II*

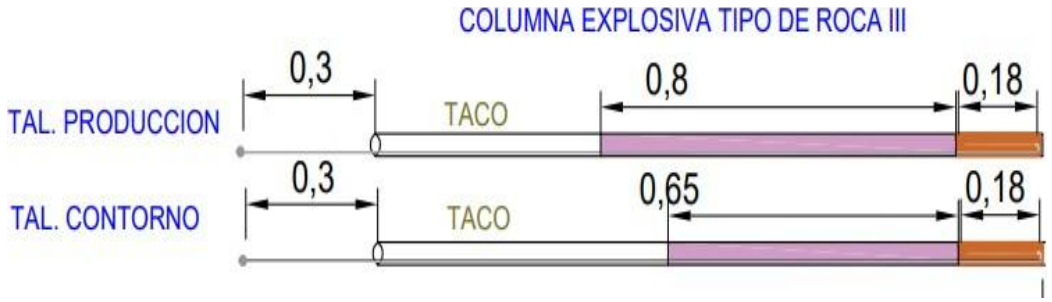


Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

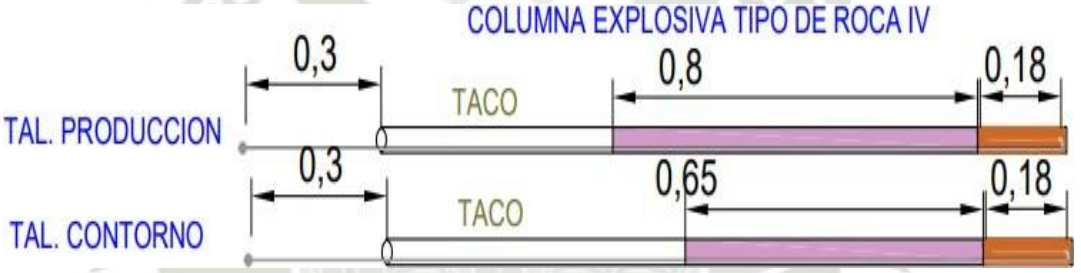
Nota. Elaboración propia, *el taladro fue tapado con taco en base de detritus (roca triturada)*

Figura 23 *Columna explosiva después del rediseño- Roca tipo III*



Nota. Elaboración propia, *el taladro fue tapado con taco en base de detritus (roca triturada)*

Figura 24 *Columna explosiva después del rediseño- Roca tipo IV*



Nota. Elaboración propia, *el taladro fue tapado con taco en base de detritus (roca triturada)*

Figura 25 *Inicio del disparo*

Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

4.5.2.4. Supervisión del frente después de la voladura

Una vez ventilada la zona, se inspeccionó el frente de trabajo y se constató que la voladura había sido exitosa. La sección excavada presentó un acabado limpio y definido, sin daños significativos en las paredes. Estos resultados indican que el diseño de la malla de perforación y la selección de los explosivos fueron óptimos, asegurando una voladura controlada y eficiente.

Figura 26 *Voladura*

Nota. Elaboración propia

4.5.2.5. Avance lineal por campaña de optimización

Para evaluar si era efectivo el nuevo modelo de malla, se recopilaron datos durante un mes. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla, donde se evidencia una mejora significativa en los indicadores de desempeño.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

Tabla 9 Avance lineal mes de Setiembre

MES	GUARDIA DIA				GUARDIA NOCHE			
SETIEMBRE	**PP**	**METROS**	**AVANCE EFEC**	**AVANCE REAL**	**PP**	**METROS**	**AVANCE EFEC**	**AVANCE REAL**
10/09/2025	5	1.524	1.4478	1.4	5	1.524	1.4478	1.4
11/09/2025	5	1.524	1.4478	1.43	5	1.524	1.4478	1.42
12/09/2025	ND	_	0	0	5	1.524	1.4478	1.45
13/09/2025	5	1.524	1.4478	1.42	ND	_	0	0
14/09/2025	5	1.524	1.4478	1.43	5	1.524	1.4478	1.3
15/09/2025	5	1.524	1.4478	1.44	5	1.524	1.4478	1.41
16/09/2025	ND	_	0	0	5	1.524	1.4478	1.38
17/09/2025	5	1.524	1.4478	1.42	5	1.524	1.4478	1.44
18/09/2025	DIA PARA ESTANDARIZAR LABORES (SIN AVANCE EN FRENTES)							
19/09/2025	5	1.524	1.4478	1.45	5	1.524	1.4478	1.35
20/09/2025	5	1.524	1.4478	1.35	5	1.524	1.4478	1.42
21/09/2025	5	1.524	1.4478	1.4	ND	_	0	0
22/09/2025	5	1.524	1.4478	1.32	5	1.524	1.4478	1.44
23/09/2025	5	1.524	1.4478	1.46	5	1.524	1.4478	1.35
24/09/2025	ND	_	0	0	5	1.524	1.4478	1.41
25/09/2025	5	1.524	1.4478	1.41	5	1.524	1.4478	1.39

26/09/2025	5	1.524	1.4478	1.42	5	1.524	1.4478	1.41
27/09/2025	ND	_	0	0	5	1.524	1.4478	1.4
28/09/2025	5	1.524	1.4478	1.36	5	1.524	1.4478	1.39
29/09/2025	5	1.524	1.4478	1.41	5	1.524	1.4478	1.44
30/09/2025	5	1.524	1.4478	1.4	5	1.524	1.4478	1.43
01/10/2025	5	1.524	1.4478	1.42	5	1.524	1.4478	1.42
02/10/2025	5	1.524	1.4478	1.4	ND	_	0	0
03/10/2025	5	1.524	1.4478	1.42	5	1.524	1.4478	1.45
TOTAL	**95**	**28.956**	**27.5082**	**26.76**	**65**	**30.48**	**28.956**	**28.1**

AVANCE TOTAL AMBAS GUARDIAS	54.86	m
AVANCE PROYECTADO	63.36	m
%EFECTIVIDAD	86.58	%

Nota. Elaboración propia

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.6. Optimización de costos con la nueva malla de perforación

En el pasado, la industria minera ha priorizado la producción sobre la eficiencia económica. La falta de un control detallado de los costos, especialmente en áreas como la perforación y voladura, ha generado una serie de problemas, como el sobredimensionamiento de las cargas de explosivos, la utilización de equipos obsoletos y una gestión ineficiente de los recursos. Estas ineficiencias han llevado a un aumento de los costos operativos y han reducido la rentabilidad de las operaciones mineras.

4.6.1. Costos unitarios de P y V

El alcance de este estudio abarca un análisis exhaustivo de todas las operaciones unitarias involucradas en la perforación y voladura, desde la planificación hasta la ejecución.

4.6.2. Costos de las herramientas

Una proporción considerable de los costos operativos se asigna a la adquisición y mantenimiento de herramientas de perforación y voladura. Por esta razón, se ha realizado un análisis detallado del costo por ciclo de vida de cada herramienta, considerando su vida útil y el número de disparos que puede realizar.

Tabla 10 *Costos en herramientas*

Item	Precio	Vida	Costo	
			Toneladas	Disparo
Barretilla	24	120 disp.	0.01	0.20
Cargador de Nitrato	70	120 disp.	0.03	0.58
Lampa	29	20 disp.	0.08	1.45
Pico	26	50 disp.	0.03	0.52
Combo de 12 Lb	50	50 disp.	0.05	1.00
Llave Stilson de 14"	90	120 disp.	0.04	0.75
Llave Stilson de 18"	131.9	130 disp.	0.05	1.01
Spray marcado de malla	7	10 disp.	0.04	0.70
Punzón Cebador	11	120 disp.	0.00	0.09
Cucharilla	20	50 disp.	0.02	0.40
Guiador	3	10 disp.	0.02	0.30
Atacador	3	5 disp.	0.03	0.60
Wincha 5 mts	7	50 disp.	0.01	0.14
TOTAL			**0.41**	**7.75**

Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.6.3. Costos de EPPS

El costo del equipo de protección personal (EPP) es una inversión fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores. Por esta razón, se ha realizado un análisis detallado de los costos asociados a cada elemento del EPP, considerando las necesidades específicas de las diferentes categorías de personal.

Tabla 11 *Costos en EPP*

Ítem	Precio s/.	Vida útil (días)	Costo/día	Tipo a	Tipo b	Tipo c
Botas de Jebe	70	75	0.93	0.93	0.93	0.93
Casco Tipo sombrero	60	300	0.20	0.20	0.20	0.20
Lampara	300	300	1.00	1.00	1.00	1.00
Guantes de cuero	8	15	0.53	0.53	0.53	0.53
Correa portalámpara	15	300	0.05	0.05	0.05	0.05
Pantalón con cintas reflectivas	30	300	0.10	0.10	0.10	0.10
Polo con cintas reflectivas	20	75	0.27	0.27	0.27	0.27
Chaleco con cintas reflectivas	45	75	0.60	0.60	0.60	0.27
Respirador contra gas	80	300	0.27	0.27	0.27	
Tapón de oído	2	300	0.01	0.01	0.01	
Lentes de seguridad	9	30	0.30	0.30		
COSTO/ DÍA				4.26	3.96	3.35

Nota. Elaboración propia

4.6.4. Costos de explosivos y accesorios

El análisis de las operaciones de voladura reveló un sobredimensionamiento en las cargas de explosivo. Para corregir esta situación, se realizaron cálculos detallados de parámetros como el factor de carga

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

lineal y el factor de potencia, lo que permitió determinar la cantidad de explosivo necesaria para cada taladro y optimizar así el consumo.

Tabla 12 *Costos de explosivos y accesorios*

Explosivos y/o accesorios	Tipo de envase	Cantidad	Cantidad a ser utilizada
ANFO	SACO	150.00	40.323
Dinamita Semexa 65 7/8" x 7	CAT	0.600	0.161
Guía de seguridad	PIE	0.070	0.019
Fulminante corriente	C/U	0.330	0.089

Nota. Elaboración propia

4.7. Comparación de información en el diseño de la malla

4.7.1. Análisis del diseño de malla usado en la mina

La malla de perforación presentaba un número excesivo de taladros (46 en total), lo que generó una distribución irregular y afectó negativamente la eficiencia y seguridad de las operaciones de voladura, como se detalla en la Tabla 14.

Tabla 13 *Cantidad de talados antes del rediseño*

Tipo de taladro	N.º de taladro
Arranque	9
Ayudas del arranque	9
Auxiliar de corona	5
Auxiliar de cuadrador	6
Auxiliar de arrastre	1
Corona	5
Cuadradores	6
Arrastre	5
TOTAL	46

Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.7.2. Análisis del diseño de malla rediseñada

En el presente diseño se logra optimizar 4 taladros (reducir) como se visualiza en la Tabla 5, con una longitud equivalente a 5.60 m y una reducción de tiempo de 10 minutos.

4.8. Discusión de resultados en la perforación

4.8.1. Perforación antes del rediseño

La nueva malla de perforación implementada en el crucero NW 4 ha demostrado ser altamente efectiva. Los resultados obtenidos muestran un aumento del 15% en el avance por disparo, alcanzando los 1.73 metros, y una reducción del 10% en el consumo de explosivos. Además, la disminución en los tiros fallidos ha mejorado significativamente la seguridad de las operaciones. La Figura 34 ilustra claramente la optimización de la distribución de los taladros y la consecuente mejora en la fragmentación de la roca.

Figura 27 *Asimetría en los taladros de arranque*

Nota. Elaboración propia

4.8.2. Perforación después de rediseño

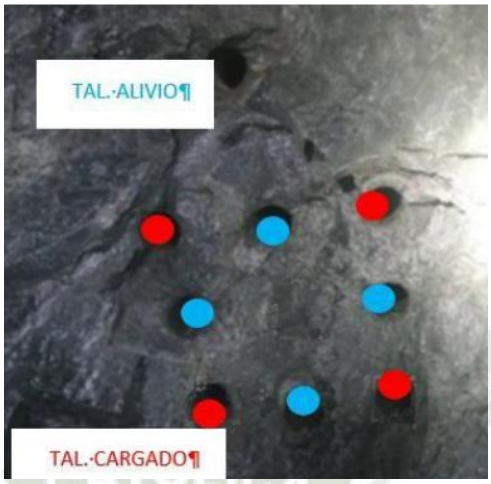
La implementación de la nueva malla de perforación permitió optimizar la distribución de los taladros, logrando una disposición más simétrica y regular en el frente de trabajo. Como se observa en la figura, esta mejora en la geometría de la malla ha contribuido a una fragmentación más uniforme de la roca y a un avance más eficiente del frente de trabajo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

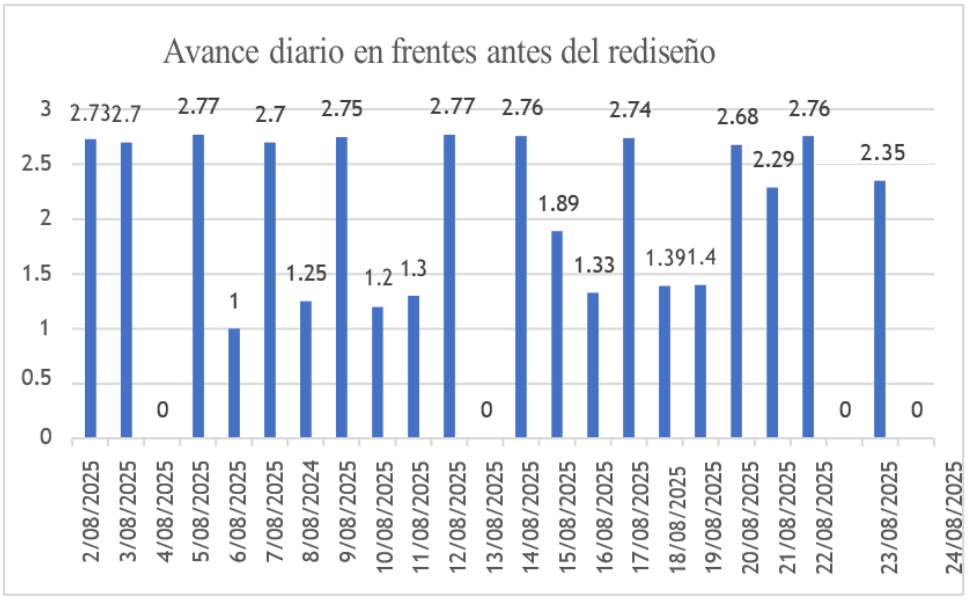
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 28 *Arranque con taladros simétricos*



Nota. Elaboración propia

Figura 29 *Avance diario antes del rediseño*



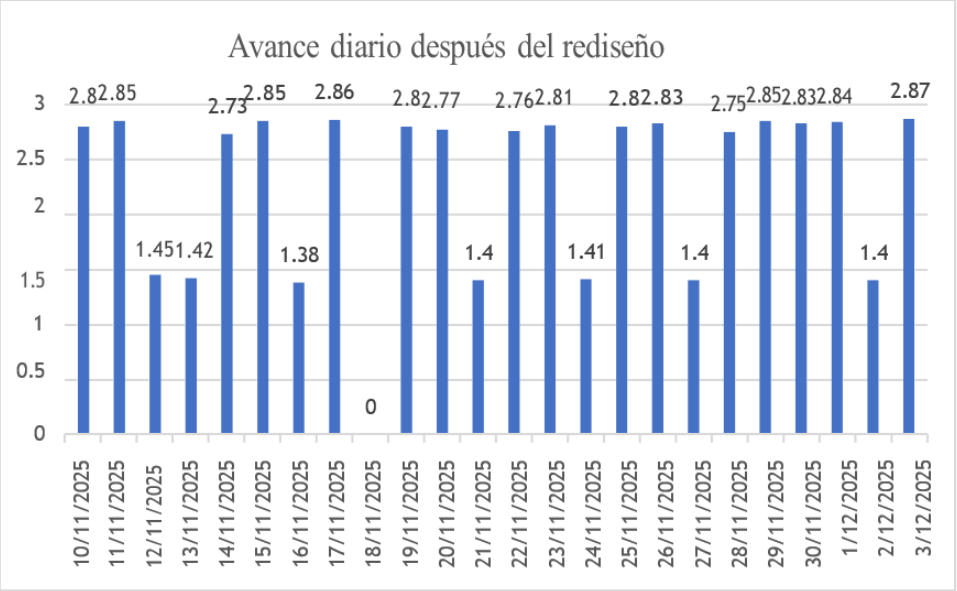
Nota. Elaboración propia

Antes de la optimización de la malla de perforación, el avance diario era bajo y se registraban frecuentemente guardias sin disparo, como se evidencia en la figura adjunta. Esta situación se atribuye a un diseño de malla ineficiente, que generaba dificultades en la fragmentación de la roca y aumentaba el riesgo de tiros fallidos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

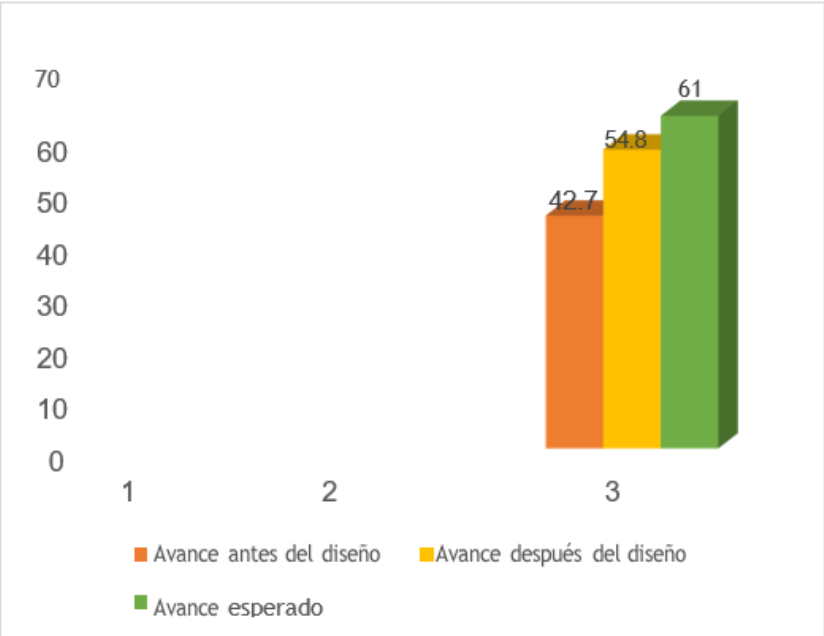
Figura 30 *Avance diario después del rediseño*



Nota. Elaboración propia

La implementación de la nueva malla de perforación ha resultado en un incremento del 54.8 metros en el avance diario, evidenciando una mejora significativa en la eficiencia de las operaciones. Esta mejora, en comparación con el diseño anterior, se traduce en un ahorro de 1027.5 dólares por metro, evidenciando la eficiencia del nuevo sistema.

Figura 31 *Avances comparados con la planificación*



Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Al realizar la optimización, se logró un incremento significativo en el avance, pasando de un 70% al 89% respecto al avance esperado. Esto representa un aumento del 19% en la productividad, como se evidencia en la figura adjunta.

4.9. Discusión de resultados de la voladura

4.9.1. Carga lineal antes del rediseño de la malla

Los cálculos realizados para el nivel 0 y el explosivo utilizado en el CX-2040 revelaron un factor de carga excesivamente alto. Esta situación provocó voladuras excesivas, generando daños en las labores y afectando la eficiencia de las operaciones.

4.9.2. Carga lineal después de rediseñar

La implementación de una nueva malla de perforación en la labor minera Esperanza ha generado múltiples beneficios. Se ha logrado una reducción del 36% en el consumo de explosivos, lo que se traduce en un ahorro de 13.24 $/m. Asimismo, se ha observado una mejora en la fragmentación de la roca y una disminución del tiempo de ciclo, lo que ha aumentado la productividad y la eficiencia general de las operaciones.

Tabla 14 *Parámetros de voladura para cada tipo de roca*

Ítems de evaluación	Antes del rediseño	Después del rediseño		
	Frentes de avances	Tipo de roca II	Tipo de roca III	Tipo de roca IV
Factor de carga	4.76 Kg/m^3	3.12 Kg/m^3	2.16 Kg/m^3	2.08 Kg/m^3
Factor de carga lineal	24 Kg/m	15.73 Kg/m	10.88 Kg/m	10.49 Kg/m
Factor de potencia	1.90 Kg/ton	1.25 Kg/ton	0.86 Kg/ton	0.83 Kg/ton
Cantidad de es4xplosivo	36.00 Kg	23.59 Kg	16.32 Kg	15.74 Kg

Nota. Elaboración propia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 15 *Parámetros de perforación para cada tipo de roca*

Ítems de evaluación	**Antes del rediseño**	**Después del rediseño**		
	Frentes de avances	**Tipo de roca II**	**Tipo de roca III**	**Tipo de roca IV**
N° de taladros	46	42	42	39
N° de taladros de alivio	4	4	4	3
N° de taladros de producción	42	38	38	36
Arranque	9	8	8	7
Ayudas de arranque	9	8	8	8
Auxiliares de corona	5	4	4	3
Auxiliares de cuadradores	6	4	4	4
Auxiliares de arrastre	1	2	2	2
Corona	5	5	5	4
Cuadradores	6	6	6	6
Arrastre	5	5	5	5

Nota. Elaboración propia

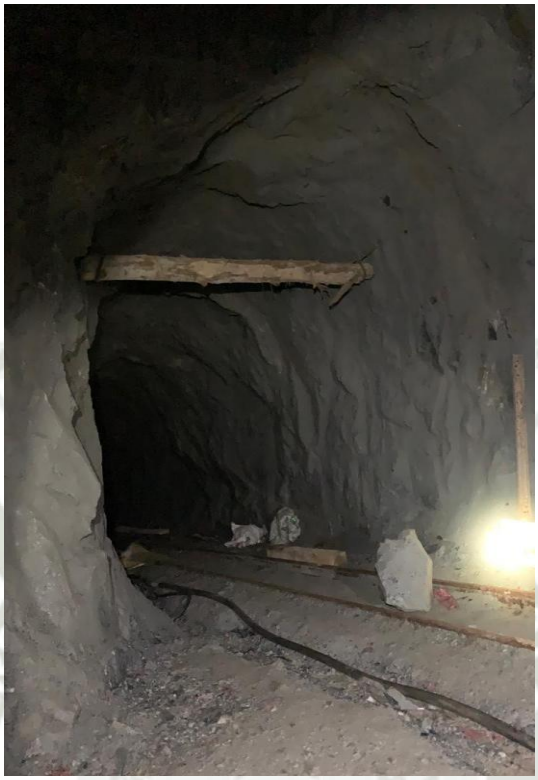
4.9.3. Resultado de voladura en CX-2040

Los resultados de la voladura en el CX-2040 son altamente satisfactorios. Como se observa en la imagen, se ha logrado una fragmentación controlada de la roca, respetando los límites de la sección diseñada. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia de las mejoras implementadas en el diseño de la malla de perforación. Al reducir significativamente la sobre-rotura, se ha disminuido la necesidad de sostenimiento adicional, optimizando así los costos y mejorando la seguridad de las operaciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 32 *Avances comparados con la planificación*



Nota. Elaboración propia

4.10. Análisis de costos

4.10.1. Costos anteriores al rediseño de la malla

Los costos de operación se veían incrementados significativamente debido al uso excesivo de explosivos. Esta práctica, además de ser ineficiente, generaba un mayor gasto en accesorios de voladura, lo que repercutía directamente en los costos totales de producción.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

Tabla 16 *Costos unitarios de perforación y voladura antes del rediseño*

Equipo de Acarreo	Pala neumática					7.56	m3
Equipo de Perforación	JACK LEG RNP					46	Tal/Guardia
					Barreno		
Avance por Disparo	1.3	m				5	Pies
					Rendimiento	85%	
	JORNAL	**CANT**	**DIAS**	**INCID%**	**BBSS**	**$ /Disp.**	**$/m**
A.- MANO DE OBRA							
1.- OPERACIÓN							
Perforación							
1 Perf. J/L	24.13	1	1			24.13	18.56
1 Ayudante	21.45	1	1			21.45	16.50
Limpieza							
1 ayudante	21.45	1	1			21.45	16.50
2.- SERVICIOS							
1 bodeguero	670.24	1	20	0.20		3.35	2.58
3.- SUPERVISION							
1 Ing. Residente	1608.58	1	20	0.15		6.03	4.64
2 Ing. De guardia	938.34	2	20	0.15		7.04	5.41
2 capataces	938.34	2	20	0.15		7.04	5.41
TOTAL A							**69.60**

	$/UND		CONSUMO		$/PIE	DURACION	$ / Disp.	$ / m
B .- MATERIALES								
1.- PERFORACION								
Barreno de 3 c/u	84.99	UND	92	pies/disp.	0.14	600	13.03	10.02
Barreno de 4 c/u	101.34	UND	92	pies/disp.	0.17	600	15.54	11.95
Barreno de 5 c/u	114.48	UND	46	pies/disp.	0.19	600	8.78	6.75
Aceite de perf. Gln	13.40	GL	0.15	Gln/disp.		400	2.01	1.55
Perforadora J/L / pie	0.12	$/PIE	230	pies/disp.			28.36	21.82
Manguera de 1/2" 100 m		257.10	m		0.01	40000	0.03	0.02
Manguera de 1" 100 m	440.75	m			0.01	40000	0.05	0.04
2.- VOLADURA								
Semexa 65% x 7/8" x 7"	0.16	UND	42	tal			6.756	5.20
Fulminante	0.09	UND	42	tal			3.716	2.86
Guía de seguridad	0.02		252	pies			4.729	3.64
ANFO	40.21	SACO	36	kg/disp.	0.72		28.954	22.27
TOTAL B								**86.12**
C.- MISCELANEOS								
1. Equipo de Protección							$ / Disp.	$ / m
	Tipo A	Tipo B	Tipo C					
2. Herramientas	1.14	1.06	0.90				3.10	2.38
							2.08	1.60

TOTAL C					**3.98**
	COSTO				
	DIRECTO:	(A + B + C)			159.70
	COSTO				
	INDIRECTO	Gastos Generales	10.00%		15.97
		Utilidad	10.00%		15.97
	SUBTOTAL				191.64
	I.G.V.		18.00%		34.50
	TOTAL			$	**226.14**

Nota. Elaboración propia

4.10.2. Reducción de costos con el rediseño de la malla

Tabla 17 *Costos unitarios de perforación y voladura después del rediseño*

Equipo de Acarreo	Pala neumática					7.56	m3
Equipo de Perforación	JACK LEG RNP					46	Tal/Gdia
Avance por Disparo	1.3 m			Barreno	:	5	Pies
				Rendimiento		85%	
JORNAL	CANT	DIAS	INCID%	BBSS		$ /Disp.	$/m

A.- MANO DE OBRA							
1.- OPERACIÓN							
Perforación							
1 Perf. J/L	24.13	1	1			24.13	18.56
1 Ayudante	21.45	1	1			21.45	16.50
Limpieza							
1 ayudante	21.45	1	1			21.45	16.50
2.- SERVICIOS							
1 bodeguero	670.24	1	20	0.20		3.35	2.58
3.- SUPERVISION							
1 Ing. Residente	1608.58	1	20	0.15		6.03	4.64
2 Ing. De guardia	938.34	2	20	0.15		7.04	5.41
2 capataces	938.34	2	20	0.15		7.04	5.41
TOTAL A							**69.60**

	$/UND		CONSUMO	$/PIE	DURACION	$ / Disp.	$ / m
B.- MATERIALES							
1.- PERFORACION							
Barreno de 3 c/u	84.99	UND	84 pies/disp.	0.14	600	11.90	9.15
Barreno de 4 c/u	101.34	UND	84 pies/disp.	0.17	600	14.19	10.91
Barreno de 5 c/u	114.48	UND	42 pies/disp.	0.19	600	8.01	6.16
Aceite de perf. Gln	13.40	GL	0.15 Gln/disp.		400	2.01	1.55
Perforadora J/L / pie	0.12	$/PIE	210 pies/disp.			25.90	19.92

Manguera de 1/2" 100 m	257.10	M			0.01	40000	0.03	0.02
Manguera de 1" 100 m	440.75	M			0.01	40000	0.05	0.04
2.- VOLADURA								
Semexa 65% x 7/8" x 7"	0.16	UND	38	tal			6.113	4.70
Fulminante	0.09	UND	38	tal			3.362	2.59
Guía de seguridad	0.02		228	pies			4.279	3.29
ANFO	40.21	SACO	36	kg/disp.		0.47	18.901	14.54
TOTAL B								**72.88**
C.- MISCELANEOS								
1. Equipo de Protección							$ / Disp.	$ / m
2. Herramientas	Tipo A	Tipo B	Tipo C					
	1.14	1.06	0.90				3.10	2.38
							2.08	1.60
TOTAL C								**3.98**
	COSTO DIRECTO: (A + B + C)						146.46	
	COSTO							
	INDIRECTO	Gastos Generales			10.00%			14.65
		Utilidad			10.00%			14.65
	SUBTOTAL						175.75	
	I.G.V.				18.00%			31.64
	TOTAL						$	**207.39**

Nota. Elaboración propia

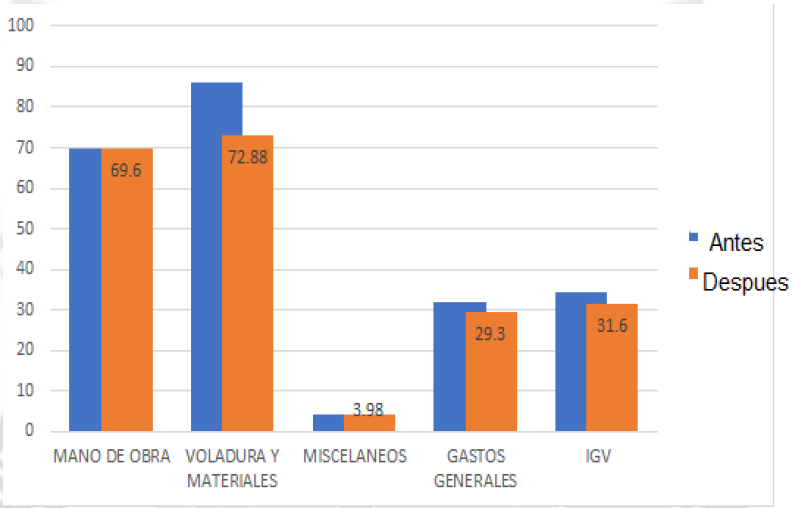
REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

4.10.3. Comparación de costos anteriores y posteriores al rediseño

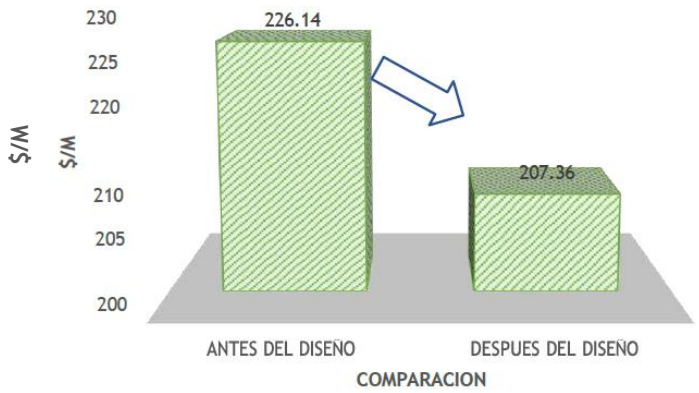
A pesar de que los costos de mano de obra y EPP se mantuvieron estables, la optimización de la malla de perforación ha permitido una reducción significativa en los costos variables asociados a la voladura, principalmente en el consumo de explosivos y accesorios. Esta disminución se evidencia claramente en la Figura 40.

Figura 33 *Comparación de costos antes y después del rediseño*



Nota. Elaboración propia

Figura 34 *Gráfico de comparación de costos*



Nota. Elaboración propia

Se logró una reducción significativa en los costos operativos, pasando de 226.14 $/m a 207.39 $/m, lo que representa un ahorro del 8.29%. Este ahorro se debe principalmente a la disminución del consumo de explosivos y a una mayor eficiencia en las operaciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CONCLUSIONES

I. Optimización de la malla de perforación

Se llevó a cabo una optimización de la malla de perforación, reduciendo el número de taladros de 46 a 42. Esta medida permitió disminuir significativamente los costos por metro de avance, pasando de 226 a 207 dólares estadounidenses, lo que representa una reducción del 8.29%.

II. Reducción del consumo de explosivos

Con el objetivo de mejorar la eficiencia y reducir costos, se implementaron cambios en los parámetros de voladura. Se logró una disminución del 64% en el consumo de explosivo ANFO, ajustando el factor de carga, el factor de carga lineal y el factor de potencia. Estos cambios optimizaron la fragmentación del material y redujeron el impacto ambiental.

III. Mejora en la planificación de la voladura

Gracias al uso de modelos matemáticos, se logró optimizar la distribución de los taladros en la malla de perforación. Esta optimización permitió realizar voladuras más eficientes, reduciendo el riesgo de daños colaterales y mejorando la fragmentación del material, lo que se tradujo en una mayor productividad en las labores de carga y acarreo.

IV. Aumento de la eficiencia operativa

Las mejoras en las operaciones de perforación y voladura han permitido superar las metas establecidas, alcanzando un avance lineal por campaña del 90%, en comparación con el 70% planificado. Este resultado evidencia la eficacia de las estrategias implementadas y una mejor utilización de los recursos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

RECOMENDACIONES

1. Analizar el rediseño de malla en Cx-2040 y prolongación de la veta Verónica que va en dirección E-W.
2. La implementación de taladros de mayor longitud (6 o 7 pies) en la malla de perforación presenta una serie de ventajas potenciales. Al aumentar la profundidad de los taladros, se podría mejorar la fragmentación de la roca, reducir el número total de taladros y, en consecuencia, disminuir los costos de perforación. Sin embargo, es fundamental realizar un análisis detallado de las condiciones geológicas y operativas para evaluar la viabilidad técnica y económica de esta propuesta.
3. Mejorar el rediseño de la malla usando softwares mineros que están relacionados al diseño en perforación y voladura para tecnificar los parámetros
4. Se recomienda el uso de sostenimiento con pernos, shotcrete y cuadros de madera de acuerdo al RMR mencionado en la investigación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

GLOSARIO

- **Rediseño:** Proceso de modificar o reorganizar algo para mejorar su funcionamiento, apariencia o eficiencia. En el contexto minero, puede referirse a cambiar la disposición de los taladros en una malla de perforación para optimizar la fragmentación de la roca y reducir costos.
- **Geometría:** Rama de las matemáticas que estudia las propiedades y medidas de las figuras en el espacio. En minería, se refiere a la forma y disposición de las estructuras geológicas, como vetas, cuerpos mineralizados y fracturas. La geometría de una veta, por ejemplo, influye en la elección del método de explotación.
- **Perforación:** Proceso mecánico que consiste en realizar agujeros en la roca utilizando herramientas especializadas llamadas barrenos. La perforación es un paso previo a la voladura y permite crear espacios para introducir los explosivos.
- **Voladura:** Proceso de fragmentación de la roca mediante la detonación de explosivos colocados en los agujeros perforados. La voladura permite extraer el mineral de manera controlada y eficiente.
- **Taladros:** Herramientas mecánicas utilizadas para perforar agujeros en la roca. Existen diferentes tipos de taladros, cada uno adaptado a diferentes condiciones geológicas y tipos de roca.
- **Costos:** Gastos asociados a una actividad, en este caso, a las operaciones mineras. Los costos pueden ser directos (materiales, mano de obra) o indirectos (energía, mantenimiento). La optimización de los costos es un objetivo fundamental en la industria minera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

REFERENCIAS

Afum, B. O. &, & Temeng, V. A. (2015). REDUCING DRILL AND BLAST COST THROUGH BLAST OPTIMISATION – A CASE STUDY. Ghana Mining Journal, 15(2), 50–57.

Agreda T, C. (1993). Curso de Modelización Matemática de la Voladura de Rocas.

Ames Lara, Víctor Alejandro (2008). - Diseño de las Mallas de Perforación y Voladura Utilizando la Energía Producida por las Mezclas Explosivas. Tesis de Post Grado, Universidad Nacional de Ingeniería: Lima

Artigas Z., María T. (2011) - Diseño de patrones de perforación y voladura, para normalizar la fragmentación del material resultante de la mina. Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela: Caracas.

Artigas, M. T. (2011). Perforación de rocas. Lima: Editorial Minera.

Chancasanampa, W. (2019). Diseño de la malla de perforacion y voladura para incrementar la productividad de tajeos en la compañia minera Great Panther Coricancha S.A. Huarochiri: Universidad Nacional del Centro del Peru. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5431/T010_74357222_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Correa, C. E. (2009). Parámetros geomecánicos para diseño de voladura en minería subterránea. Revista Geotécnica Minera, 15(3), 234-256.

De la Cuadra, I. (1974). Ventilación en minería subterránea. Lima: Editorial Minera.

EXSA, E. (2019). Manual practico de voladura. Arequipa: Exsa.

Exsa. (2001). Manual práctico de voladura. Lima: Exsa.

Hernández, R., Fernández , C., & Baptista, P. (2010). Metodología de la Investigación (Quinta ed.). México: Mc Graw Hill.

Huanca, R. (2021). "OPTIMIZACION DE COSTOS DE PERFORACION Y VOLADURA MEDIANTE EL MODELO KUZ RAM EN EL CRUCERO 862 NW, EMPRESA MINERA ESTRELLA DE CHAPARRA S.A.". Puno:Universidad Nacional del Altiplano.

Konya, C. (1998). Diseño de voladuras. Hungria: Ediciones Cuicatl

López J. C. (1984). Manual de perforación y voladura de rocas. España.

López Jimeno, C. R. (2005). Voladura de rocas (3ª ed.). Madrid: Editorial Técnica.

Mendoza, P. (2021). “REDUCCIÓN DE LOS COSTOS DE VOLADURA E INCREMENTO DEL AVANCE LINEAL, USANDO EMULSIONES ENCARTUCHADAS EN CIA. MINERA YANAQUIHUA S.A.C". Arequipa:Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa.

Ministerio de Energía y Minas. (2016). Decreto Supremo Nº 024-2016-EM. Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. Lima: MINEM.

Persson, P.-A., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). Rock Blasting and Explosives Engineering. Suecia: Routledge Group.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Rodríguez, D., & Rojas, E. (2019). Propuesta de malla de perforacion en el crucero NW 4 y el tajo 8000 para reduccion de costos en mina subterranea en La Libertad. La Libertad: Universidad Privada del Norte. Recuperado de: https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21032

Urzúa, M., Alejano, L., & Pérez, M. (2010). Clasificación geomecánica de macizos rocosos. Revista de Ingeniería Geológica, 25(2), 45-60

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis