



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**REDISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN Y FACTOR DE
CARGA EXPLOSIVA EN EL DESARROLLO DE LA GALERÍA
SANTA ISABEL, UNIDAD MINERA ESPERANZA, CARAVELÍ –
AREQUIPA**

TESIS

PRESENTADA POR:

RONALD ESTOFANERO CUTIPA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO – PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

**REDISEÑO DE MALLA DE PERFORACIÓN
Y FACTOR DE CARGA EXPLOSIVA EN EL
DESARROLLO DE LA GALERÍA SANTA**

AUTOR

RONALD ESTOFANERO CUTIPA

RECuento DE PALABRAS

18419 Words

RECuento DE CARACTERES

100650 Characters

RECuento DE PÁGINAS

103 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.0MB

FECHA DE ENTREGA

Jul 18, 2024 3:16 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jul 18, 2024 3:17 PM GMT-5

● **17% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 16% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 16 palabras)


Ing. David Velasquez Medina
DOCENTE F.I.M. - UNA


D. Americo Arizaca Avalos
Director de la Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería de Minas

Resumen



DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación la dedico a mis distinguidos padres Nancy Victoria Cutipa y Victor Estofanero, por su apoyo incondicional en la formación profesional de mi persona en la facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

A mis apreciados hermanos Yudith y Leonel Ivan que me alentaron moralmente para seguir adelante.

A mi querida esposa Leydy Villahermosa porque la amo infinitamente quien siempre me brindo todo su apoyo.

Ronald Estofanero Cutipa



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a Dios, creador de nuestro planeta y de la vida misma, por Su amor infinito y por concederme la oportunidad de ampliar mi conocimiento, beneficiando así tanto a mí como a mi familia de manera inmensa.

Estoy profundamente agradecido con mi alma mater, la Universidad Nacional del Altiplano Puno, y específicamente con la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por brindarme la educación fundamental y la formación profesional que han moldeado mi trayectoria académica. Expreso mi sincero reconocimiento a mis estimados profesores, cuya dedicación y vasta experiencia han enriquecido profundamente mi comprensión.

Extiendo mi más sincero agradecimiento a la Unidad Minera Esperanza de Caravelí - Arequipa, por su invaluable apoyo y por permitirme amablemente llevar a cabo este estudio de investigación. Su colaboración ha sido fundamental para la realización de este proyecto.

Por último, me felicito a mí mismo por mi determinación inquebrantable, mi autoconfianza y mi resiliencia a lo largo de este camino. Estoy agradecido por nunca rendirme y por enfrentar los desafíos que finalmente han contribuido a mi crecimiento personal y profesional.

Estos agradecimientos expresan gratitud de manera estructurada y apreciativa, reflejando el profundo impacto de cada entidad e individuo involucrado en tu trayectoria.

Ronald Estofanero Cutipa



ÍNDICE DE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE DE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2.1. Pregunta general.....	17
1.2.2. Preguntas específicas	17
1.3. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	18
1.3.1. Hipótesis general.....	18
1.3.2. Hipótesis específicas	18
1.4. OBJETIVOS.....	18
1.4.1. Objetivo general	18
1.4.2. Objetivos específicos	18
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	19



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	21
2.2.	MARCO TEÒRICO	28
2.2.1.	Perforación	28
2.2.2.	Trazos de arranque	29
2.2.1.1.	Corte quemado (Burn cut).....	31
2.2.2.2.	Corte cilíndrico.....	32
2.2.3.	Denominación y distribución de los taladros	33
2.2.4.	Perforadoras	35
2.2.4.1.	Perforación neumática.....	36
2.2.4.2.	Perforadora neumática Jackleg.....	36
2.2.5.	Aceros de perforación	37
2.2.5.1.	Barra de perforación.....	37
2.2.5.2.	Brocas de perforación.	38
2.2.6.	Explosivos	39
2.2.6.1.	Tipos de explosivos industriales.	40
2.2.6.2.	Propiedades de los explosivos.....	41
2.2.6.3.	Criterios de selección del explosivo.....	42
2.2.7.	Voladura.....	43
2.2.8.	Mecánica de rotura de rocas.....	46
2.2.8.1.	Proceso de fracturamiento.....	46
2.2.8.2.	Descripción del proceso	48
2.2.8.3.	Evaluaciones de la voladura.....	50
2.2.9.	Diseño de malla de perforación.....	52



2.2.9.1. Cálculo de número de taladros	52
2.2.9.2. Cálculo del burden	54
2.2.9.3. Distancia entre taladros	54
2.2.9.4. Longitud de taladros.....	55
2.2.9.5. Cantidad de carga.....	55
2.2.9.6. Eficiencia de perforación o eficiencia de voladura.	56
2.2.9.7. Número de cartuchos por taladro.	56
2.2.9.8. Volumen fracturado o total.	57
2.2.9.9. Factor de esponjamiento.	57
2.2.9.10. Tonelaje fracturado	58
2.2.9.11. Cantidad de carga explosiva.....	58
2.2.9.12. Factor de carga explosiva.....	59
2.2.9.13. Factor de potencia del explosivo.....	60
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES	60
2.3.1. Perforación subterránea.....	60
2.3.2. Malla de perforación	61
2.3.3. Labor subterránea.....	61
2.3.4. Galería	61
2.3.5. Frente de una labor.....	61
2.3.6. Parámetros.....	62
2.3.7. Burden	62
2.3.8. Espaciamiento	62
2.3.9. Explosivos	62
2.3.10. Taladros de arranque	62
2.3.11. Factor de carga explosiva.....	63



2.3.12. Avance lineal de una labor	63
2.3.13. Masa rocosa.....	63
2.13.14. Voladura de rocas.....	63

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN	64
3.2. ACCESIBILIDAD	64
3.3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	65
3.3.1. Tipo de investigación	65
3.3.2. Método de la investigación	65
3.3.3. Enfoque de la investigación	66
3.3.4. Diseño de la investigación	66
3.4. POBLACIÓN	67
3.5. MUESTRA.....	67
3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	68
3.6.1. Variable independiente.....	68
3.6.2. Variable dependiente.....	68
3.7. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	68
3.7.1. Técnicas para el procesamiento de la información	69
3.7.2. Instrumentos de recolección de datos	69

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
4.2. RESULTADOS SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS	71
4.2.1. Perforación en la Galería Santa Isabel	71



4.2.2.	Malla de perforación anterior en la Galería Santa Isabel	71
4.2.3.	Rediseño de malla	73
4.2.4.	Tipo de corte	75
4.3.	RESULTADOS DE VOLADURA	77
4.3.1.	Voladura anterior en la Galería Santa Isabel.....	77
4.3.2.	Voladura actual en la Galería Santa Isabel	81
4.4.	RESULTADOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA	85
4.5.	DISCUSIÓN	87
V.	CONCLUSIONES.....	90
VI.	RECOMENDACIONES.....	91
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
	ANEXOS.....	95

Área: Ingeniería de Minas

Tema: Análisis de costos mineros

Fecha de sustentación: 31 de julio del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Distancia entre taladros 53
Tabla 2	Coeficiente de roca 53
Tabla 3	Cálculo de sección y burden 54
Tabla 4	Factor de carga 59
Tabla 5	Coordenadas UTM de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí 64
Tabla 6	Ruta de accesibilidad a la Unidad Minera Esperanza de Caravelí - Arequipa 65
Tabla 7	Operacionalización de variables 68
Tabla 8	Número de taladros en la perforación anterior 72
Tabla 9	Número de taladros con el rediseño de malla 76
Tabla 10	Consumo de explosivos Semexa 65% en la voladura anterior 78
Tabla 11	Explosivos y accesorios utilizados en la voladura anterior 79
Tabla 12	Resultados de la voladura anterior 81
Tabla 13	Consumo de explosivo en la voladura actual 82
Tabla 14	Resumen de resultados en la voladura actual 84
Tabla 15	Resultados de perforación y voladura 85



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Cavidades formadas secuencialmente 30
Figura 2	Ubicación de aranque 31
Figura 3	Corte Quemado..... 32
Figura 4	Corte Cilíndrico 33
Figura 5	Distribución de taladros..... 35
Figura 6	Distribución de taladros de la malla anterior..... 72
Figura 7	Corte Quemado..... 76
Figura 8	Cantidad de taladros con el rediseño de malla de perforación 77
Figura 9	Comparación de resultados malla de perforación anterior y malla modificada 86



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Malla de perforación anterior	96
ANEXO 2. Rediseño de la malla de perforación.....	97
ANEXO 3. Control de avance lineal en la perforación y voladura anterior.....	98
ANEXO 4. Control de avance lineal en la perforación y voladura actual.....	99
ANEXO 5. Rediseño del arranque	100
ANEXO 6. Amarre del Carmex con la mecha rápida	101
ANEXO 7. Limpieza con pala neumática en el frente	101
ANEXO 8. Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	102
ANEXO 9. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional....	103



ACRÓNIMOS

S.R.L:	Sociedad de Responsabilidad Limitada
U.T.M:	Universal Transversal Mercator
m.s.n.m:	Metros sobre el nivel del mar
tm:	tonelada métrica
kg:	kilógramo
gr:	gramo
km:	kilómetro
m:	metro
mm:	milímetro
m ² :	metro cuadrado
m ³ :	metro cúbico
S.W:	Sur Oeste



RESUMEN

En la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa, dedicada a la extracción de oro filoniano, se desarrolló la Galería Santa Isabel con dimensiones de 2,50 metros de ancho, 2,60 metros de altura y 370 metros de longitud. Durante la evaluación inicial de perforación y voladura, se identificaron problemas de avance lineal en la galería Santa Isabel, con un avance promedio de 1,31 metros por disparo. El objetivo del estudio fue aumentar este avance mediante el rediseño de la malla de perforación y el factor de carga explosiva. La metodología empleada fue cuantitativa, con un diseño pre-experimental, el procedimiento incluyó el análisis de la malla de perforación previa, los tipos de explosivos utilizados, el factor de carga y el avance lineal. Se recolectaron datos durante 22 turnos, registrados en hojas de control específicas. Tras comparar y analizar los resultados, se encontró que el diseño anterior permitía un avance de 1,31 metros por disparo, mientras que con el nuevo diseño se logró optimizarlo a 1,41 metros, un aumento de 0,10 metros. Además, el factor de carga original de 1,72 kg/m³ se redujo a 1,47 kg/m³, una disminución de 0,25 kg/m³. Se concluye que el rediseño de la malla de perforación no solo mejoró el avance lineal, sino que también redujo el factor de carga en el frente de la galería Santa Isabel en la Unidad Minera esperanza de Caraveli – Arequipa.

Palabras clave: Desarrollo, Incremento, Malla, Rediseño, Perforación, Voladura



ABSTRACT

At the Esperanza de Caraveli Mining Unit - Arequipa, dedicated to the extraction of philonian gold, the Santa Isabel gallery was developed with dimensions of 2.50 meters wide, 2.60 meters high and 370 meters long. During the initial drill and blast evaluation, linear advance problems were identified in the Santa Isabel gallery, with an average advance of 1.31 meters per shot. The objective of the study was to increase this advance by redesigning the drilling mesh and the explosive charge factor. The methodology used was quantitative, with a longitudinal-comparative pre-experimental design. The procedure included the analysis of the previous drilling mesh, the types of explosives used, the load factor and the linear advance. Data were collected during 22 shifts, recorded in specific control sheets. After comparing and analyzing the results, it was found that the previous design allowed an advance of 1.31 meters per shot, while the new design was optimized to 1.41 meters, an increase of 0.10 meters. In addition, the original load factor of 1.72 kg/m³ was reduced to 1.47 kg/m³, a decrease of 0.25 kg/m³. It is concluded that the redesign of the drilling mesh not only improved the linear advance, but also reduced the load factor at the Santa Isabel gallery face at the Esperanza de Caraveli Mining Unit in Caraveli - Arequipa..

Keywords: Development, Increase, Mesh, Redesign, Drilling, Blasting



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la minería subterránea, la eficiencia en el avance de las galerías es un factor crucial para el éxito de las operaciones. Este avance se ve afectado por diversos factores, entre los cuales la distribución adecuada de las perforaciones en el diseño de la malla y el tamaño de la carga explosiva son determinantes. La distribución inapropiada de las perforaciones no solo puede reducir el avance lineal, sino que también puede aumentar los costos operativos debido a un uso ineficiente de los recursos explosivos.

En particular, en la Unidad Minera Esperanza de Caravelí – Arequipa, dedicada a la extracción de oro filoniano, se ha identificado un problema significativo de avance lineal en la galería Santa Isabel. La galería, con dimensiones de 2,50 metros de ancho, 2,60 metros de altura y 370 metros de longitud, muestra un avance promedio de 1,31 metros por disparo en las evaluaciones iniciales de perforación y voladura. Este rendimiento es inferior a lo esperado, lo cual representa un desafío operativo y económico para la mina.

Uno de los principales problemas radica en el diseño de la malla de perforación utilizada y el factor de carga explosiva aplicado. El diseño actual no considera adecuadamente las características del macizo rocoso, lo que lleva a una distribución ineficiente de las perforaciones y, consecuentemente, a un avance subóptimo. Además, el uso de una carga explosiva de mayor tamaño ha contribuido a un incremento en los costos de operación y a una menor eficiencia en el proceso de voladura.



Por lo tanto, es crucial abordar estos problemas mediante el rediseño de la malla de perforación y la optimización del factor de carga explosiva. Este estudio se enfoca en analizar y comparar el diseño actual con un nuevo diseño de malla de perforación, con el objetivo de mejorar el avance lineal y reducir el factor de carga explosiva. Los resultados de este estudio tienen el potencial de no solo aumentar la eficiencia operativa y reducir los costos en la galería Santa Isabel, sino también de proporcionar un modelo que pueda ser aplicado a otras operaciones mineras subterráneas con problemas similares.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Pregunta general

¿Cómo incrementa el avance lineal y el factor de carga explosiva adecuada en el desarrollo de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa?

1.2.2. Preguntas específicas

¿Cuál es el rediseño de malla de perforación para incrementar el avance lineal en el desarrollo de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa?

¿Cuál es el factor de carga explosiva requerida para el incremento del avance lineal en la ejecución de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa?



1.3. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

Rediseñando la malla, y el cálculo del factor de carga explosiva necesaria se incrementa el avance lineal en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa.

1.3.2. Hipótesis específicas

Mediante el rediseño de malla, se incrementa el avance lineal en la ejecución de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa.

Con el factor de carga explosiva adecuada se incrementa el avance lineal, en el desarrollo de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Incrementar el avance lineal mediante la modificación de la malla de perforación y el ajuste del factor de carga explosiva en el desarrollo de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa

1.4.2. Objetivos específicos

Rediseñar la malla, para la incrementación del avance lineal en la ejecución de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa.



Calcular el factor de carga explosiva requerida para incrementar el avance lineal en la ejecución de la Galería Santa Isabel en la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La Unidad Minera Esperanza en Caravelí, Arequipa, utiliza la tecnología de Corte y Relleno Ascendente para extraer oro en veta. Para utilizar eficazmente un depósito mineral, es necesario realizar actividades de exploración, preparación y desarrollo. En consecuencia, se vuelve imprescindible la construcción de diversas estructuras mineras, incluyendo rampas, galerías, subniveles, niveles, pozos, cámaras de almacenamiento y áreas de refugio, entre otras.

Se presentaron dificultades en el avance lineal, alcanzando una eficiencia de voladura de solo el 87,33%, lo cual está muy por debajo del mínimo requerido para un barreno de 5 pies de longitud, calificándose como ineficiente. Esta situación ha generado la necesidad de implementar mejoras para incrementar el proceso. Para abordar este problema, se propone un nuevo diseño de malla de perforación y un ajuste en el factor de carga explosiva. El objetivo de estos cambios es incrementar el avance lineal, lo que resultará en una reducción significativa del consumo de explosivos y una disminución del desgaste en los aceros de perforación. Estos ajustes no solo mejorarán la eficiencia operativa, sino que también contribuirán a la sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones mineras, al minimizar los costos y el impacto ambiental asociados con el uso excesivo de explosivos y el desgaste prematuro de los equipos de perforación.

El desarrollo de la Galería Santa Isabel fue muy necesario e importante para la unidad minera, porque permitió recuperar y extraer el mineral valioso y con el rediseño de malla y el cálculo del factor de carga explosiva necesaria según las características del



macizo rocoso, se incrementó el avance lineal y además se concluyó la ejecución de la Galería en menor tiempo, lo cual generó un ahorro económico para la Unidad Minera Esperanza de Caravelí – Arequipa.

Esta investigación fue importante porque permitió generar mejores beneficios económicos para la empresa minera y los conocimientos servirán para realizar nuevos estudios para los futuros ingenieros en el área de Ingeniería de Minas y afines.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Yucra (2022), la Unidad Minera Esperanza en Caravelí, Arequipa, utiliza la tecnología de Corte y Relleno Ascendente para extraer oro en veta. Para utilizar eficazmente un depósito mineral, es necesario realizar actividades de exploración, preparación y desarrollo. En consecuencia, se vuelve imprescindible la construcción de diversas estructuras mineras, incluyendo rampas, galerías, subniveles, niveles, pozos, cámaras de almacenamiento y áreas de refugio, entre otras. La implementación de estas mejoras metodológicas permitió obtener resultados significativos. Al finalizar el estudio, se concluyó que el rediseño de la malla y la optimización de la carga explosiva resultaron en un aumento del avance lineal, pasando de 1.32 metros a 1.40 metros. Este incremento no solo refleja una mayor eficiencia en las operaciones, sino también una reducción en los costos y un uso más efectivo de los recursos, beneficiando así la sostenibilidad y productividad de la unidad minera.

Aguilar (2022), al implementar una nueva metodología que se enfoca en diseñar una malla optimizada y determinar con precisión la carga explosiva requerida en función de las características específicas del macizo rocoso, se logró incrementar exitosamente el avance lineal en el frente del BY Pass 723 E de la Empresa Minera. Las Bravas Número 2. Los hallazgos demostraron un aumento notable en el avance lineal, pasando de 1,30 metros a 1,39 metros, lo que significa un aumento de 0,09 metros por cada disparo disparado. El aumento observado en el rendimiento ilustra la eficacia del enfoque utilizado, lo que indica que un diseño de malla de perforación bien diseñado con una carga explosiva adecuada puede mejorar en gran medida las operaciones mineras. Además del



incremento en el avance lineal, esta mejora contribuye a la eficiencia general del proceso, permitiendo un uso más efectivo de los recursos y una reducción en los costos operativos. La aplicación de estas técnicas innovadoras no solo mejora la productividad en el corto plazo, sino que también puede ser replicada en otros proyectos mineros, promoviendo una mayor sostenibilidad y rentabilidad en la industria minera.

Mamani (2020), mediante el uso de una malla de perforación rediseñada y calculando con precisión la carga explosiva, la Galería N12 de Empresa Minera Sotrami S.A. logró exitosamente una disminución sustancial en los gastos de perforación. Más precisamente, el costo de perforación se redujo de 158,54 USD/m a 141,88 USD/m, lo que resultó en un ahorro de 16,66 USD/m. Además, se mejoró el avance lineal, lo que resultó en un aumento de 1,32 metros a 1,39 metros, lo que representa un crecimiento de 0,07 metros. Estos resultados demuestran que la implementación de un diseño de malla más eficiente y la correcta determinación de la carga explosiva no solo reducen los costos operativos, sino que también mejoran la productividad de la operación minera. La optimización del avance lineal y la disminución de los costos son indicadores clave del éxito de las técnicas aplicadas, lo que sugiere su potencial aplicación en otras áreas de la operación minera para lograr beneficios similares. Además, estos avances contribuyen a la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de la empresa, maximizando el uso de recursos y minimizando los impactos ambientales y económicos.

Soncco (2019) La investigación tuvo como objetivo reducir los gastos de perforación y voladura reconfigurando la malla de perforación y optimizando la carga explosiva, con el objetivo de mejorar el avance lineal en el frente de la galería San Francisco. El proceso utilizado incluyó una meticulosa reconfiguración de la malla y un cálculo preciso de la carga explosiva requerida, considerando los distintos atributos de la formación rocosa. Al concluir el estudio, se observó que el avance lineal se incrementó



notablemente, pasando de 3.27 metros a 3.46 metros con el uso de taladros de 12 pies. Este aumento representa una mejora de 0.19 metros por cada disparo realizado. Estos resultados destacan la eficacia del rediseño de la malla de perforación y la correcta determinación de la carga explosiva en la optimización de las operaciones mineras. No solo se logró un incremento significativo en el avance lineal, sino que también se logró una mayor eficiencia en el proceso de perforación y voladura, contribuyendo a una reducción de los costos operativos. La aplicación de esta metodología puede ser replicada en otros proyectos mineros, promoviendo una mayor sostenibilidad y rentabilidad en la industria minera, así como un uso más eficiente de los recursos disponibles.

Ortiz (2019), la investigación tuvo como objetivo disminuir los gastos de perforación y voladura y mejorar el avance lineal reconfigurando la malla de perforación e identificando con precisión la carga explosiva adecuada según la composición de la roca. El proceso utilizado incluyó una meticulosa reconfiguración de la malla y una determinación precisa de la carga explosiva requerida. Los hallazgos de esta investigación, realizada en la Galería 435 NE de la Unidad Minera Las Águilas en Puno, fueron estadísticamente significativos. El costo de perforación se redujo con éxito de 150,74 USD/m a 140,77 USD/m, lo que resultó en un ahorro de 9,97 USD/m. Además, el avance lineal se aumentó de 1,33 metros a 1,40 metros, lo que resultó en un crecimiento de 0,07 metros. Estos hallazgos subrayan la efectividad de la metodología utilizada, demostrando que un rediseño estratégico de la malla y una correcta determinación de la carga explosiva pueden resultar en mejoras sustanciales tanto en la eficiencia como en la economía de las operaciones mineras. La optimización del avance lineal y la reducción de los costos no solo mejoran la productividad, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de la operación minera. La aplicación de estas técnicas puede ser replicada en otras áreas y unidades mineras para lograr beneficios



similares, maximizando el uso de recursos y minimizando los costos operativos y ambientales.

Pino (2019), la investigación tenía como objetivo mejorar el progreso lineal mediante el desarrollo de una nueva malla de perforación. El enfoque utilizado incluyó el desarrollo de un nuevo diseño de malla y la determinación del factor de carga explosiva adecuado. Después de las pruebas, se observó que el uso de la malla mejorada y el factor de carga explosiva ideal condujo a una mejora notable en el avance lineal, que aumentó de 1,30 metros a 1,40 metros. Cada disparo realizado al frente de la galería resultó en un aumento de 0,10 metros. Los hallazgos subrayan la eficacia de modificar la malla de perforación y estimar con precisión la carga explosiva para optimizar las operaciones mineras. La mejora en el avance lineal no solo indica una mayor eficiencia en los procesos de perforación y voladura, sino que también sugiere una reducción en los costos y el tiempo necesarios para alcanzar los objetivos de excavación. Esta metodología puede ser replicada en otros proyectos mineros, permitiendo mejoras similares en términos de productividad y rentabilidad, al tiempo que se asegura un uso más eficiente de los recursos y se minimizan los impactos ambientales y operativos.

Ccapa (2019), el objetivo de la investigación fue disminuir los gastos asociados a la perforación y voladura, al mismo tiempo que se potencia el avance lineal en la galería Esmeralda 360 NW de Yslay Mining. El enfoque utilizado incluyó el desarrollo de una nueva malla de perforación y la determinación precisa de la carga explosiva requerida. El análisis reveló que la introducción de la nueva malla de perforación y la estimación precisa de la carga explosiva condujeron a una disminución sustancial de los gastos de perforación. Específicamente, el costo por metro disminuyó de 66,87 USD a 61,04 USD, lo que resultó en un ahorro de 5,84 USD por metro. Además, hubo una mejora notable en el avance lineal, pasando de 3,10 metros a 3,25 metros. Esto resultó en una mejora



encomiable de 0,15 metros por toma en la sección frontal de la galería Esmeralda 360 NW. Estos resultados destacan la eficacia del rediseño de la malla de perforación y la correcta determinación de la carga explosiva en la optimización de las operaciones mineras. La reducción de los costos y el incremento del avance lineal no solo mejoran la eficiencia y la productividad de las operaciones, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de la mina. La aplicación de esta metodología en otras áreas y proyectos mineros puede resultar en beneficios similares, maximizando el uso de recursos y minimizando los costos operativos y el impacto ambiental.

Quispe (2017), el objetivo de la investigación fue minimizar los gastos asociados con la perforación y voladura mediante el desarrollo de un novedoso diseño de malla. El proceso utilizado incluyó la reconfiguración de la malla de perforación y la determinación meticulosa de la carga explosiva requerida en función de la composición de la roca. La investigación indicó que el uso del novedoso diseño de malla y la estimación precisa del factor de carga explosiva condujeron a una disminución significativa de los costos. En concreto, el gasto asociado a perforación y voladura ha bajado de 491,80 USD/m a 464,82 USD/m, lo que supone una reducción de 26,98 USD/m. Además, se notó un aumento en la progresión lineal, pasando de 1,35 metros a 1,42 metros, resultando en un aumento de 0,07 metros por disparo en el frente del Crucero 340 NW de Empresa Minera Yansur S.A.C. en Puno. Estos hallazgos demuestran la eficacia del rediseño de la malla y la medición precisa de la carga explosiva para optimizar las operaciones mineras. La reducción de costos y el aumento del avance lineal no solo incrementan la eficiencia y la productividad de las operaciones, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de la mina. La implementación de esta metodología en otras áreas y proyectos mineros puede resultar en beneficios similares, optimizando el uso de recursos y minimizando los costos operativos y el impacto ambiental.



Villasante (2016), el objetivo de la investigación fue disminuir los gastos asociados a las operaciones de perforación y voladura en Minera Aurifera Cuatro de Enero S.A. Para ello se utilizó una técnica que incluyó la creación de una novedosa malla de perforación y la determinación precisa del explosivo requerido. carga, teniendo en cuenta las propiedades específicas de la formación rocosa. Al finalizar la investigación, se determinó que el uso del diseño de malla mejorado y la medición precisa del factor de carga explosiva condujeron a una disminución sustancial en los gastos de perforación y voladura. Los costos se redujeron de 233,47 USD/m a 201,46 USD/m, lo que resultó en un ahorro de 32,01 USD/m. Además, se notó una mejora en el avance lineal, al pasar de 1,30 metros a 1,37 metros, lo que se tradujo en una mejora de 0,07 metros por disparo en el tramo frontal de la Galería Esperanza 570 de la Unidad Minera. Los resultados indican que el rediseño de la malla de perforación y la estimación precisa de la carga explosiva son útiles para optimizar las operaciones mineras. La reducción de costos y el aumento en el avance lineal no solo mejoran la eficiencia y productividad de las operaciones, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de la mina. La aplicación de esta metodología en otras áreas y proyectos mineros puede generar beneficios similares, optimizando el uso de recursos y minimizando los costos operativos y el impacto ambiental.

Mamani (2015), la investigación tuvo como objetivo mejorar el avance lineal mediante la introducción de un novedoso diseño de malla y la optimización de la carga explosiva. Los métodos utilizados incluyeron el desarrollo de una nueva malla de perforación y la determinación meticulosa de la carga explosiva requerida, considerando al mismo tiempo los atributos de la formación rocosa. Al concluir la investigación se demostró que el avance lineal tuvo un aumento considerable, pasando de 1,35 metros a 1,42 metros, indicando un crecimiento de 0,07 metros por disparo realizado. El aumento



observado en el progreso lineal por disparo resalta la eficacia del enfoque utilizado, lo que indica que una malla bien diseñada y una estimación precisa de la carga explosiva pueden conducir a mejoras significativas en la eficiencia de las operaciones mineras. Los hallazgos demuestran una mayor eficiencia en las operaciones de perforación y voladura, así como la posibilidad de reducir los gastos operativos y optimizar el uso de recursos. La aplicación de estas técnicas puede ser extendida a otras áreas y proyectos mineros, promoviendo una mayor sostenibilidad y rentabilidad en la industria.

Chipana (2015), la investigación tuvo como objetivo minimizar los gastos de perforación y voladura mediante la introducción de un novedoso diseño de malla de perforación y la optimización de la carga explosiva. El enfoque utilizado incluyó el desarrollo de un novedoso diseño de malla y la determinación meticulosa de la carga explosiva requerida, teniendo en cuenta los distintos atributos de la formación rocosa. Luego de la investigación, se encontró que la progresión lineal en la galería Progreso de Contrata Minera Cavilques en La Rinconada aumentó dramáticamente, de 1,33 metros a 1,41 metros. Esto implica una mejora de 0,08 metros por cada disparo realizado. Esta mejora resalta la eficacia de la técnica utilizada, mostrando que una configuración refinada de la malla de perforación y una determinación precisa de la carga explosiva pueden conducir a una progresión lineal más competente. Además de incrementar el avance lineal, estos cambios también contribuyen a la reducción de costos operativos, ya que una mayor eficiencia en la perforación y voladura se traduce en un menor uso de recursos y tiempo. La aplicación de estas técnicas no solo mejora la productividad de las operaciones mineras, sino que también puede ser replicada en otros proyectos mineros para obtener beneficios similares, promoviendo una mayor sostenibilidad y rentabilidad en la industria minera.

Sancho (2014), el objetivo del estudio fue examinar los gastos asociados a la



perforación y voladura, y potenciar el avance lineal en la galería Anaconda de la Unidad Minera Kori Chaska en La Rinconada. Los métodos utilizados incluyeron la reconfiguración de la malla de perforación y la determinación meticulosa de la carga explosiva requerida, teniendo en cuenta las propiedades de la formación rocosa. El análisis reveló que el rediseño de la malla resultó en una disminución sustancial en los gastos de perforación y voladura, pasando de 275,38 USD/m a 239,37 USD/m. Esta es una reducción sustancial de 36,01 USD por metro. Además, se optimizó el avance lineal, lo que resultó en un aumento de 1,30 metros a 1,40 metros en cada disparo durante cada rotación en el frente de la galería Anaconda. Los hallazgos ilustran la eficacia de la malla de perforación rediseñada y la estimación precisa de la carga explosiva para optimizar las operaciones mineras. La reducción de costos y el aumento en el avance lineal no solo mejoran la eficiencia y la productividad de las operaciones, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y rentabilidad a largo plazo de la mina. La implementación de esta metodología en otras áreas y proyectos mineros puede generar beneficios similares, optimizando el uso de recursos, reduciendo costos operativos y minimizando el impacto ambiental. Esto subraya la importancia de la innovación y la precisión en el diseño y ejecución de las técnicas de perforación y voladura en la industria minera.

2.2. MARCO TEÒRICO

2.2.1. Perforación

Para provocar la fragmentación de una masa rocosa, se requieren dos procesos esenciales. El primero es la perforación, que implica la creación de orificios cilíndricos en la roca para la colocación de explosivos. Este paso se lleva a cabo utilizando equipos hidráulicos, neumáticos, mecánicos o térmicos, según sea necesario para abrir túneles, galerías o pozos en actividades mineras u obras



civiles. El segundo proceso es la voladura, que consiste en la aplicación de explosivos para agrietar y romper la roca, el suelo compacto o el hormigón de manera controlada. Este método busca fragmentar la materia sólida mediante el uso de energía química e hidráulica de forma precisa y eficaz (Yucra, 2022)

El principio de perforación se fundamenta en el uso de efectos mecánicos como la percusión o la rotación, que mediante golpes y fricción provocan el astillamiento y trituración de la roca (EXSA, 2019). Estos métodos son clasificados de acuerdo con su aplicación y tecnología específica, adaptándose a diversas condiciones geológicas y requerimientos técnicos en actividades como la minería y la construcción civil.

- Percusión: Implica golpes y cortes similares a los de un cincel o martillo para fragmentar la roca.
- Percusión-Rotación: Combina golpes, cortes y movimiento rotatorio para mejorar la eficiencia en la fragmentación de la roca.
- Rotación: Utiliza principalmente fricción para desgastar y cortar rocas de alta dureza, sin aplicar golpes directos.
- Fusión: Se utiliza en yacimientos con minerales muy duros como el hierro, donde se genera calor intenso para fundir la roca y el mineral.

2.2.2. Trazos de arranque

La esencia fundamental del término voladura en cualquier actividad que la requiera implica la creación de una cavidad inicial denominada corte, cuele o arranque. Este proceso tiene como objetivo generar una segunda cara libre que facilite la fractura de la roca de manera eficiente. Los taladros ubicados tanto en el centro como en el contorno de esta cavidad trabajan para fracturar la roca hacia

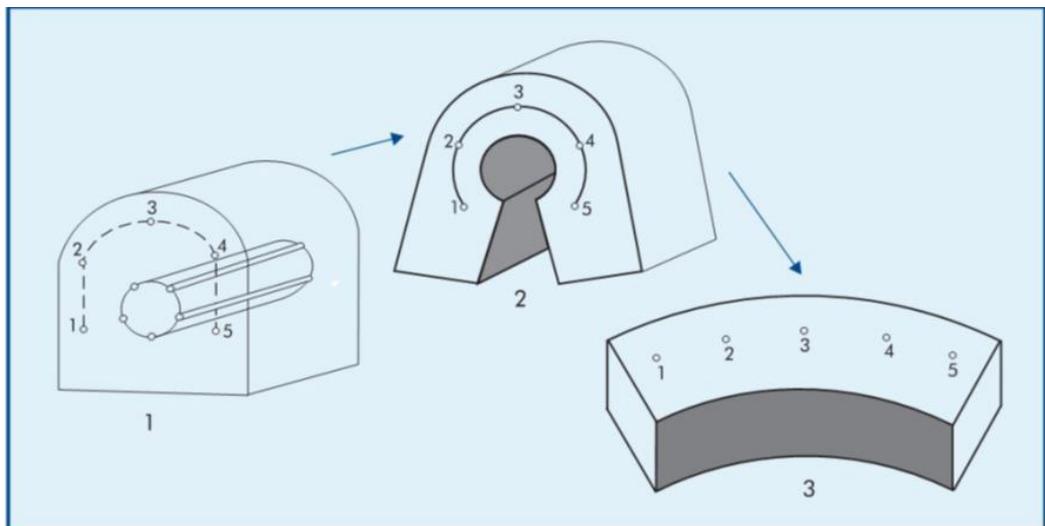
esta cara libre adicional, facilitando así la rotura del material. Esta configuración resulta en un frente que se comporta como un "banco anular", con cálculos de diseño similares a los de una voladura superficial, aunque requiriendo una carga significativamente mayor para desplazar el material fracturado (EXSA, 2019).

Se requerirá un menor número de taladros en la parte superior del frente de trabajo.

- Se logrará un mejor desplazamiento centrado del material roto, aunque se incrementará el consumo de explosivos en el fondo del área de trabajo.
- Esta configuración es adecuada únicamente cuando el material volado puede caer naturalmente por gravedad.

Figura 1 .

Cavidades formadas secuencialmente



Nota. cavidades formadas secuencialmente (EXSA, 2019).

La profundidad del corte debe ser al menos igual a la proyección estimada para el avance del disparo. La ubicación estratégica del corte juega un papel crucial en la dispersión controlada del material roto, el óptimo uso de explosivos

y la determinación del número adecuado de taladros necesarios para ejecutar la voladura de manera eficiente y segura (EXSA,2019)

Figura 2

Ubicación de arranque



Nota. Ubicación de arranque en el frente de trabajo (EXSA, 2019).

2.2.1.1. Corte quemado (Burn cut)

El diseño de perforación se compone de una cantidad específica de taladros del mismo diámetro, perforados contiguamente y distribuidos en diversos patrones y figuras. Algunos de estos taladros no contienen carga explosiva, actuando como caras libres para reflejar las ondas de choque generadas por los taladros cargados, facilitando así la fractura de la roca.

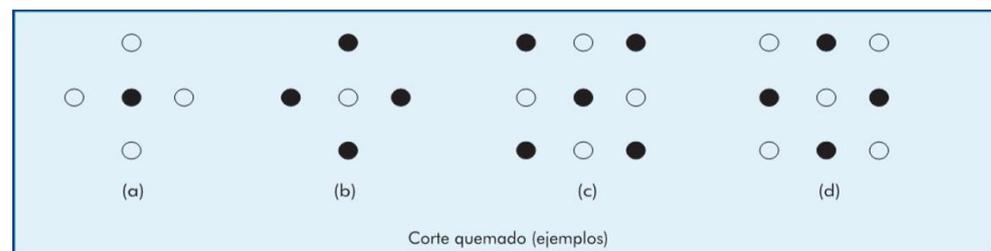
Según EXSA (2019), el trazo más simple del corte quemado es un rombo con cinco cavidades cilíndricas (taladros), donde los cuatro taladros en los vértices están vacíos y solo el taladro central contiene carga explosiva. En ciertas condiciones de roca, el esquema se invierte, con todos los taladros en los vértices cargados y el taladro central vacío.

Existen también esquemas con seis, nueve o más taladros, distribuidos en patrones cuadrados, triangulares y rómbicos, donde aproximadamente la mitad de los taladros están cargados y los otros se dejan vacíos.

Este tipo de corte, conocido como Burn cut, tiene la desventaja de que su avance es limitado, promediando unos 2,5 metros por disparo, lo que hace que los cortes cilíndricos sean preferidos para excavaciones de mayor profundidad (EXSA, 2019).

Figura 3

Corte Quemado



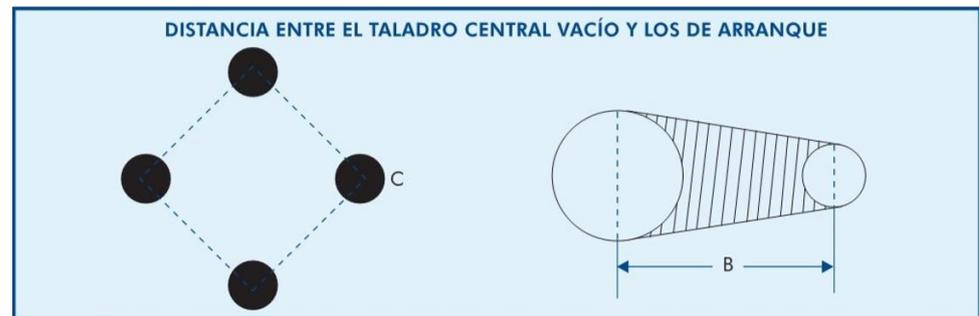
Nota. Ejemplos de corte quemado (EXSA, 2019).

2.2.2.2. Corte cilíndrico

Estos cortes presentan una distribución similar al corte quemado, pero con la diferencia notable de que los taladros centrales (de alivio) tienen un diámetro mayor que los demás taladros, facilitando la creación de cavidades cilíndricas. Comparativamente, este tipo de corte suele lograr un mayor avance en la excavación en comparación con el corte quemado. Además, este diseño da mayor importancia al burden (espacio entre taladros cargados y taladros vacíos), el cual se calcula empíricamente como $B = 0,7 \times \text{diámetro del taladro vacío}$ (EXSA, 2019).

Figura 4

Corte Cilíndrico



Nota: Distancia entre taladros para un corte cilíndrico (EXSA, 2019).

2.2.3. Denominación y distribución de los taladros

Los taladros están dispuestos concéntricamente, comenzando con los taladros de corte o arranque en el área de la voladura, según su designación específica:

a.- Taladros de Arranques

Los taladros de arranque son aquellos destinados a crear una cavidad inicial o segunda cara libre en el frente de voladura, y por lo tanto son los primeros en ser disparados. En promedio, se requiere de 1,25 a 1,45 veces más carga en estos taladros debido a la necesidad de una mayor energía para remover el material triturado en esta zona. Esta mayor carga se compensa con una reducción correspondiente en la carga de los taladros cuadradores y alzas, que requieren menos carga ya que tienen un efecto de colapso más que de fragmentación directa (Yucra, 2022).



b.- Taladros de Ayuda

Los taladros de ayuda, situados alrededor de los taladros de arranque, facilitan la remoción del material hacia el corte inicial, ajustándose a las dimensiones de la galería de trabajo. La cantidad y distribución de estos taladros pueden variar según las necesidades específicas del proyecto y las características del material a remover (Mamani, 2022). Estos taladros son cruciales para asegurar una voladura eficiente, ya que optimizan el proceso de fragmentación y desplazamiento del material, permitiendo un avance más controlado y seguro en la excavación.

c.- Taladros cuadradores

Los cuadradores son los taladros ubicados a lo largo de los lados de la sección de la galería, también conocidos como taladros laterales hastiales según EXSA (2019). Estos taladros juegan un papel crucial en la voladura al ayudar a mantener la forma deseada de la galería y a controlar el avance del frente de trabajo. Su disposición estratégica asegura que la excavación se realice de manera ordenada y segura, optimizando así la eficiencia del proceso de voladura en actividades mineras y de construcción.

d.- Taladros de alza

“Se denominan taladros periféricos a los taladros que conforman el contorno del techo del túnel o galería. Estos taladros, también conocidos como taladros de coronación en el contexto de recorte y voladura controlada” (smooth blasting), se disparan simultáneamente junto con los cuadradores y alzas. Su

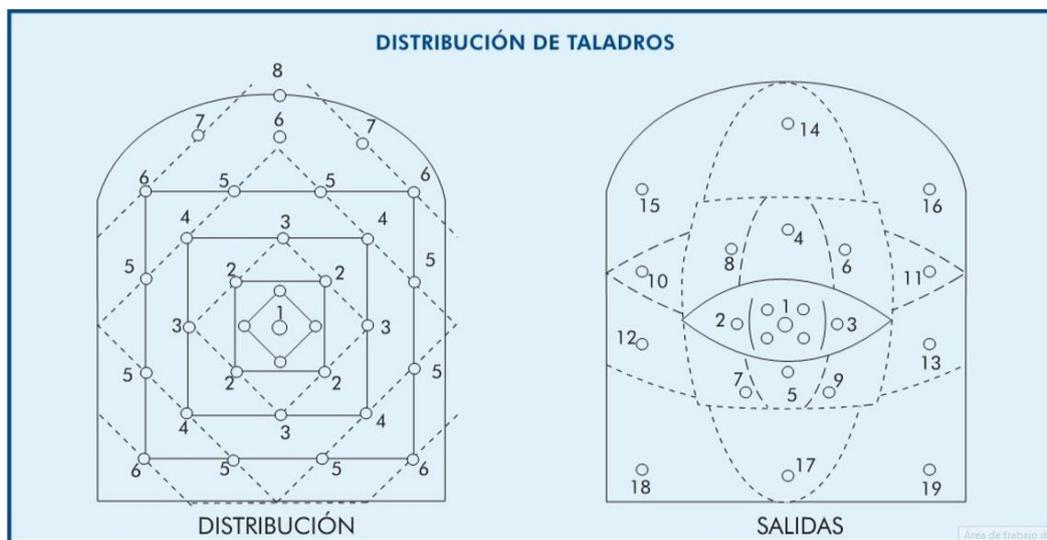
función es generar el plano de rotura necesario para la sección de la galería, asegurando un proceso de voladura eficiente y controlado.

e.- Taladros de arrastre o piso

Los taladros ubicados en el suelo o parte inferior del túnel, conocidos como taladros de piso, se activan una vez finalizada toda la secuencia de voladura. En ocasiones, estos taladros son acompañados por taladros de perforación inclinada colocados en las esquinas, los cuales tienen como objetivo principal crear canaletas de drenaje. Este diseño permite gestionar eficazmente el flujo de agua y otros materiales hacia fuera del túnel, garantizando condiciones seguras y funcionales para las actividades subterráneas.

Figura 5

Distribución de taladros



Nota: manual de perforación y voladura (EXSA, 2019).

2.2.4. Perforadoras

Según, Aguilar (2023) Se trata de equipos especializados diseñados para perforar roca o mineral, con la finalidad de ser posteriormente fragmentados mediante explosivos, aunque también pueden permanecer sin detonar según las

necesidades del proyecto. Estos equipos se categorizan según la Nota de energía utilizada para su operación, ofreciendo diversas opciones que pueden incluir sistemas hidráulicos, neumáticos, eléctricos o incluso manuales, adaptándose así a las condiciones específicas del entorno y las exigencias técnicas de la tarea de perforación:

- Manual
- Aire comprimido
- Eléctricos
- Hidráulicos

2.2.4.1. Perforación neumática.

Esta actividad se lleva a cabo utilizando una perforadora convencional que emplea aire comprimido para operar todo el proceso de perforación. Estas perforadoras pueden crear agujeros de diámetro pequeño utilizando barrenos integrales o descartables según sea necesario. (Yucra 2022)

2.2.4.2. Perforadora neumática Jackleg.

Se describe como un tipo de perforadora que utiliza aire comprimido como Nota de energía. Es de uso manual, equipada con un pie de avance, también conocido como empujador. Esta herramienta puede ser empleada para realizar perforaciones en avances horizontales e inclinados, siendo especialmente útil en la excavación de túneles, galerías y subniveles convencionales. Aunque existen diversas variaciones en el mercado en



términos de diseño y características, todas comparten la misma Nota de poder basada en el aire comprimido. (Chipana 2015)

2.2.5. Aceros de perforación

2.2.5.1. Barra de perforación.

Según, Villasante (2016) se denomina barras de perforación a varillas de acero con un eje hueco, diseñadas para transmitir la energía roto-percutiva generada por un martillo neumático al extremo en contacto con la superficie de la roca. Las barras pueden tener forma redonda o hexagonal y están equipadas con varios tipos de acoplamientos, incluidas opciones roscadas y de cono liso, entre otras. Por el contrario, las barras integrales se clasifican en función de la configuración de su broca y la colocación de sus insertos. Las barras están dispuestas en sucesión, y el diámetro de los insertos cambia en función del tamaño de la barra de perforación. Existen diversas variedades de barras integrales:

- Las barras pueden tener forma redonda o hexagonal y están equipadas con varios tipos de acoplamientos, incluidas opciones roscadas y de cono liso, entre otras.
- Por el contrario, las barras integrales se clasifican en función de la configuración de su broca y la colocación de sus insertos.
- Las barras están dispuestas en sucesión, y el diámetro de los insertos cambia en función del tamaño de la barra de perforación. Existen diversas variedades de barras integrales.



2.2.5.2. Brocas de perforación.

Según, Pino (2019) Son herramientas utilizadas para realizar perforaciones en diversos materiales según las necesidades del usuario. Las brocas empleadas en la perforación roto-percutiva pueden clasificarse en dos tipos diferentes:

- Broca de inserto tipo cincel.
- Broca de inserto tipo botón.

Las características de diseño comunes a ambos tipos de taladradoras son las siguientes:

- La barra de perforación debe calibrarse con precisión hasta alcanzar la distancia límite deseada. El objetivo es garantizar que la energía generada durante la operación de perforación se transfiera de forma eficaz y directa a la roca que se está perforando.
- El usuario no ha facilitado ningún texto. La sarta de perforación y la broca están equipadas con orificios centrales y laterales que sirven para inyectar fluido de lavado y eliminar las partículas de roca generadas durante la perforación rotativo percusiva.
- Las piezas están diseñadas con una sutil configuración cónica, en la que la sección más ancha entra en contacto directo con la roca. Esto ayuda a controlar la abrasión y evita que la broca se atasque en la pared del agujero durante su uso.



2.2.6. Explosivos

Un explosivo es una mezcla de componentes, como combustibles y oxidantes, que experimenta un rápido cambio a sustancias más estables y mayoritariamente gaseosas cuando se activa adecuadamente en una región específica de la masa explosiva. Este proceso produce energía térmica, presión elevada y aumento de la temperatura. Existen varios explosivos, cada uno con composiciones, cualidades y características distintas que requieren una selección meticulosa para su uso previsto. El poder destructivo del explosivo se deriva principalmente de la rápida transformación del material en gases a alta temperatura. Estos gases ocupan un volumen mucho mayor que la sustancia original e imponen presión en su entorno. La rápida expansión de estos gases produce ondas de choque suficientes para superar las fuerzas de contención ejercidas por la roca circundante (Aguilar, 2023).

- Factor de carga: La densidad de energía de la explosión se refiere a la cantidad de material explosivo utilizado por unidad de volumen de roca durante la explosión.
- Densidad de carga: Es el peso de un explosivo cargado por metro de taladro
- Velocidad de detonación: Velocidad a la cual progresa la detonación a través de un explosivo.
- Retardos: es el intervalo de tiempo que se establece entre las detonaciones y el impulso que las desencadena, de modo que puedan detonarse cargas explosivas separadas.



2.2.6.1. Tipos de explosivos industriales.

El manual de voladuras de Exsa (2019) clasifica los explosivos químicos en dos tipos principales en función de la velocidad de su onda de choque. Esta clasificación permite diferenciar entre explosivos de alta velocidad, que generan ondas de choque rápidas, y explosivos de baja velocidad, que generan ondas de choque más lentas pero más potentes. La elección del explosivo adecuado depende de varios factores, como las características del terreno, el objetivo de la detonación y las condiciones meteorológicas del momento. Esto garantiza una eficacia óptima en el uso de explosivos en diversos entornos industriales y de construcción.

- Explosivos rápidos y detonantes: Los explosivos detonantes se clasifican en explosivos principales y secundarios en función de su uso previsto. Los explosivos principales, que poseen altos niveles de energía y son muy sensibles, se utilizan como iniciadores para activar los explosivos secundarios. Estos últimos, que se refieren a los secundarios, tienen la responsabilidad de iniciar y fracturar las rocas. Son menos sensibles que las rocas primarias, pero tienen la capacidad de realizar tareas más prácticas. Los explosivos pertenecientes a este grupo tienen velocidades de detonación que oscilan entre los 2.000 y los 7.000 metros por segundo.
- Explosivos lentos y deflagrantes: La pólvora, los compuestos pirotécnicos y los compuestos propulsores para cohetes y artillería son ejemplos de explosivos deflagrantes. Estos explosivos no son útiles en ingeniería civil o minería, ya que su velocidad de detonación es inferior a 2.000 metros por segundo. Obsérvese que la pólvora,



utilizada como núcleo de la mecha de seguridad, es la única aplicación aplicable en estos ámbitos.

2.2.6.2. Propiedades de los explosivos

Cada explosivo tiene cualidades únicas que son esenciales para la detonación, como se indica en el manual de voladuras de Exsa (2019). En estos atributos se incluyen características importantes del explosivo y sus métodos de medición, entre ellas:

- Velocidad de detonación: La velocidad de la onda de detonación a través del explosivo viene determinada por varios elementos, como el tipo de producto, el diámetro, el confinamiento, la temperatura y el cebado. El cálculo de la presión de detonación depende en gran medida de esta velocidad.
- Densidad: El peso específico del explosivo es la medida de su densidad, expresada en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3). Una mayor densidad suele corresponder a una mayor potencia. La densidad crítica se refiere a la densidad mínima necesaria para que un explosivo explote. Desempeña un papel crucial en el diseño de técnicas de voladura eficaces y en la distribución de las cargas.
- Presión de detonación: La presión en la zona de choque que se produce durante la explosión se denomina presión generada por el choque. La brisancia o poder de fractura de un explosivo viene determinada por la presión que ejerce en una onda de choque súbita, que se rige por su densidad y velocidad de detonación.



- Potencia y energía: La energía es la cantidad de potencia que puede utilizarse para crear efectos mecánicos, y desempeña un papel vital en las aplicaciones industriales.
- Resistencia al agua: Puede variar desde muy baja hasta excelente según la composición del explosivo, afectando su capacidad para funcionar en condiciones húmedas.
- Sensibilidad a la iniciación: Cada explosivo requiere un tipo específico de iniciador para detonar. La sensibilidad se clasifica según el tipo de iniciador necesario, siendo crucial para su manejo seguro.
- Volumen normal de gases: Es la cantidad de gases generados por la detonación de 1 kg de explosivo a condiciones estándar (0°C y 1 atmósfera de presión). Este valor indica la energía disponible y varía entre 600 y 1000 litros por kilogramo.
- Inflamabilidad: Se refiere a la facilidad con la que un explosivo puede encenderse por calor, chispa, llama o fuego, lo cual es crucial para su almacenamiento, transporte y uso seguro.

2.2.6.3. Criterios de selección del explosivo.

Según el manual de voladuras de Exsa (2019), la elección del explosivo adecuado es un factor crítico en el diseño de una explosión y tiene un impacto directo en la consecución del resultado previsto. A la hora de elegir un explosivo, los principales criterios que se tienen en cuenta son: el coste, el diámetro de la carga, las características geomecánicas de la roca, la cantidad de roca que se va a volar, la presencia de agua en los



barrenos, la normativa de seguridad, las atmósferas explosivas y las limitaciones de suministro.

- **Emulnor.** La mezcla volátil se encierra dentro de una carcasa de plástico que tiene propiedades excepcionales de seguridad, potencia, resistencia al agua y gas explosivo. Se puede acceder a las siguientes categorías:
 - Emulnor 1000. Para la voladura de rocas suaves a intermedias.
 - Emulnor 3000. Para la voladura de rocas intermedias a duras.
 - Emulnor 5000. Para la voladura de rocas muy duras

2.2.7. Voladura

Según, Quispe (2022) desde la perspectiva de la mecánica de rotura de rocas, la voladura ocurre en un espacio tridimensional debido a las altas presiones generadas por los explosivos confinados en los taladros. Estas presiones crean zonas de alta concentración de energía, resultando en dos efectos dinámicos principales: la fractura y el desplazamiento. Estos términos se refieren a la fracturación y la fragmentación del material rocoso triturado. En minería subterránea, una buena fracturación es crucial para una voladura exitosa, ya que facilita la remoción y el transporte del material volado, influyendo directamente en el destino final del mismo. El éxito de una voladura depende de varios factores interrelacionados, algunos de los cuales son controlables, como el diseño de perforación y la elección de los explosivos, mientras que otros, como las características geológicas y de la roca, son variables que no se pueden modificar. Además, se consideran aspectos como las dimensiones de los equipos de carga y limpieza, así como las proyecciones de las rocas voladas en relación con áreas



críticas de instalaciones. Estas variables están interconectadas y afectan directa o indirectamente las operaciones de voladura, destacando la importancia de una planificación meticulosa para optimizar el volumen excavado y la fragmentación in situ.

a) Accesorios de voladura

Fulminante común: El cebo consiste en una cápsula cilíndrica de aluminio sellada por un extremo. En el interior de la cápsula hay un explosivo primario muy sensible a la ignición de una mecha de seguridad, así como un explosivo secundario de gran capacidad. La mezcla de ignición es accesible por el extremo opuesto expuesto de la cápsula. Es importante abstenerse de modificar o manipular indebidamente la fulmita cebadora, ya que hacerlo podría provocar una explosión prematura y posibles accidentes. Estas imprimaciones tienen una excelente seguridad y eficacia debido a la alta calidad de los insumos utilizados en su producción. Están disponibles en dos variantes, designadas como 6 y 8, que indican la cantidad de fulminante incluida en cada cebador, respectivamente (FAMESA, 2019).

Mecha de seguridad: Según, FAMESA (2019), La mecha de seguridad se considera un elemento crucial en las técnicas convencionales de cebado por chorro. Presenta flexibilidad y consta de un núcleo central de pólvora que garantiza la propagación constante de la llama hacia el cebador. Esta estructura está envuelta en muchas capas de diversos materiales que garantizan una combustión ininterrumpida y densa. Además, tiene una capa de plástico que ofrece una impermeabilidad excepcional y protege contra la humedad, la abrasión y la tensión mecánica, incluso en circunstancias desfavorables. El diseño de la mecha



de seguridad consiste en inhibir la propagación del fuego entre secciones adyacentes, reduciendo así la aparición de chispas internas.

Carmex: El sistema de iniciación es un dispositivo premontado y listo para usar que incluye un cebador N° 8, una sección de fusible de seguridad y un conector de mecha rápida de plástico en un extremo. La finalidad de la conexión es acoplar de forma segura la mecha rápida al mismo (FAMESA, 2019).

- Una vez contruidos los cebadores (Carmex más dinamita), deben introducirse en los taladros.
- El usuario no ha facilitado ningún texto. A continuación, se organiza todo el grupo de explosivos en un orden predeterminado para su detonación. Todas las mechas que sobresalen de los taladros deben estar unidas a una mecha principal, creando un patrón parecido a una tela de araña. Es importante señalar que los taladros que se inicien primero se colocarán al principio de la secuencia de detonación, mientras que los taladros de arrastre se situarán al final.
- El usuario no proporcionó ningún texto. El individuo responsable de encender la chispa debe estar atento a cualquier circunstancia potencial que pueda surgir en el punto de ignición, ya que una pequeña porción de la mecha rápida es astillada con el propósito de iniciar la chispa.
- El usuario no proporcionó ningún texto. La trayectoria de las chispas durante la fase inicial de los taladros cargados debe garantizar que la chispa de la mecha de seguridad se sitúe dentro de la abertura del taladro antes de que se produzca la primera detonación. Esta precaución se toma



- para evitar disparos accidentales causados por la degradación de la mecha de seguridad debido a los restos que vuelan.
- El usuario no proporcionó ningún texto. Es crucial que la chispa de la perforación anterior permanezca dentro de la perforación cuando se produce la detonación de la primera carga para evitar que cualquier porción de roca interrumpa el proceso de combustión.
 - **Mecha rápida:** según FAMESA (2019) El sistema descrito es un método convencional utilizado para iniciar explosiones. Consiste en una sustancia pirotécnica, dos cables y una cubierta plastificada. La mecha rápida, al encenderse, genera una llama muy caliente que activa el material pirotécnico en la conexión de la mecha rápida. Esto, a su vez, asegura la activación del fusible de seguridad.
 - **Conector para mecha rápida:** según FAMESA (2019) El conector es una cápsula metálica que aloja una carga pirotécnica. Está equipado con una abertura de color rojo paralela a la base, que sirve para distinguirlo del encendedor estándar. El fusible rápido se complementa con otro componente, conocido como fusible de seguridad, que garantiza una conexión fiable y segura, incluso en entornos húmedos.

2.2.8. Mecánica de rotura de rocas

2.2.8.1. Proceso de fracturamiento

Según, EXSA (2019) El proceso de fracturamiento de la roca mediante voladuras incluye la detonación del explosivo y la reacción de la masa rocosa circundante. Este proceso implica varios factores, como la duración, la expansión de la energía térmica, las ondas de choque y las



ondas de tensión. Además, la presión mecánica de las rocas también es un aspecto crucial. Este es un mecanismo de interacción rápida y compleja.

Existen diversas teorías que intentan explicar este fenómeno:

- La fractura causada por ondas de tensión que regresan desde la cara libre.
- La expansión producida por el proceso de detonación.
- La flexión o teoría de la expansión de gases.
- La teoría del corte por cizallamiento o fractura por torsión.
- Las energías de tensión y compresión generadas por el frente.
- La liberación repentina de cargas.
- La nucleación en fracturas, fallas y discontinuidades.

Las fracturas de las rocas se deben a diversos factores, como la distribución de la fuerza, la compresión, la tensión y la reflexión de las ondas de choque en una superficie libre. Las pruebas de laboratorio realizadas a lo largo de los años han demostrado que la fractura de la roca se produce debido a los efectos de colisión de los fragmentos, los movimientos de cizallamiento y deslizamiento, la torsión, la presión repentina del gas y la posterior liberación de la carga, lo que provoca la flexión y la rotura del material rígido.

Estas hipótesis sólo pueden comprobarse en determinadas situaciones de trabajo, por lo que se consideran poco concluyentes. Otra teoría comúnmente aceptada es que todos estos procesos ocurren de forma secuencial, prácticamente simultánea y uno tras otro. En consecuencia, es



casi difícil experimentarlos individualmente. Teóricamente, estos pasos pueden:

- La explosión produce ondas de choque.
- Propagación de la onda de choque a través de la masa rocosa, lo que provoca su fractura.
- El aumento de volumen de los gases cuando se exponen a temperaturas y presiones elevadas.
- El usuario no proporcionó ningún texto. La acumulación de roca fragmentada resultante del desplazamiento de la roca.

2.2.8.2. Descripción del proceso

Tras la explosión, los gases y la onda de choque provocan alteraciones físicas en las paredes del taladro. La acción se transmite rápidamente a la siguiente roca, propagándose como una fuerza de compresión que induce deformación elástica, dada la resistencia inherente de las rocas a la compresión. Al llegar a la superficie libre, estas ondas producen ondas de tensión. Cuando se supera la resistencia a la tracción de la roca, a menudo se fractura en el lugar de menor resistencia, que suele ser la carga. Las ondas que rebotan en la superficie abierta regresan a su lugar de origen, provocando la formación de fracturas y fisuras a lo largo de su trayectoria. En este punto, la fragmentación más significativa se produce como resultado de la colisión de partículas de roca voladoras. El explosivo del taladro muestra una reacción muy rápida, logrando un impacto total cuando la masa se ha expandido hasta 10 veces su volumen original. Este proceso suele ocurrir en un período de tiempo de 5 a 10



milisegundos. Normalmente, la fragmentación tiene más éxito en rocas sólidas y uniformes en comparación con rocas naturalmente fracturadas extensamente, ya que estas últimas tienden a dispersar energía a través de las grietas, disminuyendo así su eficiencia. En teoría, la explosión muestra un patrón de expansión esférico. Sin embargo, debido a la configuración típica de los explosivos que se colocan en huecos u orificios cilíndricos, la explosión resultante adquiere una forma de expansión cilíndrica. Al perforar materiales sólidos, el agujero se expande y provoca que crezcan grietas en un patrón radial. Estas grietas se alinean con el eje del agujero y crean planos de falla longitudinales. (Ortiz 2019).

La fractura de rocas necesita cumplir con ciertas condiciones esenciales, tales como:

- **Confinamiento del explosivo en el taladro:** Esto se refiere a la relación entre el diámetro del explosivo y el diámetro del taladro. En el caso del ANFO y los explosivos a granel, el acoplamiento es de factor 1 porque el explosivo se distribuye uniformemente en todo el diámetro y volumen del taladro (EXSA 2019).
- **Cara libre:** Es crucial para la formación y el retorno de las ondas de tensión reflejadas que causan la fragmentación. Si la cara libre no es adecuada, la voladura será ineficiente. Si no hay cara libre, las ondas de compresión viajarán sin reflejarse y se dispersarán como ondas sísmicas a distancia (EXSA 2019).
- **Distancia del taladro a la cara libre:** También conocida como línea de menor resistencia o "burden". Esta distancia debe ser adecuada para



cada diámetro de taladro. Si es demasiado larga, la reflexión de ondas será mínima o incluso nula, limitando la fragmentación a la boca del taladro, causando craterización (EXSA 2019).

- **Fisuramiento cilíndrico radial:** Una carga explosiva puntual (con una relación longitud/diámetro máxima de 6/1), es decir, no mayor a 6 veces el diámetro del taladro, generalmente produce una excavación en forma de copa o cráter de profundidad limitada. En cambio, un taladro convencional (con una longitud mayor a 6 diámetros) tiene una expansión cilíndrica radial a lo largo de toda su longitud (EXSA 2019).

2.2.8.3. Evaluaciones de la voladura

Según EXSA (2019), “una voladura puede evaluarse mediante varios factores importantes, entre los cuales se encuentran el grado de fragmentación de la roca, el volumen removido, el grado de deslizamiento alcanzado, el avance logrado, la sobre-rotura y el costo por disparo”.

- La cantidad de material a eliminar debe coincidir estrechamente con la masa teórica prevista, considerando el factor de hinchamiento.
- El usuario no proporcionó ningún texto. Los avances realizados en la excavación subterránea mediante voladuras deben coincidir con la profundidad de las perforadoras utilizadas y limitarse a los límites definidos por el diseño del patrón de perforación. Si el anticipo es insuficiente, será imprescindible ampliarlo, lo que se traducirá en un aumento de los gastos. Lo mismo se aplica en situaciones de rotura excesiva.



- El usuario no proporcionó ningún texto. El nivel del piso debe estar alineado con la proyección del piso anterior. Cualquier protuberancia o lugar saliente necesitará un mayor peso en el piso.
- El usuario no proporcionó ningún texto. Es fundamental mantener la pendiente, ya sea cuesta arriba o cuesta abajo, en cualquier construcción subterránea para garantizar un drenaje adecuado del agua.
- El usuario no proporcionó ningún texto. El grado de fragmentación del material volado variará según su destino previsto, ya que los escombros demasiado pequeños o demasiado grandes podrían plantear complicaciones.
- El usuario no proporcionó ningún texto. Por ejemplo, en caso de formación de bolas, será necesario realizar más voladuras o, idealmente, mayores esfuerzos de trituración.
- El usuario no proporcionó ningún texto. Dentro de edificios o túneles subterráneos, el proceso de voladura puede inducir una reducción de la resistencia y la formación de fracturas en la roca circundante, comprometiendo así la estabilidad del interior y elevando la posibilidad de que los techos o paredes colapsen. Este peligro se ve agravado aún más por las propiedades geológicas impredecibles, las vulnerabilidades estructurales y la fracturación generalizada.
- El usuario no proporcionó ningún texto. Se debe optimizar el movimiento y apilamiento del material fragmentado para mejorar la facilidad de las operaciones de acarreo y transporte. La acumulación anticipada depende del equipo específico utilizado para limpiar el área designada.



- El usuario no proporcionó ningún texto. La dispersión de escombros a grandes distancias no sólo aumenta el peligro de las rocas volantes, sino que también intensifica la dilución de materiales preciosos a medida que se mezclan con los escombros al separarse del frente de disparo. Esto a menudo sugiere que hay una cantidad excesiva de material explosivo en el portamecha o una cantidad insuficiente de tapón.

2.2.9. Diseño de malla de perforación.

2.2.9.1. Cálculo de número de taladros.

El manual de voladuras de Exsa (2019) establece que la cantidad de perforadoras necesarias para las voladuras subterráneas depende de varios elementos, incluido el tipo de roca, el nivel de confinamiento del frente, el grado de fragmentación deseado y el diámetro de las barrenas de perforación disponibles. Cada uno de estos parámetros puede necesitar la modificación de la malla de perforación, lo que quizás resulte en un aumento o reducción en el número de perforaciones previstas teóricamente. La cantidad de agujeros se puede estimar con la siguiente expresión matemática:

$$N^{\circ} t = \left(\frac{P}{dt}\right) + (c * S) \quad (1)$$

$$P = \sqrt{(S)} * 4 \dots \quad (2)$$

$$S = a * h \dots \quad (3)$$



Dónde:

P: circunferencia o perímetro de la sección del túnel, en metros.

dt: distancia entre los taladros de la circunferencia o periféricos
(coeficiente de tipo de roca)

c: coeficiente o factor de roca.

S: área o sección de la galería

a: ancho de la galería

h: altura de la galería

Tabla 1

Distancia entre taladros

Dureza de roca	Distancia entre Taladros (m)
Tenaz	0,50 a 0,55
Intermedia	0,60 a 0,65
Friable	0,70 a 0,75

Nota: EXSA (2019)

Tabla 2

Coficiente de roca

Dureza de roca	Coficiente de roca (m)
Tenaz	2,00
Intermedia	1,50
Friable	1,00

Nota: Exsa (2019)

2.2.9.2. Cálculo del burden

Según EXSA (2019) para calcular el primer burden, la distancia de los taladros centrales de alivio a los taladros de la primera sección no debe exceder de $1,7 \times D_2$. Las condiciones de fragmentación varían mucho, el mismo que depende del tipo de explosivos, tipo de roca y distancia entre los taladros que están cargados y vacíos.

Tabla 3

Cálculo de sección y burden

Sección del corte	Valor de burden	Lado de la sección
Primera	$B_1 = 1,5 \times D_2$	$B_1 \times \sqrt{2}$
Segunda	$B_2 = B_1 \times \sqrt{2}$	$1,5 \times B_2 \times \sqrt{2}$
Tercera	$B_3 = 1,5 \times B_2 \times \sqrt{2}$	$1,5 \times B_3 \times \sqrt{2}$
Cuarta	$B_4 = 1,5 \times B_3 \times \sqrt{2}$	$1,5 \times B_4 \times \sqrt{2}$

Nota: Manual práctico de voladura-EXSA (2019).

2.2.9.3. Distancia entre taladros

El número de taladros se determina en función del área del frente de voladura. Normalmente, la distancia entre los taladros varía de 15 a 30 cm entre los de arranque, de 60 a 90 cm entre los de ayuda, y de 50 a 70 cm entre los cuadradores.

Como regla general, se estima una distancia de 2 pies (60 cm) por cada pulgada del diámetro de la broca.

“Los taladros periféricos, como los de alza y cuadradores, deben perforarse a unos 20-30 cm del límite de las paredes del túnel para facilitar la perforación y evitar la sobre-rotura. Normalmente, se perforan



ligeramente divergentes del eje del túnel para que sus topes mantengan la misma amplitud de sección en la nueva cara libre a formar” (EXSA, 2009).

2.2.9.4. Longitud de taladros

La longitud de las brocas con corte en V, cuña o pirámide está influenciada por factores como el ancho efectivo de la sección, la técnica seleccionada para iniciar el proceso de corte y las propiedades de la plataforma de perforación. La técnica de corte por quemado permite que las perforaciones alcancen profundidades que oscilan entre 2 y 3 metros, mientras que el método de corte en V normalmente alcanza profundidades de 1 a 2 metros en túneles de sección corta. La longitud de estos agujeros se puede determinar utilizando la siguiente ecuación matemática.

$$L = 0,5 * \sqrt{S}$$

Donde:

S: área o sección de la galería

2.2.9.5. Cantidad de carga

Según Mamani (2022) La cantidad de explosivo necesaria depende de la tenacidad de la roca y del tamaño del frente de voladura, factores que afectan el número, diámetro y profundidad de los taladros, así como el tipo de explosivo e iniciadores a utilizar. Es importante considerar que la cantidad de explosivo por metro cuadrado disminuye a medida que aumenta la sección del túnel, pero aumenta con la dureza de la roca.



En minería, los consumos típicos de dinamita varían generalmente entre 300 y 800 gramos por metro cúbico.

2.2.9.6. Eficiencia de perforación o eficiencia de voladura.

Según Cámac (2012) la eficiencia de la voladura se calcula como el cociente entre el avance efectivo y la longitud del taladro, multiplicado por cien para obtener el porcentaje.

$$\text{Eficiencia de perforacion} = \frac{\text{Avance efectivo}}{\text{longitud del taladro}} * 100 \dots (4)$$

Donde:

Avance efectivo expresado en metros (m).

Longitud del taladro expresado en metros (m).

2.2.9.7. Número de cartuchos por taladro.

Según EXSA (2019) “el número de cartuchos se da por medio de la siguiente ecuación”:

$$\text{N}^\circ \text{ de cartuchos} = \frac{\frac{2}{3} * L}{L * 0.8} \dots (5)$$

Donde:

Le: longitud del explosivo o cartucho (m)

L: longitud de taladro perforado (m)

0,80 = 80 % longitud de carga



2.2.9.8. Volumen fracturado o total.

Según EXSA (2019) el volumen total fracturado está dado por la ecuación matemática siguiente:

$$V = a * h * I \dots (6)$$

Donde:

V: volumen total (m³).

a: ancho de la sección de la galería (m).

h: altura de la galería (m).

I: profundidad de la perforación (m).

2.2.9.9. Factor de esponjamiento.

Según Yucra (2020) El factor de esponjamiento representa el aumento de volumen que resulta de la fractura de una masa de roca. Este incremento se debe a la reducción de su densidad, ya que el material se desplaza desde su volumen natural (volumen in situ) hacia otro espacio o simplemente se remueve (volumen no confinado). Este factor puede expresarse como una fracción decimal o un porcentaje.

$$F_w = \frac{V_f}{V_s} \dots (7)$$

Donde:

F_w = factor de esponjamiento.

V_f = volumen que ocupa el material en el frente (m³).



V_s = volumen total que ocupa el material suelto o roto (m³).

2.2.9.10. Tonelaje fracturado

Según Konya (2000), para expresar el volumen encontrado en toneladas, este debe multiplicarse por la densidad promedio del mineral o roca.

$$Tm = V * \rho \dots (8)$$

Donde:

V: volumen total (m³).

ρ : densidad promedio de la roca (kg /m³).

2.2.9.11. Cantidad de carga explosiva.

Según López (2005) la cantidad de carga explosiva está determinada por la resistencia de la roca y el tamaño del frente de voladura, que se basa en factores como la cantidad, profundidad y diámetro de los taladros, así como las características de los explosivos y los iniciadores a utilizar. Es importante destacar que la cantidad de explosivos por metro cuadrado disminuye aún más debido a la amplia sección transversal del túnel, pero aumenta con la dureza creciente de la roca a volar. En la actividad minera, el consumo de explosivos generalmente varía entre 350 y 840 gramos por metro cuadrado.

$$Qt = V * \text{kg/m}^3 \dots (9)$$

Donde:

$V =$ volumen de carga estimado, en m^3

$kg/m^3 =$ carga por m^3

2.2.9.12. Factor de carga explosiva.

Según Cámac (2012) el factor de carga representa la cantidad de explosivo requerida para fragmentar un metro cúbico de roca (m^3). Este factor es un indicador crucial en el diseño de patrones de voladura y también se utiliza como medida de eficiencia en las voladuras”:

$$F_{ce} = \frac{\text{kg-explosivo}}{\text{Volumen roto}} \dots (10)$$

Donde:

Cantidad de explosivo expresado en kilogramos (kg).

Volumen de material roto expresado en metros cúbicos (m^3).

Tabla 4

Factor de carga

Dureza de roca	Factor de carga (kg/m^3)
Muy difícil	1,5 a 1,8
Difíciles	1,3 a 1,5
Fácil	1,1 a 1,3
Muy fácil	1,0 a 1,2

Nota: EXSA (2019)

En donde podemos considerar:

- Rocas muy difíciles: granito, conglomerado, arenisca.
- Rocas difíciles: arenisca sacaroide, arena esquistosa.



- Rocas fáciles: esquisto, arcilla, esquistos arcillosos, lutita.
- Rocas muy fáciles: arcilla esquistosa o rocas muy suaves.

Valores estimados para galería con una sola cara libre, para disparos con 2 caras libres se pueden considerar valores de 0,4 a 0,6 kg/m³.

2.2.9.13. Factor de potencia del explosivo

Según Cámac (2012) “indica que el factor de potencia es la relación entre la cantidad de explosivo con respecto al tonelaje roto.”

$$F_p = \frac{\text{kg-explosivo}}{\text{Tonelaje roto}} \dots (11)$$

Donde:

Cantidad de explosivo expresado en kilogramos (kg).

Toneladas métricas de material roto (Tm).

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.3.1. Perforación subterránea

Consiste en realizar taladros o agujeros en la superficie de la masa rocosa con barrenos de diferentes dimensiones con la finalidad de colocar la carga explosiva e iniciar la explosión con cartucho cebo y posterior fragmentación del macizo rocoso de las labores subterráneas donde se encuentra el yacimiento mineral.



2.3.2. Malla de perforación

La distribución de los barrenos en el frente de una explotación minera es crucial para realizar voladuras controladas, necesarias para el avance de las actividades mineras tanto horizontales como verticales. El diseño de la malla de perforación tiene en cuenta la interacción entre la carga y el espaciado, así como la orientación de los barrenos. El número de agujeros necesarios viene determinado por las propiedades geomecánicas del macizo rocoso.

2.3.3. Labor subterránea

Las excavaciones se realizan bajo la superficie terrestre para obtener recursos minerales. Estas excavaciones incluyen una variedad de vías subterráneas, como galerías horizontales, cruces, niveles, subniveles, así como estructuras verticales como chimeneas, pozos o pozos de diversos diámetros.

2.3.4. Galería

Son labores subterráneas que se realizan para la extracción de un yacimiento mineral, estas labores son horizontales que se realizan siguiendo una veta o mineral de mena y su posterior concentración y recuperación. Se desarrollan de diferentes dimensiones de la sección y longitud variable.

2.3.5. Frente de una labor

Son lugares en donde se realizan la perforación y voladura con la finalidad de realizar el avance lineal de una labor minera que son requeridos para una explotación de un yacimiento mineral.



2.3.6. Parámetros

El término parámetro se denomina a las diferentes ratios que se obtienen en la práctica, en las diferentes operaciones mineras mediante la observación en el lugar insitu del trabajo a realizar.

2.3.7. Burden

Es la distancia que se mide desde el primer taladro hacia las caras libres de la roca, que se mide perpendicular al eje del taladro. Se denomina también línea de menor resistencia a la cara libre.

2.3.8. Espaciamiento

Es la distancia medida entre la ubicación de los taladros de forma secuencial, esta distancia es calculada según el tipo de roca y características geomecánicas del macizo rocoso de una labor minera.

2.3.9. Explosivos

Son sustancias químicas de diferentes composiciones que poseen alta energía que al ser accionadas por un iniciador que puede ser un fulminante u otro dispositivo que al explosionar a alta velocidad de detonación pueda fragmentar una masa rocosa con la finalidad de realizar una explotación de un yacimiento mineral. En el mercado se fabrican de diferentes tipos, dimensiones, potencias y resistentes al agua.

2.3.10. Taladros de arranque

Son taladros perforados generalmente en la parte céntrica del frente de una labor minera y tienen taladros de producción que son cargados con explosivos y



taladros vacíos sin carga explosiva, que al ser chispeados en su primera fase genera una cara libre para los siguientes taladros a chispear y optimizar la voladura.

2.3.11. Factor de carga explosiva

Es la cantidad del explosivo que se usa en una voladura ya sea subterránea o superficial y se expresa en kg/m^3 .

2.3.12. Avance lineal de una labor

Es la longitud de avance por cada disparo realizado en un turno con la finalidad de desarrollar una labor minera subterránea, cuyo avance permitirá la culminación de dicha labor ya sea en mayor o menor tiempo de ejecución.

2.3.13. Masa rocosa

Son estructuras de roca conformado por un conjunto de bloques de la matriz rocosa y las discontinuidades que se encuentran en la corteza terrestre.

2.3.14. Voladura de rocas

Es el fenómeno físico y químico de la reacción de la mezcla explosiva que se ocasiona al iniciar la explosión mediante un iniciador o fulminante para fragmentar el macizo rocoso con la finalidad de realizar una explotación de un yacimiento mineral.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

La Unidad Minera Esperanza de Caraveli, está situada en la Cordillera Occidental de los Andes, políticamente se encuentra ubicada en la jurisdicción de:

Distrito : Atico

Provincia : Caravelí

Departamento: Arequipa

El derecho minero se encuentra ubicado en las coordenadas U. T.M. WGS 84, en la Hoja 32- O de la Carta Nacional del IGN. (Ver Tabla 5)

Tabla 5

Coordenadas UTM de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí

Vértices	Norte	Este
1	8 244 000	646 000
2	8 244 000	641 000
3	8 242 000	641 000
4	8 242 000	646000

Nota: Mina Esperanza de Caravelí – Arequipa.

3.2. ACCESIBILIDAD

El acceso a la Unidad Minera Esperanza de Caravelí se realiza a través de la carretera Panamericana desde la Ciudad Lima y/o Arequipa. (Ver Tabla 6).

Tabla 6*Ruta de accesibilidad a la Unidad Minera Esperanza de Caravelí - Arequipa*

Ruta	Distancia (km)	Tipo de Vía	Tiempo (horas)
Arequipa – Ático	413	Carretera asfaltada	6
Ático - Km 40	40	Carretera asfaltada	1
Km 40 - Minera Esperanza	35	Carretera afirmada	1
Total	488		8

Nota: Unidad Minera Esperanza de Caravelí.

3.3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.3.1. Tipo de investigación

El estudio utilizó un diseño experimental, en el que la variable independiente se modificó intencionadamente para examinar su impacto directo en la variable dependiente. Hernández et al. (2014) dilucidan que este tipo de estudio conlleva la alteración deliberada de tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones con el fin de monitorizar su impacto sobre otras variables, todo ello dentro de un entorno controlado. Cuando se trata de la parrilla de perforación, realizar cambios en su configuración tiene un efecto directo sobre el progreso lineal, que puede ser beneficioso o perjudicial.

3.3.2. Método de la investigación

El método utilizado en el estudio fue cuantitativo, se basa en interrogantes y encuestas para la recopilación de los datos cuantitativos y en función a estos datos se obtienen las conclusiones del trabajo de investigación.



3.3.3. Enfoque de la investigación

El estudio de investigación utilizó una metodología cuantitativa con análisis estadístico no probabilístico. Los datos obtenidos consistieron en mediciones cuantitativas. En el estudio de Hernández et al. (2014), “se dice que el método cuantitativo implica una serie de procesos que se siguen de manera secuencial y probatoria. Esto significa que no se saltan etapas y se cumple estrictamente con la secuencia de los procedimientos”.

3.3.4. Diseño de la investigación

Para el presente estudio, el diseño de investigación fue preexperimental longitudinal-comparativo, debido a que las mediciones se realizaron en un único grupo, específicamente la galería Santa Isabel, antes y después de la implementación de un nuevo diseño de malla de perforación. Según Hernández et al. (2014), los diseños preexperimentales se caracterizan por tener un grado mínimo de control, ya que implican administrar un tratamiento a un grupo y luego medir una o más variables para observar los cambios en estas variables dentro del grupo a lo largo del tiempo.

El procedimiento para desarrollar el estudio de investigación comenzó con la evaluación de las perforaciones realizadas en cada turno, donde se midió el avance lineal en cada perforación efectuada en la Galería Santa Isabel, además de analizar la línea de perforación, el número de taladros y los explosivos utilizados. En el trabajo de investigación, se rediseñó la malla de perforación y se calculó el factor de carga explosiva de acuerdo con las características de la masa rocosa. Se llevaron a cabo pruebas en 22 turnos, considerando el número de taladros, tipo de perforación, carga, espaciamiento y el factor de carga explosiva según las



características de la masa rocosa. Los datos se registraron en hojas de control. Finalmente, se obtuvo el siguiente resultado: con la malla de perforación anterior, el avance lineal fue de 1.31 metros, mientras que con el rediseño de la malla de perforación y el factor adecuado de carga explosiva, el avance lineal aumentó a 1.41 metros, con una diferencia de 0.10 metros. En total, se perforaron 32 taladros en el frente de la galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí en Arequipa.

3.4. POBLACIÓN

La población para el estudio de investigación está constituida por las galerías: 385 – SW, Santa Isabel y San Vicente, cuyas secciones fueron de 2.50 m x 2.60 m, pertenecientes a la Unidad Minera Esperanza de Caravelí en Arequipa. Hernández et al. (2014), quien a su vez cita a Lepkowski (2008), define que una población o universo es un conjunto de todas las instancias que cumplen con una serie de especificaciones. Por lo tanto, es preferible delimitar claramente las características de la población para obtener los parámetros de muestreo adecuados.

3.5. MUESTRA

Para el presente estudio de investigación, la muestra consiste en la Galería Santa Isabel, que tiene una sección de 2,50 m x 2,60 m y una longitud de 370 metros. Esta galería está ubicada en la Unidad Minera Esperanza de Caravelí en Arequipa, y está compuesta por roca semidura a dura con una densidad promedio de 2,67 t/m³. Según Hernández et al. (2014), la muestra se define esencialmente como un subconjunto o subgrupo de los elementos que conforman la población en particular, y debe ser lo más representativa posible de la población para ser un fiel reflejo de la misma.

3.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.6.1. Variable independiente

Rediseño de Malla y Cálculo del Factor de Carga Explosiva.

3.6.2. Variable dependiente

Optimización del Avance Lineal.

Tabla 7

Operacionalización de variables

Variables	Indicadores	Escala de medición
Variable independiente	- Taladros perforados	- Total de taladros
Rediseño de Malla y Cálculo del Factor de Carga Explosiva.	- Burden	- metros
	- Espaciamiento	- metros
	- Sección de la galería	- metros
	- tipo de roca	- Mpa
	- explosivos	- kg/m
	- Factor de carga	- kg/m ³
	Variable dependiente	- Longitud de avance
Optimización del Avance Lineal		

3.7. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Es crucial identificar los métodos empleados para recopilar datos en el estudio de investigación. Para el estudio antes y después, se utilizaron métodos que incluyeron la recopilación de datos en campo, la observación posterior al disparo, la medición del avance lineal logrado, la evaluación del grado de fragmentación y la revisión de los



reportes de guardia durante las operaciones en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí en Arequipa.

3.7.1. Técnicas para el procesamiento de la información

Para analizar la información adquirida, se utilizaron estadísticas descriptivas para calcular los promedios generales de varias métricas de campo, que incluyen el avance lineal promedio por disparo, el número de taladros y el factor de carga tanto para las mallas anteriores como para las actuales. Se utilizaron las siguientes herramientas: Microsoft Excel, para la elaboración de gráficos y cuadros estadísticos, Microsoft Word para la redacción del presente trabajo de investigación, Auto CAD para elaborar la malla de perforación.

3.7.2. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados para recopilar datos incluyeron la revisión documental para verificar el avance lineal de la Galería Santa Isabel, así como los reportes diarios y mensuales de operación. Además, se utilizaron libretas de campo, fichas de control de datos y una cámara fotográfica para documentar el proceso de manera detallada y precisa.

1. Reporte diario de operación.

- Avance lineal
- Consumo de explosivos
- Granulometría
- Taladros perforados



2. Reporte mensual de operación.

- Explosivo utilizado.
- Promedio de avance lineal
- Cantidad de taladros.
- Consumo de explosivos



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los análisis de resultados de la investigación se realizaron en el frente de la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí. – Arequipa. Los controles de las mediciones de avance lineal antes y después del rediseño de malla de perforación, como también la carga explosiva utilizada, se realizaron en la Galería Santa Isabel, Los datos se recolectaron en 22 turnos y posteriormente se procesaron mediante la base de datos con el Software Excel.

4.2. RESULTADOS SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.2.1. Perforación en la Galería Santa Isabel

La perforación se ejecutó en la Galería Santa Isabel de 2,50 m x 2,60 m de sección y una longitud de 370 m, realizado en roca dura. Para la perforación de taladros se utilizó barrenos de 3 y 5 pies de longitud y brocas de 38 mm y 39 mm de diámetro. (Ver tabla N° 14)

4.2.2. Malla de perforación anterior en la Galería Santa Isabel

La malla de perforación anterior tuvo deficiencias en su aplicación en el frente de la Galería Santa Isabel, debido a las variaciones en el comportamiento de la masa rocosa de la labor minera. (Ver Anexo N° 1).

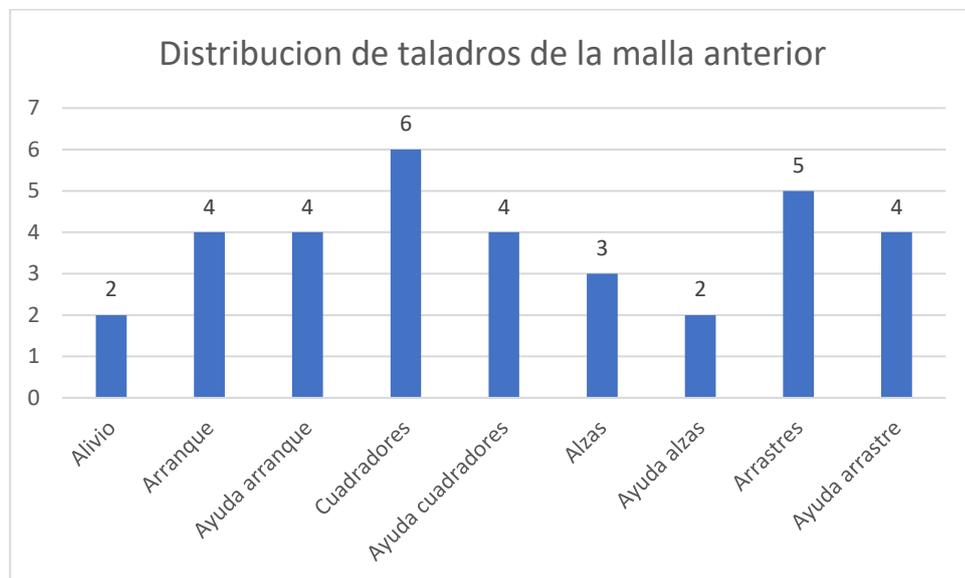
Tabla 8

Número de taladros en la perforación anterior

Descripción	N° de Taladros
Alivio	2
Arranque	4
Ayuda arranque	4
Cuadradores	6
Ayuda cuadradores	4
Alzas	3
Ayuda alzas	2
Arrastres	5
Ayuda arrastre	4
Total/disparo	34

Figura 6

Distribución de taladros de la malla anterior



Nota: La tabla 8 y figura 6 detalla los tipos y la cantidad de taladros utilizados en una perforación anterior, totalizando 34 taladros distribuidos en diversas categorías: 2 de alivio para reducir presión, 4 de arranque para la ruptura inicial, 4 de ayuda arranque para complementar el arranque, 6 cuadradores para definir



límites, 4 de ayuda cuadradores para mantener bordes, 3 alzas para crear elevaciones, 2 de ayuda alzas para uniformidad, 5 arrastres para mover material y 4 de ayuda arrastre para asegurar el desplazamiento correcto. Esta distribución muestra una planificación meticulosa, esencial para una voladura efectiva y segura, destacando la importancia de cada tipo de taladro en el éxito del proyecto.

4.2.3. Rediseño de malla

Mediante el análisis de la malla anterior, que presentó deficiencias en su aplicación, se rediseñó la malla actual teniendo en consideración las características geomecánicas de la masa rocosa de la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa. (Ver Anexo N° 2).

a) Datos de campo requeridos

Densidad de la roca	: 2,67 t/m ³
Sección de la galería	: 2,50 m x 2,60 m
Ancho	: 2,50 m.
Altura	: 2,60 m.
Diámetros de los taladros de producción:	39 mm y 38 mm
Diámetros de los taladros de alivio	: 38 mm.
Longitud de barreno de perforación	: 5 pies = 1,52 m.

b) Número de taladros:

Se calculó según el Modelo matemático de EXSA

Donde:

N° Tal = Número de taladros

P = Perímetro de la labor



- S = Sección de la labor
dt = Distancia entre taladros
c = Coeficiente del factor de roca
a = Ancho de la labor
h = Altura de la labor

c) Factores para el rediseño de la malla de perforación

- Para rediseñar la malla, se tomó en consideración los siguientes factores.
- Número de taladros de alivio
- Número de taladros de producción
- Diámetro de los taladros de producción
- Longitud de taladros perforados
- Avance lineal
- Tipo de roca
- Equipo utilizado
- Volumen de roca
- Área de la sección de la galería

d) Cálculo del número total de taladros

Aplicando la formula (3)

$$S = 2,50 \text{ m} \times 2,60 \text{ m}$$

$$S = 6,50 \text{ m}^2$$

Aplicando la formula (2)

$$P = 4 \sqrt{6,50}$$



$$P = 10,20 \text{ m}$$

C = Coeficiente de factor de roca

dt = distancia de taladros

Aplicando la formula (1)

$$N^{\circ} t = \left(\frac{10,20}{0,55} \right) + (2 * 6,50)$$

$$N^{\circ} t = (18,54) + (13)$$

$$N^{\circ} t = 31,54 = 32 \text{ taladros}$$

e) Avance efectivo de la voladura.

$$L = 0,95 * H$$

H= Longitud (5 pies)

$$L = 0,95 * (5 * 0,3048)$$

$$L = 1,44 \text{ m.}$$

Indica que, con el corte, se debe tener un máximo de 1,44 m.

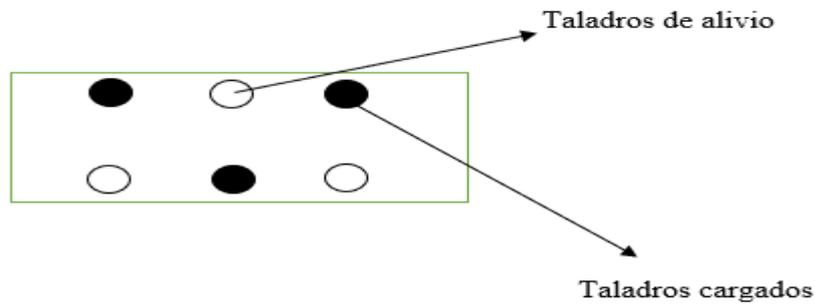
4.2.4. Tipo de corte

a) Corte Quemado

En el corte, se perforó un total de 6 taladros paralelos que consistió de 3 taladros de alivio y 3 taladros de arranque, se dejó taladros vacíos con la finalidad de crear cara libre para la expansión de la roca triturada hacia el espacio libre.

Figura 7

Corte Quemado



Nota: diseño del arranque modificado

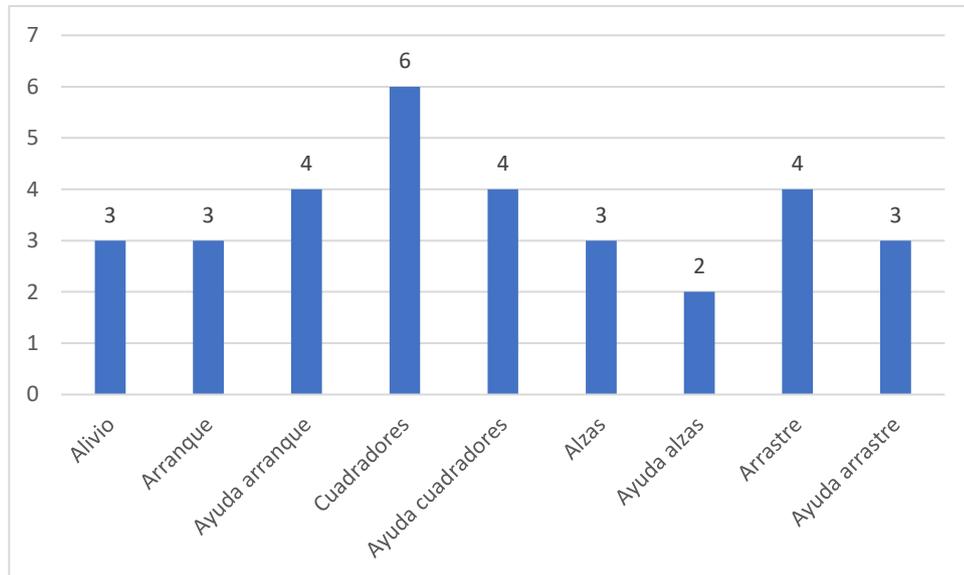
Tabla 9

Número de taladros con el rediseño de malla

Descripción	N° de Taladros
Alivio	3
Arranque	3
Ayuda arranque	4
Cuadradores	6
Ayuda cuadradores	4
Alzas	3
Ayuda alzas	2
Arrastre	4
Ayuda arrastre	3
Total/disparo	32

Figura 8

Cantidad de taladros con el rediseño de malla de perforación



Nota: La Tabla 9 y en la figura 8 presenta un rediseño de malla con 32 taladros distribuidos estratégicamente para mejorar la eficiencia y seguridad en operaciones de perforación y voladura. Se observan ajustes como el aumento en taladros de alivio para controlar mejor las presiones, la reducción en taladros de arranque para una ruptura más eficiente, y la constancia en taladros de cuadradores y alzas para mantener límites y elevaciones precisas. Esto refleja una planificación meticulosa que busca optimizar la ejecución del proyecto, subrayando la importancia de la precisión en el diseño de taladros para alcanzar objetivos operativos específicos.

4.3. RESULTADOS DE VOLADURA

4.3.1. Voladura anterior en la Galería Santa Isabel

En la voladura anterior hubo mayor consumo de explosivos, debido al mayor número de taladros perforados en la malla anterior y el cálculo de la carga

explosiva no acorde a las características estructurales del macizo rocoso de la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa como se aprecia en la tabla 10.

Tabla 10

Consumo de explosivos Semexa 65% en la voladura anterior

Taladros	N° de Taladros	N° de cartucho o/taladro	N° Total de cartuchos	Peso del cartucho (kg)	Distribución de explosivos (kg)
Alivio	2	0	0	0	0
Arranque	4	7	28	0,080	2,24
Ayuda arranque	4	6	24	0,080	1,92
Cuadradores	6	6	36	0,080	2,88
Ayuda cuadradores	4	5	20	0,080	1,60
Alzas	3	5	15	0,080	1,20
Ayuda alzas	2	5	10	0,080	0,80
Arrastre	5	6	30	0,080	2,40
Ayuda arrastre	4	5	20	0,080	1,60
Total/disparo	34		183		14,64

En la tabla 10, se presenta un análisis exhaustivo del consumo de explosivos Semexa 65% durante una voladura anterior, proporcionando datos. Se destaca que se utilizaron un total de 34 taladros, lo que subraya la estrategia de perforación empleada. Además, se registraron 183 cartuchos de explosivos utilizados, indicando la cantidad exacta de unidades explosivas desplegadas. Cada disparo promedió un consumo de 14.64 kilogramos de explosivo

Tabla 11*Explosivos y accesorios utilizados en la voladura anterior*

Descripción	Unidad de medida	Total
Semexa 65%	kg/disparo	14,64
Mecha de seguridad	Pies	204
Fulminante N° 8	Unidades	34

La Tabla 11 detalla los materiales utilizados en una voladura previa, incluyendo 14.64 kg de Semexa 65% por disparo para la fragmentación de rocas, 204 pies de mecha de seguridad para controlar la sincronización de la detonación, y 34 unidades de fulminante N° 8 para iniciar la detonación de explosivos. Estos datos subrayan la importancia de la selección precisa y el manejo seguro de explosivos y accesorios en operaciones de voladura.

- **Volumen**

$$V = b \times h \times Lp$$

Donde:

$$V = \text{Volumen (m}^3\text{)}$$

$$b = \text{Ancho de la labor (m)}$$

$$h = \text{Altura de la labor (m)}$$

$$Lp = \text{Longitud perforada(m)}$$

$$V = 2,50 \text{ m} \times 2,60 \text{ m} \times 1,31 \text{ m}$$

$$V = \mathbf{8,52 \text{ m}^3}$$

$$\text{Avance lineal} = 1,31 \text{ m (Ver anexo N}^\circ \text{ 3)}$$



- **Tonelaje**

$$T_m = V \times d_r$$

Donde:

T_m = Tonelada métrica

V = Volumen

d_r = Densidad de roca

$$T_m = 8,52 \times 2,67$$

$$\mathbf{T_m = 22,75 Tm}$$

- **Factor de carga**

$$F_c = \frac{\text{kg - explosivo}}{\text{Volumen Roto}}$$

$$F_c = \frac{14,64}{8,52}$$

$$\mathbf{F_c = 1,72 \text{ kg/m}^3}$$

- **Factor de carga lineal**

$$F_{cl} = \frac{\text{kg - explosivo}}{\text{metro lineal}}$$

$$F_{cl} = \frac{14,64}{1,31}$$

$$\mathbf{F_{cl} = 11,18 \text{ kg/m}}$$

- **Factor de potencia**

$$F_p = \frac{\text{kg - explosivo}}{\text{Tonelaje}}$$

$$F_p = \frac{14,64}{22,75}$$

$$\mathbf{F_p = 0,64 \text{ kg/Tm}}$$

Tabla 12*Resultados de la voladura anterior*

Descripción	Unidad de medida
kg/disparo	14,64 kg.
Volumen	8,52 m ³
Toneladas	22,75 tm
Factor de carga	1,72 kg/m ³
Factor de potencia	0,64 tm
Factor de carga lineal	11,18 kg/m

La Tabla 12 proporciona los resultados clave de la voladura anterior, destacando un uso de 14.64 kg de explosivos por disparo. Además, se detallan otros parámetros importantes: un factor de carga de 1.72 kg/m³, que indica la densidad de explosivos por unidad de volumen excavado; un factor de potencia de 0.64 tm, que evalúa la eficiencia de los explosivos en términos de energía liberada por tonelada métrica de explosivo; y un factor de carga lineal de 11.18 kg/m, que muestra la cantidad de explosivo por unidad de longitud de la perforación.

4.3.2. Voladura actual en la Galería Santa Isabel

Para obtener una voladura eficiente en el frente de la Galería Santa Isabel, se consideró las características del macizo rocoso y se seleccionó el explosivo Semexa 65% y también se tomó en cuenta el confinamiento del explosivo en el sistema de carguío a los taladros como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13*Consumo de explosivo en la voladura actual*

Taladros	N° de Taladros	N° de Cartucho/taladro	N° Total de cartucho	Peso del cartucho (kg)	Distribución de explosivos (kg)
Alivio	3	0	0	0	0
Arranque	3	7	21	0,080	1,68
Ayuda arranque	4	6	24	0,080	1,92
Cuadradores	6	6	36	0,080	2,88
Ayuda cuadradores	4	5	20	0,080	1,60
Alzas	3	6	18	0,080	1,44
Ayuda alzas	2	5	10	0,080	0,80
Arrastre	4	6	24	0,080	1,92
Ayuda arrastre	3	5	15	0,080	1,20
Total/disparo	32		168		13,44

En la tabla 13 se presenta un análisis detallado del rediseño de malla, enfocándose en el uso de explosivos y cartuchos durante el proceso. Se especifica que se emplearon un total de 32 taladros para completar la operación, destacando la distribución precisa de perforaciones dentro del proyecto. Además, se utilizaron 168 cartuchos de explosivos, lo que indica la cantidad exacta de unidades explosivas implementadas en la voladura. Cada disparo promedió un consumo de 13.44 kilogramos de explosivo, subrayando la cantidad específica de material explosivo utilizado en cada fase del proceso de voladura.

a) Datos de campo

- Densidad de roca : 2,67 t/m³
- Sección de la galería : 2,50 m x 2,60 m
- Diámetro de taladro : 0,038 m
- Longitud de barreno : 5 pies = 1,52 m



b) Volumen

$$V = b \times h \times L_p$$

Donde:

V = Volumen fragmentado (m³)

B = Ancho de la galería (m)

h = Altura de la galería (m)

L_p = Longitud perforada (m)

$$V = 2,50 \text{ m} \times 2,60 \text{ m} \times 1,41 \text{ m}$$

$$V = 9,17 \text{ m}^3$$

Avance lineal = 1,41 m. (Ver anexo N° 4)

c. Tonelaje

$$T_m = V \times d_r$$

Donde:

T_m = Tonelada métrica

V = Volumen de mineral

d_r = Densidad de roca

$$T_m = 9,17 \text{ m}^3 \times 2,67 \text{ t/m}^3$$

$$T_m = 24,48 \text{ Tm}$$

d. Factor de carga

$$F_c = \frac{\text{kg} - \text{explosivo}}{\text{Volumen}}$$

$$F_c = \frac{13,44 \text{ kg}}{9,17 \text{ m}^3}$$

$$F_c = 1,47 \text{ kg/m}^3$$

e. Factor de carga lineal

$$F_c = \frac{\text{kg} - \text{explosivo}}{\text{metro lineal}}$$

$$F_c = \frac{13,44 \text{ kg}}{1,41 \text{ m}}$$

$$F_{cl} = 9,53 \text{ kg/m}$$

f. Factor de potencia

$$F_p = \frac{\text{kg} - \text{explosivo}}{\text{Tonelaje}}$$

$$F_p = \frac{13,44 \text{ kg}}{24,48 \text{ Tm}}$$

$$F_p = 0,54 \text{ kg/Tm}$$

Tabla 14

Resumen de resultados en la voladura actual

Descripción	Unidad de medida
kg/ disparo	13,44 kg.
Volumen	9,17 m ³ .
Toneladas	24,48 tm
Factor de carga	1,47 kg/m ³ .
Factor de potencia	0,54 kg/tm
Factor de carga lineal	9,53 kg/m.

La Tabla 14 presenta los resultados detallados de la voladura actual, destacando el uso de 13,44 kg de explosivos por disparo. Además, proporciona información crucial sobre el factor de carga de 1,47 kg/m³, que indica la densidad de explosivos por volumen excavado, y el factor de potencia de 0,54 tm, que evalúa la eficiencia energética de los explosivos en términos de toneladas métricas



detonadas por tonelada métrica de explosivo utilizado. Asimismo, se especifica un factor de carga lineal de 11.18 kg/m, que muestra la cantidad de explosivo por unidad de longitud de la perforación.

4.4. RESULTADOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

Según los cálculos y análisis de resultados de perforación y voladura anterior y actual, se demostró las diferencias en los parámetros de perforación y voladura de la ejecución de la Galería Santa Isabel como apreciamos en la tabla 15.

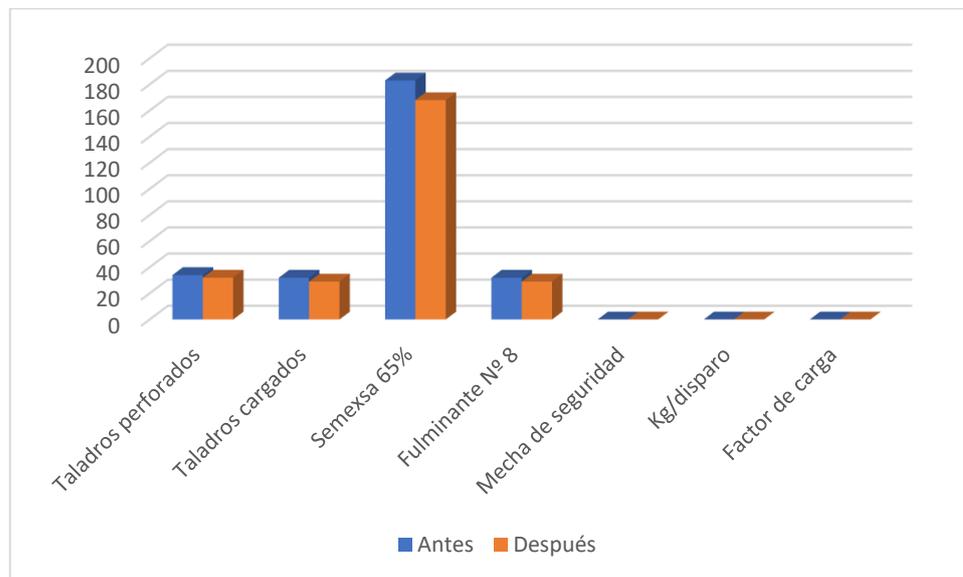
Tabla 15

Resultados de perforación y voladura

Descripción	Unidad de Medida	Antes	Después	Diferencia
Taladros perforados	Taladros	34	32	02
Taladros cargados	Taladros	32	29	03
Semexsa 65%	Cartuchos	183	168	15
Fulminante N° 8	Cápsulas	32	29	03
Mecha de seguridad	Metro	62,18	58,52	3,66
Kg/disparo	Kilogramo	14,64	13,44	1,20
Factor de carga	Kg/m ³	1,72	1,47	0,25
Factor de potencia	Kg/Tm	0,64	0,54	0,10
Factor de carga lineal	Kg/m	11,18	9,53	1,65
Avance lineal	Metro	1,31	1,41	0,10

Figura 9

Comparación de resultados malla de perforación anterior y malla modificada



La tabla 15 y la figura 9 detalla los resultados antes y después de un proceso de perforación y voladura, proporcionando una comparativa clara de varios parámetros clave. Se observa que el número de taladros perforados disminuyó de 34 a 32, lo que sugiere un ajuste en la planificación de perforación. Asimismo, la cantidad de taladros cargados pasó de 32 a 29, indicando una menor cantidad de taladros activos en el proceso posterior. El uso de cartuchos Semexsa 65% también se redujo de 183 a 168 unidades, mostrando una optimización en el consumo de explosivos. Similarmente, la cantidad de cápsulas de fulminante N° 8 y la longitud de mecha de seguridad disminuyeron, reflejando un ajuste en la gestión de recursos y seguridad. Además, el peso de explosivo por disparo bajó de 14,64 a 13,44 kilogramos, destacando una eficiencia mejorada en el uso de explosivos por disparo. Estos cambios se reflejan en los factores de carga, potencia y carga lineal, que muestran una tendencia hacia la optimización de recursos y procesos en operaciones de voladura.



4.5. DISCUSIÓN

Los resultados a un nivel general del presente trabajo de investigación, en el que se logró el incremento del avance lineal de 1,31 m a 1,41 m logrando un incremento de 0,10 m en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa. En comparación con Villasante,(2016). Utilizando un método similar, rediseñando la malla de perforación y determinado la carga explosiva adecuada, también logro incrementar el avance lineal de 1,30 m a 1,37 m, con una diferencia de 0,07 m.

Existe un incremento en el avance lineal en la modificación de la malla de perforación para el presente trabajo de investigación, el cual incremento de 1.31 metros a 1,41 metros, con un incremento de 0,10 metros el cual representa un incremento en el avance lineal. Este resultado es similar al de Sancho, (2014) quien también, al determinar la carga explosiva adecuada, incremento el avance lineal de 1,30 metros a 1,40 metros con incremento de 0,10 metros en el frente de la Galería.

En el presente estudio de investigación, mediante el rediseño de malla y el factor de carga explosiva necesaria se incrementó el avance lineal de 1,31 m a 1,41 m con un incremento de 0,10 m en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa. Se concluyó que, mediante el rediseño de malla y la carga explosiva necesaria considerando el tipo de la masa rocosa de la Galería Santa Isabel, si se incrementó el avance lineal en cada disparo ejecutado en el frente de la galería. Los resultados son similares a los cálculos obtenidos en la galería N12 de la empresa minera SOTRAMI S.A – Ayacucho donde concluye que, diseñando la nueva malla, y calculando la carga explosiva necesaria, el costo de perforación se redujo de 158,54 US \$/m a 141,88 US \$/m, logrando un incremento de 16,66 US\$/m, y el avance lineal se optimizó de 1,32



metros a 1,39 metros con un incremento de 0,07 m, en la Galería N12 de la Empresa Minera Sotrami S.A. (Mamani T.2020).

En el presente estudio de investigación, mediante el rediseño de malla y el factor de carga explosiva necesaria se incrementó el avance lineal de 1,31 m a 1,41 m con un incremento de 0,10 m en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caraveli – Arequipa. Se concluyó que, mediante el rediseño de malla y la carga explosiva necesaria considerando el tipo de la masa rocosa de la Galería Santa Isabel, si se incrementó el avance lineal en cada disparo ejecutado en el frente de la galería. Los resultados son similares a los cálculos obtenidos en la Galería 773 del nivel 4773 m.s.n.m de la Mina Maribel de Oro A, Ananea – Phoquera, en donde concluye que con la metodología del nuevo diseño de malla y la carga explosiva adecuada, el avance lineal se incrementó de 1,35 m a 1,42 m, con un incremento de 0,07 m en el frente de la Galería. (Mamani, P. 2015).

En el presente trabajo de investigación el avance lineal se incrementó de 1,31 metros a 1,41 metros logrando un incremento de 0,10 metros este avance se logró gracias al rediseño de malla de perforación. Este resultado contrasta con los resultados de Ortiz (2019) utilizando un método similar, rediseñando la malla de perforación y determinando la carga explosiva adecuada, también logró aumentar el avance lineal de 1,33 metros a 1,40 metros con un incremento de 0,07 m en la Galería 435 NE de la Unidad Minera Las Águilas – Puno

Respecto a la comparación entre la malla antigua de perforación y el nuevo diseño de malla de perforación se tiene los siguientes resultados un avance lineal de 1,31 metros a 1,41 metros con un incremento de 0,10 metros, Los resultados son similares. En comparación con Pino, (2019). Utilizando un método similar, rediseñando la malla de



perforacion y determinado la carga explosiva el avance lineal se optimizó de 1,30 m a 1,40 m obteniendo un incremento de 0,10 m por cada uno de los disparos realizados en el frente de la galería.



V. CONCLUSIONES

- De manera general, que con el rediseño de malla perforación y carga explosiva adecuada, se incrementó de 1,31 metros a 1,41 metros con una diferencia de 0,10 metros por cada disparo realizado en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí - Arequipa
- El rediseño de la malla de perforación y la optimización del factor de carga explosiva en la galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí – Arequipa resultó en una reducción de taladros y explosivos utilizados, además de disminuir el factor de carga de 1,72 Kg/m³ a 1,47 Kg/m³. Esto mejoró el avance lineal de 1,31 a 1,41 metros por disparo, demostrando una mayor eficiencia y menor costo operativo.
- Con el rediseño de la malla de perforación, se concluye que solamente son necesarios 32 de los 34 taladros que tenía la malla anterior, por lo tanto, el incremento de avance lineal es de 1,31 metros a 1,41 metros incrementando de 0,10 metros, realizado en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza de Caravelí – Arequipa.



VI. RECOMENDACIONES

- Para mejorar la eficiencia en la Galería Santa Isabel de la Unidad Minera Esperanza en Caravelí, Arequipa, es esencial realizar un estudio geomecánico detallado que caracterice la roca encajonante mediante pruebas específicas y modelos geomecánicos. Esto permitirá rediseñar la malla de perforación y optimizar la carga explosiva, mejorando la estabilidad de las galerías y el avance lineal.
- Además, se recomienda estandarizar las mallas de perforación según el tipo de roca y las capacidades de los equipos disponibles, lo que aumentará la eficiencia, reducirá riesgos operativos y mejorará la seguridad. Evaluar continuamente los procesos de perforación y voladura ayudará a identificar áreas de mejora y oportunidades para optimizar costos sin comprometer la calidad ni la seguridad.
- Implementar estas recomendaciones fortalecerá la infraestructura geotécnica y operativa, contribuirá a un desarrollo minero más eficiente y sostenible, y aumentará la productividad y rentabilidad, asegurando un entorno de trabajo seguro y estable.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, J., (2023). Reducción de costos operativos en perforación y voladura con nuevo diseño de malla y carga explosiva en el By Pass 723 E de la Compañía Minera Las Bravas N° 2 Arequipa [Universidad Nacional del Altiplano].
<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19372>
- Cámac, T. (2012). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. FIM-UNA. Puno.
- Ccapa, Q. (2019). Reducción de costos de producción mediante la evaluación de las operaciones unitarias en la Minera Yslay de la Empresa Chungar S.A.C. – Cerro de Pasco
- Exsa, (2019). *Manual Práctico de Voladura* (EXSA S.A., Ed.; 5ta ed.)
- Chipana, N. (2015). *Diseño de perforación y voladura para reducción de costos en el frente de la galería Progreso de la Contrata Minera Cavilques- Corporación Minera Ananea S.A.*, Universidad Nacional del Altiplano-Puno.
- FAMESA, E. (2019). Manual de perforación y voladura [FAMESA Explosivos S.A.C.], Edición 2019.
- Hernández, Fernández & Baptista (2014). Metodología de la Investigación, [McGraw - Hill Interamericana de Editores S.A. -México], Sexta edición.
- Konya, C. (2000). *Manual de perforacion y voladura de rocas en labores mineras subterráneas*.
- López, J. (2005). *Manual de perforación y voladura de rocas*, Instituto Geológico y Minero España. Edición 2005.



- Mamani, T. (2020). *Optimización de costos de producción mediante la evaluación de las operaciones de perforación y voladura en la galería N12 de la empresa minera SOTRAMI S.A – Ayacucho* [Universidad Nacional del Altiplano] <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3227043>
- Mamani, V. (2022). *Rediseño de la malla de perforación y voladura en frentes de avance nivel 0 para reducir los costos de operación SM Esperanza Secocha* [Universidad Nacional de San Agustín]. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/14733>
- Mamani, P. (2015). *Optimización de costos de perforación y voladura en la mina Maribel de Oro A-Ananea*, Universidad Nacional del Altiplano-Puno.
- Mendoza, (2006). *Perforación y voladura*, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Ortiz, Q. (2019). *Minimización de costos de perforación y voladura con rediseño de malla en la galería 435 NE de la Unidad Minera Las Águilas de la Empresa Minera CIEMSA S.A. – Lampa*.
- Pino, Ch. (2019). *Optimización de avance lineal con nuevo diseño de malla en el frente de la galería San Jorge en la minera aurífera Cuatro de Enero S.A. – Arequipa* [Universidad Nacional del Altiplano].. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3224157>
- Quispe, C. (2017). *Reducción de costos de perforación y voladura con nuevo diseño de malla en el frente del Crucero 340 NW de la Empresa Minera Yansur S.A.C. – Rinconada*, Universidad Nacional del Altiplano-Puno.
- Sancho, C. (2014). *Análisis de costos de perforación y voladura para optimizar el desarrollo de la galería anaconda de la Unidad Minera Kori Chaska - Ananea*



[Universidad Nacional del Altiplano].

<https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/17823>

Soncco, D., (2019). Minimización de costos de perforación y voladura en el frente de la galería San Francisco de la Unidad Minera Pallancata - IESA S.A. – Ayacucho

Minimización de costos de perforación y voladura en el frente de la galería San

Francisco de la Unidad Minera Pallancata - IESA S.A. - Ayacucho [Tesis,

Universidad Nacional del Altiplano].

<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/1200>

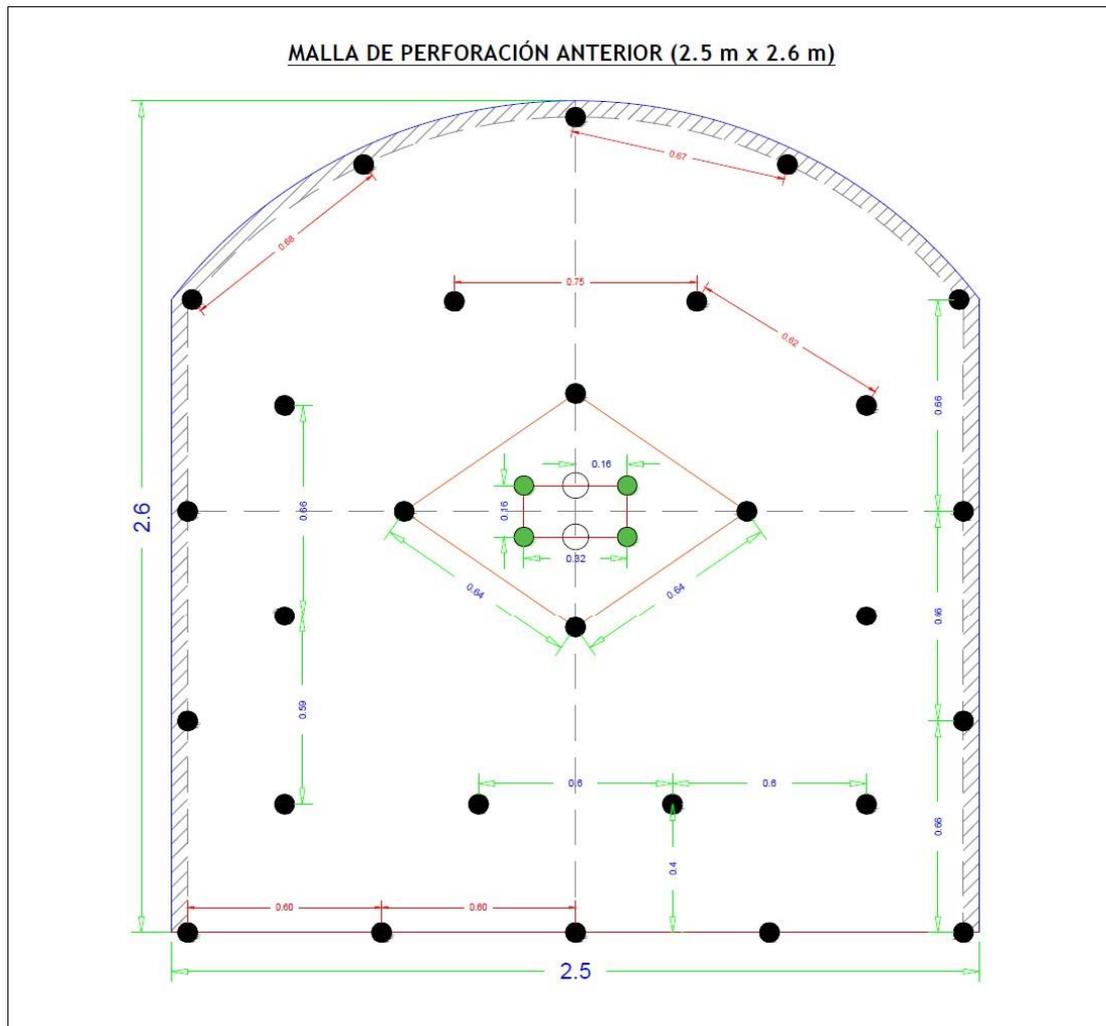
Villasante, I. (2016). Reducción de costos de explotación en las operaciones unitarias de la Minera Aurífera Cuatro de Enero S.A. – Arequipa.

Yucra, E., (2022). Reducción de costos de perforación y voladura mediante rediseño de malla y carga explosiva adecuada en la Galería San Fernando de la Unidad Santa María, Cía Minera Poderosa S.A. - La Libertad [Universidad Nacional del Altiplano]. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19242>



ANEXOS

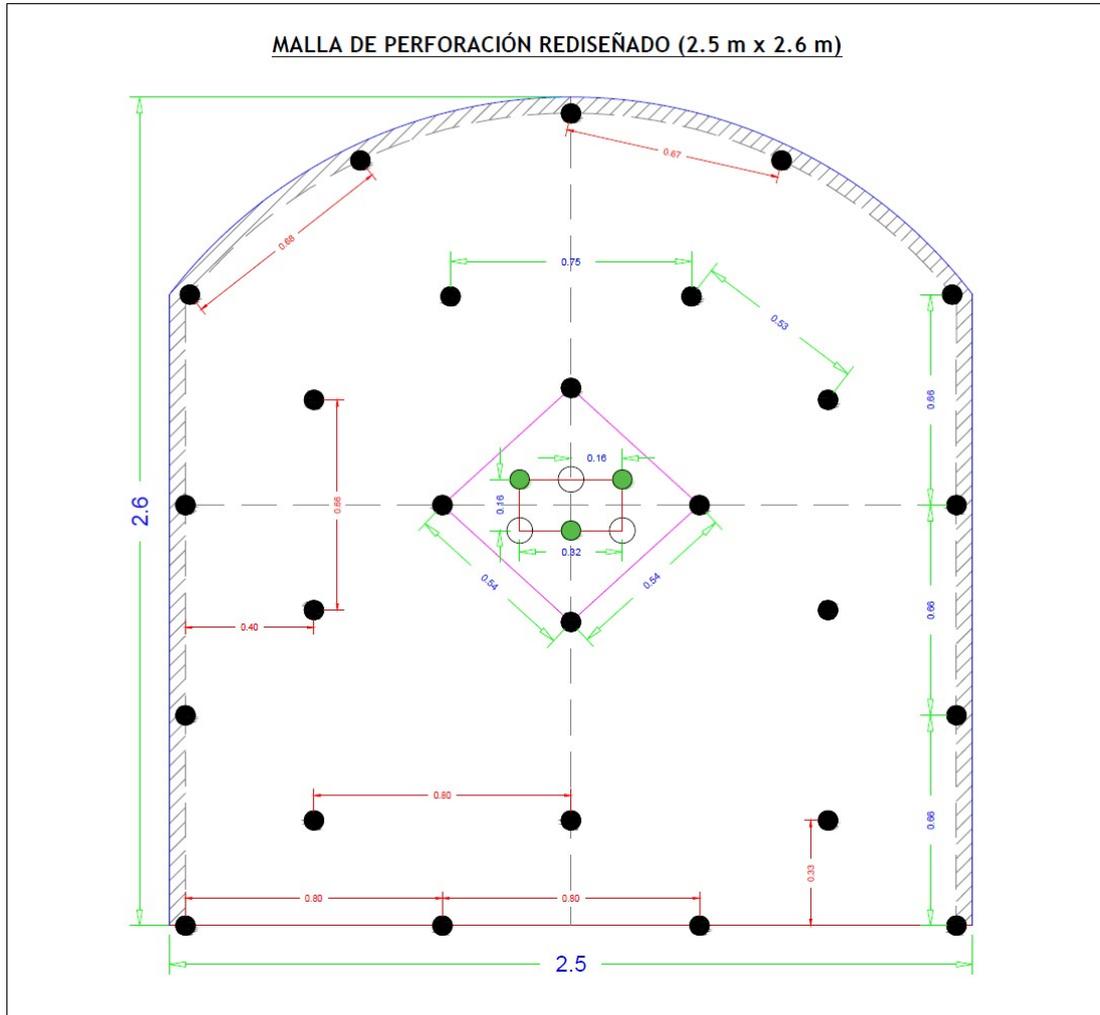
ANEXO 1. Malla de perforación anterior



DESCRIPCIÓN	ARRANQUE		CUADRADORES	ALZAS	ARRASTRES	CANTIDAD TOTAL TALADROS	
	04		06	03	05		34
	Taladros de alivio	Ayuda Arranque	Ayuda Cuadradores	Ayuda Alzas	Ayuda Arrastres		
	02	04	04	02	04		
10		10	05	09			

	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO			LAMINA N°: 01
	FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS			
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS			
	UNIDAD MINERA: ESPERANZA DE CARAVELÍ - AREQUIPA			
PLANO: Malla de Perforación Anterior		AÑO: 2022	FORMATO: A4	
Departamento: Arequipa	Provincia: Caravelí	Distrito: Huanu-Huanu	ESCALA: 1:17	

ANEXO 2. Rediseño de la malla de perforación



DESCRIPCIÓN	ARRANQUE		CUADRADORES	ALZAS	ARRASTRES	CANTIDAD TOTAL TALADROS	
	03		06	03	04		
	Taladros de alivio	Ayuda Arranque	Ayuda Cuadradores	Ayuda Alzas	Ayuda Arrastres		
	03	04	04	02	03		
10		10	05	07	32		

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO					
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS					
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS					
	UNIDAD MINERA: ESPERANZA DE CARAVELÍ - AREQUIPA			AÑO: 2022	LAMINA N°: 02
	PLANO: Malla de Perforación Rediseñado			FORMATO: A4	
	Departamento: Arequipa	Provincia: Caravelí	Distrito: Huanu-Huanu	ESCALA: 1:17	



ANEXO 3. Control de avance lineal en la perforación y voladura anterior

Nº	Fecha	Avance lineal
1	Miércoles 01 junio 2022	1,32
2	Jueves 02 junio 2022	1,30
3	Viernes 03 junio 2022	1,29
4	Sábado 04 junio 2022	1,31
5	Lunes 06 junio 2022	1,30
6	Martes 07 junio 2022	1,32
7	Miércoles 08 junio 2022	1,31
8	Jueves 09 junio 2022	1,30
9	Viernes 10 junio 2022	1,32
10	Sábado 11 junio 2022	1,29
11	Lunes 13 junio 2022	1,31
12	Martes 14 junio 2022	1,32
13	Miércoles 15 junio 2022	1,31
14	Jueves 16 junio 2022	1,30
15	Viernes 17 junio 2022	1,32
16	Sábado 18 junio 2022	1,30
17	Lunes 20 junio 2022	1,29
18	Martes 21 junio 2022	1,30
19	Miércoles 22 junio 2022	1,32
20	Jueves 23 junio 2022	1,31
21	Viernes 24 junio 2022	1,30
22	Sábado 25 junio 2022	1,32
Promedio		1,31



ANEXO 4. Control de avance lineal en la perforación y voladura actual

N°	Fecha	Avance lineal (metros)
1	Lunes 04 julio 2022	1,40
2	Martes 05 julio 2022	1,41
3	Miércoles 06 julio 2022	1,39
4	Jueves 07 julio 2022	1,40
5	Viernes 08 julio 2022	1,42
6	Sábado 09 julio re 2022	1,41
7	Lunes 11 julio 2022	1,42
8	Martes 12 julio 2022	1,41
9	Miércoles 13 julio 2022	1,40
10	Jueves 14 julio 2022	1,39
11	Viernes 15 julio 2022	1,41
12	Sábado 16 julio 2022	1,40
13	Lunes 18 julio 2022	1,42
14	Martes 19 julio 2022	1,41
15	Miércoles 20 julio 2022	1,40
16	Jueves 21 julio 2022	1,41
17	Viernes 22 julio 2022	1,42
18	Sábado 23 julio 2022	1,41
19	Lunes 25 julio 2022	1,40
20	Martes 26 julio 2022	1,42
21	Miércoles 27 julio 2022	1,41
22	Jueves 28 julio 2022	1,40
Promedio		1,41

ANEXO 5. Rediseño del arranque



ANEXO 6. Amarre del Carmex con la mecha rápida



ANEXO 7. Limpieza con pala neumática en el frente





ANEXO 8. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Ronald Estofaneco Cutla
identificado con DNI 72113848 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería de Minas

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"Rediseño de Aula de Profundación y factor de carga
explosiva en el Desarrollo de la Galería Santa Isabel, Unidad
Minera Esperanza, Canavelli - Arequipa"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 15 de Julio del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



ANEXO 9. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Ronald Esteban Cortina
identificado con DNI 72113848 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería de Minas

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"Rediseño de Malla de Perforación y Factor de Carga Explosiva en el Desarrollo de la Galería Santa Isabel Unidad Minera Esperanza, Ceravel - Arequipa"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 15 de Julio del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella