

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Cambio en el sistema de iniciación de tiro por tiro por
detonadores ensamblados para optimizar la voladura
en una unidad minera en el distrito Bella Unión -
Caravelí**

Yesenia patricia Ortega Quispe
Edison Genaro Ramos Mamani

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Arequipa, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TESIS

A : Felipe Gutarra meza
Decano de la Facultad de Ingeniería

DE : Guido Mario Cuadros Ramirez
Asesor de tesis

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de tesis

FECHA : 6 de junio de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado asesor de la tesis titulada: "CAMBIO EN EL SISTEMA DE INICIACIÓN DE TIRO POR TIRO POR DETONADORES ENSAMBLADOS, PARA OPTIMIZAR LA VOLADURA EN UNA UNIDAD MINERA EN EL DISTRITO BELLA UNION - CARAVELI", perteneciente al/la/los/las estudiante(s) YESENIA PATRICIA ORTEGA QUISPE Y EDISON GENARO RAMOS MAMANI, de la E.A.P. de Ingeniería de Minas; se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

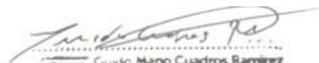
- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores (Nº de palabras excluidas: 0) SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que la tesis constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido de la tesis sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,


 **Guido Mario Cuadros Ramirez**
Coordinador Académico de EAP
Ingeniería Ambiental
Filial Arequipa

Asesor de tesis

Cc.
Facultad
Oficina de Grados y Títulos
Interesado(a)

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, Yesenia Patricia Ortega Quispe, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 75438968, de la E.A.P. de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "CAMBIO EN EL SISTEMA DE INICIACIÓN DE TIRO POR TIRO POR DETONADORES ENSAMBLADOS, PARA OPTIMIZAR LA VOLADURA EN UNA UNIDAD MINERA EN EL DISTRITO BELLA UNION - CARAVELI", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniera de Minas.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

19 de febrero de 2024.



Yesenia Patricia Ortega Quispe

DNI. No. 75438968

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, Edison Genaro Ramos Mamani, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 71074677, de la E.A.P. de Ingeniería De Minas de la Facultad de Ingeniería la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "CAMBIO EN EL SISTEMA DE INICIACIÓN DE TIRO POR TIRO POR DETONADORES ENSAMBLADOS, PARA OPTIMIZAR LA VOLADURA EN UNA UNIDAD MINERA EN EL DISTRITO BELLA UNION – CARAVELI", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

19 de febrero de 2024.



Edison Genaro Ramos Mamani

DNI. No. 71074677

TesisFinal

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	3%
2	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
4	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	2%
5	idoc.pub Fuente de Internet	1%
6	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1%

10	1library.co Fuente de Internet	<1 %
11	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
12	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
18	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	RODRIGUEZ VELASQUEZ LEDGARDO ROBERTO. "DIA del Proyecto Instalación de una Estación de Puesto de Venta de Combustibles Líquidos - Grifo de Mónica Rossana Franco Flores-IGA0008180", R.S.R. N° 099-2013-GRA/ARMA-SG, 2022 Publicación	<1 %

20	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	kupdf.net Fuente de Internet	<1 %
23	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
24	PRIETO INGENIEROS CONSULTORES S.A .. "DIA del Proyecto Variante en 60 kV de la Línea de Transmisión Marcona - Bella Unión y S.E.T. Elevadora 60/66 kV-IGA0003654", R.D. N° 132-2015-MEM/DGAAE, 2021 Publicación	<1 %
25	Submitted to Universidad Tecnologica del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
26	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	pdfcoffee.com Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.upp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %

30	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
31	distancia.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
32	repositorio.autonoma.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
34	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
35	www.docstoc.com Fuente de Internet	<1 %
36	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
37	prezi.com Fuente de Internet	<1 %
38	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
39	repositorio.uigv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
40	repositorio.upla.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
41	thesesups.ups-tlse.fr Fuente de Internet	<1 %

42	www.dspace.uce.edu.ec:8080 Fuente de Internet	<1 %
43	www.famesa.com.pe Fuente de Internet	<1 %
44	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
45	moam.info Fuente de Internet	<1 %
46	repositorio.unamba.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
47	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
48	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
49	repositoriodemo.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
50	www.aalto.fi Fuente de Internet	<1 %
51	SNC LAVALIN PERU S.A.. "Tercera MEIA-D de la Unidad Minera las Bambas-IGA0001512", R.D. N° 016-2018-SENACE-PE/DEAR, 2020 Publicación	<1 %
52	archive.org Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas Apagado

Excluir coincidencias Apagado

Excluir bibliografía Apagado

ASESOR

Ing. Guido Mario Cuadros Ramírez

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseamos expresar nuestra gratitud a Dios por las bendiciones recibidas y por permitirnos lograr tanto nuestras metas profesionales como personales.

Agradecemos profundamente a nuestros padres, hermanos, otros familiares y amigos por brindarnos un apoyo inquebrantable y total en nuestra búsqueda de objetivos.

Queremos extender un agradecimiento especial al Ing. Guido Cuadros, nuestro asesor de tesis, cuya orientación, consejos y valiosa experiencia han sido fundamentales para alcanzar la meta personal de convertirnos en ingenieros de minas. Su dedicación de tiempo es altamente apreciada.

DEDICATORIA

Le dedico esta tesis con gran amor a mis padres, por su apoyo en todos los momentos brindados y a toda mi familia por su ayuda constante y motivación, les agradezco por sus consejos en el ámbito profesional y personal para continuar avanzando en esta importante etapa de mi vida.

Yesenia Patricia Ortega Quispe

Quiero dedicar el fruto de este esfuerzo a mi familia en su totalidad. Especialmente, agradezco a mis padres por su respaldo constante, tanto en los momentos de alegría como en los desafíos. Aprecio enormemente su enseñanza sobre cómo enfrentar obstáculos sin perder la compostura ni rendirse en el proceso.

Edison Genaro Ramos Mamani

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	15
1.1.1. Problema general.....	16
1.1.2. Problemas específicos	17
1.2. Objetivos	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Justificación e importancia de la investigación	17
1.3.1. Justificación práctica	17
1.3.2. Justificación económica	18
1.4. Hipótesis y descripción de las variables	18
1.4.1. Hipótesis general	18
1.4.2. Hipótesis específicas.....	18
1.5. Variables	19
1.5.1. Variable dependiente	19
1.5.2. Variable independiente.....	19
1.5.3. Operacionalización de variables.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. Antecedentes del problema.....	20
2.1.1. Antecedentes internacionales	20
2.1.2. Antecedentes nacionales	20
2.1.3. Antecedentes locales	21

2.2. Bases teóricas.....	22
2.2.1. Descripción de la zona de estudio.....	22
2.2.2. Tipo de explotación	29
2.2.3. Plan de minado	29
2.2.4. Método de minado	30
2.2.5. Operaciones unitarias	31
2.2.6. Definición de términos básicos.....	35
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	38
3.1. Método y alcance de la investigación	38
3.1.1. Método de la investigación	38
3.1.2. Alcance de la investigación	40
3.1.3. Diseño de la investigación.....	40
3.2. Población y muestra.....	40
3.2.1. Población	40
3.2.2. Muestra	40
3.3. Técnicas de recolección de datos	41
3.3.1. Trabajos de gabinete.....	41
3.3.2. Trabajos de campo.....	41
3.3.3. Instrumentos en la recolección de datos	41
3.3.4. Procesamiento de datos.....	42
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS	43
4.1. Características operacionales de la galería 539-NE.....	43
4.1.1. Malla de perforación para la voladura	44
4.1.2. Voladura convencional tiro por tiro	45
4.1.3. Voladura con detonadores ensamblados	58
CONCLUSIONES	66
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	19
Tabla 2. Cuadro ubicación de accesibilidad desde Abancay	23
Tabla 3. Cuadro ubicación de accesibilidad desde Arequipa.....	24
Tabla 4. Clasificación del tipo de roca (RMR)	43
Tabla 5. Ficha técnica del fulminante común Nro. 06.....	45
Tabla 6. Ficha técnica de la mecha de seguridad	46
Tabla 7. Ficha técnica de la dinamita de 45	47
Tabla 8. Consumo promedio de explosivos y accesorios de voladura por disparo	51
Tabla 9. Cubicación de material para planta de procesamiento	57
Tabla 10. Fulminante Común	59
Tabla 11. Mecha de Seguridad	59
Tabla 12. Conector.....	60
Tabla 13. Block de sujeción	60
Tabla 14. Consumo promedio de explosivos y accesorios de voladura con detonador ensamblado.	62
Tabla 15. Cubicación de material para planta de procesamiento	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista de la zona de ingreso	23
Figura 2. Accesibilidad desde la ciudad de Abancay	24
Figura 3. Accesibilidad desde la ciudad de Arequipa	25
Figura 4. Corte y relleno ascendente	31
Figura 5. Clasificación de explosivos primarios	33
Figura 6. Clasificación de explosivos primarios	34
Figura 7. Clasificación de Explosivos Primarios.	35
Figura 8. Malla de perforación.....	44
Figura 9. Fulminante común Nro. 06	45
Figura 10. Mecha de seguridad.....	46
Figura 11. Dinamita de 45	47
Figura 12. Fulminante maquina fijadora o maquina encapsuladora	48
Figura 13. Armada (fulminante nr0. 06 con mecha de seguridad)	48
Figura 14. Realizando el hueco con punzón de madera e introduciendo la mecha armada en la dinamita.....	49
Figura 15. Elaboración del Anfo	50
Figura 16. Prendido de los explosivos.....	51
Figura 17. Diagrama de la causalidad de fragmentación.....	55
Figura 18. Cubicación Área Topografía.....	58
Figura 19. Amarre con la mecha armada	61
Figura 20. Cubicación Área Topografía.....	65

RESUMEN

El presente estudio trata sobre el cambio en el sistema de iniciación de tiro por tiro por detonadores ensamblados para optimizar la voladura en una unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caraveli; el objetivo es determinar las ventajas técnicas y operativas del sistema de ensamblado para optimizar la voladura.

El enfoque adoptado en esta investigación se originó a partir de dos perspectivas principales. En primer lugar, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda de información. Esto incluyó un análisis detallado de los registros geológicos disponibles y geomecánicos del campo de estudio, así como la revisión de informes de voladuras. Esto permitió realizar una evaluación de los resultados de la fragmentación. En segundo lugar, se llevaron a cabo trabajos de campo que consistieron en inspecciones de las voladuras. El objetivo era identificar las deficiencias y los resultados de estas voladuras para evaluar tanto la división de la roca como la cantidad de material rocoso resultante de las explosiones.

La meta principal de realizar una voladura es dividir la roca en fragmentos que luego puedan ser tratados o procesados. Los impactos positivos de lograr una fragmentación adecuada se reflejan en diversas etapas de la actividad minera, desde la carga y el manejo de los materiales hasta la trituración, la molienda y las fases posteriores. Una evaluación de la fragmentación tiene como principal ventaja el suministro de datos valiosos para el ciclo minero, permitiendo la mejora de los diseños de voladuras mediante el uso de esta información.

Con el fin de lograr los objetivos relacionados con la fragmentación, se examinaron las teorías sobre técnicas de voladura y se analizó la composición de las rocas en la zona de operaciones. Además, se introdujeron modificaciones en el sistema de iniciación con el propósito de optimizar el proceso de voladura y garantizar una fragmentación adecuada, de manera que los resultados cumplan con los estándares requeridos por la planta.

La aplicación de este cambio ha permitido lograr una fragmentación menor a 30.48 centímetros de diámetro, cumpliéndose de esta manera con el parámetro de fragmentación solicitado por planta; asimismo se ha logrado minimizar la voladura secundaria que era un gran problema para la unidad minera por sus altos costos y por el manejo dentro de las zonas de voladura.

Palabras claves: voladura de rocas, fragmentación, optimización, voladura secundaria

ABSTRACT

The present study on the change in the initiation system from shot by shot to assembled detonators is aimed at optimizing blasting in a Mining Unit in the Bella Unión - Caraveli district. The objective is to determine the technical and operational advantages of the assembly system for blast optimization.

The approach adopted in this research originated from two main perspectives. Firstly, a thorough information search was carried out. This included a detailed analysis of available geological and geomechanical records of the study area, as well as a review of blasting reports. This allowed for an assessment of fragmentation results. Secondly, fieldwork was conducted, consisting of inspections of the blasts. The goal was to identify deficiencies and outcomes of these blasts, evaluating both rock division and the amount of rocky material resulting from the explosions.

The primary goal of blasting is to break the rock into fragments that can then be treated or processed. The positive impacts of achieving proper fragmentation are reflected in various stages of mining activity, from loading and material handling to crushing, grinding, and subsequent phases. An assessment of fragmentation provides valuable data for the mining cycle, enabling improved blast designs through the utilization of this information.

In order to achieve the objectives related to fragmentation, theories on blasting techniques were examined, and the composition of rocks in the operational area was analyzed. Furthermore, modifications were introduced to the initiation system with the purpose of optimizing the blasting process and ensuring proper fragmentation, thereby meeting the required standards set by the plant.

The implementation of this change has allowed achieving fragmentation smaller than 46.00 centimeters in diameter, thus fulfilling the fragmentation parameter requested by the plant. Likewise, secondary blasting, which posed a significant

problem for the Mining Unit due to its high costs and management within blasting zones, has been minimized.

Keywords: rock blasting, fragmentation, optimization, secondary blasting.

INTRODUCCIÓN

Tanto a nivel nacional como internacional, las empresas mineras se esfuerzan por ser competitivas mediante la búsqueda de estrategias, enfoques y ajustes en sus procedimientos. Esto tiene como objetivo principal lograr eficiencia y alcanzar las metas de producción preestablecidas, las que se miden en términos de toneladas métricas de mineral extraído. De esta forma, se generan ganancias y beneficios dentro de la empresa.

Este estudio de investigación se realizó en una unidad minera localizada en el distrito de Bella Unión – Caravelí. Esta mina se dedica a la extracción de minerales de cobre (Cu) y oro (Ag) a través de la minería subterránea. Utiliza la técnica de explotación conocido como corte y relleno ascendente, en la que se utiliza material estéril de roca para llenar las áreas excavadas y continuar con las zonas de extracción.

La fragmentación se refiere a la ruptura de una roca mediante métodos mecánicos o tecnológicos, siguiendo ciertos estándares de dimensiones según las necesidades. Por lo tanto, el objetivo central de la voladura es lograr que la roca se rompa en fragmentos que puedan ser procesados posteriormente. La calidad del producto resultante tiene un papel esencial en el ciclo minero, ya que una fragmentación adecuada se nota de inmediato en diversas etapas del proceso de producción: desde la carga y transporte hasta la descarga, clasificación, traslado a la planta y trituración. Además, una buena fragmentación reduce significativamente la necesidad de realizar voladuras secundarias y disminuye las áreas de almacenamiento de material rocoso en los frentes de explotación.

Debido a que se realizaban voladuras convencionales de tiro por tiro en la galería 539-NE, estas no eran eficientes produciendo una fragmentación deficiente, inestabilidad del macizo rocoso, bastantes bancos de roca (material muy grueso), tiros retardados, tiros cortados o quedados. Después de una evaluación y análisis se tomó la decisión de realizar el cambio del sistema de iniciación de tiro por tiro

por detonadores ensamblados, para optimizar la voladura, lográndose muy buenos resultados mejorando la fragmentación de la roca, eliminando los tiros cortados, tiros retardados, la estabilización llevándose una sección uniforme y por último se redujo la pedronería de un 30 % cubicado por el área de topografía a un 10 %, mejorando en un 20 %.

Un aporte valioso en términos de seguridad y salud laboral fue la reducción de los riesgos inherentes al proceso de voladura. Esto se logró al disminuir las posibilidades de explosiones repentinas en cada detonación y también al controlar los gases provocados por los explosivos, tales como aldehídos, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, humos, monóxido de carbono y metan.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Las grandes empresas mineras, tanto en el ámbito nacional como internacional, que se enfocan en la extracción de recursos naturales, están constantemente investigando formas de reducir los gastos operativos. Para lograrlo, emplean enfoques dinámicos en diversas etapas de sus operaciones con el fin de aumentar la producción de minerales. Dado que la minería es una actividad extractiva, se esfuerzan cada día por mejorar sus métodos, buscando así aumentar la rentabilidad. En el contexto peruano, la minería ocupa una posición de gran importancia en términos económicos. Esta industria genera una considerable cantidad de ingresos fiscales, que a su vez forman parte de políticas estatales orientadas a elevar el bienestar de la población.

En todas las formas de explotación minera surge una pregunta fundamental: ¿cuál es la relevancia de los explosivos en esta industria? La respuesta es sencilla y directa. La desintegración de rocas mediante explosión juega un papel de máxima importancia en las operaciones mineras orientadas a la extracción de minerales. Es la primera etapa para lograr la fragmentación de las rocas, lo que marca el comienzo de un extenso procedimiento de recuperación de minerales. Al fragmentar la roca, esta adquiere un tamaño adecuado para poder ser transportada. En la actualidad, tanto en las minas a cielo abierto como en las subterráneas, los

explosivos son fundamentales para iniciar la extracción de la roca, permitiendo después su traslado al transporte que la llevará a la planta de procesamiento. Lograr una fragmentación adecuada de la roca en la mina es una fase crítica, con el objetivo de cargarla y transportarla eficientemente hacia la planta.

Ahora bien, la actual investigación se enfocará, justamente, en este último aspecto. En la unidad minera en el distrito de Bella Unión – Caravelí, dentro de sus operaciones de extracción de minerales en minería subterránea, usaba como sistema de iniciación en la voladura la metodología de tiro por tiro, que consiste en una armada (fulminante nro. 06, mecha de seguridad y una dinamita), el cual se introduce en el hueco de perforación con anfo y su taco correspondiente, posteriormente se realiza el encendido de las mechas de seguridad, una por una hasta concluir con toda la voladura.

Las fallas de explosión en este tipo de voladuras traen como consecuencia: (compumet)

- ✓ Inestabilidad del macizo rocoso.
- ✓ Inadecuada fragmentación de la roca.
- ✓ Bastante pedronería y o bancos de roca (material muy grueso).
- ✓ Tiros retardados.
- ✓ Tiros cortados o quedados.
- ✓ Seguridad de los trabajadores.

La actual investigación tiene por finalidad realizar el cambio de este tipo de voladura de tiro por tiro por una voladura sistema ensamblado que permitiría optimizar la voladura y mejorar la fragmentación de la roca con la finalidad de llevar este material hacia la planta concentradora y bajar los costos operativos, lo que conlleva a mejorar las utilidades empresariales.

1.1.1. Problema general

- ¿El cambio de iniciador de tiro por tiro por un sistema ensamblado podrá optimizar la voladura en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿El iniciador ensamblado podrá mejorar la fragmentación del mineral en el proceso de voladura en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí?
- ¿El iniciador ensamblado podrá disminuir la voladura secundaria en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Determinar las ventajas técnicas y operativas del sistema ensamblado para optimizar la voladura en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí.

1.2.2. Objetivos específicos

- Lograr la fragmentación menor a 30.48 centímetros de diámetro del mineral con el iniciador ensamblado en el proceso de voladura en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí.
- Lograr minimizar la voladura secundaria con iniciador ensamblado en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí.

1.3. Justificación e importancia de la investigación

1.3.1. Justificación práctica

La unidad minera en el distrito de Bella Unión – Caravelí viene teniendo muchas deficiencias en la voladura que se realiza en las labores que se explota en el mineral que se envía a planta, ya que se presentaban muchos problemas como: inestabilidad del macizo rocoso, inadecuada fragmentación de la roca, bastante pedronería y/o bancos de roca (material muy grueso), tiros retardados, tiros cortados o quedados.

Se lleva a cabo esta investigación debido a los problemas mencionados previamente en el proceso de voladura. Por lo tanto, se busca estudiar la viabilidad de cambiar el tipo de explosivo con el objetivo de optimizar y reducir los costos

asociados a la voladura. A través de pruebas realizadas en las zonas de mineralización, se ha tomado la decisión adecuada con respecto al explosivo a emplear. Es esencial considerar la dureza del macizo rocoso para elegir el tipo de explosivo y determinar la distribución de los taladros. Además, el cambio en el detonador utilizado tendrá un impacto positivo directo en la productividad, llevando a un aumento en la producción diaria en toneladas métricas y garantizando el cumplimiento del plan de extracción mensual y anual.

1.3.2. Justificación económica

Con la implementación del detonador ensamblado se mejorará la fragmentación del mineral que se enviará a planta y por lo tanto, se disminuirá en un gran porcentaje la voladura secundaria que tiene un alto costo; asimismo, al mejorar la fragmentación del mineral se optimizará el carguío, acarreo, descargue del mineral de tal manera que se disminuirán los tiempos operativos de traslado y por lo tanto se disminuirán los costos en estos rubros, por lo que es significativo indicar que la ejecución de este nuevo dispositivo de voladura disminuirán los costos operativos por tonelada producida y enviada a planta para su transformación metalúrgica.

1.4. Hipótesis y descripción de las variables

1.4.1. Hipótesis general

- El sistema ensamblado de iniciación logrará mejorar la voladura en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí.

1.4.2. Hipótesis específicas

- El sistema ensamblado de iniciación mejorará la fragmentación del mineral a menos de 30.48 centímetros de diámetro en el proceso de voladura en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí.
- El sistema ensamblado de iniciación disminuirá la voladura secundaria en un 20 % de pedronería en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí.

1.5. Variables

1.5.1. Variable dependiente

Y: Optimización de voladura

1.5.2. Variable independiente

X: Sistema de Iniciación "Carmex"

1.5.3. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual – dimensión	Indicadores
Variable dependiente: Optimización de la voladura	<ul style="list-style-type: none">• Avance efectivo• Toneladas Rotas• Fragmentación• Pedroneria	<ul style="list-style-type: none">• Metros/Disparo• Toneladas métricas.• Diámetro (centímetros)• Porcentaje
Variable independiente: Cambio del sistema ensamblado de iniciación	<ul style="list-style-type: none">• Diseño de Malla de perforación.• Longitud de perforación• Cantidad .de Taladros.	<ul style="list-style-type: none">• Metros• Metros• Unidad

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes internacionales

- Trabajo de investigación titulado: «*Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía en Sociedad Contractual Minera Abra*». La investigación se trata la cuestión de las pérdidas originadas por la fragmentación gruesa, los gastos y el rendimiento del chancador, con la meta de potenciar el funcionamiento al disminuir los desembolsos y calibrar el tamaño de los fragmentos, con la intención de establecer un proceso de voladura uniforme en una zona particular de la mina. Los hallazgos obtenidos señalan que la utilización de un explosivo de elevada potencia conduce a una optimización exitosa, al lograr una disminución en el tamaño de partículas (P80). Sin embargo, es importante mencionar que los costos relacionados con el proceso de perforación y voladura aumentan en este enfoque (1).

2.1.2. Antecedentes nacionales

- Tesis titulada: «*Comparación de la productividad, fragmentación y costos del sistema de iniciación electrónica versus pirotécnica en voladura- Minera Yanacocha S. R. L.*». La metodología empleada en este estudio compara el uso de sistemas de iniciación pirotécnicos con sistemas de iniciación electrónicos. Se recolectaron datos de los tajos Tapado Oeste y Yanacocha para analizar la

fragmentación, la productividad y los costos. Los resultados revelaron que la voladura con detonadores electrónicos tuvo un desempeño superior al utilizar detonadores pirotécnicos. El tamaño de partículas (P80) con detonadores pirotécnicos fue de 3.9", mientras que con detonadores electrónicos fue de 3.34", lo que representó una mejora del 14.6 %. En relación con la eficiencia de la pala, se lograron 2982.37 t/h usando detonadores pirotécnicos, en comparación con 3323.27 t/h alcanzados con detonadores electrónicos, representando un aumento del 11.4%. Aunque los detonadores pirotécnicos tienen un costo unitario menor que los electrónicos, estos últimos demostraron una mayor eficiencia en términos de productividad y fragmentación. Estas mejoras contribuyen a optimizar los procesos de trituración y molienda (2).

- Investigación titulada: «*La posibilidad de emplear emulsión a granel en minería subterránea se deriva de las pruebas realizadas con Emultex PDBG*». El estudio tiene como objetivo confirmar la posibilidad de usar emulsión a granel en la minería subterránea, destacando los beneficios técnicos, operativos, económicos y de seguridad que esta tecnología presenta en comparación con los explosivos convencionales como el anfo, comúnmente empleados en minería subterránea. Para lograrlo, se llevaron a cabo pruebas con la emulsión Emultex PDBG y, a partir de los resultados, se llegó a la conclusión siguiente: el uso de la emulsión a granel Emultex PDBG como carga principal en las voladuras en áreas de desarrollo es totalmente viable. Además de ser económica y operativamente ventajosa, esta elección también contribuye a mejorar la gestión de la seguridad (3).

2.1.3. Antecedentes locales

- Tesis titulada: «*Optimización de los costos de voladura en la Compañía Macdesa mediante la disminución de la carga explosiva en la zona de desarrollo utilizando el explosivo Emulnor*». En la investigación se ha examinado la posibilidad de reducir los costos relacionados con las explosiones en los avances horizontales en la unidad minera aurífera Cuatro de Enero de MACDESA. Se ha conseguido esto al implementar regulaciones de trabajo óptimas en las fases críticas de la

carga de los barrenos con el explosivo Emulnor, en sus variantes de 500, 1000, 3000 y 5000. Esto asegura una reducción efectiva en las detonaciones y previene una excesiva fragmentación en la corona de las galerías en construcción. El éxito se logra a través de un sistema de control y rigurosa estandarización en las aplicaciones de carga de explosivos. Estos logros se sintetizan en la continua supervisión y capacitación en la correcta implementación de los estándares ideales de voladura en la operación (4).

- Tesis titulada: «*Mejora de la distribución de tamaños de partículas mediante la implementación de voladuras controladas en mina Marcapunta norte, Sociedad Minera El Brocal, Arequipa, durante el año 2020*». La investigación busca mejorar la gradación de los tamaños de partículas mediante la aplicación de voladuras controladas en la mina Marcapunta Norte. Se han establecido parámetros como el procedimiento de detonación regulada, la cantidad de explosivos, el factor de carga, entre otros, específicamente para optimizar la fragmentación en la ubicación Tajo 1784N y Galería 8942E, en el Nivel 3932. Estos parámetros servirán como punto de referencia para normalizar estas medidas en otras áreas de explotación de la mina Marcapunta Norte. Además, los resultados obtenidos podrían ser útiles para compañías mineras con operaciones similares, lo que lleva a la conclusión de que la implementación de voladuras controladas ha logrado mejorar la gradación de tamaños de partículas en la mina Marcapunta Norte.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Descripción de la zona de estudio

2.2.1.1. Localización geográfica y política y accesibilidad

La unidad minera está situada en el batolito costero del sur de Perú, ocupando un área entre la costa y las montañas en el departamento de Arequipa. Su altitud varía entre 1,300 y 1,800 m s. n. m. Precisamente, se localiza en el distrito de Bella Unión, en la provincia de Caraveli, dentro del departamento de Arequipa.

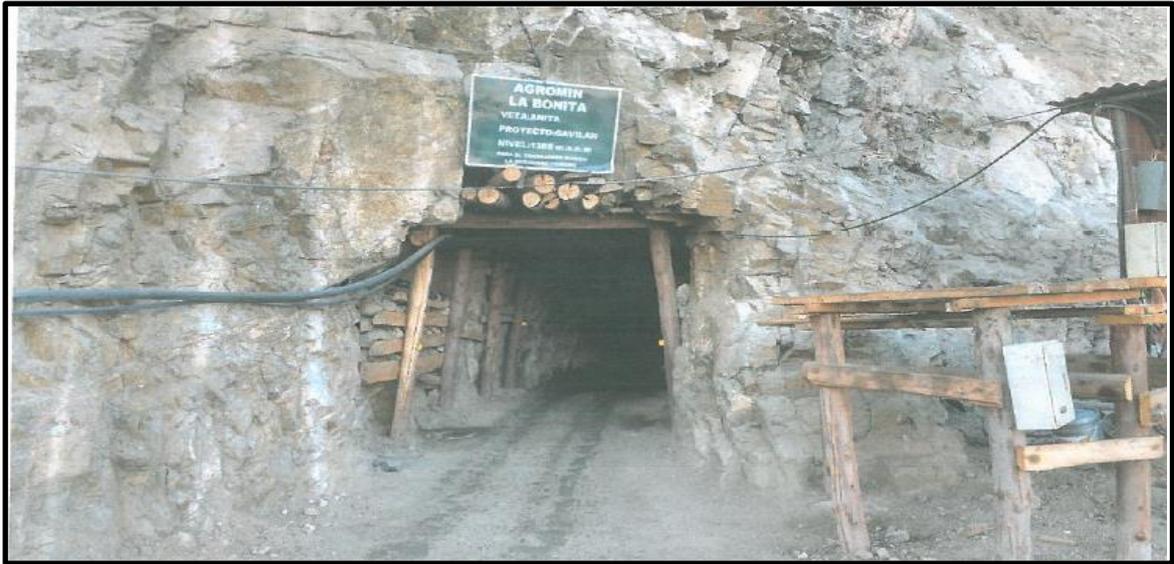


Figura 1. Vista de la zona de ingreso

Encuanto al acceso a la zona de explotación, es sencillo llegar a través de carretera desde Lima, así como desde Arequipa y Abancay. Para lograrlo, se pueden tomar las siguientes vías:

Tabla 2. Cuadro ubicación de accesibilidad desde Abancay

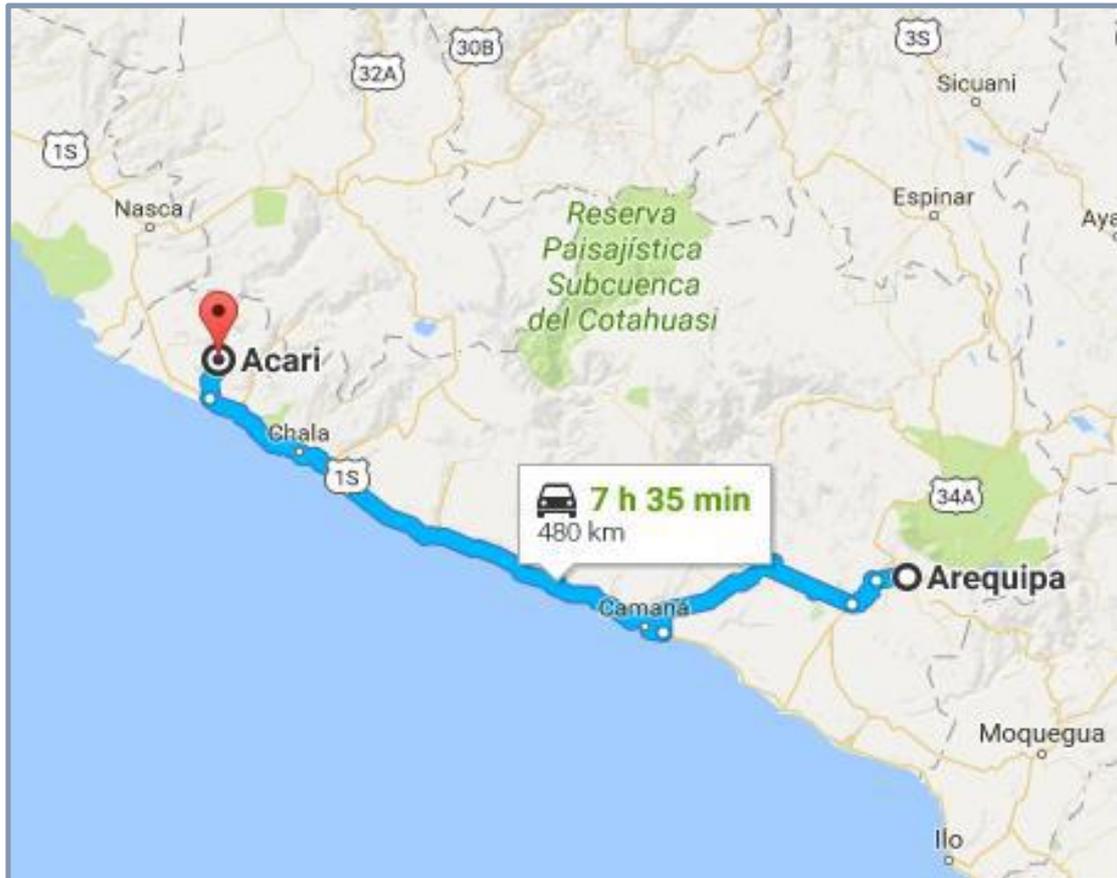
Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas)	Tipo de Acceso	Tipo de carretera
Abancay - Nazca	463	7.8	Carretera	Pavimentado
Nazca - Acarí	90	1.5	Carretera	Pavimentado
Acarí- unidad minera	40	1	Carretera	No Pavimentado
Total, de viaje	593	10.3		



**Figura 2. Accesibilidad desde la ciudad de Abancay
Tomada de Google Maps**

Tabla 3. Cuadro ubicación de accesibilidad desde Arequipa

Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas)	Tipo de acceso	Tipo de carretera
Arequipa - Acari	540	7.6	Carretera	Pavimentado
Acari - Unidad Minera	40	1.0	Carretera	No pavimentado
Total, de viaje	670	8.6		



**Figura 3. Accesibilidad desde la ciudad de Arequipa
Tomada de Google Maps**

2.2.1.2. Geología

La geología de la región posibilitará la identificación de las capas de roca presentes en la zona de investigación, junto con los aspectos estructurales. Además, a nivel regional, se sitúa en el Batolito de la Costa y presenta depósitos de cobre, hierro y oro.

2.2.1.2.1. Geología regional

a) Batolito de la Costa sur

Compuesto por múltiples plutones individuales, estos están agrupados en un conjunto reducido de súper-unidades. Desde una perspectiva geográfica, se divide en cinco grandes segmentos a lo largo del eje del batolito. Cada superunidad se caracteriza por su propia combinación de tipos de rocas. El segmento más extenso es el de Arequipa, abarcando 900 km en dirección a la zona de trabajo. La

secuencia de cómo se ubican los plutones en el segmento de Arequipa es la siguiente:

- 1) Gabros tempranos y dioritas.
- 2) Superunidad Linga.
- 3) Superunidad Pampahuasi, con su nombre vinculado a una ubicación al este de Ica.
- 4) Superunidad Incahuasi, ligada a una localización al norte de Pisco.

- **Complejo Bella Unión**

Dentro del conjunto Bella Unión, hay una variabilidad destacable en la composición de las rocas. Esto se evidencia por la existencia de una intrusión fragmentada, que puede ser andesítica o dacítica, con bloques angulares y subangulares. Además, hay otras formaciones con composición básica, como las diabasas porfiríticas que tienen tonos entre verdosos y grisáceos. En este conjunto, también se encuentran diques de andesita porfirítica. Su distribución se orienta en dirección este-oeste a noroeste-sureste, y está delimitada por rasgos estructurales notables que podrían haber afectado su formación.

- **Superunidad Linga**

La superunidad que se presenta revela notables diferencias en sus tipos de rocas, exhibiendo gabros y dioritas con niveles relativamente altos de feldespatos potásico. Dentro de esta categoría, se identifican las rocas monzoníticas que se agrupan bajo el nombre de superunidad Linga. Estos tipos de roca tienen un registro de edad que data de hace 97 millones de años, y se supone que son responsables de la presencia de minerales como cobre, hierro y molibdeno.

La presencia más destacada de la superunidad Linga se encuentra limitada al costado occidental del batolito. Esta es la más diversa dentro del segmento de Arequipa, compuesta aproximadamente por unas 30 subdivisiones identificadas con minuciosidad. En particular, la unidad Humay abarca desde monzogabros hasta cuarzo-monzonitas. Por otro lado, la unidad Rinconada se diferencia de la

unidad Humay debido a que presenta una mayor cantidad de sílice, pasando de cuarzo-monzodioritas a monzogranitos.

b) Superunidad Pampahuasi

La superunidad primaria es más notoria en la región de Ica-Pisco. Su presencia abarca el lado occidental del batolito, con una extensión de aproximadamente 100 km en una dirección andina y un ancho de alrededor de 10 km. La superunidad Tíabaya atraviesa principalmente esta área. Las rocas, que son de naturaleza diorítica y tonalítica y forman parte de la súper-unidad Pampahuasi, tienen un registro antiguo de 94 millones de años.

En esta superunidad, el rasgo principal en lo que respecta al tipo de roca es la presencia de tonalitas y cuarzo dioritas. Esta característica conlleva a una distinción en dos secciones predominantes. Primero, existe una subdivisión inicial con granos de tamaño medio a grueso, que engloba las tonalitas-dioritas, seguida por una tonalita leucocrática menos foliada. Ambas unidades comparten una composición rica en hornblenda y biotita, y presentan texturas similares.

Los límites entre estas diversas facies muestran una irregularidad marcada, lo que dificulta la determinación de una secuencia temporal fiable. Estos puntos de contacto señalan variaciones en el movimiento interno del Plutón.

c) Superunidad Incahuasi

En el ámbito de esta superunidad, es posible identificar cinco divisiones menores que se desarrollaron en el siguiente orden: cuarzo-diorita, cuarzo-monzodiorita, granodiorita, pórfidos monzoníticos y monzogranitos. Dentro de estas, la cuarzo-monzodiorita y la granodiorita son las más abundantes en términos de cantidad. La súper-unidad Incahuasi se constituyó hace aproximadamente 83 millones de años.

La superunidad Incahuasi exhibe una disposición de minerales en forma de planos, siguiendo la dirección andina. Aunque también se identifica una disposición

mineral vinculada a fallas normales de orientación andina en la región. Esto sugiere que estas fallas tuvieron actividad durante el proceso de formación del Plutón.

En el Incahuasi, se pueden identificar dos conjuntos de diques. Uno de ellos está relacionado con la súper-unidad Tíabaya, mientras que el segundo conjunto se vincula al proceso de formación de los magmas en el Incahuasi. Estos diques presentan una tonalidad oscura y una textura fina, lo que probablemente indique una composición andesítica. Estas fracturas se orientan en dirección andina y en dirección perpendicular a esta, lo que sugiere que fueron influenciadas por las mismas fuerzas regionales que afectaron la formación de los plutones en el Incahuasi.

2.2.1.2.2. Geología local

La región de análisis se distingue como un depósito mineral ubicado en el batolito costero, con presencia de minerales como Cu, Fe y Au. El cobre se presenta en minerales sulfurosos (calcopirita, calcosina y bornita). Conforme se profundiza, las vetas adquieren mayor contenido de hierro (magnetita y actinolita).

La disposición de las capas de roca en esta región está compuesta por intrusiones de rocas. Se han identificado dos episodios de formación magmática en el batolito costero que están conectados con la existencia de minerales. Las tonalitas y dioritas presentes en la superunidad Tíabaya se asocian con la presencia de oro, mientras que las monzonitas en la superunidad Linga están ligadas a la mineralización de cobre. Es en esta última unidad donde se ubica la zona de explotación.

2.2.1.2.3. Geomorfología

En el área de investigación, se distinguen tres categorías primarias en términos de la geomorfología, las cuales se originan debido a los procesos de erosión influenciados por el ascenso de los Andes. Estas categorías son las siguientes:

- a. Valles
- b. Llanuras de Caravelí

- c. Flanco occidental de los Andes. La unidad final es la más sobresaliente y extensa en términos de relieve. En esta unidad, es posible reconocer otras características secundarias, como la peneplanicie de pausa, el altiplano y las áreas de conos volcánicos.

2.2.2. Tipo de explotación

Una vez que se ha descubierto, explorado, delineado y evaluado un depósito, el siguiente paso consiste en seleccionar el método de extracción que se adecúe tanto desde el punto de vista físico, económico como ambiental para recuperar los minerales de valor comercial. Desde la perspectiva económica, el método de explotación más adecuado será aquel que ofrezca el mayor rendimiento en términos de inversión. Además, la elección del método debe garantizar altos estándares de seguridad y permitir una extracción eficiente, considerando las características geológicas específicas del yacimiento.

Los enfoques de extracción deben basarse en la geología estructural y en la mecánica de las rocas, priorizando el principio fundamental de mantener la estabilidad en las operaciones. En el caso particular de la mina situada en el distrito de Bella Unión - Caravelí, la extracción se lleva a cabo mediante métodos subterráneos.

La minería subterránea se dirige hacia la obtención de recursos minerales ubicados bajo la superficie de la tierra. En muchas situaciones, se recurre a este tipo de explotación cuando no es factible extraer los minerales en la superficie debido a consideraciones económicas o ambientales. Las operaciones mineras subterráneas se originan a partir del descubrimiento de concentraciones de minerales bajo tierra que tienen un valor económico sustancial, lo que justifica la creación de una mina subterránea.

2.2.3. Plan de minado

La normativa define el plan de minado como un instrumento que engloba todas las acciones y tareas a llevar a cabo durante el tiempo de operación de la mina.

Esto abarca la delimitación de las zonas de exploración, preparación, extracción, procesamiento y otras tareas inherentes. Además, debe contener enfoques y criterios de trabajo, equipos a emplear, estimaciones de costos y presupuestos, personal, medidas para la seguridad y salud laboral, así como la posible influencia en el entorno y las contramedidas ante situaciones desfavorables. Asimismo, el plan debe cuantificar los objetivos a lograr y considerar los riesgos potenciales en todos los procesos operativos, que van desde la ventilación, humedecimiento, despeje, soporte, perforación y voladura hasta la carga, transporte y mantenimiento de las vías, entre otros aspectos. (MEM, 2017)

Sin embargo, también es esencial que posea investigaciones recientes en áreas como geomecánica, geología, geotecnia, hidrogeología, hidrología, estabilidad de laderas, valores de diseño, métodos de explosivos y detonaciones, logística de transporte, manejo de depósitos de material, técnicas de refuerzo, sistemas de aireación y procedimientos de relleno, dependiendo de la naturaleza de la operación.

2.2.4. Método de minado

El proceso empleado es el corte y relleno ascendente, también conocido como realce. En este enfoque, se procede a extraer el mineral mediante franjas tanto horizontales como verticales, comenzando desde la base del tajo y avanzando hacia arriba. Una vez que se ha retirado por completo una franja, se procede a llenar el espacio correspondiente con material estéril (relleno). Este material actúa como una superficie de trabajo para los trabajadores y simultáneamente brinda soporte a las paredes de la excavación, y en casos especiales, también al techo.

El método de extracción de corte y relleno es aplicable en depósitos que exhiban las siguientes propiedades:

- a) Fuerte buzamiento, superior a los 50° de inclinación.
- b) Características fisicomecánicas del mineral y roca de caja relativamente mala (roca incompetente).
- c) Potencia moderada.
- d) Límites regulares del yacimiento.

Para el escenario de la investigación, se ha decidido implementar la estrategia de extracción minera que involucra el proceso de corte y relleno ascendente, utilizando material detrítico (roca estéril derivada de las actividades de exploración y desarrollo) como técnica. Esta selección se basa en las dimensiones y la inclinación de la veta, además de nuestra familiaridad con este enfoque de explotación en el entorno peruano. Se ha establecido una tasa de producción de 150 toneladas diarias, teniendo en cuenta la mineralización, el método de extracción y la productividad minera correspondiente.

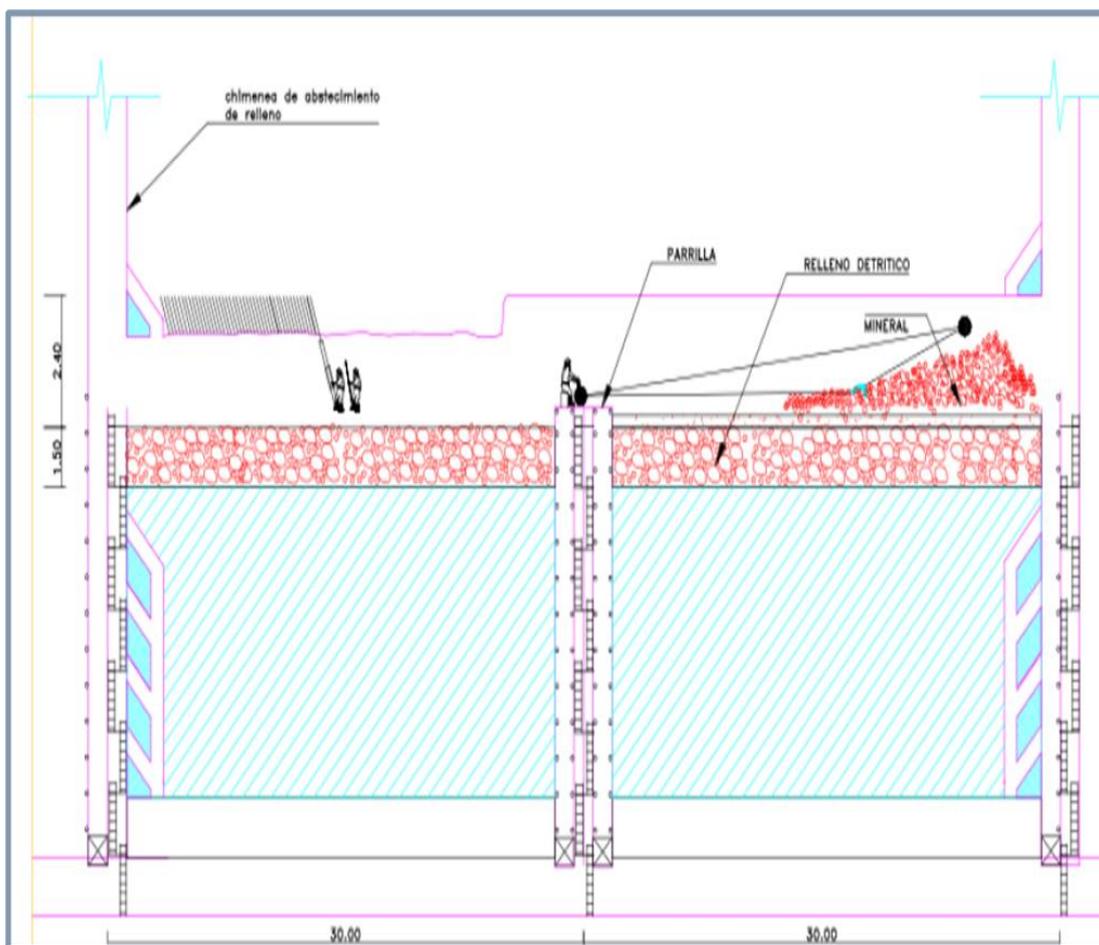


Figura 4. Corte y relleno ascendente

2.2.5. Operaciones unitarias

2.2.5.1. Perforación

En el ámbito de la minería subterránea, el acto de realizar perforaciones se utiliza en la creación de los sectores de extracción, así como en la construcción de chimeneas y pozos. Esta tarea se realiza en entornos con humedad controlada para

preservar la calidad del aire y minimizar al máximo los posibles peligros relacionados con problemas de salud laboral.

Se lleva a cabo la perforación con la intención de extraer o fragmentar la mayor cantidad de roca o mineral al colocar el explosivo en la posición adecuada, que en este caso es el taladro. El propósito es alcanzar la meta utilizando la menor cantidad de explosivos posible.

En resumen, la perforación se lleva a cabo con el propósito de fragmentar una determinada cantidad de roca o mineral, ya sea en una zona de avance o en una excavación. Para lograr esto, se realiza un análisis de la composición de la roca y posteriormente se efectúa la perforación de varios taladros. De esta manera, se logra utilizar una cantidad relativamente pequeña de explosivos para conseguir la fragmentación de una gran cantidad de material (6)

2.2.5.2. Voladura

Se trata de una actividad que implica el uso de explosivos y sus complementos para extraer el material deseado de la roca. En este proceso, es crucial que los agujeros de perforación estén espaciados y ubicados de manera óptima para distribuir la energía de manera efectiva en la roca y lograr la obtención del material deseado.

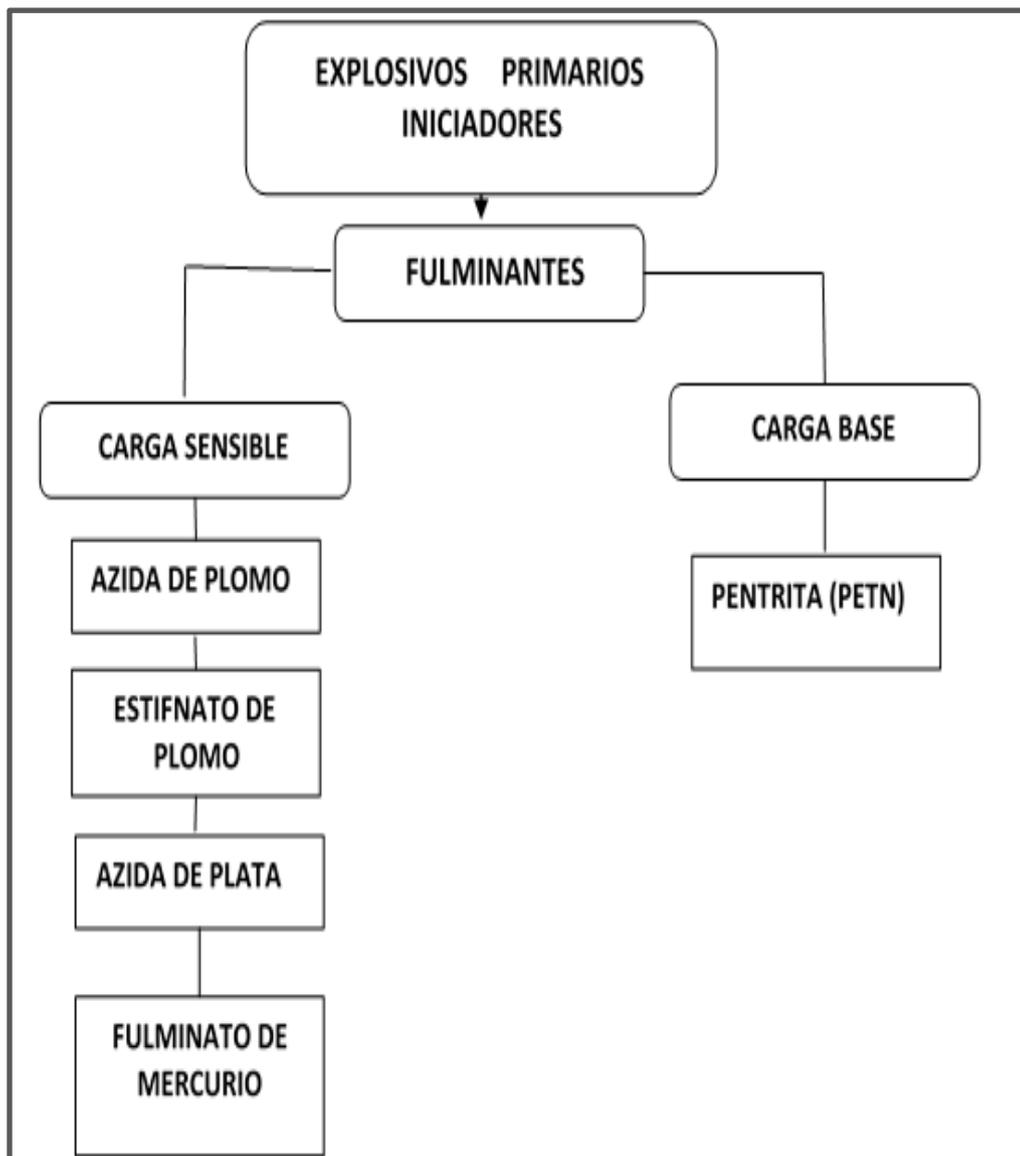
a) Explosivos.

Un explosivo se compone de una mezcla o combinación química que tiene como función principal generar una explosión. Esta explosión es el resultado de una reacción exotérmica que libera de manera instantánea la energía almacenada en forma de gases, sonidos, calor, entre otros. Una fracción de esta energía liberada se aprovecha en la industria minera para fragmentar rocas. Este proceso se convierte en una opción altamente efectiva para extraer minerales de formaciones rocosas en distintas minas alrededor del mundo. Este procedimiento se conoce como voladura. Al llevar a cabo la voladura en la industria minera, es crucial elegir de manera óptima el tipo de explosivo que se utilizará para este procedimiento. Por

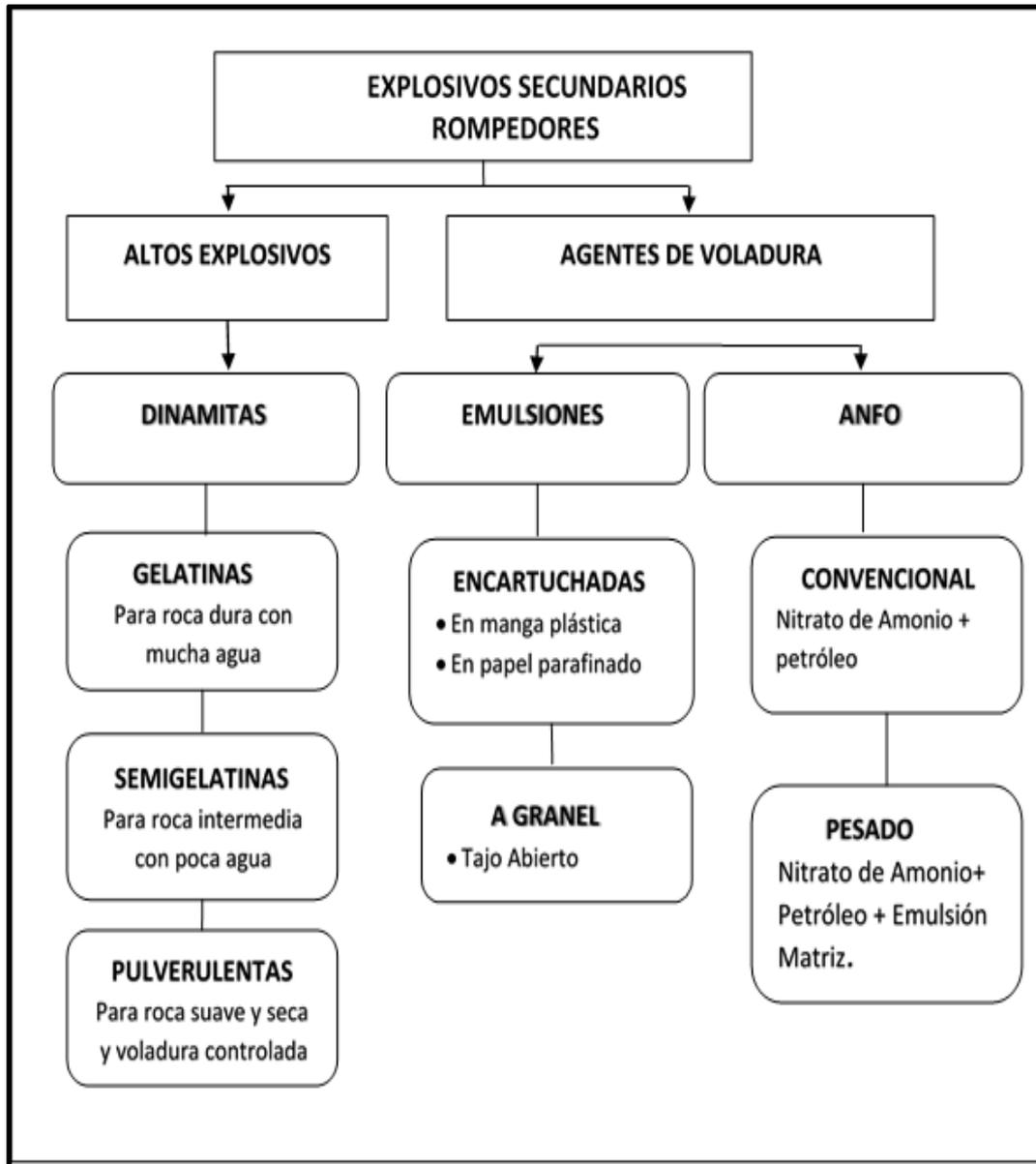
tanto, es esencial tener un conocimiento profundo de los atributos y cualidades de cada explosivo antes de su aplicación. Es importante señalar que no basta con considerar únicamente una propiedad o característica específica del explosivo, ya que esto no asegura una voladura exitosa en un contexto particular. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta todas las propiedades del explosivo para garantizar un proceso de voladura eficaz (6).

b) Clasificación de explosivos

Los explosivos se clasifican en:



*Figura 5. Clasificación de explosivos primarios
Tomada de Manual práctico de voladura (7)*



*Figura 6. Clasificación de explosivos primarios
Tomada de Manual práctico de voladura (7)*

c) Sistema de Iniciación Carmex

El Carmex ha sido desarrollado y concebido con el propósito de ser un sistema de detonación seguro y eficaz en la realización de voladuras tradicionales. Es construido por expertos en el área, empleando herramientas neumáticas de sujeción, garantizando de esta manera la hermeticidad entre el iniciador, la mecha de seguridad y el conector.

Fue creado un producto que actúa como un sistema seguro y eficiente para detonar cargas explosivas, ofreciendo ventajas como su ensamblaje previo, lo que evita la necesidad de armarlo en el lugar de la mina. Además, proporciona mayor seguridad durante el proceso de encendido en áreas extensas, optimiza la secuencia de detonación y reduce al mínimo los disparos fallidos. Este producto se concibió y desarrolló con la finalidad de ser un sistema seguro y eficiente para llevar a cabo voladuras convencionales.



*Figura 7. Clasificación de Explosivos Primarios.
Tomada de Manual práctico de voladura (7)*

2.2.6. Definición de términos básicos

a) Anfo

Se trata de una combinación explosiva que presenta un equilibrio adecuado de oxígeno. Su formulación incluye un rango de nitrato de amonio en esferas que va desde el 93.5 % al 94.5 %, acompañado por un contenido de combustible líquido que oscila entre el 6.5 % y el 5.5 %. Este carburante en forma líquida puede constituirse de petróleo residual exclusivamente o una mezcla de petróleo residual y aceite quemado (8).

b) Banco de mineral o desmonte

En el ámbito de la minería, se emplea este concepto para describir rocas que varían en su tamaño (8).

c) Banco o cara

Este segmento de una mina, tanto subterránea como a cielo abierto, es el área destinada a la realización de tareas de excavación (8).

d) Conector

Se refiere a un suplemento adicional diseñado para la mecha rápida, compuesto de un cilindro de aluminio con muescas cerca de su extremo inferior. En su interior, alberga un compuesto pirotécnico especial que es impermeable. La mecha rápida se inserta en las muescas del cilindro, se presiona la base para asegurar el contacto y, cuando la mecha rápida se enciende, el adaptador recibe la chispa y la transmite a la mecha lenta o de seguridad (8).

e) Cordón detonante

Se trata de una cuerda flexible que incorpora en su interior un núcleo sólido con una gran potencia explosiva y una capacidad notable para resistir la tensión (8).

f) Detonador

Se trata de cualquier dispositivo que contiene una carga iniciadora para activar un explosivo, generalmente conocida como fulminante. Estos dispositivos pueden ser de naturaleza eléctrica o no, además de ser instantáneos o con cierto retraso. Es importante destacar que el término detonador no incluye al cordón detonante (8).

g) Dinamita

Se trata de un tipo de explosivo que puede ser detonado por un fulminante y utiliza un compuesto sensibilizador como su elemento principal para generar energía. En la mayoría de las dinamitas, la nitroglicerina es el compuesto sensitivo, y los nitratos se incorporan como aditivos para proporcionar oxígeno (8).

h) Explosivo potente

Es un explosivo de alta velocidad, densidad y capacidad de detonación que se utiliza para iniciar perforaciones de gran tamaño y longitud, especialmente cuando se emplean explosivos (8).

i) Fulminante común

Es un tubo de aluminio cerrado en uno de sus extremos, en el que se aloja una cantidad precisa de un explosivo inicial muy sensible a la chispa de la mecha de seguridad, además de otro explosivo secundario de gran capacidad explosiva (8).

j) Mecha armada

Se trata de un método seguro para iniciar explosivos de manera convencional. Este sistema incluye componentes estándar como el fulminante usual, el conector y la mecha de seguridad, los cuales son ensamblados con la ayuda de una máquina neumática altamente precisas (8).

k) Mecha lenta

Se trata de un complemento empleado en voladuras que consiste en capas de distintos materiales que recubren la mecha de pólvora (8).

l) Mecha rápida

Se trata de un accesorio en forma de cable flexible que incorpora dos alambres: uno fabricado en hierro y otro en cobre. Uno de estos alambres está revestido con una composición pirotécnica especial a lo largo de su longitud, mientras que ambos alambres están resguardados por una cubierta impermeable de plástico (8).

m) Proceso de voladura

Consiste en una serie de acciones que incluyen llevar los explosivos y sus accesorios desde los polvorines hasta el sitio de la detonación, tomar medidas preventivas antes de cargar, llenar los taladros con explosivos, conectar los taladros cargados, revisar las precauciones de seguridad, obtener la aprobación y finalmente, iniciar la detonación (8).

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de la investigación

En esta investigación se empleará el enfoque del método científico como enfoque principal. Este método se fundamenta en la obtención de conocimiento a través de la observación sistemática, medidas, formulación de interrogantes, análisis y ajustes de hipótesis para lograr resultados y establecer estrategias de acción (9).

Para la ejecución del método de la presente investigación se utilizó la siguiente metodología:

a) Reunión con el área de planeamiento de minado en donde se coordina:

- ✓ Zona de voladura : Galería 539-NE
- ✓ Progresiva 500 : 540
- ✓ Malla de perforación : para iniciar, empleaban una distancia de 8 centímetros entre taladros y un espacio de 16 centímetros. Para el apoyo, utilizaban una separación de 16 centímetros entre taladros y un distanciamiento de 34 centímetros. En el caso de los taladros de corte, el distanciamiento era de 35 centímetros; mientras que, para los taladros de contorno, se usaba un espacio de 73 centímetros. En los lados largos de la zona, se empleaba un distanciamiento de 50 centímetros; mientras que, para el área central, la

separación era de 38 centímetros. Finalmente, para los taladros de arrastre, se mantenía un distanciamiento de 55 centímetros.

- ✓ Voladura : Cantidad de explosivos
- ✓ Cubicación de material volado: el enfoque topográfico implica la utilización del software Topo Cal 2021 que es altamente adaptable al emplear las funciones del AutoCAD, en su versión 1.048. Además, se basa en el sistema geodésico WGS 84, un sistema ampliamente reconocido de coordenadas geográficas que permite la ubicación precisa de puntos en la Tierra a través de tres unidades de medida. Este sistema está respaldado por el Decreto Supremo N° 023-2017-EM, Artículo 341. En esta investigación, se hará uso del Método Científico como enfoque principal.
- ✓ En cada mina subterránea, es fundamental mantener actualizados un conjunto de planos con coordenadas "UTM WGS 84". Además, se emplean las coordenadas de norte, este y cota. En este sistema se integran puntos geodésicos de primer orden proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Mediante este sistema, es posible generar diversas herramientas y representaciones, como curvas de nivel, planos topográficos en 3D, trazado en planta, secciones longitudinales de la zona definida, secciones transversales y cálculos de volúmenes.
- ✓ Fecha y hora de voladura : fin de guardia turno B
- ✓ Medidas de seguridad : coordinación con la Jefatura de Seguridad

b) Ejecución de la voladura:

- ✓ Coordinación con la Jefatura de Mina para la ejecución de las voladuras de acuerdo con lo programado.
- ✓ Coordinación con la Jefatura de Seguridad para la ejecución antes, durante y cuando se termina la voladura.
- ✓ Ingreso del personal de mina para el carguío, acarreo y descargue de material.
- ✓ Separación del material que no cumple con los parámetros de medición (pedronería).
- ✓ Ingreso del personal de topografía para la cubicación de este material.

c) Comparación de datos

- ✓ 48 voladuras con material con sistema de iniciación tiro por tiro.
- ✓ 48 voladuras con detonadores ensamblados (Carmex)

3.1.2. Alcance de la investigación

La investigación se ha desarrollado con el propósito de su implementación en las operaciones mineras, particularmente en el ámbito de la voladura en la minería en cuestión. El objetivo es mejorar la fragmentación de las rocas mediante este enfoque, lo que resultará en la optimización de las etapas subsiguientes como el carguío, transporte y descarga del mineral hacia la planta.

3.1.3. Diseño de la investigación

La investigación se basa en un enfoque cuantitativo y aplicado, utilizando un diseño de investigación cuasi experimental de carácter descriptivo. Esto facilita la exploración de los factores que impactan en el estudio. El enfoque descriptivo se utiliza para recolectar datos en la zona de investigación en relación con los objetivos y la hipótesis. El propósito de este estudio consiste en examinar los procedimientos de voladura y su influencia en la mejora de la fragmentación del mineral, con el objetivo de optimizar las operaciones mineras en términos de transporte. Esto llevará a cabo la ejecución eficaz de los planes programados (9).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

En este estudio, el grupo de individuos considerado está compuesto por los empleados que participan en las actividades de perforación y voladura en las galerías de extracción de mineral en la unidad minera.

3.2.2. Muestra

La muestra de la presente investigación está determinada por los procesos de voladura en la galería 539-NE, desde la progresiva 540 metros hasta la progresiva 890 metros del nivel 539, en la cual se desarrollarán las perforaciones de 6 pies (1.8288 metros) en la unidad minera del presente estudio.

3.3. Técnicas de recolección de datos

Para recopilar los datos, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

3.3.1. Trabajos de gabinete

- ✓ Se llevó a cabo la búsqueda de datos acerca de la región de investigación.
- ✓ Se realizaron revisiones y evaluaciones de los reportes de voladura generados por los encargados del área.
- ✓ Se procedió a revisar y analizar detenidamente los estudios geológicos y geomecánicos relacionados con el área de estudio.

3.3.2. Trabajos de campo

Durante las actividades de campo, se llevará a cabo la inspección de las voladuras con el propósito de identificar las áreas en las que se han presentado deficiencias y determinar los resultados obtenidos. Esto se realiza con el fin de evaluar la fragmentación de la roca y cuantificar el material de mayor tamaño generado por el proceso.

3.3.2.1. Equipos para la recolección de datos

- ✓ Plano topográfico
- ✓ Plano geológico-geo mecánico
- ✓ Brújula Brunton versión azimutal
- ✓ Distanciómetro
- ✓ Wincha de 20 metros
- ✓ Cordeles para medir
- ✓ Picsa de geólogo
- ✓ Tablero metálico, con lápices, colores y protector
- ✓ Procedimientos de trabajo (SSOMA)

3.3.3. Instrumentos en la recolección de datos

Se emplearon herramientas de recopilación de información diseñadas en forma de formatos específicos, los cuales se completaron en cada turno laboral. Estos formatos incluyen detalles como el consumo de accesorios y explosivos para las

voladuras, registros de los aceros de perforación, planos de perforación y evaluaciones de las voladuras.

3.3.4. Procesamiento de datos

La información obtenida durante la fase de investigación de campo fue administrada y examinada mediante utilidades tales como hojas de cálculo en Excel y el programa de software AutoCAD. A partir de estos análisis, se obtuvieron parámetros cruciales como la eficacia de la perforación y la voladura, la cantidad de roca fragmentada en toneladas métricas, el factor de carga y el costo individual de los procesos de perforación y voladura.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

4.1. Características operacionales de la galería 539-NE

La galería 539-NE que se encuentra en explotación presenta una litología de rocas ígneas intrusivas principalmente monzonita cuarcífera que es una roca plutónica de grano grueso, en su composición tiene 18 % de cuarzo por lo que se le denomina de esta manera, 30 % de feldspatos, 30 % de plagioclasa, minerales maficos como biotita y anfíbol entre 10 % y 14 % y como minerales accesorios tienen clorita.

El macizo rocoso donde se encuentra emplazada la galería ha sido determinada según la clasificación geomecánica de Bieniawski RMR (rock mass rating), clase III, con calidad de roca regular, presentado fractura miento moderado y una dureza media.

Tabla 4. Clasificación del tipo de roca (RMR)

Clase	Calidad de roca	RMR
I	muy buena	81 – 100
II	buena	61 – 80
III	regular	41 – 60
IV	mala	21 – 40
V	muy mala	0 - 20

Tomada del Libro the ISRM suggested methods for characterization

Las secciones de avance de la galería están definidas con un ancho de 1.80 metros y altura de 2.10 metros, encontrando algunas deficiencias en las voladuras

debido a una inadecuada iniciación del explosivo como tiros cortados, tiros retardados, lo que implica el mal uso de los explosivos; asimismo se observó zona de explotación con bastante pedronería que es aquel material que no puede ser cargado y trasladado a parrilla por su diámetro superior a lo estandarizado y que necesita realizar la voladura secundaria.

4.1.1. Malla de perforación para la voladura

En el frente de la galería 539 N-E, se sigue una disposición técnica específica para la malla de perforación utilizada en las voladuras. Estas especificaciones determinan las dimensiones de la malla de perforación según las diferentes etapas del proceso. Para la etapa de arranque, se establece un *burden* de 8 centímetros con un distanciamiento de 16 centímetros. Para la etapa de ayuda, se utiliza un *burden* de 16 centímetros con un distanciamiento de 34 centímetros. Los cuadradores se perforan con un *burden* de 35 centímetros y un distanciamiento de 73 centímetros. Los hastiales presentan un distanciamiento de 50 centímetros. Para la corona, se mantiene un distanciamiento de 38 centímetros y finalmente, en la etapa de arrastre, se emplea un distanciamiento de 55 centímetros.

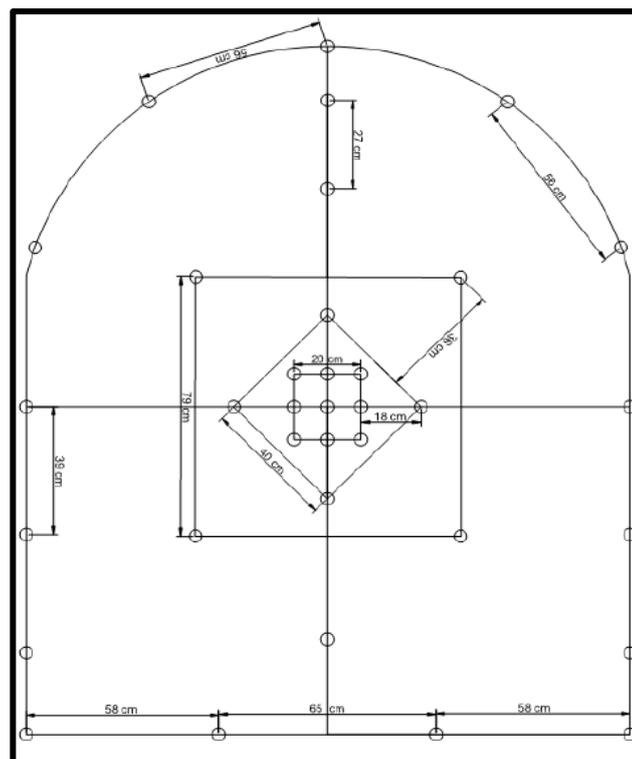


Figura 8. Malla de perforación

4.1.2. Voladura convencional tiro por tiro

Generalmente para las voladuras convencionales en pequeña minería el elemento principal de inicio son las armadas que están compuestas por:

- Fulminante común Nro. 6.- El fulminante común es un elemento empleado en explosiones y se compone de una cápsula cilíndrica hecha de aluminio que está sellada en uno de sus extremos. En su interior, alberga un explosivo primario altamente receptivo a la chispa de la mecha de seguridad, además de otro explosivo secundario de alta capacidad explosiva.

Tabla 5. Ficha técnica del fulminante común Nro. 06
Características técnicas del fulminante común Nro.06

Longitud del fulminante (mm)	45
Diámetro del fulminante (mm)	6,3
Prueba de Esopo, diámetro de perforación (mm)	9,0
Volumen trauzl (centímetros)	20
Resistencia a la humedad relativa del 100% por 24 horas	Detona
Resistencia al impacto 2 kg/1m	No detona
Sensibilidad a la chispa de la mecha de seguridad	Buena

Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019

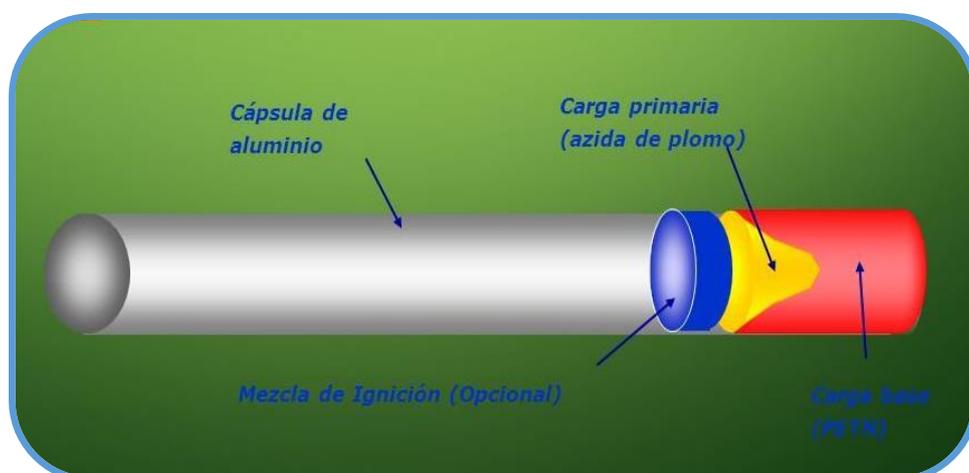


Figura 9. Fulminante común Nro. 06
Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019

- Mecha de seguridad. - La mecha de seguridad es un elemento utilizado en voladuras y forma parte del sistema convencional de inicio. Tiene la particularidad de ser flexible y contiene en su interior un núcleo central de pólvora, que transmite la ignición de manera uniforme hasta el fulminante.

Tabla 6. Ficha técnica de la mecha de seguridad
Características técnicas de la mecha de seguridad

Color de recubrimiento de plástico	Blanco
Núcleo de pólvora (g/m)	6
Tiempo de combustión a.n.m. (s/m)	150 a 165
Longitud de la chispa a.n.m. (mm)	50
Diámetro externo (mm)	5,2
Impermeabilidad	Muy buena
Resistencia a la tensión durante 3 minutos (kg)	Muy buena

Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019



Figura 10. Mecha de seguridad
Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019

- Dinamita. - La dinamita es un compuesto explosivo que incorpora nitroglicerina y dióxido de silicio. Debido a su considerable capacidad, se emplea para desintegrar rocas. Es susceptible a la influencia del fulminante convencional N°6 y del anfo.

Tabla 7. Ficha técnica de la dinamita de 45
Características técnicas de la dinamita de 45

Densidad relativa (g/ cm ³)	1,12
Velocidad de detonación (m/s) confinado	5200
Presión de detonación (kbar)	76
Potencia relativa en peso *** (%)	65
Fuerza Hess (mm)	22
Volumen normal de gases (L/kg)	800
Resistencia al agua	Buena
Categorías de humos	Primera

Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019



Figura 11. Dinamita de 45
Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019

4.1.2.1. Procedimiento de armado de tiro por tiro

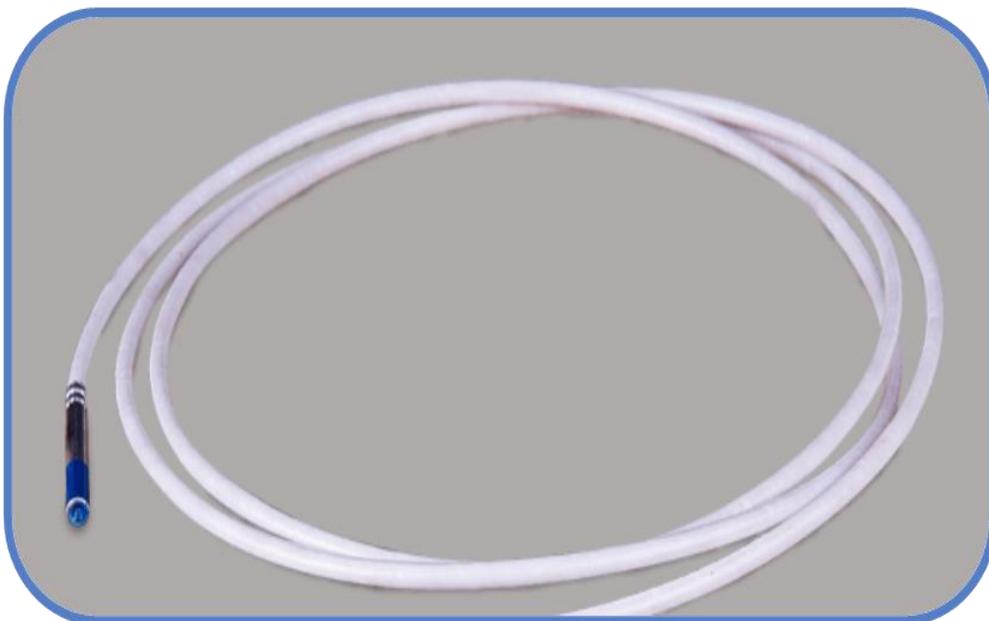
Para el armado de los explosivos para la columna horizontal de la voladura convencional de tiro por tiro se procede de la siguiente manera:

- Mecha armada de explosivos. - Se trata de un método seguro y tradicional para la activación de explosivos que involucra accesorios convencionales, como el fulminante corriente y la mecha de seguridad. Para llevar a cabo este proceso, se emplea una máquina fijadora de fulminantes o encapsuladora (ver Figura 11), que es una herramienta neumática de alta precisión. En el procedimiento de

encapsulado, se inicia cortando la mecha de seguridad a una longitud de 10 pies (3.50 metros) y luego se inserta en el fulminante. Con precaución, todo este conjunto se coloca en la máquina fijadora, donde se ejecuta el proceso mediante la palanca de fuerza. Esto permite ajustar el fulminante y la mecha de seguridad de manera hermética, logrando así una unión segura y efectiva.



**Figura 12. Fulminante maquina fijadora o maquina encapsuladora
Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019**



**Figura 13. Armada (fulminante nr0. 06 con mecha de seguridad)
Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019**

- Cebado de los explosivos. - Se trata de un detonador que incluye un explosivo potente, como la dinamita, conectado a una mecha armada con un fulminante, que a su vez está conectado a la mecha de seguridad. Para preparar la detonación, se crea un orificio en la parte superior de la dinamita con un punzón de madera o cobre, asegurándose de que el orificio esté alineado lo más cercano posible al eje longitudinal del cartucho. El fulminante se coloca de manera que esté orientado hacia la columna del explosivo.



Figura 14. Realizando el hueco con punzón de madera e introduciendo la mecha armada en la dinamita

- Anfo. - El Anfo, cuya abreviatura proviene de la expresión en inglés *Ammonium Nitrate - Fuel Oil*, es un explosivo de alta intensidad constituido por una combinación de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo. Estas mezclas se utilizan extensamente, sobre todo en empresas de minería y demolición. Aunque su densidad es baja, el Anfo es altamente poroso y puede absorber una gran cantidad de petróleo. Esto posibilita llenar un pequeño taladro con una mínima cantidad de este explosivo, lo que garantiza una detonación adecuada y con la máxima energía. Por ende, se logra una fragmentación efectiva de la roca debido a su rápida velocidad de detonación. Adicionalmente,

se aplica en la minería y en proyectos de construcción para perforaciones de amplio diámetro.



*Figura 15. Elaboración del Anfo
Tomada del Manual práctico de voladura Exsa, 2019*

4.1.2.2. Procedimiento de voladura

Para la voladura en la galería se procedió se procedió primero con la limpieza de los 30 taladros, posteriormente se procede a llenarlos con los accesorios y explosivos correspondientes.

Se inicia el llenado del taladro se inicia con hacer ingresar el cebo hasta el fondo de taladro con el atacador de madera, después en mangas de plástico de introduce el Anfo y con atacador se le empuja para que se comprima, posteriormente se le hecha el taco que vienen hacer los detritos de la perforación y/o arcilla el cual fue de 55 centímetros, esto se realiza con seguridad en los 30 taladros.

Tabla 8. Consumo promedio de explosivos y accesorios de voladura por disparo

Consumo promedio de explosivos y accesorios de voladura por disparo		
Voladura por taladros	Cantidad	Unidad/Medida
Numero de taladros cargados	30	Taladros
Longitud de taladros (6 pies)	1.8286	Metros
Dinamitas de 45	30	Pieza
Peso de Anfo utilizado	35	Kilogramos
Fulminantes Nro. 06	30	Pieza
Mecha de Seguridad	100	metros
Avance efectivo	1.7654	metros

4.1.2.3. Encendido de los explosivos en el frente de trabajo

El encendido de los explosivos se realiza mediante una mecha de seguridad que se corta cada 05 centímetros en forma diagonal, colocándose aproximadamente a una longitud de 45 centímetros aproximadamente para poder prender todos los taladros, generalmente lo realizan dos trabajadores, posteriormente esta mecha de seguridad es encendida para dar inicio al prendido de todos los taladros uno por uno siguiendo la secuencia de salida de la malla de voladura de tal manera que todos se hayan encendido y posteriormente el personal se retira de la zona de voladura.



Figura 16. Prendido de los explosivos

4.1.2.4. Deficiencias del sistema de iniciación tiro por tiro

La finalidad del mecanismo de inicio es transmitir la señal de detonación de un explosivo a otro en los orificios de perforación con exactitud y en un lapso específico. La elección del sistema de inicio es de suma importancia para el éxito de una detonación, ya que no solo supervisa la secuencia de disparo de los orificios, sino que también regula la cantidad de vibración producida por la explosión. Esta vibración tiene un impacto considerable en la fragmentación resultante y en la fractura de la roca en el conjunto.

En el enfoque de detonación individual de cada carga en el sistema de iniciación tiro por tiro, no se transmite la señal de detonación de un explosivo a otro. Cada carga se enciende individualmente en lugar de seguir una secuencia coordinada de disparo. Esto resulta en que las ondas de choque y vibraciones generadas por la explosión originen microfracturas en la roca. A medida que los gases se expanden dentro de estas fracturas, se produce la rotura de la roca. Es la presión de gas la que físicamente provoca estas fracturas en la roca. A pesar de esto, el costo de los sistemas de iniciación también es un factor importante en la elección, pero debería considerarse secundario, especialmente si el sistema de iniciación, en lugar de ahorrar, genera problemas como vibración excesiva, rotura incontrolada o fragmentación insuficiente.

Un desafío significativo asociado con el sistema de iniciación tiro por tiro es la presencia de explosivos que no han detonado por completo o en parte, debido a diversas razones. Estas pueden incluir fallos en los componentes principales como los detonadores, guías o el propio explosivo.

- **Tiros fallados**

Es importante destacar que un tiro cortado, en líneas generales, podría considerarse un tiro que no tuvo éxito, pero hasta el momento no había evidencia que respaldara la identificación de la causa subyacente de estos incidentes. Por lo tanto, no se contaba con estudios que justificaran la razón detrás de estos eventos y permitieran abordar el riesgo potencial aplicando técnicas de control operativo. La

idea era enfocarse en descubrir la causa raíz, con el propósito de reducir la frecuencia de estos eventos y eliminar sus efectos en el proceso de voladura.

Todas las razones mencionadas anteriormente encuentran su justificación en el hecho de que los tiros cortados suelen ser el resultado de factores operativos. Esto ocurre cuando un taladro que contiene una mezcla explosiva y accesorios de voladura (detonadores electrónicos o pirotécnicos) no explota como se esperaba después de haber sido activado. Esto se debe a una interrupción (corte) en alguna parte de la columna explosiva antes o durante la voladura. Estos incidentes son principalmente causados por:

- ✓ Errores en las prácticas durante las etapas de carga, encendido, fijación y sellado de los taladros.
- ✓ Restos de material de perforación que caen dentro del taladro, causando cargas desvinculadas.
- ✓ Rocas que se desprenden o quedan en el interior del taladro y, al moverse, dañan o cortan las conexiones de encendido.
- ✓ Fallas en los sistemas de inicio debido a problemas de calidad en el explosivo.
- ✓ Otra posibilidad es una combustión lenta de los explosivos (a veces relacionada con su composición).
- ✓ Detonación prematura, no planificada como se indica, cuando una carga explota antes de lo esperado y sin razón aparente o sin una señal clara e intencional de encendido.

La presencia de tiros ineficaces se refiere a situaciones en las que no ocurre la detonación total o parcial de una o varias columnas explosivas ubicadas en los taladros. Esto puede deberse a la detonación imprecisa o a que no cumple su objetivo principal, que es la fragmentación de la roca.

- **Tiros quedados**

El término "evento" se refiere a la situación en la que una carga explosiva no detona en el momento adecuado. Esto implica que una columna de explosivo en un taladro, que ha sido cargada y aparentemente iniciada de manera correcta, no

explota como se espera, lo que puede generar un riesgo potencial. Principales problemas que causan tiros cortados:

✓ **Tiros soplados**

Un taladro con una mezcla explosiva cuya reacción no logra fracturar la roca según lo previsto en el diseño de voladura. Esto puede deberse a un contenedor de energía (taco) mal diseñado, una mala configuración de distancia y separación, o la elección de un explosivo inapropiado para una roca altamente resistente.

✓ **Hangfire**

Este tipo de fallo en la detonación resulta en lo que se llama un "fuego suspendido", que es una detonación muy retrasada y puede ser causada por diversas razones. Una de las causas más comunes es la iniciación con mecha de seguridad (mecha lenta), mientras que también es posible debido a la deflagración lenta de los explosivos.

4.1.2.4. Consecuencias operativas del sistema de iniciación tiro por tiro.

a) Inestabilidad del macizo rocoso

Con el propósito de optimizar la eficiencia en las explosiones y disminuir los peligros relacionados con desprendimientos de rocas, así como los costes elevados de mantenimiento, resulta fundamental adoptar enfoques más efectivos. La inestabilidad en las operaciones mineras emerge a partir de dos factores primordiales. Uno de ellos es la práctica de voladuras, especialmente cuando carece de bases técnicas sólidas, como es el caso de las detonaciones convencionales llevadas a cabo mediante el sistema de iniciación de tiro por tiro. En esta situación, es posible identificar cuatro factores determinantes: la disposición de los agujeros, involucrando diversos aspectos vinculados con la tipología de la roca; las ondas de choque de alta frecuencia derivadas de un factor de carga elevado; la secuencia de la voladura, es decir, el orden de disparo de los orificios; y por último, las prácticas inapropiadas por parte de los trabajadores, que desempeñan un rol crucial en el éxito de una detonación.

b) Inadecuada fragmentación de la roca en las voladuras

La principal meta de la voladura es lograr una fragmentación que cumpla con los requisitos establecidos por la planta de procesamiento del macizo rocoso. Esto incluye conseguir una distribución de tamaños de partículas adecuada, así como una disposición y compactación adecuadas de la pila de material rocoso desprendido.

La calidad de la fragmentación tiene un impacto considerable en las etapas subsiguientes de la operación minera.

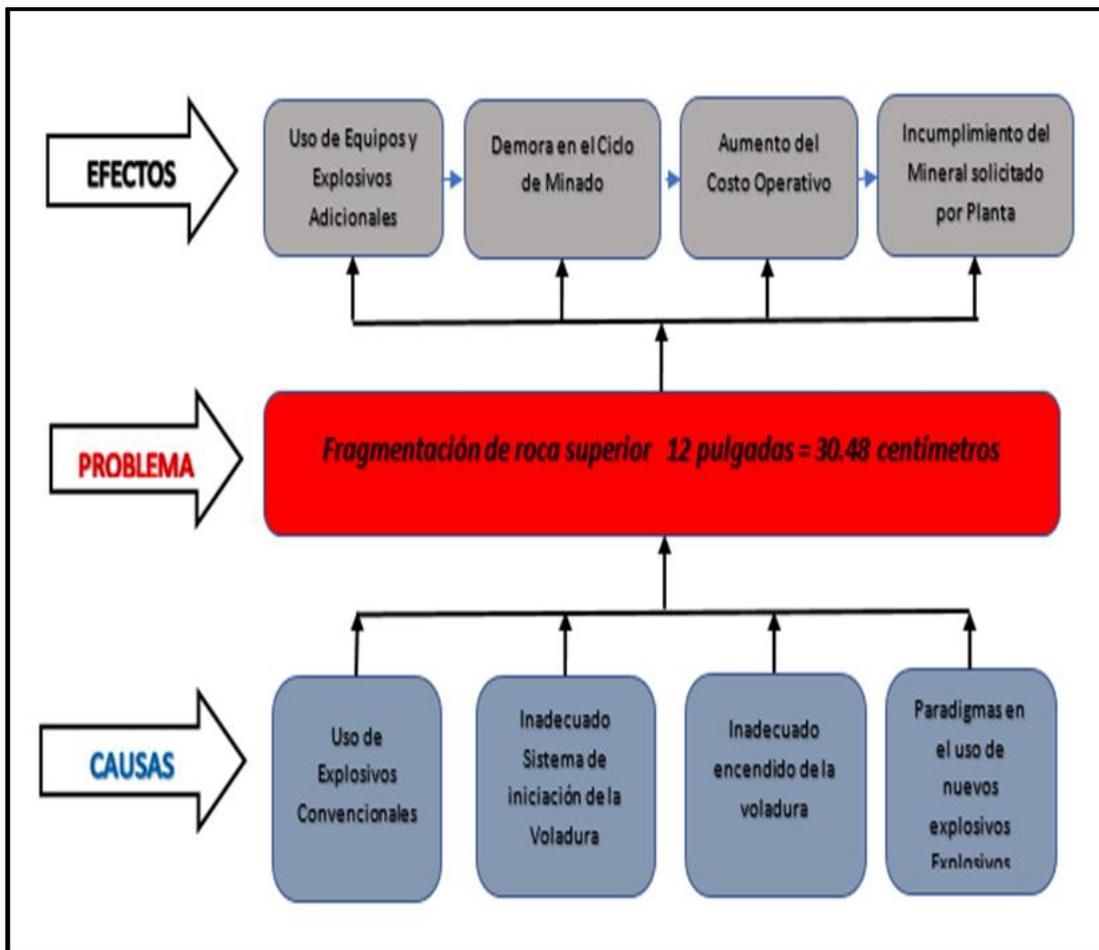


Figura 17. Diagrama de la causalidad de fragmentación

c) Cálculos de avance de la voladura

Se exponen a continuación los cálculos de los factores de la voladura para determinar el tonelaje métrico y la fragmentación.

- **Eficiencia de perforación**

$$\text{Eficiencia Perf.} = \frac{\text{Avance efectivo}}{\text{Longitud de taladro}} \times 100 \%$$

$$\text{Eficiencia Perf.} = \frac{1.8100 \text{ metros}}{1.8288 \text{ metros}} \times 100 \%$$

$$\text{Eficiencia Perf.} = 98.9720 \%$$

- **Cálculo de volumen de una voladura**

$$\text{Vol.} = \text{Sección} \times \text{Avance efectivo}$$

$$\text{Vol.} = 2.1 \text{ m.} \times 1.8 \text{ m.} \times 1.8100 \text{ m.}$$

$$\text{Vol.} = 6.8418 \text{ m}^3$$

- **Cálculo del tonelaje por voladura**

$$t = \text{volumen} \times \text{peso específico}$$

$$t = 6.8418 \text{ m}^3 \times 2.85 \text{ gr/ cm}^3$$

$$t = 19.4991 \text{ TM}$$

- **Cálculo del porcentaje de material grueso**

$$\text{Porcen. \%} = \frac{\text{Cubicación topografía} \times 100}{\text{tonelaje métrico}}$$

$$\text{Porcen. \%} = \frac{5.8497 \text{ T.M.} \times 100 \%}{19.4991 \text{ T.M.}}$$

$$\text{Porcen. \%} = 30.00 \text{ de material grueso}$$

d) Cubicación del material de la voladura tiro por tiro

La cubicación del mineral de la voladura la realiza la Jefatura de Ingeniería mediante el Área de Topografía, utilizando una estación total marca Leica con la cual realizan el levantamiento topográfico del mineral y con el software Topo Cal 2021, calculan la cantidad de mineral volado, cuyos datos son entregados al Área de Planeamiento de Minado de la Jefatura de Mina.

Después de haber cargado el mineral que pasa por parrilla, se separa el mineral grueso (que no pasa por parrilla) y es cubicado por área de topografía y cuyos cálculos son entregados para la voladura secundaria. (ver Tabla 9)

Tabla 9. Cubicación de material para planta de procesamiento

CUBICACION MINERAL PARA PLANTA DE PROCESAMIENTO 2022						
FECHA DE VOLADURA	ZONA DE VOLADURA	CODIGO DE VOLADURA (Calculo de 03 Voladuras semanales)	PROGRESIVAS DE VOLADURA	VOLUMEN CUBICADO TM.	MATERIAL GRUESO CUBICADO TM	% DE MATERIAL GRUESO
Set-22	Galería 539-NE	N-590 - 101 - 103	Progresiva 547.20	58.789	17.546	29.85
Set-22	Galería 539-NE	N-590 - 104 - 106	Progresiva 554.40	58.245	17.234	29.59
Set-22	Galería 539-NE	N-590 - 106 - 109	Progresiva 561.60	57.980	16.345	28.19
Set-22	Galería 539-NE	N-590 - 110 - 112	Progresiva 568.80	57.789	18.121	31.36
Oct-22	Galería 539-NE	N-590 - 112 - 115	Progresiva 576.00	58.900	17.541	29.78
Oct-22	Galería 539-NE	N-590 - 116 - 119	Progresiva 583.20	58.500	17.671	30.21
Oct-22	Galería 539-NE	N-590 - 120 - 121	Progresiva 590.40	57.987	17.567	30.29
Oct-22	Galería 539-NE	N-590 - 122 - 124	Progresiva 597.60	57.876	18.235	31.51
Nov-22	Galería 539-NE	N-590 - 125 - 127	Progresiva 604.80	57.111	17.564	30.75
Nov-22	Galería 539-NE	N-590 - 128 - 130	Progresiva 612.00	57.123	17.222	30.15
Nov-22	Galería 539-NE	N-590 - 131 - 133	Progresiva 619.20	56.234	17.345	30.84
Nov-22	Galería 539-NE	N-590 - 134 - 136	Progresiva 626.40	57.211	17.342	30.31
Dic-22	Galería 539-NE	N-590 - 140 - 142	Progresiva 633.60	57.564	17.345	30.13
Dic-22	Galería 539-NE	N-590 - 143 - 146	Progresiva 640.80	58.453	17.879	30.59
Dic-22	Galería 539-NE	N-590 - 147 - 149	Progresiva 648.00	58.900	16.457	27.94
Dic-22	Galería 539-NE	N-590 - 150 - 152	Progresiva 655.20	58.000	16.999	29.31
TOTAL DE CUBICACION DE MINERAL				926.662	278.413	30.05

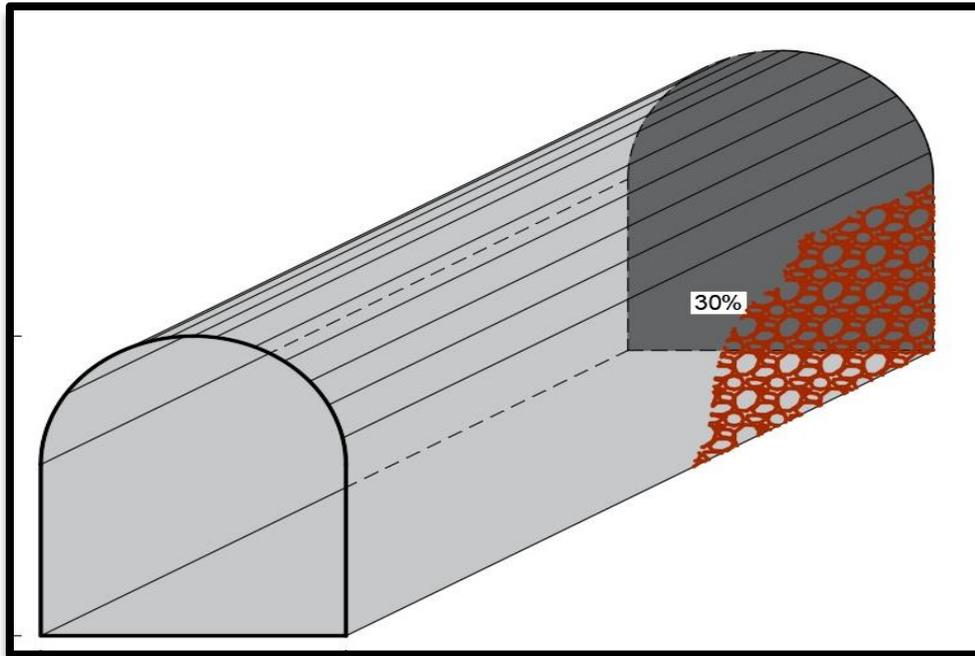


Figura 18. Cubicación Área Topografía

4.1.3. Voladura con detonadores ensamblados

Un detonador ensamblado es un dispositivo para iniciar la voladura, la que se viene implementado en las voladuras del presente estudio por su versatilidad y seguridad, después de varios estudios y análisis por el Área de Voladura se llegó a la conclusión de usar el explosivo Carmex de Famesa.

Carmex se constituye a partir de un fulminante común N°8, un segmento de mecha de seguridad, un conector destinado a la mecha rápida y un bloque de sujeción, empleado como una suerte de cierre de seguridad de plástico. Este bloque tiene la finalidad de asegurar la mecha rápida al conector. Posee un núcleo de pólvora con una densidad de 6 g/m, una tasa de combustión en el rango de 150 a 165 a.n.m. (s/m) y una longitud de chispa que varía de 50 a.n.m. (mm). Este producto fue diseñado como un sistema seguro y eficiente para la iniciación de cargas explosivas. Se caracteriza por su preensamblaje, lo cual elimina la necesidad de ensamblarlo en el lugar de trabajo. Además, ofrece ventajas como la mejora de la secuencia de detonación, mayor seguridad en áreas extensas y la reducción de tiros cortados. En su fabricación, el Carmex es ensamblado por personal altamente capacitado y utilizando máquinas fijadoras neumáticas, lo que

garantiza la estanqueidad del conjunto de fulminante, mecha de seguridad y conector.

El sistema de iniciación del Carmex este compuesto por:

a) Fulminante común:

Tabla 10. Fulminante Común

DIÁMETRO DEL FULMINANTE (mm)	6,3
LONGITUD DEL FULMINANTE (mm)	45
PRUEBA DE ESOPO, DIÁMETRO DE PERFORACIÓN (mm)	10,0
VOLUMEN TRAUZL (cm ³)	23
RESISTENCIA A LA HUMEDAD RELATIVA DEL 100 % POR 24 HORAS	Detona
RESISTENCIA AL IMPACTO 2 kg/1m	No Detona
SENSIBILIDAD A LA CHISPA DE LA MECHA DE SEGURIDAD	Buena

Tomada de Ficha técnica Famesa 2022

b) Mecha de seguridad

Tabla 11. Mecha de Seguridad

COLOR DE RECUBRIMIENTO PLÁSTICO	Verde
NÚCLEO DE PÓLVORA (g/m)	6
TIEMPO DE COMBUSTIÓN a.n.m. (s/m)	150 a 165
LONGITUD DE LA CHISPA a.n.m. (mm)	50
DIÁMETRO EXTERNO (mm)	5,2
RESISTENCIA A LA TENSIÓN DURANTE 3 MINUTOS (kg)	30

Tomada de Ficha técnica Famesa 2022

e) Conector

Tabla 12. Conector

DIÁMETRO DEL CONECTOR (mm)	6,3
LONGITUD DEL CONECTOR (mm)	45
ANCHO DE LA RANURA (mm)	2,4
CARGA DE MATERIAL PIROTÉCNICO (g)	0,5
ALTURA DE CARGA (mm)	12

Tomada de Ficha técnica Famesa 2022

f) Block de sujeción

Tabla 13. Block de sujeción

DIÁMETRO DEL BLOCK DE SUJECCIÓN (mm)	10
LONGITUD TOTAL (mm)	14
COLOR DEL BLOCK DE SUJECCIÓN	Anaranjado
MATERIAL	Plástico

Tomada de Ficha técnica Famesa 2022

4.1.3.1. Procedimiento para la voladura con el detonador ensamblado Carmex

El llenado de los taladros con el detonador ensamblado se realiza:

- a) Limpieza del taladro de perforación.
- b) Verificación de la longitud del taladro de perforación.
- c) Colocar la dinamita en el detonador ensamblado y ajustarla según procedimiento establecido para que no se separe del detonador.
- d) Meter el detonador ensamblado con la dinamita hasta el fondo del taladro de perforación con el atacador de madera.
- e) Llenar el taladro con Anfo empujándolo con el atacador de madera hasta comprimirlo.

- f) Llenar el taco de 55 centímetros con detritos de la perforación y/o con arcilla y comprimirla de tal manera que sea hermético el llenado con finalidad de que no se sople el taladro.
- g) Cargar los 30 taladros de igual manera y revisar que todo esté de acuerdo con el estándar, se procede a realizar el amarrado correspondiente con el cordón detonante y/o pentacord 5P, de acuerdo con el diseño de salida.
- h) Posteriormente se revisa que todos los taladros estén amarrados de acuerdo con el estándar se procede a realizar el amarre de la mecha armada con el cordón detonante, realizando un amarre (tipo muñeco), para que este bien sujeto y se pueda realizar el prendido correspondiente.

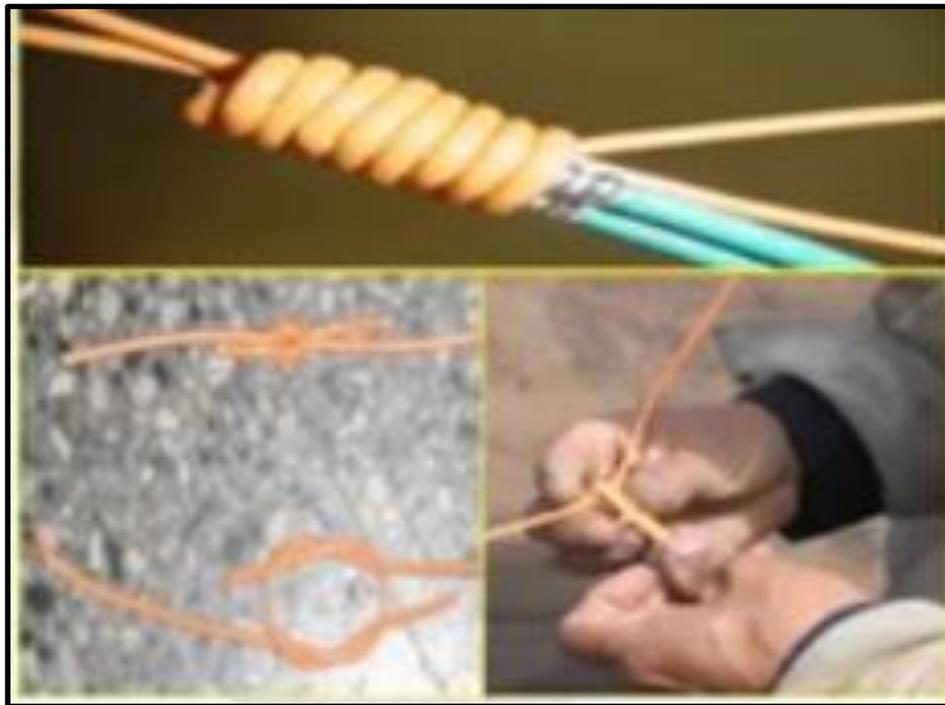


Figura 19. Amarre con la mecha armada

- i) Después de haberse cumplido con todas las normas de seguridad se procede al encendido de la mecha armada, esto se realiza con un trabajador de voladura el cual es certificado.
- j) Luego de 30 minutos se procede a ingresar para verificar la voladura.

Tabla 14. Consumo promedio de explosivos y accesorios de voladura con detonador ensamblado.

Consumo promedio de explosivos y accesorios de voladura por disparo		
Voladura por taladros	Cantidad	Unidad/Medida
Numero de taladros cargados	30	Taladros
Longitud de taladros	1.8288	Metros
Detonador ensamblado Carmex	30	Pieza
Dinamita de 45	30	Pieza
Peso de Anfo utilizado	35	Kilogramos
Cordón detonante	90	Metros
Fulminantes Nro. 06	1	Pieza
Mecha de seguridad	3.5	Metros
Avance efectivo	1.8100	Metros

4.1.3.2. Beneficios del sistema de iniciación detonador ensamblado Carmex

El uso de los detonadores ensamblados resulta más costoso a diferencia de los métodos tradicionales, pero se diferencia en la mejora e incremento la productividad de la mina y de los procesos.

- a) Estabilidad del macizo rocoso
- b) Mejor fragmentación.
- c) Mejor apilamiento del material volado.
- d) Disminución de la proyección de rocas
- e) Mejora en la productividad.
- f) Disminución de equipos para el carguío acarreo descargue de material.
- g) Disminución de explosivos para voladura secundaria.
- h) Mejora de la seguridad.

a) Cálculos de avance de la voladura

Se exponen a continuación los cálculos de los factores de la voladura para determinar el Tonelaje Métrico y la fragmentación.

- **Eficiencia de la perforación**

$$\text{Eficiencia Perf.} = \frac{\text{Avance efectivo}}{\text{Longitud de taladro}} \times 100 \%$$

$$\text{Eficiencia Perf.} = \frac{1.8100 \text{ metros}}{1.8288 \text{ metros}} \times 100 \%$$

$$\text{Eficiencia Perf.} = 98.972 \%$$

- **Cálculo de volumen**

$$\text{Vol.} = \text{Sección} \times \text{Avance efectivo}$$

$$\text{Vol.} = 2.1 \text{ m.} \times 1.8 \text{ m.} \times 1.8100 \text{ m}$$

$$\text{Vol.} 6.8418 \text{ m}^3$$

- **Cálculo del tonelaje**

$$\text{Ton} = \text{Volumen} \times \text{peso específico del mineral}$$

$$\text{Ton} = 6.8418 \text{ m}^3 \times 2.85 \text{ gr/ cm}^3$$

$$\text{Ton} = 19.4991 \text{ TM}$$

- **Cálculo del porcentaje de material grueso**

$$\text{Porcen. \%} = \frac{\text{Cubicación topografía} \times 100}{\text{Tonelaje Métrico}}$$

$$\text{Porcen. \%} = \frac{1.949 \text{ T.M.} \times 100 \%}{19.4991 \text{ T.M.}}$$

$$\text{Porcn. \%} = 10.00 \%$$

b) Cubicación del material de la voladura con detonador ensamblado Carmex

La cubicación del mineral de la voladura la realiza la Jefatura de Ingeniería mediante el Área de Topografía, utilizando una estación total marca Leica con la cual realizan el levantamiento topográfico del mineral y con el software Topo Cal 2021, calculan la cantidad de mineral volado, cuyos datos son entregados al Área de Planeamiento de Minado de la Jefatura de Mina.

Después de haber cargado el mineral que pasa por parrilla, se separa el mineral grueso (que no pasa por parrilla) y es cubicado por área de topografía y cuyos cálculos son entregados para la voladura secundaria. (ver tabla 15)

Tabla 15. Cubicación de material para planta de procesamiento

CUBICACION MINERAL PARA PLANTA DE PROCESAMIENTO 2023 CON DETONADOR ENSAMBLADO "CARMEX"						
FECHA DE VOLADURA	ZONA DE VOLADURA	CODIGO DE VOLADURA (Calculo de 3 Voladuras semanales)	PROGRESIVAS DE VOLADURA	VOLUMEN CUBICADO TM.	MATERIAL GRUESO CUBICADO TM	% DE MATERIAL GRUESO
Ene-23	Galería 539-NE	N-590 - 152 - 155	Progresiva 662.40	58.365	5.847	10.02
Ene-23	Galería 539-NE	N-590 - 156 - 158	Progresiva 669.60	57.890	5.896	10.18
Ene-23	Galería 539-NE	N-590 - 159 - 161	Progresiva 676.80	56.890	5.908	10.38
Ene-23	Galería 539-NE	N-590 - 162 - 164	Progresiva 684.00	57.897	5.345	9.23
Feb-23	Galería 539-NE	N-590 - 165 - 167	Progresiva 691.20	57.980	5.777	9.96
Feb-23	Galería 539-NE	N-590 - 168 - 170	Progresiva 698.40	56.990	5.900	10.35
Feb-23	Galería 539-NE	N-590 - 171 - 173	Progresiva 705.60	57.879	5.955	10.29
Feb-23	Galería 539-NE	N-590 - 174 - 176	Progresiva 712.80	57.908	5.987	10.34
Mar-23	Galería 539-NE	N-590 - 177 - 179	Progresiva 720.00	57.678	5.111	8.86
Mar-23	Galería 539-NE	N-590 - 180 - 182	Progresiva 727.20	56.895	5.987	10.52
Mar-23	Galería 539-NE	N-590 - 183 - 185	Progresiva 734.40	56.900	5.890	10.35
Mar-23	Galería 539-NE	N-590 - 186 - 188	Progresiva 741.60	55.980	5.780	10.33
Abr-23	Galería 539-NE	N-590 - 189 - 191	Progresiva 748.80	56.098	5.897	10.51
Abr-23	Galería 539-NE	N-590 - 192 - 194	Progresiva 756.00	57.021	5.290	9.28
Abr-23	Galería 539-NE	N-590 - 195 - 197	Progresiva 763.20	52.654	5.114	9.71
Abr-23	Galería 539-NE	N-590 - 197 - 200	Progresiva 770.40	53.000	5.211	9.83
TOTAL DE CUBICACION DE MINERAL				908.025	90.895	10.01

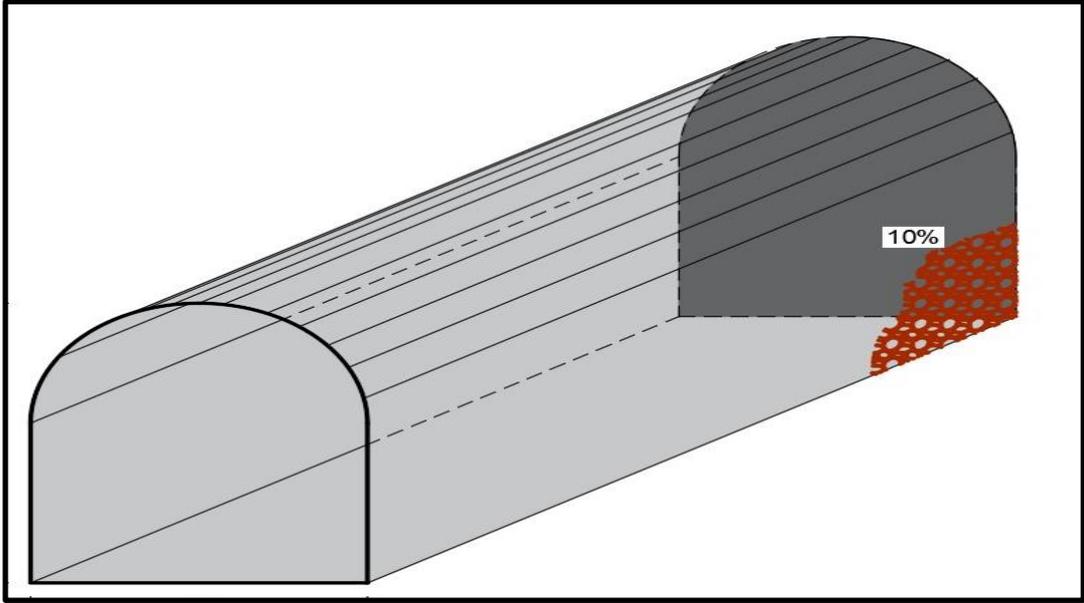


Figura 20. Cubicación Área Topografía

CONCLUSIONES

1. Con la implementación del detonador ensamblado Carmex en el sistema de iniciación se ha optimizado la eficiencia de la voladura, principalmente en la iniciación de las cargas, ya que cuenta con beneficios como el ensamblado industrial y por lo tanto ya no requiere el ensamblado en mina; asimismo, proporciona seguridad en el chispeo o prendido, mejora la secuencia de salida, minimiza la cantidad de tiros fallados en la unidad minera en el distrito de Bella Unión - Caravelí.
2. Se ha mejorado en un 20 % la fragmentación en la voladura:
 - En la voladura con sistema de iniciación tiro por tiro de 19.4991 TM se obtuvo 5.8497 TM de mineral grueso o pedronería, superior a 30.48 centímetros que corresponde al 30 %.
 - Con el sistema de iniciación detonador ensamblado Carmex se ha optimizado la voladura logrando minimizar en un 20 % la fragmentación de la roca de 19.4991 TM se obtuvo 1,949 TM lo que corresponde al 10 % de pedronería o material grueso que es superior a 30.48 centímetros.
3. Con la utilización del detonador ensamblado Carmex se ha minimizado la voladura secundaria en un 20 %; asimismo, se ha disminuido las áreas destinadas para su disposición.
4. Se ha disminuido la utilización de equipos para el carguío, acarreo y descargue de mineral.
5. Se ha mejorado la seguridad y salud ocupacional de los trabajadores debido a que el sistema de iniciación detonador ensamblado Carmex viene acoplado desde la fábrica y el encendido es mediante una sola armada y lo puede realizar un trabajador con todas las condiciones de seguridad.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda llevar a cabo una investigación sobre la viabilidad de emplear emulsión, que consiste en un explosivo encapsulado en un revestimiento de plástico con características de seguridad, potencia, impermeabilidad al agua y generación de gases para la voladura y que esta sea de alta calidad.
2. Se recomienda la adopción de equipos de perforación automáticos que incorporan mecanismos de rotación y sistemas de perforación que se ajustan automáticamente, lo que les capacita para superar bloqueos en áreas con formaciones fracturadas u otros desafíos.
3. Se recomienda brindar una formación constante a los empleados encargados de las labores de perforación y voladura, con el fin de garantizar su cumplimiento de los criterios establecidos por la unidad minera.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUIRRE, Andres. Optimización de parámetros de tronadura en función de los explosivos de alta energía en Sociedad Contractual Minera el Abra. Tesis (Título de Ingeniero Civil de Minas). Santiago de Chile :Universidad de Chile, 2016, 166 pp.
2. CUEVA, Brayde. Comparación de la productividad, fragmentación y costos del sistema de iniciación electrónica versus pirotécnica en voladura minera Yanacocha S.R.L. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cajamarca - Perú: Universidad Privada del Norte, 2018, 108 pp.
3. VALDIVIA, Tom. Factibilidad del uso de emulsión a granel en minería subterránea: resultados de pruebas Emultex PDBG. Tesis (Título Ingeniero de Minas). Lima :Pontificia Universidad Católica del Perú, 2022, 101 pp.
4. PARRA, Gean. Reducción de la carga explosiva con el uso del explosivo emulnor, en la corona de labores de desarrollo para optimizar los costos de voladura en CIA Minera Macdesa. Arequipa: Universidad Nacional San Agustín, 2018, 158 pp.
5. ZEA, Yesu y NOA, Beltan. 2021. Optimización de la granulometría en función de la voladura controlada en Mina Marcapunta Norte, Sociedad Minera El Brocal, Arequipa 2020. 2021. Tesis (Título Ingeniero de Minas). Huancayo: Universidad Continental, 2012, 72 pp.
6. PERNIA, José, ORTIZ, Fernando, LOPEZ, Carlos y LOPEZ, Emilio. *Manual de perforacion y voladura de rocas*. España, ETIMSA, 2021, 464 pp.
7. EXSA. 2019. *Manual práctico de voladura Exsa*. [en línea] 2019.[Fecha de consulta: 14 de mayo de 2023] Disponible en: <https://minedeskcorp.com/libro-manual-practico-de-voladura-exsa/>

8. D. S. 023.2017-EM. 2017. Modifican diversos artículos y anexos del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, Aprobado por Decreto Supremo N° 024-2016-EM. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 18 de agosto de 2017.

9. HERNANDEZ, Roberto. *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México, McGRAW-HILL INTERAMERICANA, 2018, 744 pp. ISBN: 978-1-4562-6096-5