



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Optimización de la fragmentación en zona mineralizada aplicando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

AUTOR

Jody Jeanpool REPOMA PUERTAS

ASESOR

Dr. Jesús Alberto TORRES GUERRA

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Repoma, J. (2025). *Optimización de la fragmentación en zona mineralizada aplicando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jody Jeanpool Repoma Puertas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75409197
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0002-6229-6823
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Jesús Alberto Torres Guerra
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07219691
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-8186-5249
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Enrique Soto Yen
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	03493146
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Emiliano Mauro Giraldo Paredes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08635711
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Victor Hugo Ramirez Ponce
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06163701

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.6.5. Ingeniería de Voladura.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú. Departamento: Tacna. Provincia: Jorge Basadre. Distrito: Ilabaya. Latitud: -17.246258 Longitud: -70.615268
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00



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

En el auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el jueves 18, de diciembre del 2025 siendo las 10:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. JORGE ENRIQUE SOTO YEN
Dr. EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ
Ing. VICTOR HUGO RAMIREZ PONCE

(PRESIDENTE)
(SECRETARIO)
(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: "*Optimización de la fragmentación en zona mineralizada aplicando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala*" presentada por Don: **JODY JEANPOOL REPOMA PUERTAS**, Bachiller en Ingeniería Minas, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero de Minas.

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

..... A CONFORMIDAD

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de: 19 (Diecinueve).

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

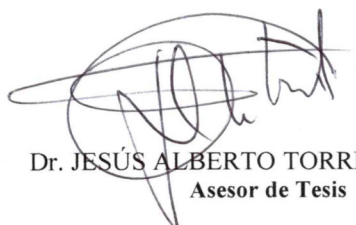
Siendo las 11:00 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 18 de diciembre del 2025


Dr. JORGE ENRIQUE SOTO YEN
Presidente


Dr. EMILIANO MAURO GIRALDO PAREDEZ
Secretario


Ing. VICTOR HUGO RAMIREZ PONCE
Miembro


Dr. JESÚS ALBERTO TORRES GUERRA
Asesor de Tesis

Anexo 1

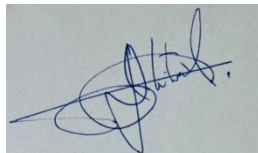
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Jesús Alberto Torres Guerra** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la EP N° **000008-2025-EPIMI-FIGMMG/UNMSM** de la tesis, cuyo título es **“Optimización de la fragmentación en zona mineralizada aplicando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala”** presentado por el bachiller **JODY JEANPOOL REPOMA PUERTAS** para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 8% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

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

Lima, 15 de diciembre del 2025

Firma del Asesor:



Nombres y Apellidos del asesor: **Jesús Alberto Torres Guerra**

DNI: **07219691**

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

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

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mi madre, Tarcila Puertas Rosario, por ser el pilar de mi vida y mi mayor inspiración. A ti, que con amor, sacrificio y sabiduría has guiado cada uno de mis pasos, enseñándome que no hay sueños inalcanzables y que el esfuerzo siempre encuentra recompensa. Este logro es tanto tuyo como mío, porque sin tu ejemplo y tu apoyo incondicional, nada de esto habría sido posible. Gracias por enseñarme el valor de la perseverancia y la fortaleza.

A mi hermano, Luber Repoma Puertas, mi compañero de vida y mi amigo incondicional. A ti, que siempre has estado a mi lado, dándome ánimos en cada momento difícil y celebrando conmigo cada pequeño avance. Tu apoyo y confianza en mí han sido una fuente constante de motivación, y saber que cuento contigo ha sido una de mis mayores fortalezas.

A Sisley Rosario Baez Mauricio, por ser mi compañera incansable y mi mayor aliento. Tu amor y dedicación me han dado la fuerza para seguir adelante, y no hay palabras suficientes para agradecerte por todo lo que has hecho por mí.

A todas las personas que confiaron en mi potencial, me brindaron su apoyo y me impulsaron a seguir cuando las dudas me asaltaban. Gracias por estar siempre presentes y por darme la confianza necesaria para alcanzar mis sueños.

Con todo mi amor y gratitud, les dedico esta tesis, fruto de su respaldo y de la inspiración que me brindan cada día.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis ha sido posible gracias al apoyo y la inspiración de personas y entidades que, con su dedicación y confianza, han marcado profundamente mi vida y mi desarrollo profesional.

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada momento. Su presencia ha sido una fuente constante de inspiración y resiliencia, permitiéndome enfrentar cada reto con determinación y esperanza.

A mi madre, Tarcila Puertas Rosario, cuyo amor incondicional y esfuerzo constante me han guiado en cada paso de mi vida. A mi hermano, Luber Repoma Puertas, por su compañía y apoyo, quien ha sido una fuente de ánimo constante y ha creído en mí en cada momento. A Sisley Rosario Baez Mauricio, por ser la fortaleza que me da la calma necesaria para avanzar. Gracias por estar a mi lado, por tu amor y por tu capacidad para inspirarme cada día.

Expreso también mi gratitud a Southern Peru Copper Corporation, una empresa que me ha brindado no solo la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, sino también los recursos y el entorno propicio para realizar esta investigación.

Agradezco especialmente a mi jefe, Ing. Raúl Baldi, y a mi gerente, Ing. Raúl Veramendi, por su apoyo constante, su confianza y el liderazgo que han demostrado en cada etapa de mi formación profesional, impulsándome siempre a dar lo mejor de mí. Asimismo, a mi director, Ing. Rogelio Martinez, quien ha sido un ejemplo de excelencia profesional y ética; su guía y ejemplo han dejado una huella significativa en mi vida y en la realización de este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por haber sido el pilar de mi formación profesional. De manera especial, mi reconocimiento al Dr. Alberto Torres Guerra, quien, con su experiencia y dedicación, ha sido mi principal apoyo durante todo este proceso de investigación, guiándome en cada etapa con su sabiduría y orientación.

RESUMEN

En la Unidad Minera Toquepala (Fase 05) se evaluó, como parte de una estrategia de mejora continua, la optimización de la fragmentación de roca en voladuras primarias. Tradicionalmente, se utilizaba la mezcla explosiva Heavy Anfo Quantex-73, retacando con detritus de perforación, obteniéndose una fragmentación promedio de 22,8 cm, pero sin tener buenos resultados en la zona de retacado. A principios de 2023, se introdujo la mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70 en los proyectos de voladura en esta zona, utilizando como material de retacado a la gravilla de entre 1” y 1,5” de granulometría en conjunción con los retenedores de energía Conigass, para garantizar una adecuada fragmentación del material en esta área.

El objetivo fue reducir el P80 y elevar la tasa de excavación (Dig Rate) comparando cuatro configuraciones de carga y taco: (i) H.A. Quantex-73 + detritus (línea base), (ii) H.A. Fortis Extra-70 + detritus, (iii) H.A. Fortis Extra-70 + gravilla (1”–1.5”) y (iv) H.A. Fortis Extra-70 + gravilla + retenedores de energía Conigass. Se midieron P80 y Dig Rate.

Los resultados mostraron mejoras progresivas. La configuración (iv) obtuvo los mejores desempeños, con P80=17.4 cm y Dig Rate=8078 t/h, equivalente a +27% respecto de la base (P80=22.8 cm; 6340 t/h). La opción (iii) alcanzó P80=19.0 cm y 7363 t/h (+14%); la (ii), P80=20.4 cm y 6700 t/h (+6%). Se confirmó una asociación inversa entre P80 y Dig Rate, atribuible a mejor transmisión de energía y eficacia del taco (gravilla) y los retenedores. En conclusión, la mezcla H.A. Fortis Extra 70 + Gravilla + Conigass demostró ser la configuración más eficaz para obtener una fragmentación óptima y maximizar la tasa de excavación en proyectos de voladura primaria, mejorando la eficiencia y reduciendo costos operativos.

Palabras Clave: Fragmentación (P80), Dig Rate, H.A. Fortis Extra 70, H.A. Quantex 73, retenedor de energía.

ABSTRACT

At the Toquepala Mining Unit (Phase 05), as part of a continuous improvement strategy, the optimization of rock fragmentation in primary blasting was evaluated. Traditionally, the explosive mix Heavy Anfo Quantex-73 was used, backfilled with drilling detritus, achieving an average fragmentation of 22.8 cm, but without yielding good results in the backfill zone. In early 2023, the explosive mix Heavy Anfo Fortis Extra-70 was introduced in blasting projects in this area, using gravel with a grain size of 1" to 1.5" as backfill material in conjunction with the Conigass energy retainers, to ensure adequate fragmentation of the material in this area.

The objective was to reduce the P80 and increase the dig rate by comparing four charge and plug configurations: (i) H.A. Quantex-73 + detritus (baseline), (ii) H.A. Fortis Extra-70 + detritus, (iii) H.A. Fortis Extra-70 + gravel (1"–1.5"), and (iv) H.A. Fortis Extra-70 + gravel + Conigass energy retainers. P80 and Dig Rate were measured.

The results showed progressive improvements. Configuration (iv) obtained the best performance, with P80=17.4 cm and Dig Rate=8078 t/h, equivalent to +27% compared to the baseline (P80=22.8 cm; 6340 t/h). Option (iii) achieved P80=19.0 cm and 7363 t/h (+14%); option (ii) achieved P80=20.4 cm and 6700 t/h (+6%). An inverse association between P80 and Dig Rate was confirmed, attributable to improved energy transmission and effectiveness of the plug (gravel) and retainers. In conclusion, the H.A. Fortis Extra 70 + Gravel + Conigass mixture proved to be the most effective configuration for obtaining optimal fragmentation and maximizing the excavation rate in primary blasting projects, improving efficiency and reducing operating costs.

Keywords: Fragmentation P80, Dig Rate, H.A. Fortis Extra 70, H.A. Quantex 73, energy retainer.

INDICE GENERAL

1. CAPITULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	3
1.2.1. Descripción de la Problemática	3
1.2.2. Formulación del Problema	4
1.2.2.1. Problema General.	4
1.2.2.2. Problemas Específicos.....	4
1.3. Objetivos de la Investigación	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. Importancia y Alcance de la Investigación	5
1.5. Limitaciones de la Investigación	7
2. CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes de la Investigación	9
2.2. Bases Teóricas	11
2.2.1. Operaciones Unitarias	11
2.2.1.1. Perforación.	11
2.2.1.2. Voladura.	13
2.2.1.4. Acarreo.	19
2.2.2. Fly Rock	20
2.2.3. Fragmentación	21
2.2.3.1. Índice P80 en fragmentación.....	22
2.2.4. Dig Rate.....	22
2.3. Definición de Términos.....	23

3. CAPÍTULO III.....	26
HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	26
3.1. Las Hipótesis	26
3.1.1. Hipótesis General	26
3.1.2. Hipótesis Específicos	26
3.2. Las Variables.....	27
3.2.1. Variable Independiente	27
3.2.2. Variable Dependiente	27
3.3. Operacionalización de Variables.....	27
4. CAPÍTULO IV	28
MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
4.1. Área de Estudio	28
4.1.1. Ubicación	28
4.1.2. Accesibilidad.....	29
4.1.3. Clima	30
4.1.4. Geología Regional y Local.....	31
4.1.5. Estratigrafía	33
4.1.5.1. Pórfido de Cuarzo Quellaveco (Qq).....	34
4.1.5.2. Serie Toquepala (Terciario Inferior).	34
4.1.6. Tipos de Alteraciones Más Comunes de la fase 05.....	36
4.1.6.1. Alteración Fílica.....	36
4.1.6.2. Alteración Fílico-potásica.	36
4.1.7. Mineralización en fase 05.	36
4.1.8. Mineralogía en fase 05 de Unidad Minera Toquepala	37
4.1.9. Operaciones en fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.....	37
4.1.10. Operaciones Unitarias en mineral de sulfuro de fase 05	38
4.1.11. Perforación	39

4.1.11.1.	Diseño de perforación primaria.....	41
4.1.11.2.	Diseño de carga explosiva según tipo de taladro	44
4.1.11.3.	Perforación primaria.....	47
4.1.11.4.	Perforación Precorte.....	48
4.1.12.	Aceros de perforación primaria.....	51
4.1.13.	Voladura	52
4.1.13.1.	Voladura Primaria.	53
4.1.13.2.	Voladura de Contorno.	56
4.1.14.	Accesorio de Voladura	57
4.1.14.1.	Detonador Electrónico Ikon Extreme III.....	57
4.1.14.2.	Detonador No Electrónico Exel.	58
4.1.14.3.	Booster 2 Lb Pentex.	59
4.1.14.4.	Cordón Detonante Cordtex.....	61
4.1.15.	Mezclas Explosivas Heavy Anfo	62
4.1.15.1.	Heavy ANFO Quantex 73.....	64
4.1.15.2.	Heavy ANFO Fortis Extra 70.....	66
4.1.16.	Secuencia de salida de las voladuras.....	70
4.1.17.	Control de Densidad en Mezclas Explosivas.....	71
4.1.18.	Conservación de Energía Explosiva	74
4.1.19.	Taco.....	75
4.1.20.	Material de Tapado.....	76
4.1.21.	Longitud de Taco.	79
4.1.22.	Accesorio para la Retención de Energía.	81
4.1.23.	Equipos de monitoreo de fragmentación.	84
4.2.	Diseño de Investigación.....	86
4.3.	Población y Muestra	87
4.3.1.	Población.....	87

4.3.2. Muestra	87
4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información	87
4.4.1. Preparación	88
4.4.2. Ejecución.....	89
4.4.3. Recolección de Información	90
4.5. Análisis Estadístico.....	91
CAPITULO V	93
RESULTADOS DE LA VOLADURA CON HEAVY ANFO QUANTEX 73 + DETRITUS	93
CAPITULO VI.....	98
RESULTADOS DE LA VOLADURA CON HEAVY ANFO FORTIS EXTRA-70 + DETRITUS / HEAVY ANFO FORTIS EXTRA-70 + GRAVILLA / HEAVY ANFO FORTIS EXTRA-70 + GRAVILLA + CONIGASS.	98
6.1. Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70 y Detritus como Material de Taco... 98	
6.2. Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70 y Gravilla como Material de Taco. 102	
6.3. Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70, Gravilla como Material de Taco y Retenedor de Energía Conigass	106
CAPITULO VII.....	112
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	112
7.1. Análisis de resultados	112
7.2. Discusión	120
CAPITULO VIII	122
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
ANEXOS.....	126

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Matriz de Operacionalización de Variables.	27
Tabla 2	Tipos de alteración asociadas a la mineralogía en fase 05 de Mina Toquepala.....	36
Tabla 3	Mineralogía en fase 05 de Unidad Minera Toquepala	37
Tabla 4	Flota de equipos de perforación en fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.	40
Tabla 5	Parámetros del macizo rocoso para el diseño de perforación primaria	42
Tabla 6	Parámetros de estimación de Burden - Kb.	43
Tabla 7	Estándar de diseño de malla de perforación y voladura de fase 05.....	48
Tabla 8	Parámetros de perforación de precorte en mina Toquepala	49
Tabla 9	Explosivos y materiales relacionados por tipo de taladro en fase 05.....	55
Tabla 10	Parámetros de voladura de precorte en la fase 05 de mina Toquepala	56
Tabla 11	Propiedades técnicas del detonador electrónico Ikon Extreme III	58
Tabla 12	Componentes del detonador no electrónico Exel.....	59
Tabla 13	Propiedades técnicas del Booster 2 Lb Pentex.....	60
Tabla 14	Propiedades técnicas del cordón detonante Cordtex	62
Tabla 15	Especificaciones técnicas de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73	65
Tabla 16	Especificaciones técnicas de la mezcla explosiva Heavy ANFO Fortis Extra 70 ..	68
Tabla 17	Datos de las materias primas del Heavy Anfo Fortis Extra 70	72
Tabla 18	Densidad de la gravilla proveniente de la cantera Toquepala	78
Tabla 19	Características del accesorio Conigass.....	83
Tabla 20	Parámetros del diseño de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus.....	93
Tabla 21	Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Quantex 73 y detritus	95
Tabla 22	Parámetros del diseño de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus	98
Tabla 23	Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus	99
Tabla 24	Parámetros del diseño de voladura con H.A. Fortis Extra 70 y gravilla	102
Tabla 25	Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla.....	104
Tabla 26	Parámetros del diseño de voladura con H.A. Fortis Extra 70, gravilla y retenedor de energía Conigass	106
Tabla 27	Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Fortis Extra-70, gravilla y retenedor de energía Conigass.....	109

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Parámetros de perforación primaria en mina Toquepala	12
Figura 2	Medición y rotulado de los taladros perforados en mina Toquepala	13
Figura 3	Primado y su colocación en el interior del taladro en mina Toquepala	14
Figura 4	Compartimentos del camión fábrica de Orica.....	15
Figura 5	Proceso de carguío de taladros con mezcla explosiva	15
Figura 6	Proceso de tapado de taladros con material gravilla	16
Figura 7	Proceso de conexión y testeo de detonadores electrónicos en campo	17
Figura 8	Proceso de programación y detonación del proyecto de voladura	18
Figura 9	Carguío de material fragmentado hacia los equipos de acarreo.....	19
Figura 10	Acarreo de material fragmentado hacia su destino	20
Figura 11	Componentes de un banco	23
Figura 12	Ubicación geográfica de la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala	29
Figura 13	Accesibilidad a la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.....	30
Figura 14	Precipitación media por mes en la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.	31
Figura 15	Mapa Geológico de la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.	33
Figura 16	Columna Estratigráfica por las que atravesó la fase 05 de Mina Toquepala	35
Figura 17	Material minado vs Ley de %Cu – Ley de %Mo en fase 05 en el año 2023.	38
Figura 18	Flujograma de operaciones del mineral de fase 05 en Unidad Minera Toquepala.	39
Figura 19	Flota de equipos de perforación primarias en fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.	40
Figura 20	Cálculo geométrico del burden y espaciamiento entre taladros.....	43
Figura 21	Ejemplo de diseño de carga explosiva en un taladro de producción en fase 05.	45
Figura 22	Ejemplo de diseño de carga explosiva en un taladro de amortiguación de fase 05.	46
Figura 23	Ejemplo de diseño de carga explosiva Fortis Extra 70 en un taladro de trim en fase 05....	47
Figura 24	Vista de perfil de la perforación y carguío de taladros de precorte	50
Figura 25	Distribución de los tipos de taladros presentes en una malla de perforación de fase 05. ...	50
Figura 26	Aceros de perforación primaria en zona de mineral de fase 05	52
Figura 27	Tonelaje roto real vs tonelaje roto planeado de mineral de fase 05 en el año 2023.....	53
Figura 28	Distribución de taladros presentes en una malla de perforación en fase 05.....	54
Figura 29	Diseño de carga de los tipos de taladros en una malla de perforación en fase 05.....	54
Figura 30	Resultados de la voladura de precorte en fase 05	57
Figura 31	Detonador electrónico Ikon Extreme III	58
Figura 32	Detonador no electrónico Exel.....	59
Figura 33	Booster 2 Lb Pentex.....	61
Figura 34	Cordón detonante Cordtex	62
Figura 35	Composición de la mezcla explosiva Heavy ANFO.....	63
Figura 36	Composición de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73	65
Figura 37	Comportamiento de la densidad (g/cc) de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73	66
Figura 38	Promedio de VOD vs Densidad de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73	66
Figura 39	Composición de la mezcla explosiva Heavy ANFO Fortis Extra 70.....	68
Figura 40	Comportamiento de la densidad de la mezcla explosiva Heavy ANFO Fortis Extra 70	69
Figura 41	Composición del Fortis Extra 70 vs Quantex 73 utilizado en fase 05 de mina Toquepala.	69
Figura 42	Comparación técnica entre el H.A. Quantex 73 y H.A. Fostis Extra 70.....	69
Figura 43	Imagen de instrumentos de iniciación de detonadores electrónicos: Logger en primer plano y Blaster en segundo plano.....	71
Figura 44	Detalle de amarre y secuenciamiento de los taladros pimaros en fase 5.	71
Figura 45	Instrumentos empleados en la medición de densidades en campo	73

Figura 46	Proceso de medición de densidades en campo de la mezcla explosiva	73
Figura 47	Medición y registro en campo de la densidad de la mezcla explosiva.....	74
Figura 48	Distribución de carga explosiva y material de taco según tipo de taladro en fase 05.....	76
Figura 49	Detritus obtenido de la perforación primaria	77
Figura 50	Uso del detritus como material de taco en un proyecto de voladura	78
Figura 51	Cálculo de densidad de la gravilla y su aplicación en fase 05	79
Figura 52	Medición de la granulometría de la gravilla empleada en mina Toquepala	79
Figura 53	Cálculo de taco por Frank Chiapetta.....	80
Figura 54	Profundidad escala de entierro (SD) – Chiapetta.....	81
Figura 55	Accesorio para la retención de energía Conigass.....	82
Figura 56	Ubicación del conigass en los tipos de taladros en una malla voladura.....	84
Figura 57	Proceso de medición de fragmentación con el Split Desktop	85
Figura 58	Proceso de medición de fragmentación con el PortaMetrics	86
Figura 59	Diseño de taladros con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco	94
Figura 60	Gráfico estadístico de los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco.....	95
Figura 61	Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco.....	96
Figura 62	Medición de P80 (cm) a los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco	97
Figura 63	Diseño de taladros con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco.....	99
Figura 64	Campana de Gauss para los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco.....	100
Figura 65	Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra 70 y detritus como material de taco.....	101
Figura 66	Medición de P80 (cm) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco.....	102
Figura 67	Diseño de taladros con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco.....	103
Figura 68	Campana de Gauss para los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco	104
Figura 69	Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra 70 y gravilla como material de taco	105
Figura 70	Medición de P80 (cm) a los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco.....	106
Figura 71	Diseño de taladros con H.A. Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass	108
Figura 72	Campana de Gauss para los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor Conigass.....	110
Figura 73	Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra 70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass	111
Figura 74	Medición de P80 (cm) a los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass	111
Figura 75	Comparativo de los resultados de P80 (cm) y factor de potencia (kg/t)	112
Figura 76	Comparativo de los resultados de P80 (cm) y factor de potencia (kg/t)	113
Figura 77	Tonelaje de producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco	114
Figura 78	Tonelaje de producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco.....	115

Figura 79 Tonelaje de producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco	116
Figura 80 Producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass	117
Figura 81 Comparativo de los resultados de Dig Rate de la pala 01 (t/h).....	118
Figura 82 Comparativo de los resultados de Dig Rate promedio (t/h) vs fragmentación (P80) de pala 01	119
Figura 83 Vista de planta del tajo de mina Toquepala.....	126
Figura 84 Horizontes de planificación en el planeamiento a corto y mediano plazo en mina Toquepala	127
Figura 85 Modelo de plan de minado anual de mina Toquepala	128
Figura 86 Modelo de plan de minado mensual de mina Toquepala.....	128
Figura 87 Modelo de programa de producción semanal de mina Toquepala.....	129
Figura 88 Modelo diseño de malla de perforación de mina Toquepala	130
Figura 89 Modelo de conciliación de producción mensual de mina Toquepala	130
Figura 90 Pit final económico de mina Toquepala.....	131
Figura 91 Pit final operativo de mina Toquepala	132
Figura 92 Desarrollo de fases de minado de mina Toquepala.....	132
Figura 93 Movimiento de Materiales - Plan de Producción 2025 - 2055	133
Figura 94 Diseño final de botaderos: desarrollo del tajo y secuencia de botadero en mina Toquepala	134
Figura 95 Material minado vs Relación de Desbroce en el año 2023	134
Figura 96 Disparo de prueba Py 2830 109 110 - FASE 5 (30-06-23).....	135
Figura 97 Información geotécnica del Proyecto de prueba 2830 109	136
Figura 98 Diseño de la secuencia de salida del disparo de prueba del Py. 2830 109 110.....	137
Figura 99 Diseño de carga del disparo de prueba del Py. 2830 109 110	137
Figura 100 Uso de gravilla como material de taco en los taladros primarios de los proyectos de prueba	138
Figura 101 Imágenes de la voladura del proyecto 2830 109 110.....	138
Figura 102 Evaluación durante la voladura del proyecto 2830 109 110.....	139
Figura 103 Evaluación post voladura del proyecto 2830 109 110	139
Figura 104 Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 03-07-2023	140
Figura 105 Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 05-07-2023	140
Figura 106 Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 06-07-2023	141
Figura 107 Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 08-07-2023	141
Figura 108 Registro de capacitación a personal de Orica en la aplicación eficiente y segura del H.A. Fortis Extra 70	142
Figura 109 Ficha técnica del accesorio de voladura Pentex.....	144
Figura 110 Ficha técnica del accesorio de voladura Exel	145
Figura 111 Ficha técnica del accesorio de voladura I-kon III Extreme	146
Figura 112 Ficha técnica del accesorio de voladura I-kon III Extreme	147
Figura 113 Ficha técnica del nitrato de amonio grado ANFO	148
Figura 114 Ficha técnica de la Emulsión a granel no sensibilizada	149

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La minería desempeña un papel crucial en el desarrollo económico global, y Perú, con su vasta riqueza mineral, ha consolidado su posición como uno de los actores más relevantes en la industria minera a nivel mundial. En este contexto, la mejora continua de los procesos productivos se ha convertido en un desafío fundamental para optimizar la eficiencia operativa, reducir costos y mantener la competitividad en un mercado internacional cada vez más exigente. Uno de los factores clave para alcanzar estos objetivos es la optimización de las operaciones de voladura, las cuales afectan directamente la fragmentación del macizo rocoso y, en consecuencia, la eficiencia de los procesos subsecuentes como el carguío, acarreo y chancado.

La Unidad Minera Toquepala, ubicada en el sur del Perú, es uno de los principales yacimientos de cobre del país. En la fase 05, las características geológicas y mineralógicas presentan retos significativos en términos de fragmentación de la roca, lo cual incide directamente en la eficiencia de las operaciones de excavación y en el desempeño de los equipos de palas eléctricas. El tamaño de partícula en el percentil P80, como indicador de la

fragmentación, es esencial para evaluar la eficacia de los procesos de voladura, ya que impacta directamente la facilidad con que el material extraído puede ser manejado y procesado.

El objetivo de esta investigación es evaluar la optimización de la fragmentación en la zona mineralizada de fase 05 de la Unidad Minera Toquepala mediante la aplicación de la mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70, combinada con el uso de materiales de taco avanzados como la gravilla y el retenedor de energía Conigass. El propósito es determinar si estas combinaciones pueden generar una fragmentación más fina, reduciendo el tamaño de partícula (P80) y mejorando la tasa de excavación (Dig Rate), lo que resulta en una mejora significativa en la productividad de los equipos de excavación y, por ende, en la eficiencia global de la operación minera. La hipótesis fue, la aplicación de la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 mejora la fragmentación en zona mineralizada en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala.

La elección de la mezcla explosiva Fortis Extra-70, frente a opciones tradicionales como el Heavy Anfo Quantex-73, responde a la necesidad de adaptarse a las condiciones geológicas complejas de la zona mineralizada, especialmente en términos de dureza de las rocas y la optimización del uso de explosivos para mejorar el rendimiento. El estudio emplea un enfoque experimental y controlado para evaluar los efectos de diferentes combinaciones de explosivos y materiales de taco sobre la fragmentación y, a su vez, sobre la productividad de las palas eléctricas en términos de Dig Rate.

Este trabajo se justifica por la necesidad de encontrar soluciones más eficientes y sostenibles en las operaciones mineras, permitiendo maximizar la recuperación de mineral, reducir costos operativos y mejorar la seguridad en el proceso de extracción. Los resultados de esta investigación no solo contribuirán a la optimización de los procesos en Toquepala, sino que también podrán servir de referencia para otras operaciones mineras que enfrenten desafíos similares en términos de fragmentación y eficiencia operativa.

El estudio se circunscribe a voladuras primarias ejecutadas en la Fase 05, manteniendo constantes malla, burden y espaciamiento, diámetro de perforación, longitud de taco y secuenciamiento de disparo durante el período de evaluación. Se asume estabilidad de las prácticas de carguío y acarreo y una variabilidad geológica acotada por litologías y dominios geomecánicos comparables; en consecuencia, la validez externa se restringe a yacimientos con características análogas. Entre las limitaciones se reconocen la variabilidad inherente de la roca y del acoplamiento explosivo, la disponibilidad de instrumentación y posibles sesgos operativos asociados al régimen de producción.

La sección Métodos detalla el diseño comparativo y los procedimientos de medición de P80 y Dig Rate; Resultados presenta el desempeño de cada configuración; discusión interpreta los hallazgos y sus implicancias técnicas, económicas y de seguridad; y conclusiones sintetizan aportes, limitaciones y líneas futuras de investigación y mejora continua.

1.2. Planteamiento del Problema

1.2.1. Descripción de la Problemática

La voladura es una de las operaciones unitarias más relevantes en el proceso de extracción minera, y su desempeño está estrechamente vinculado a la perforación, un proceso previo esencial. El principal objetivo de la voladura es obtener una fragmentación adecuada del macizo rocoso, generando fragmentos de tamaño óptimo para las fases posteriores de carguío, acarreo y chancado. Es fundamental que las voladuras no solo logren una fragmentación eficiente, sino que también aseguren un apilamiento adecuado para los equipos de carguío y minimicen el daño al entorno, preservando la estabilidad del talud y garantizando la seguridad de los trabajadores.

A medida que las operaciones mineras a tajo abierto se profundizan, los desafíos asociados se incrementan tanto en cantidad como en complejidad. Esto ha llevado a la minería a adaptarse y adoptar nuevas tecnologías disponibles en el mercado para solucionar los

problemas emergentes. La voladura no es ajena a este proceso de adaptación. La creciente demanda mundial de metales, impulsada por los avances tecnológicos, obliga a las operaciones mineras a realizar voladuras en macizos rocosos más competentes, lo que requiere un cambio hacia tecnologías explosivas más avanzadas, dejando atrás las mezclas explosivas tradicionales como el ANFO. Este cambio busca obtener mejores resultados en términos de fragmentación y tasa de excavación (dig rate).

Si bien la mezcla explosiva es un factor determinante en los resultados de la fragmentación, el material de taco juega un papel crucial en la retención de energía explosiva, lo que mejora el rendimiento de la columna explosiva y, por ende, la fragmentación resultante. La optimización de estos procesos es esencial para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos en las operaciones mineras, lo cual es clave para mantener la competitividad y la sostenibilidad a largo plazo.

1.2.2. Formulación del Problema

1.2.2.1. Problema General.

¿La mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 mejora la fragmentación en zona mineralizada en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala?

1.2.2.2. Problemas Específicos.

P.E.1. ¿Cómo comparar los resultados de fragmentación obtenidos con la implementación de la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 con respecto a la mezcla explosiva H.A. Quantex 73 en zona mineralizada de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala?

P.E.2. ¿Cuál es la influencia positiva de los retenedores de energía en la reducción de fragmentación del macizo rocoso en la zona mineralizada de fase 05 en Unidad Minera Toquepala?

P.E.3. ¿Cuál es el incremento de la productividad de las palas eléctricas mediante la optimización de la fragmentación en zona mineralizada de fase 05 en Unidad Minera Toquepala?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Optimizar la fragmentación en zona mineralizada aplicando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala.

1.3.2. Objetivos Específicos

O.E.1. Comparar los resultados de fragmentación obtenidos con la implementación de la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 con respecto a la mezcla explosiva H.A. Quantex 73 en zona mineralizada de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala.

O.E.2. Evaluar la influencia positiva de los retenedores de energía en la reducción de fragmentación del macizo rocoso en la zona mineralizada de fase 05 en Unidad Minera Toquepala.

O.E.3. Determinar el incremento de la productividad de las palas eléctricas mediante la optimización de la fragmentación en zona mineralizada de fase 05 en Unidad Minera Toquepala.

1.4. Importancia y Alcance de la Investigación

La presente investigación posee una relevancia fundamental no solo en el ámbito minero nacional, sino también en la modernización de las prácticas en la minería global. En un contexto donde la eficiencia operativa y la reducción de costos son factores clave, este estudio se presenta como una valiosa contribución para la optimización de los procesos de fragmentación en la Unidad Minera Toquepala, ubicada en una de las regiones más

productivas de Perú. La investigación se centra en la implementación de tecnologías innovadoras, tales como la mezcla explosiva avanzada Heavy Anfo Fortis Extra-70, y la introducción de materiales de taco como la gravilla y el retenedor de energía Conigass. Estas tecnologías tienen el potencial de transformar el proceso de voladura, logrando una fragmentación más eficiente y controlada del macizo rocoso, lo que conlleva beneficios directos tanto en la mejora de las operaciones mineras como en la sostenibilidad a largo plazo de la actividad minera.

Más allá de la mejora de la fragmentación, este estudio subraya cómo una fragmentación más fina, medida mediante el percentil P80, facilita el manejo del material extraído. Estos avances no solo incrementan la productividad de los equipos de excavación, como las palas eléctricas, sino que también permiten una significativa reducción de costos operativos al disminuir la necesidad de procesos secundarios, como el chancado adicional. En este sentido, la investigación se posiciona como un instrumento clave para la mejora continua en la minería a cielo abierto, un sector que enfrenta retos constantes relacionados con la eficiencia operativa y la competitividad global.

Desde una perspectiva práctica, los resultados de este estudio tienen el potencial de generar un impacto inmediato en la productividad de la Unidad Minera Toquepala. A través de la combinación específica de explosivos y materiales de taco, se busca no solo optimizar la fragmentación, sino también incrementar la tasa de excavación (Dig Rate), que es un indicador esencial de la eficiencia operativa. Los datos obtenidos en esta investigación proporcionan evidencia clara de cómo la optimización de la fragmentación puede reducir los tiempos de ciclo, mejorar la utilización de los equipos de extracción y, como consecuencia, aumentar la rentabilidad del proyecto minero.

Teóricamente, esta investigación aporta valiosos conocimientos al campo de la ingeniería minera, especialmente en lo relacionado con la optimización de los procesos de

voladura. Aunque el uso de explosivos es una práctica común en la minería, la introducción de combinaciones específicas de explosivos avanzados y materiales de retención de energía ha sido poco explorada en contextos geológicos particulares, como el de la Unidad Minera Toquepala. Así, este estudio contribuye al conocimiento académico al examinar cómo las propiedades físicas y químicas de los explosivos, junto con los accesorios utilizados, influyen directamente en la fragmentación y en la eficiencia global de las operaciones mineras. Por tanto, esta investigación no solo ofrece soluciones prácticas para la industria, sino que también expande las fronteras del conocimiento sobre voladura y su aplicación en la minería moderna.

El alcance de esta investigación trasciende la mejora operativa en una unidad minera específica. La metodología empleada y los resultados obtenidos pueden ser replicados en otros contextos mineros, tanto a nivel nacional como internacional, constituyendo una base sólida para la optimización de las operaciones mineras en regiones con condiciones geológicas y operativas similares. Esta replicabilidad convierte al estudio en un referente valioso para la industria minera, proporcionando una metodología práctica y eficiente que podrá ser adoptada y adaptada en futuros proyectos mineros.

1.5. Limitaciones de la Investigación

A pesar de la rigurosidad con la que se ha llevado a cabo este estudio, existen limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados y su aplicabilidad en otros contextos. Los hallazgos obtenidos están profundamente ligados a las características geológicas específicas de la Unidad Minera Toquepala. Debido a que las condiciones geológicas y mineralógicas varían significativamente entre diferentes yacimientos, los resultados de esta investigación pueden no ser completamente extrapolables a otros depósitos con formaciones rocosas o condiciones geotécnicas diferentes. Aunque los datos proporcionan una base sólida, su aplicabilidad en contextos geológicos distintos debe considerarse con precaución.

Además, dado que el estudio se realizó en un entorno de minería en operación, uno de los principales desafíos fue el control de las variables externas, como las condiciones climáticas cambiantes y las variaciones en el equipo de perforación y maquinaria utilizada. Aunque se implementaron rigurosos protocolos para minimizar estos factores, la naturaleza dinámica de las operaciones mineras limita el control absoluto sobre todos los elementos que podrían haber influido en los resultados obtenidos.

Por otro lado, la medición de la fragmentación se realizó utilizando tecnología avanzada y software especializado, lo que permitió obtener alta precisión en los datos. Sin embargo, en situaciones de fragmentación fina, donde las diferencias entre las partículas son mínimas, las herramientas de medición pueden estar sujetas a pequeñas variaciones, lo que introduce un grado de incertidumbre en la interpretación de los datos, especialmente en el análisis de tamaños de fragmentos cercanos.

Asimismo, el tiempo limitado para evaluar los efectos de las mezclas explosivas y los materiales de taco restringió la capacidad de realizar un análisis a largo plazo. La investigación se basó en un período determinado de estudio, lo que impide realizar una evaluación más exhaustiva de los impactos persistentes en el rendimiento de la voladura durante un ciclo operativo completo.

Finalmente, aunque los resultados obtenidos han mostrado mejoras significativas en la fragmentación y en la productividad de las palas eléctricas, la generalización de estos hallazgos a otras minas debe hacerse con cautela. Las características geológicas y operativas de cada mina son únicas, por lo que las soluciones propuestas deben ser adaptadas a las condiciones particulares de cada operación minera antes de ser implementadas de manera más amplia.

CAPÍTULO II

MARCO TÉORICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

La optimización de la fragmentación en las operaciones de voladura es un aspecto clave en la minería moderna debido a su impacto directo en la eficiencia de los procesos subsecuentes, tales como el carguío, acarreo y chancado. Diversos estudios han demostrado que una fragmentación controlada no solo mejora la productividad de las operaciones, sino que también contribuye significativamente a la reducción de costos operativos y ambientales. Por ejemplo, Yaranga (2021) realizó un análisis realizado en una mina a tajo abierto en Perú, donde destacó que la implementación de técnicas de voladura controlada resultaba en una mejora considerable en la fragmentación del mineral y en la eficiencia de los equipos de carguío.

Del mismo modo, en una investigación realizada por Mantilla (2021) se resalta la importancia de evaluar el grado de fragmentación del mineral producido por las voladuras y cómo este factor influye en el rendimiento de los equipos de carguío. Este estudio, de carácter analítico, con un enfoque descriptivo y explicativo, permitió observar cómo los cambios en la fragmentación se asociaron con mejoras en los parámetros operacionales, optimizando el rendimiento de los equipos utilizados en la mina.

La investigación de Ríos (2019), que tuvo como escenario la Unidad Minera Toquepala, analizó el impacto de diferentes combinaciones de mezclas explosivas y materiales de taco sobre la fragmentación del macizo rocoso y la productividad de los equipos de excavación. Los resultados mostraron que algunas combinaciones mejoraron notablemente tanto la fragmentación como la tasa de excavación (dig rate), lo que subraya la importancia de seleccionar adecuadamente las mezclas explosivas y los materiales de taco para optimizar las operaciones de voladura y mejorar la eficiencia de las operaciones mineras.

De manera similar, el estudio de Salinas & Ninahuanca (2022) profundizó en el análisis de las variables operacionales de perforación y voladura en minas a tajo abierto, concluyendo que el control adecuado de la energía explosiva en las voladuras contribuyó a una fragmentación más fina, reduciendo la sobrerotura y mejorando la eficiencia de los equipos de carguío. Este control de la voladura no solo optimizó el rendimiento de los equipos, sino que también permitió una reducción en los costos operativos al minimizar la necesidad de procesos secundarios como el chancado adicional.

Por otro lado, el estudio realizado por Sánchez & Paredes (2023) en Minera Chinalco Perú S.A. se centró en el análisis del dig rate y el grado de fragmentación, considerando diversas combinaciones de mallas de perforación y voladura. Su investigación mostró una mejora significativa en la tasa de excavación, vinculada al control de variables como la dureza del macizo rocoso, la granulometría y el factor de potencia. La implementación de accesorios de voladura, como las bolsas de aire (taponex), también contribuyó a una disminución de los costos de perforación y voladura, lo que optimizó el rendimiento de los equipos de carguío y redujo los costos operacionales.

Finalmente, el estudio de Márquez (2024) evaluó la aplicación de gravilla como material de taco en la voladura de la zona mineralizada fase 04 de la Unidad Minera Toquepala. Los resultados mostraron que el uso de este material favoreció una fragmentación homogénea y de

tamaño adecuado para las operaciones de carguío, lo que aumentó la capacidad de los equipos en un 15% y redujo el desgaste de la maquinaria asociada al proceso de excavación.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Operaciones Unitarias

Las operaciones unitarias son los distintos pasos o procesos específicos que se realizan dentro de la cadena de producción en una mina a tajo abierto. Estas operaciones son esenciales para la extracción y procesamiento del mineral, y cada una de ellas juega un papel crucial en alcanzar el objetivo final de obtener el mineral de manera eficiente y rentable.

2.2.1.1. Perforación.

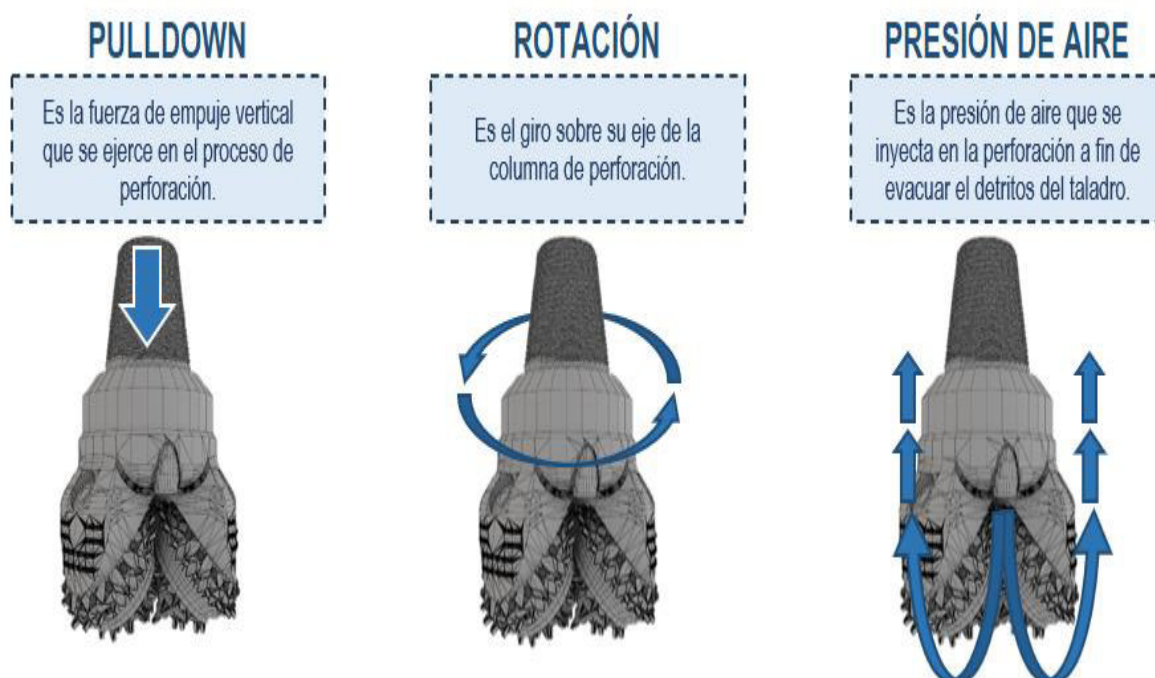
La perforación del macizo rocoso constituye la etapa inicial en el proceso de explotación minera. Su propósito principal es crear pozos o taladros en el terreno, asegurando que estos tengan una disposición y geometría apropiadas. Estos taladros son fundamentales, ya que en ellos se colocarán las cargas explosivas junto con sus respectivos iniciadores.

Este proceso tiene múltiples objetivos, entre los que se incluyen la extracción de mineral, la voladura, la recolección de muestras geológicas y el monitoreo de las condiciones del terreno, lo cual facilita la toma de decisiones para una adecuada fragmentación del macizo rocoso y la optimización de la extracción de los minerales.

La perforación juega un papel crucial, ya que la eficiencia y efectividad de las voladuras dependen en gran medida de la calidad de la perforación realizada. Es esencial respetar los principales parámetros de perforación, tales como el pulldown, la rotación y la presión de aire, adaptados a cada tipo de terreno, con el fin de formar correctamente el taladro y preservar la integridad de los aceros de perforación.

Figura 1

Parámetros de perforación primaria en mina Toquepala



Antes de proceder con la voladura, es fundamental verificar la profundidad de todos los taladros dentro de la malla de perforación. Cada taladro debe estar marcado con una estaquilla que indique el nombre de la malla, el nombre del taladro, la profundidad objetivo, la profundidad real perforada y las condiciones del terreno. En caso de que se encuentren pozos más cortos de lo previsto, se marcarán con un “apache” (una roca encintada) para señalar que es necesario perforar un taladro cercano o corregir el taladro corto. Es crucial dejar el espacio suficiente y claramente señalado para permitir el acceso de una perforadora, garantizando que se cumplan los procedimientos internos establecidos por la mina.

Figura 2

Medición y rotulado de los taladros perforados en mina Toquepala



2.2.1.2. Voladura.

La voladura es una de las etapas fundamentales en el proceso de extracción de minerales, cuyo principal objetivo es lograr una fragmentación óptima del macizo rocoso, produciendo fragmentos de tamaño adecuado para facilitar el minado del material volado. Sin embargo, si los resultados obtenidos no cumplen con las expectativas, se hace necesario realizar extracciones adicionales y ejecutar voladuras complementarias, lo que conlleva a un aumento en los costos operativos.

Cada voladura se planifica meticulosamente antes de su ejecución, considerando factores cruciales como un primado adecuado, el carguío correcto, el tapado y una secuencia de detonación precisa de los taladros.

a) Primado

El proceso de primado consiste en la colocación de uno o más detonadores, ya sean electrónicos o no electrónicos, dentro del explosivo (booster), procedimiento que se realiza tras haber efectuado las verificaciones necesarias en el campo. Es crucial garantizar que los detonadores queden correctamente ubicados dentro del booster para evitar la ocurrencia de tiros cortados. Una vez que los detonadores están fijados en el booster, se procederá a introducir la prima a través del centro del taladro, asegurándose de evitar cualquier contacto con las paredes del agujero y posicionándola a la profundidad estipulada.

Los tubos de los detonadores deben estar firmemente sujetos en el centro de un taco o roca, los cuales se colocarán en la boquilla del taladro con el fin de evitar que la línea electrónica y/o no electrónica se introduzca dentro del taladro. En caso de que sea necesario dejar accesorios en el suelo, es esencial que estos se ubiquen en áreas claramente señalizadas y protegidas, alejadas del tránsito de vehículos que puedan estar circulando dentro de la malla de voladura.

Figura 3

Primado y su colocación en el interior del taladro en mina Toquepala

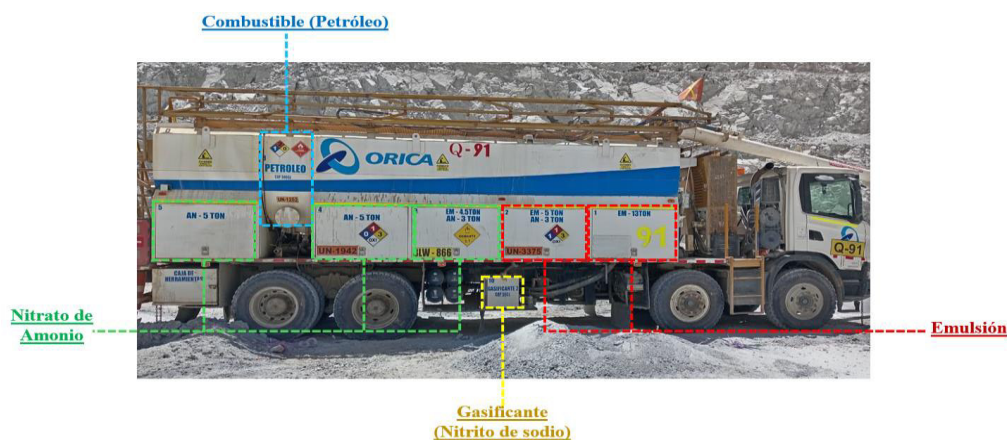


b) Carguío de taladros con mezcla explosiva

Los camiones fábrica tienen la responsabilidad de transportar las materias primas desde los silos hasta la malla de voladura, donde se mezclarán según las proporciones establecidas antes de proceder con el carguío de los taladros perforados. Además, estos camiones deben indicar de manera precisa la cantidad de explosivo necesario para el carguío, siguiendo las directrices del plano de amarre y la dirección de carga.

Figura 4

Compartimentos del camión fábrica de Orica



Es fundamental llevar a cabo un control de calidad exhaustivo de la mezcla explosiva, así como verificar la calibración de las herramientas y equipos que se utilizarán en el proceso. Esto asegura que se cumplan los estándares necesarios y que la mezcla explosiva sea efectiva.

Figura 5

Proceso de carguío de taladros con mezcla explosiva



c) Tapado de taladros

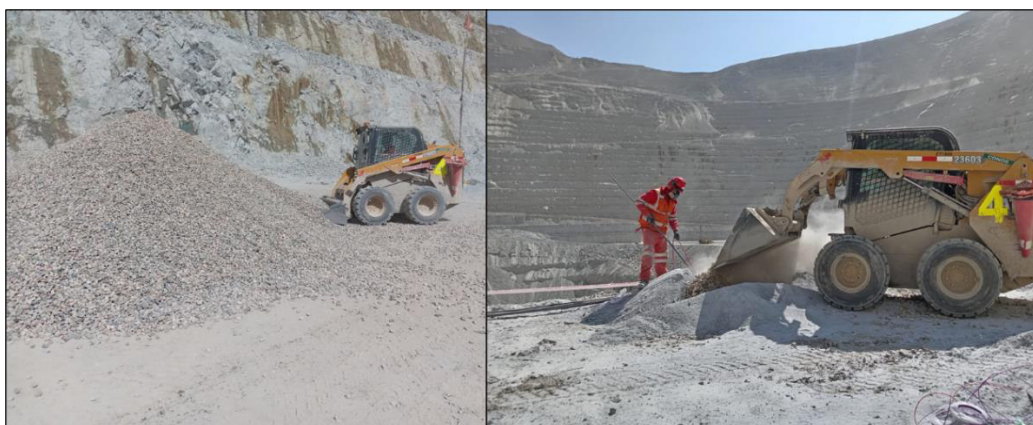
Una vez que los pozos están llenos con explosivo, es crucial sellarlos correctamente para asegurar que la carga esté bien confinada. Para este propósito, se emplearán materiales como el detritus (producto de la perforación) o la gravilla, que se utilizarán como material de taco.

Durante el proceso de tapado, es necesario cubrir las líneas electrónicas y no electrónicas que descienden por el taladro con un tubo protector para evitar cortes que podrían

resultar en tiros cortados. Además, el material utilizado debe tener una granulometría, densidad y distribución apropiadas para garantizar tanto la eficiencia como la seguridad en la operación. En este proceso, es esencial utilizar equipos versátiles y adecuados, como los bobcat, para asegurar que la tarea se realice de manera efectiva.

Figura 6

Proceso de tapado de taladros con material gravilla



d) Conexión y testeo de los detonadores electrónicos

Este proceso consiste en conectar los cables de los detonadores a un sistema de iniciación que permitirá configurarlos según el tiempo y la secuencia de voladura establecidos.

Los testeos se realizan para verificar que todos los cables y conectores estén correctamente instalados y asegurados. Esta prueba eléctrica tiene como objetivo asegurar el correcto funcionamiento de cada detonador y detectar cualquier posible anomalía que pueda surgir durante la instalación.

Figura 7

Proceso de conexión y testeo de detonadores electrónicos en campo



e) Programación y detonación del proyecto de voladura

La programación consiste en la configuración precisa de los detonadores electrónicos para controlar el tiempo y la secuencia de detonación, con el objetivo de garantizar la seguridad en la operación, reducir el impacto de las vibraciones sobre la estabilidad del talud o estructura, y mejorar la eficiencia de la voladura.

Una vez realizada la detonación, se lleva a cabo una verificación en el campo para asegurar que no existan anomalías en la zona de voladura, como tiros quedados. Además, se monitorean posibles efectos secundarios, como vibraciones y emisiones de gases nitrosos, para salvaguardar la seguridad de los trabajadores y mitigar el impacto ambiental. Es crucial evaluar los resultados de la voladura en términos de fragmentación, con el fin de implementar mejoras continuas en los proyectos de voladura subsecuentes.

Figura 8

Proceso de programación y detonación del proyecto de voladura



2.2.1.3.Carguío.

El proceso de carguío en minería consiste en cargar el material fragmentado (ya sea mineral o desmonte) desde el frente de minado hasta la tolva del equipo de acarreo, con el fin de transportarlo hacia los destinos correspondientes, como la chancadora de mineral, la chancadora lixiviable, el stock de mineral o el botadero de desmonte.

Este proceso es realizado por diversos equipos, tales como palas, cargadores frontales, excavadoras, retroexcavadoras, dragalinas, entre otros.

Para garantizar la eficiencia en el carguío, es fundamental que se cumplan las siguientes condiciones tanto en el terreno como en el material volado:

El material fragmentado debe presentar un tamaño de partícula (P80) apropiado que permita una carga eficiente y favorezca la maniobrabilidad del equipo de carguío.

El material fragmentado debe contar con un esponjamiento y desplazamiento adecuados para facilitar el trabajo del equipo de carguío.

El material debe tener una composición uniforme en términos de tipo de material, tamaño y dureza, lo que permite una carga más eficiente.

El material volado no debe estar excesivamente apelmazado o compactado (material amarrado), ni el toe del frente debe estar duro, ya que esto dificultaría el proceso de carguío. Un buen esponjamiento, con fragmentos sueltos y separables, facilita el trabajo de la pala.

El material volado debe estar dispuesto de manera que sea fácilmente accesible para el equipo de carguío, asegurando una operación fluida.

El terreno alrededor del área de carguío debe ser estable y adecuado para permitir el movimiento seguro y eficiente de las palas y otros equipos.

El material volado debe estar libre de riesgos que puedan dañar el equipo o poner en peligro la seguridad de los operadores, como rocas grandes o fragmentos explosivos no detonados.

Figura 9

Carguío de material fragmentado hacia los equipos de acarreo



2.2.1.4.Acarreo.

El acarreo es el proceso que consiste en transportar el material extraído, ya sea mineral o desmonte, desde el frente de carguío hasta su destino de descarga, que puede ser la chancadora de mineral, la chancadora lixiviable, el stock de mineral o el botadero de desmonte.

Es crucial que la carga transportada esté correctamente centrada, con la carga completa y distribuida de manera adecuada en la tolva del camión minero para obtener mejores resultados en los siguientes aspectos:

- Minimiza el riesgo de accidentes, especialmente en terrenos irregulares o durante las maniobras en las zonas de carga y descarga.

Reduce el riesgo para el personal presente en las vías de acarreo y en las áreas de descarga de material.

Aumenta la estabilidad del camión minero durante el transporte del material, garantizando un movimiento más seguro en las vías de acarreo.

Disminuye el desgaste irregular de los neumáticos y componentes de la suspensión del equipo, lo que contribuye a un ahorro económico significativo.

Permite cargar más material en cada viaje, mejorando la eficiencia general del equipo de acarreo.

Optimiza la maniobrabilidad del camión minero, lo que reduce el tiempo de transporte y mejora la fluidez del tráfico de camiones en la vía de acarreo.

Minimiza el desprendimiento de material de la tolva durante el transporte, lo que previene cuellos de botella y reduce la necesidad de utilizar más equipos para limpiar las vías de acarreo.

Figura 10

Acarreo de material fragmentado hacia su destino



2.2.2. Fly Rock

Fly Rock hace referencia a la proyección de fragmentos de roca a distancias mayores de las previstas durante una voladura minera, lo cual puede generar riesgos tanto para el personal

como para los equipos cercanos. Este fenómeno ocurre cuando la energía liberada en la detonación no se distribuye de forma controlada, y los fragmentos de roca son expulsados fuera de la zona de seguridad. Para evitar estos riesgos, se establecen normas de seguridad que incluyen la evacuación de los trabajadores fuera de un radio de 500 metros desde el punto de disparo. Además, el control del tiempo de retardo entre los disparos es crucial para minimizar la posibilidad de fly rock. Si el tiempo de retardo entre las filas de perforación es demasiado corto, la energía de la detonación puede proyectar los fragmentos verticalmente, aumentando la posibilidad de que las rocas sean lanzadas al aire (Romero, 2016).

2.2.3. Fragmentación

La fragmentación por voladura es el proceso mediante el cual se emplea un explosivo para romper y reducir el tamaño de las rocas en operaciones mineras o de construcción. Este procedimiento implica una serie de fenómenos físicos y mecánicos, incluyendo la liberación de energía explosiva, la propagación de ondas de choque y presión, y la respuesta de la roca circundante. El objetivo principal de la fragmentación por voladura es generar rocas de tamaños adecuados para su manipulación y procesamiento, lo que optimiza tanto la eficiencia operativa como la reducción de costos. La ejecución adecuada de la voladura tiene un impacto directo en el tamaño final de los fragmentos, lo cual influye considerablemente en las etapas posteriores, como el carguío, transporte y molienda del material.

El proceso de fragmentación de la roca durante la voladura es un mecanismo complejo y rápido, influenciado por diversos factores interrelacionados. Entre ellos se encuentran las características geomecánicas del macizo rocoso, las propiedades del explosivo, la distribución de la energía del mismo y la geometría de la voladura, que incluyen parámetros como el burden, el espaciamiento y el tamaño de los taladros, así como las condiciones del terreno (Carhuancho, 2011).

2.2.3.1. Índice P80 en fragmentación.

El índice P80 es un parámetro esencial para evaluar la fragmentación de rocas, ya que indica el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80% del material fragmentado, mientras que el 20% restante corresponde a fragmentos de mayor tamaño. Este valor estadístico es comúnmente utilizado en minería y en industrias que requieren procesos de trituración y molienda, ya que proporciona información valiosa sobre la distribución de tamaños en el material fragmentado, lo que facilita la optimización de dichos procesos.

Conocer el valor de P80 en la voladura de roca es fundamental, ya que permite evaluar la calidad de la fragmentación obtenida tras la detonación, lo que influye directamente en las etapas posteriores del proceso minero. Además, su uso contribuye a mejorar la eficiencia operativa de la mina, reduce el desgaste de los equipos, disminuye los costos y permite una planificación más precisa de las futuras voladuras.

2.2.4. *Dig Rate*

El dig rate es un indicador clave que mide la velocidad a la que un equipo de carguío puede extraer y trasladar material, generalmente expresado en toneladas por hora (t/h) o metros cúbicos por hora (m³/h). Este parámetro refleja la productividad del equipo, cuantificando la cantidad de material que puede cargar desde el frente de trabajo hasta los equipos de acarreo en un tiempo determinado.

El dig rate está influenciado por una serie de factores clave, entre los cuales se incluyen:

Capacidad del balde del equipo de carguío.

Duración del ciclo de trabajo, que abarca las fases de cargar, levantar, girar y descargar.

Condiciones del terreno y del material, tales como el tipo de roca, el tamaño de los fragmentos y el nivel de humedad.

Destreza del operador, quien debe ejecutar los movimientos de manera eficiente.

Estado general del equipo, que depende de su mantenimiento y rendimiento operativo.

Un dig rate más alto indica que el equipo es capaz de mover una mayor cantidad de material en menos tiempo, lo que se traduce en una mejora significativa en la eficiencia de las operaciones mineras.

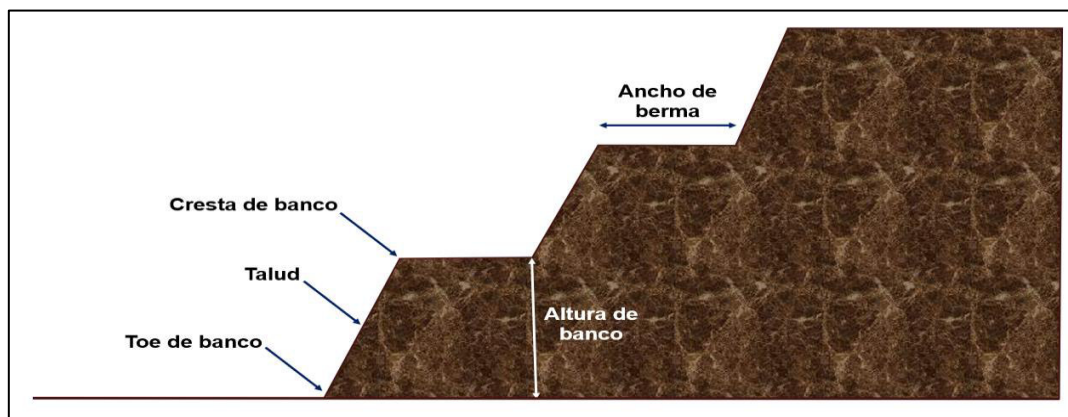
$$\text{Dig rate} = \frac{\text{Material minado por el equipo de carguío}}{\text{Tiempo efectivo de carguío de material}}$$

2.3. Definición de Términos

Banco.- Los bancos en una mina a cielo abierto son cortes horizontales que se realizan en diferentes niveles, donde se lleva a cabo la extracción del mineral. Los bancos de seguridad deben tener un ancho suficiente para evitar que las rocas provenientes de niveles superiores caigan al área de trabajo, garantizando la seguridad de los operarios y la estabilidad de la excavación.

Figura 11

Componentes de un banco



Altura de banco.- Distancia vertical entre dos bancos adyacentes.

Taladro.- Es un agujero cilíndrico creado por perforación, diseñado específicamente para albergar una carga explosiva de acuerdo con un plan de voladura previamente establecido.

Explosivo.- Un explosivo es un material que puede presentarse en estado sólido o líquido y que, al ser activado, produce una liberación considerable de energía. Esta liberación se manifiesta principalmente a través de la emisión de calor y la generación de ondas de choque.

Factor de Potencia.- Este factor mide la efectividad de una carga explosiva para generar la energía requerida para lograr una fragmentación adecuada del macizo rocoso. Se utiliza para optimizar tanto la cantidad como el tipo de explosivos empleados en una voladura, asegurando así una mayor eficiencia en el proceso.

Burden.- Es la distancia mínima que existe desde el eje de un taladro hasta la cara libre del macizo rocoso.

Espaciamiento.- Es la distancia existente entre los taladros de una misma fila de perforación.

Sobreperforación.- Es la distancia adicional de longitud en el taladro, que excede la medida del diseño original.

Malla de perforación.- Es la disposición de un conjunto de taladros perforados en un área específica, con ubicaciones, direcciones e inclinaciones determinadas según el diseño de la voladura.

Taco.- Es un material inerte utilizado para sellar el extremo de un taladro durante el proceso de voladura. Su función principal es retener y redirigir la energía explosiva hacia el macizo rocoso, optimizando así la fragmentación de la roca.

Material de Taco.- El material de taco se emplea para sellar el extremo del taladro después de la colocación de la carga explosiva, con el propósito de confinar la energía liberada durante la detonación.

Retenedor de Energía.- Es un dispositivo o material utilizado para conservar la energía liberada durante la detonación, garantizando que esta se transfiera de manera eficiente hacia el macizo rocoso.

Fly Rocks.- Son fragmentos de roca que se expulsan de manera descontrolada durante el proceso de voladura. Estos fragmentos representan un peligro para la seguridad de los trabajadores y pueden comprometer la estabilidad de las estructuras cercanas.

P80 (Percentil 80).- Es un indicador utilizado para evaluar la fragmentación, que mide el tamaño de las partículas resultantes de una voladura. El P80 se define como el tamaño de partícula en el cual el 80% de las muestras son más pequeñas. Este valor es esencial para determinar la eficiencia de la voladura, ya que refleja la homogeneidad del tamaño de los fragmentos y su adecuación para los procesos posteriores de carguío y procesamiento.

Dig Rate.- Es una medida que evalúa la eficiencia operativa de los equipos de excavación, como las palas eléctricas, basada en el tonelaje movido por hora. El Dig Rate es un indicador clave para determinar la productividad de una operación minera, ya que está directamente vinculado a la calidad de la fragmentación obtenida durante las voladuras.

Gravilla.- Es un material inerte, compuesto principalmente por partículas de tamaño medio, que se emplea en los procesos de voladura como material de taco. Su función principal es retener la energía explosiva, facilitando su transferencia eficiente hacia el macizo rocoso, lo que optimiza la fragmentación y controla los efectos secundarios de la detonación. La granulometría de la gravilla es un factor para garantizar su efectividad como material de taco.

Velocidad de Detonación (VOD).- Es la rapidez con la que la onda explosiva se desplaza a través del explosivo. La velocidad de detonación juega un papel clave en la cantidad de energía que se libera y cómo se distribuye durante la voladura. Un VOD elevado facilita una fragmentación más rápida y eficiente del material rocoso, mientras que un VOD bajo puede reducir la efectividad de la voladura, afectando negativamente los resultados.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Las Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis General*

La aplicación de la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 mejora la fragmentación en zona mineralizada en los proyectos de voladura primaria de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala.

3.1.2. *Hipótesis Específicos*

H.E.1. Las voladuras con Heavy Anfo Fortis Extra-70 presentan fragmentación más fina que las realizadas con Heavy Anfo Quantex-73 en zona mineralizada de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala.

H.E.2. El uso de retenedores de energía en la mezcla explosiva reduce significativamente el tamaño de fragmentación del macizo rocoso en la zona de mineralización de fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.

H.E.3. La optimización de la fragmentación en la zona mineralizada de la Fase 05 mediante H.A. Fortis Extra-70 y retenedores de energía incrementa la productividad de las palas eléctricas en las operaciones de excavación de la Unidad Minera Toquepala.

3.2. Las Variables

3.2.1. Variable Independiente

La mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70 en conjunto con los materiales de taco y accesorios para la retención de energía utilizada en los proyectos de voladura primaria en zona de mineral de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala.

3.2.2. Variable Dependiente

La fragmentación del macizo rocoso (tamaño de fragmentación P80) y la productividad de las palas eléctricas (di grate) en la zona mineralizada de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala.

3.3. Operacionalización de Variables

Tabla 1

Matriz de Operacionalización de Variables.

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Sub-Dimensiones	Indicadores	Métodos de Medición
VI: Variable Independiente.	Mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70.	Combinación de explosivos formulada para optimizar la fragmentación del macizo rocoso en procesos de voladura, mejorando la eficiencia en la extracción minera.	Características químicas del explosivo.	Composición del Heavy Anfo Fortis Extra-70.	Relación entre nitrato de amonio y emulsión.	Composición de la mezcla explosiva.
	Materiales de Taco y Retenedores de Energía (Conigass y Gravilla).	Materiales usados en la voladura para contener la energía liberada, favoreciendo una mejor transmisión de la energía hacia la roca, reduciendo la dispersión y optimizando la fragmentación.	Propiedades físicas del material de taco y retenedor de energía.	Composición del material de taco y retenedor de energía.	Densidad del material de taco y retenedor de energía.	Granulometría y densidad del material de taco y retenedor de energía.
	Fragmentación del Macizo Rocos (P80).	Medida de la distribución de tamaños de los fragmentos resultantes de la voladura, evaluada a través del percentil P80, indicando la eficiencia de la voladura.	Tamaño de fragmentación.	P80 (percentil 80 de la distribución de tamaños de partículas).	Promedio de tamaño de fragmentos (cm).	P80 (cm).
VI: Variable Dependiente.	Productividad de las Palas Eléctricas (Dig Rate).	Indicador de la eficiencia en la carga del material excavado, reflejando la tasa de excavación del material mineralizado por las palas eléctricas, en toneladas por hora (t/h).	Rendimiento de los equipos de excavación.	Tiempo de ciclo de carga.	Tonelaje por hora (t/h).	Tasa de excavación promedio.

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de Estudio

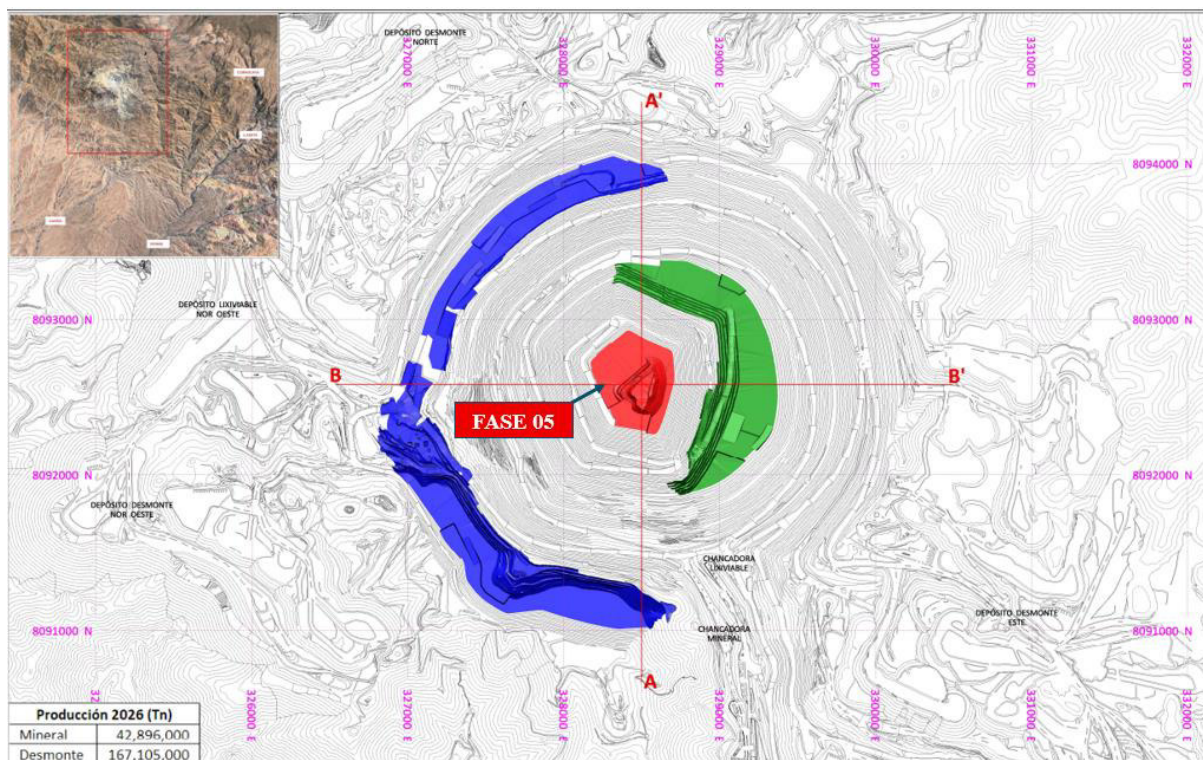
El área de estudio para la optimización de la fragmentación en la zona mineralizada de la Unidad Minera Toquepala se limitó específicamente a la zona de mineral de la fase 5, sector noroeste, en los niveles 2830 y 2845. En esta área, se realizaron los ensayos correspondientes utilizando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70, gravilla para material de taco y Conigass como retenedor de energía.

4.1.1. Ubicación

La fase 05 de la Unidad Minera Toquepala se encuentra en el distrito de Ilabaya, en la provincia de Jorge Basadre, en el departamento de Tacna, al sur de Perú. Su ubicación exacta está determinada por las coordenadas geográficas UTM 8092500 N y 328500 E, que definen con precisión su posición en el territorio.

Figura 12

Ubicación geográfica de la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala



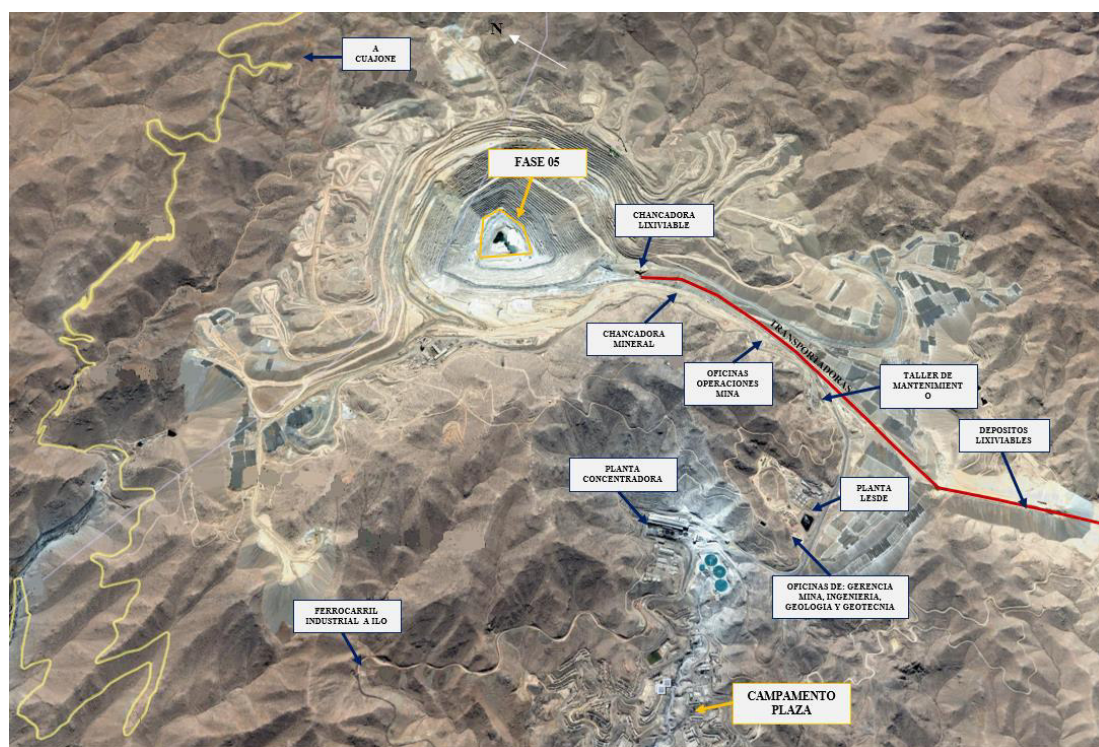
4.1.2. Accesibilidad

El acceso a la zona de producción de fase 05 de la Unidad Minera Toquepala se realiza por vía terrestre a través de la carretera Panamericana Sur, hasta llegar al punto denominado Camiara. Desde allí, parte una carretera afirmada que se extiende por aproximadamente 72 km, conduciendo directamente al campamento minero de Toquepala, a la mina y a la fase de minado.

Además, se dispone de una línea férrea de 170 km que conecta con el Puerto de Ilo, utilizada para el transporte de concentrados hacia la fundición y la refinería. La empresa también cuenta con un aeropuerto de uso exclusivo para facilitar las operaciones.

Figura 13

Accesibilidad a la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala



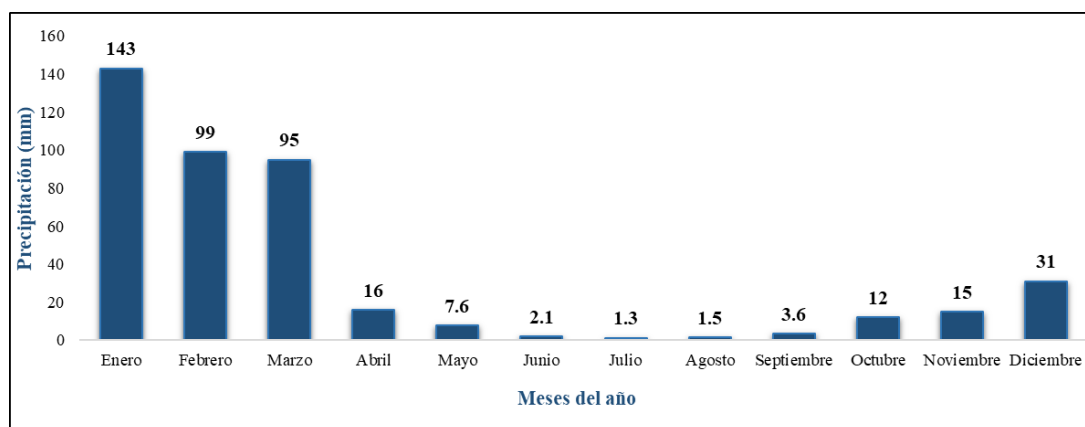
Nota. Recuperado del departamento de Geología de SPCC.

4.1.3. Clima

El clima en la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala es característico de las zonas altas del sur de Perú, donde predomina un ambiente desértico durante la mayor parte del año. Sin embargo, entre diciembre y marzo, se presentan lluvias y neblina densa, lo que reduce la radiación solar debido a la nubosidad y las lloviznas. Durante el resto del año, la exposición al sol es más intensa. La región recibe un promedio mensual de 36 mm de lluvia, con temperaturas que fluctúan entre los 33 °C como máxima y 0 °C como mínima.

Figura 14

Precipitación media por mes en la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.



4.1.4. Geología Regional y Local

El yacimiento que alberga la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala se formó hace aproximadamente 70 millones de años, durante el periodo Cretácico-Terciario, a raíz de una intensa actividad volcánica caracterizada por erupciones de magmas riolíticos y andesíticos. Estos eventos volcánicos dieron lugar a grandes volúmenes de material que se depositaron en capas sucesivas de lava, acumulando un espesor total de 1,500 metros. Este conjunto de capas, conocido como el "Grupo Toquepala", constituye la base geológica de la región, con flujos alternados de riolitas, andesitas y aglomerados que presentan una ligera inclinación hacia el oeste.

Posteriormente, la actividad ígnea se hizo predominantemente epitermal, generando grandes cuerpos de roca fundida que fracturaron y fusionaron las lavas ya enfriadas del "Grupo Toquepala". Estas rocas intrusivas, que forman parte del batolito andino, se originaron en varias fases. A partir de un magma calco-alcalino con composiciones químicas diversas, se formaron distintas rocas, tales como diorita, granodiorita y dacita porfirítica, entre otras.

La actividad tectónica en la región, asociada a la formación de la Cordillera de los Andes, se manifiesta estructuralmente a través de las fallas Incapuquio y Micalaco, que se orientan de noroeste a sureste, y el alineamiento Toquepala. El basamento de Toquepala

experimentó los efectos de los movimientos tectónicos durante la segunda fase de la orogenia andina, conocida como la fase Inca, que ocurrió al final del Eoceno o al inicio del Oligoceno.

La falla Micalaco se formó principalmente por el contacto entre materiales volcánicos e intrusivos, mientras que el alineamiento Toquepala, orientado de norte a sur, se desarrolló como una estructura secundaria vinculada a la falla principal con orientación noroeste-sureste y al levantamiento del bloque ubicado al norte de la falla Micalaco. El cruce de ambas fallas en la zona de la mina generó una amplia área de debilitamiento estructural.

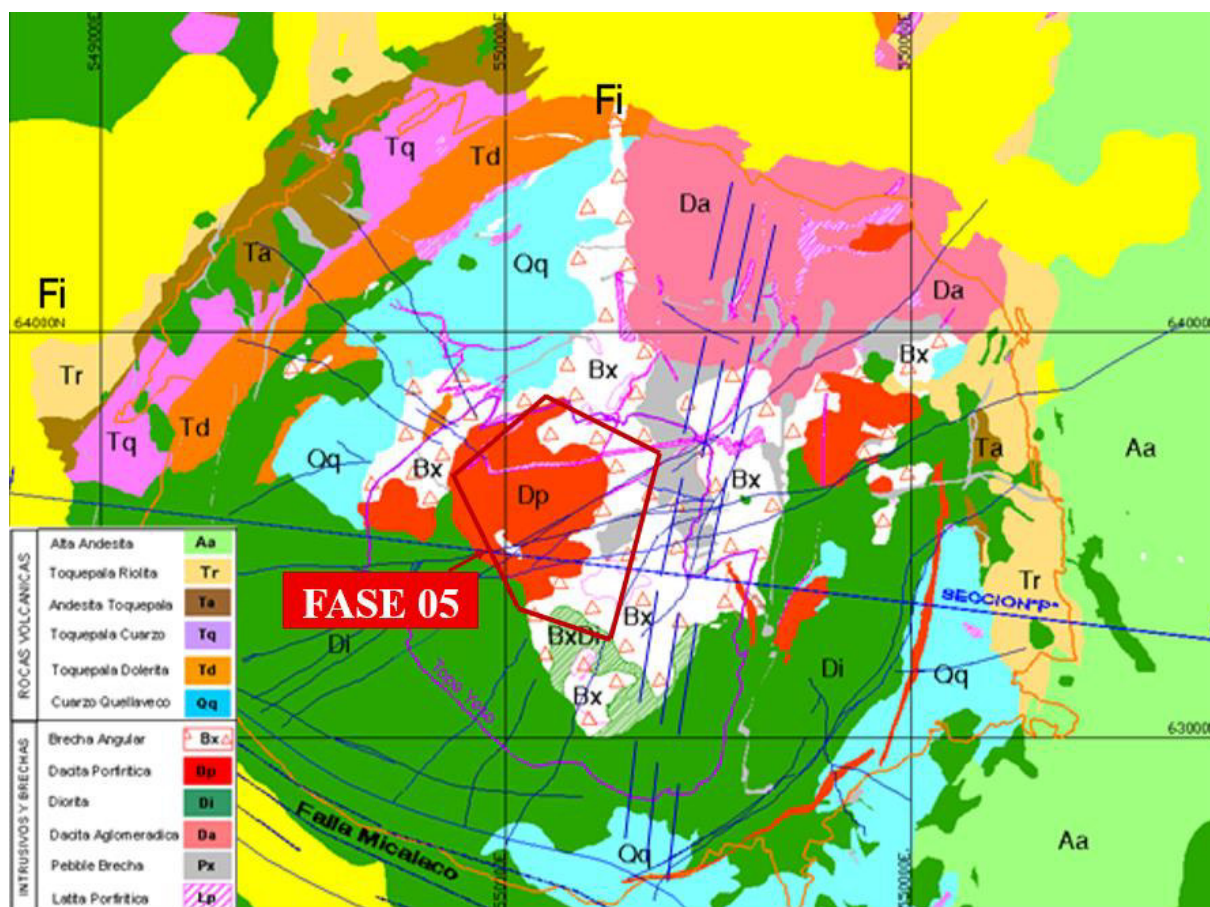
A lo largo de este proceso, los fluidos de alta temperatura generados por la diferenciación del magma atravesaron las rocas presentes, desintegrándolas y modificando su composición química, lo que aumentó su permeabilidad. Estos fluidos aprovecharon las debilidades estructurales de las rocas, provocando alteraciones y mineralización primaria, lo que estabilizó el equilibrio del sistema.

En etapas posteriores, se produjo la intrusión de brechas, como la Chimenea de Brecha, y en las últimas fases de la actividad hidrotermal, se formó una cavidad explosiva en el norte del yacimiento. Esta cavidad fue luego colmada por un magma porfirítico de mineralización débil, que incorporó fragmentos de diversas rocas, formando un aglomerado de dacita.

La fase final de la actividad volcánica se caracterizó por la intrusión de diques de latita porfirítica a lo largo del alineamiento Toquepala. Posteriormente, intensas fases de erosión, vinculadas a cambios en el nivel freático, provocaron la lixiviación de la parte superior de la zona mineralizada, lo que resultó en la acumulación de minerales de cobre en las capas más profundas, formando una zona de enriquecimiento secundario.

Figura 15

Mapa Geológico de la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.



4.1.5. Estratigrafía

A lo largo de los niveles de minado, tanto en desbroce como en producción mineral, en la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala se han identificado flujos de riolitas, andesitas y aglomerados, los cuales forman parte de la formación Quellaveco. Estas formaciones están en discordancia con las rocas volcánicas que componen la serie Toquepala. Por encima de esta última y también en discordancia, se encuentra la Serie Alta, que se caracteriza por flujos volcánicos de riolitas y andesitas, con la presencia ocasional de brechas y aglomerados.

Para el desarrollo de este estudio, se ha determinado que la fase 05 se encuentra dentro de la Serie Pórfido Cuarzófero Quellaveco. A continuación, se detallan las diferentes divisiones litoestratigráficas por las que atravesó la fase 05 durante el proceso de minería.

4.1.5.1. Pórfido de Cuarzo Quellaveco (Qq).

Este pórfido se orienta hacia el noroeste y presenta un suave buzamiento hacia el sur y suroeste, con un plegamiento poco pronunciado. Las formaciones se encuentran expuestas al norte de la Falla Incapuquio, en el distrito de Toquepala, y están formadas por lavas y flujos riolíticos de textura porfirítica, los cuales incluyen fenocristales de cuarzo de hasta 2 mm de diámetro, en su mayoría subredondeados. La exposición regional de estas formaciones es amplia y se evidencia en los depósitos porfiríticos de Toquepala, Quellaveco y Cuajone, donde se encuentran parte de la mineralización económicamente significativa. Generalmente, estas formaciones están afectadas por fases de alteración filica y por la cubierta lixiviada, características comunes de estos depósitos.

4.1.5.2. Serie Toquepala (Terciario Inferior).

Está compuesto por una secuencia de riolitas y andesitas.

a) Dolerita Toquepala (Td)

La Dolerita Toquepala está compuesta por al menos cinco unidades, que incluyen andesitas, aglomerados y una dolerita característica. Esta dolerita sirve como un indicador clave para establecer la posición estratigráfica de los otros componentes del Grupo Toquepala. En la zona de Toquepala, afloran en las áreas circundantes. La descripción incluida en la Columna Estratigráfica Local para esta unidad corresponde a un flujo andesítico altamente erosionado, que posiblemente ha sufrido una intensa alteración filica pero sin presentar mineralización. Además, se han encontrado aglomerados que contienen fragmentos del Pórfido Cuarzófero Quellaveco.

b) Pórfido de Cuarzo Toquepala (Tq)

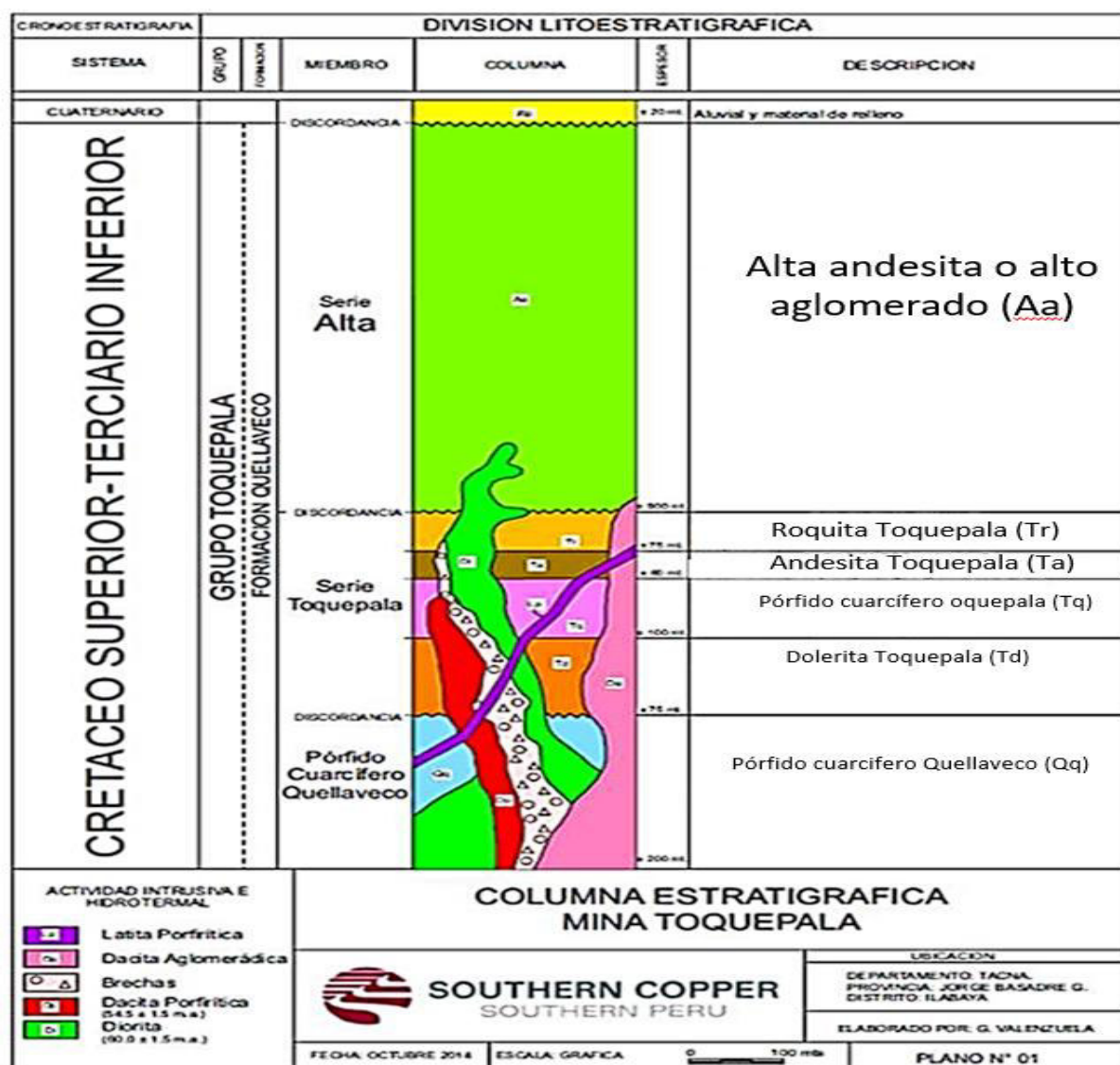
Se localiza por encima de la dolerita y está compuesto por riolita porfirítica. Los afloramientos de este material se extienden desde el sur de Quellaveco hasta la zona de Toquepala.

c) Andesita Toquepala (Ta)

Se caracteriza por la presencia de flujos andesíticos que varían en color desde gris claro hasta oscuro, con una textura afanítica.

Figura 16

Columna Estratigráfica por las que atravesó la fase 05 de Mina Toquepala



4.1.6. Tipos de alteraciones más comunes de la fase 05.

4.1.6.1. Alteración Fílica.

Esta alteración incluye cuarzo, sericita y pirita, y se encuentra principalmente en los intrusivos de dacita y en las brechas en general.

4.1.6.2. Alteración Fílico-potásica.

Está compuesta por biotita, clorita y sericita, y se presenta en los intrusivos de dacita y las brechas.

4.1.7. Mineralización en fase 05.

La mineralización en la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala fue bastante homogénea y se distribuye principalmente de manera vertical. Los minerales de interés económico están presentes como sulfuros dispersos a lo largo de la roca, formándose en pequeñas vetas que llenan vacíos o en agregados pequeños. Los principales minerales incluyen calcopirita (CuFeS) y calcosita (CuS) como minerales de cobre; molibdenita (MoS) como mineral de molibdeno; y pirita (FeS), que es un mineral de hierro no económico. La mineralización corresponde a un tipo mesotermal, con temperaturas que oscilan entre los 225°C y 475°C.

Tabla 2

Tipos de alteración asociadas a la mineralogía en fase 05 de Mina Toquepala

Alteración	Asociación	Relación py:cp
Fílica	Cuarzo Sericita	10-8:1
	Biotita - Clorita	
	Ortosa - Biotita	
Potásica – Fílica	(Anhidrita-Magnetita)	1:02

Nota. Recuperado del departamento de Geología de SPCC

4.1.8. Mineralogía en fase 05 de Unidad Minera Toquepala

Tabla 3

Mineralogía en fase 05 de Unidad Minera Toquepala

Zona de mineral	Minerales predominantes	Ocurrencia
Transicional	Calcopirita 60%, Calcosita 25%, otros 15% Molibdenita, Pirita, Bornita.	Rellenando espacios en las brechas, diseminado y en venas, asociado al Curso.
Primario	Calcopirita 90% y otros 10% Pirita, Bornita, Molibdenita, Tetrahedrita, Enargita, Galena.	Rellenando espacios vacíos de las brechas, diseminado y en vetas.

Nota. Recuperado del departamento de Geología de SPCC

4.1.9. Operaciones en fase 05 de la Unidad Minera Toquepala

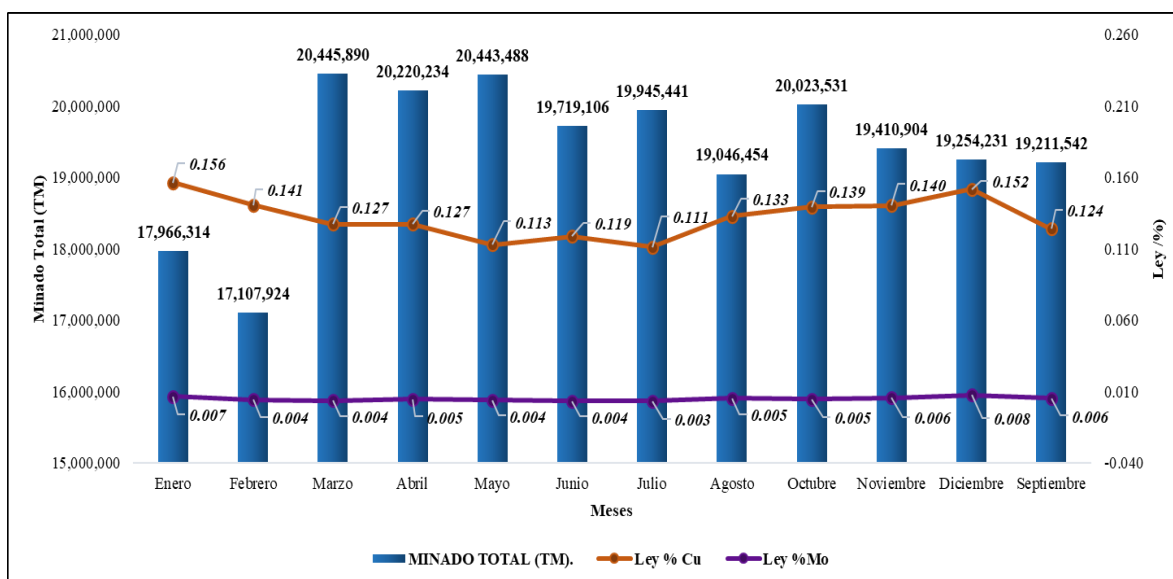
En la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala, las operaciones mineras se llevaron a cabo bajo un enfoque integral que prioriza la seguridad, la eficiencia y la optimización de los recursos. La imagen adjunta muestra la evolución de diversos indicadores de rendimiento durante los últimos meses, reflejando tanto la variabilidad en la producción como la tendencia de los principales parámetros operacionales.

Para asegurar que los programas de producción en Toquepala se cumplan de manera efectiva, es fundamental que todas las operaciones se ejecuten siguiendo estrictos estándares de seguridad y eficiencia. Además, es crucial que estas operaciones estén bien coordinadas, para evitar que errores en una de ellas afecten negativamente al proceso productivo global.

En la fase 05, se viene produciendo mineral de sulfuro de alta ley de Cobre y Molibdeno, lo que resalta la importancia de mantener un control preciso y eficiente sobre las operaciones, dada la calidad del mineral extraído.

Figura 17

Material minado vs Ley de %Cu – Ley de %Mo en fase 05 en el año 2023.

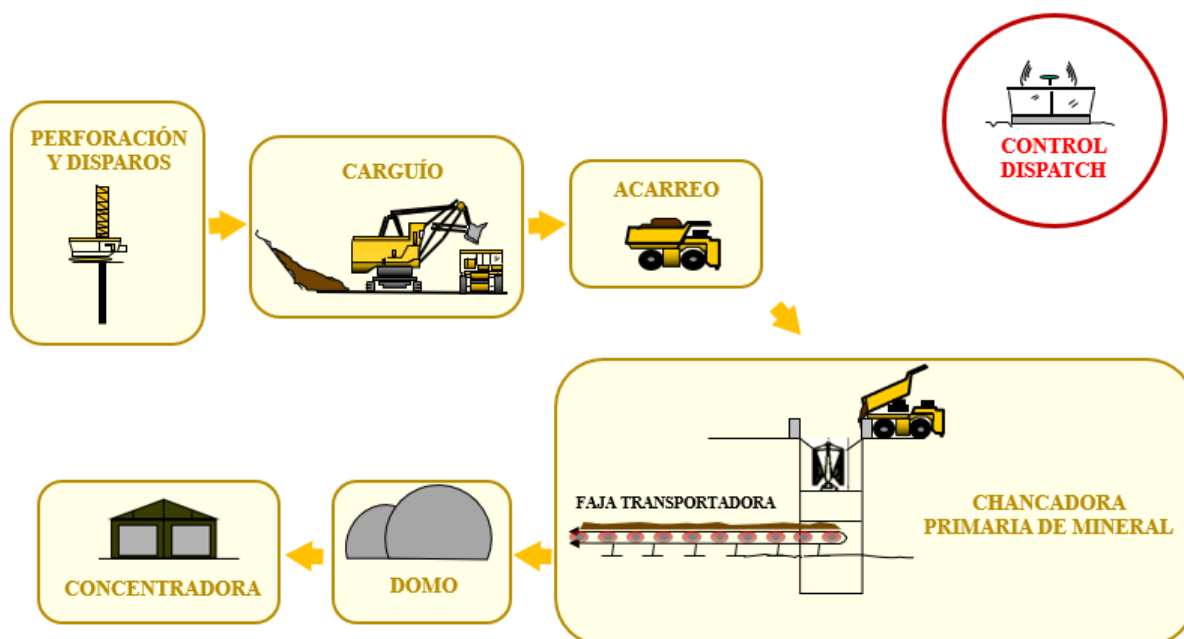


4.1.10. Operaciones Unitarias en mineral de sulfuro de fase 05

Para garantizar un desempeño óptimo en las operaciones unitarias, es fundamental contar con la información adecuada y precisa para realizar los procedimientos laborales de manera eficiente. Esta información debe originarse de fuentes técnicas confiables, con el objetivo de llevar a cabo las tareas cumpliendo con los más altos estándares de seguridad, empleando la tecnología más avanzada y utilizando los procesos productivos más eficientes. Además, la experiencia y conocimientos de los operarios son esenciales para la correcta ejecución de las labores, lo que contribuye significativamente al éxito en las operaciones.

Figura 18

Flujograma de operaciones del mineral de fase 05 en Unidad Minera Toquepala.



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

4.1.11. Perforación

La perforación constituye la fase inicial en el proceso de extracción minera, y tiene como objetivo crear taladros (holes) mediante la aplicación de rotación, pulldown y la inyección de presión de agua y aire para evacuar el detritus. Esta etapa es crucial para proceder con el primado (cebado), el carguío de la mezcla explosiva y la posterior detonación durante la voladura.

Los patrones de perforación se diseñaron teniendo en cuenta las características estructurales del terreno, lo que define las mallas de perforación. Dado que la perforación está estrechamente vinculada con la voladura, es esencial que se realice con precisión en aspectos como el burden, el espaciamiento y la profundidad de los taladros, ya que estos factores influyen directamente en los resultados de las voladuras.

Para los proyectos de prueba en la fase 05, se utilizaron diversos modelos de perforadoras para llevar a cabo las perforaciones primarias de los taladros de producción. Entre los modelos empleados se encuentran el Bucyrus 49RIII, el Bucyrus 49RH y el CAT MD6640.

Tabla 4

Flota de equipos de perforación en fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.

PERFORADORAS	MARCA	MODELO
01 perforadora	Bucyrus	49RIII
02 perforadoras	Bucyrus	49HR
01 perforadoras	CAT	MD6640

Figura 19

Flota de equipos de perforación primarias en fase 05 de la Unidad Minera Toquepala.



- a) Perforadora Bucyrus 49RIII: La perforadora Bucyrus 49RIII es un equipo robusto diseñada para perforaciones de gran profundidad, con una capacidad de perforación de hasta 406 mm de diámetro y una carga de broca de hasta 63,975 kg. Este modelo destaca por su estructura de soldadura tipo "caja", que le permite soportar trabajos intensivos en minería subterránea y a cielo abierto, asegurando la estabilidad y la potencia necesarias para perforar en terrenos duros. El equipo ofrece robustez y

potencia para perforaciones profundas en roca dura, ideal cuando se requiere estabilidad y capacidad de carga elevada.

- b) Perforadora Bucyrus 49RH: La perforadora Bucyrus 49RH es un equipo versátil, ideal para terrenos variables. Su sistema hidráulico y de aire comprimido le confiere una mayor flexibilidad y capacidad para adaptarse a distintas condiciones geológicas, manteniendo una alta eficiencia operativa y facilidad de mantenimiento. Resulta ventajosa en zonas con roca fracturada o porosa, donde la evacuación de detritos podría complicarse, asegurando eficiencia en barrido y menor consumo energético.
- c) Perforadora CAT MD6640: La perforadora CAT MD6640 se distingue por su motor eléctrico de inducción de alta potencia, con capacidades entre 522 y 746 kW, lo que le permite realizar perforaciones profundas con alta eficiencia energética. Esta perforadora es capaz de perforar a un diámetro de entre 244 y 406 mm y alcanzar profundidades de hasta 21.3 m en una sola pasada, destacándose por su versatilidad y movilidad gracias a su tren de rodaje tipo excavadora. Además, su cabina de operador está diseñada para optimizar la ergonomía y el confort, lo que mejora la productividad y reduce los riesgos de fatiga en condiciones de trabajo prolongadas.

Durante el año 2023, se alcanzó un metraje de perforación real acumulado de 2,293,296 metros, superando el metraje de perforación planeado acumulado de 2,287,668 metros. Esto refleja que se cumplió el plan de perforación con un excedente de 5,628 metros.

4.1.11.1. Diseño de perforación primaria.

a) Diámetro de taladro

El diámetro de taladro perforado en la fase 05 de Mina Toquepala fue de 11 pulgadas.

Como se observa en la (Tabla 5), la elección del diámetro está de acuerdo con la productividad requerida de perforación y la dureza del terreno a fragmentar.

Tabla 5

Parámetros del macizo rocoso para el diseño de perforación primaria

DIÁMETRO DEL BARRENO (mm)	PRODUCCIÓN HORARIA MEDIA (m ³ b/h)		
	Roca blanda <70 Mpa	Roca media-dura 70-80 Mpa	Roca muy dura >180 Mpa
200	600	150	50
250	1200	300	125
311	2050	625	270

En la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala se trabajó en un tipo de roca yeso anhidrita con brechas y dacita, que tiene una resistencia a la compresión de 100 a 150 MPa, se seleccionó 11 pulgadas de diámetro para mantener la productividad de perforación y asegurar la velocidad de detonación óptima para la fragmentación de ese tipo de roca.

b) Cálculo de Burden

Para la determinación del Burden se consideró como referencia el modelo matemático de Richard Ash, es usado como una primera etapa de aproximación, requiere una serie de ajuste para ampliación y ajuste en gabinete.

Asimismo, Ash ha desarrollado 5 estándares básicos con los cuales se puede evaluar un disparo en minería superficial, cabe resaltar que esta teoría es aplicada en Toquepala, de acuerdo con la siguiente formula:

$$B = \frac{D_e}{12} \times K_b$$

Donde:

B : Burden (pies)

K_b : Factor de tabla en función al tipo de roca y explosivo

D_e : Diámetro de la carga explosiva (pulgadas)

Para estimar el valor K_b debemos conocer las características de las rocas y explosivos a usar, y usar la siguiente tabla:

Tabla 6

Parámetros de estimación de Burden - K_b .

Clase de explosivo	Densidad del Explosivo	CLASE DE ROCA		
		Roca Blanda	Roca Media	Roca Dura
Baja densidad	0.8 - 0.9 g/cm ³	30	25	20
Mediana densidad	1.0 - 1.2 g/cm ³	35	30	25
Alta densidad	1.3 - 1.6 g/cm ³	40	35	30

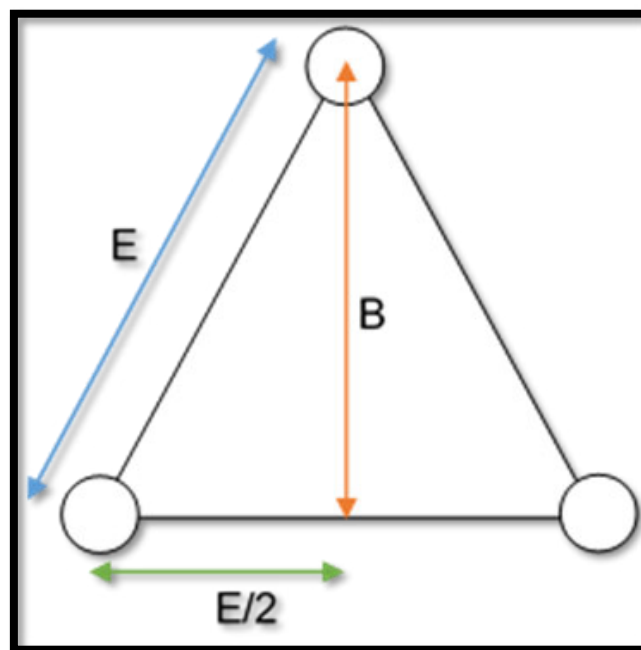
a) Cálculo de espaciamiento

Para realizar el cálculo del espaciamiento se usó la malla trabada, debido a que esta nos proporciona un rompimiento más efectivo de roca para un factor de carga fijo.

El cálculo de espaciamiento se realizó por medio del método geométrico.

Figura 20

Cálculo geométrico del burden y espaciamiento entre taladros.



$$B^2 = E^2 - \left(\frac{E}{2}\right)^2$$

Donde:

B : Burden (pies)
 E : Espaciamiento (pies)

Evidencias teóricas y prácticas sugieren que la relación óptima entre el Espaciamiento y el Burden para voladuras con mallas trabadas está en el rango de 1.1. a 1.4.

4.1.11.2. Diseño de carga explosiva según tipo de taladro

a) Diseño en taladros de producción de fase 05.

Para la determinación del diseño de carga se consideró los parámetros de perforación y el tipo de explosivo, de acuerdo con el P80 teórico estimado en el modelo ajustado de KUZ – RAM.

$$C_L = 0.507 \times D^2 \times \rho$$

Donde:

C_L : Carga Lineal
 D : Diámetro del taladro (pulgadas)
 ρ : Densidad del explosivo

$$LC = LT - LTa$$

Donde:

LC : Longitud de carga (m)
 LT : Longitud de Taladro (m)
 LTa : Longitud de Taco (m)

Figura 21

Ejemplo de diseño de carga explosiva en un taladro de producción en fase 05.

MEZCLA EXPLOSIVA		
	PRODUCCIÓN	
Diametro	11	5.5
Altura de Banco	15	
Sobre Perforacion	1.5	
Espaciamiento	6.50	
Burden	5.63	0.7
Taco	5.5	
Taco Intermedio		
Longitud de Carga	10.3	
Lc/ Kg	831	
Densidad Inicial	1.32	
Densidad Final	1.15	10.3
Esponjamiento	0.7	
Volumen	549	
Tonelaje	1482	
Densidad de Roca	2.7	
Fp	0.561	

b) Diseño de carga explosiva en los taladros de amortiguación en fase 05.

Para la determinación del diseño de carga se consideró los parámetros de perforación y el tipo de explosivo, de acuerdo con el P80 teórico estimado en el modelo ajustado de KUZ – RAM y por temas de cuidado del talud se agrega 1 metro de longitud de taco.

$$C_L = 0.507 \times D^2 \times \rho$$

Donde:

- C_L : Carga Lineal
 D : Diámetro del taladro (pulgadas)
 ρ : Densidad del explosivo

$$LC = LT - (LTa + 1)$$

Donde:

- LC : Longitud de carga (m)
 LT : Longitud de Taladro (m)

LTa : Longitud de Taco (m)

Figura 22

Ejemplo de diseño de carga explosiva en un taladro de amortiguación de fase 05.

MEZCLA EXPLOSIVA	
	AMORTIGUADO
Diametro	11
Altura de Banco	15
Sobre Perforacion	1.5
Espaciamiento	6.50
Burden	5.63
Taco	6.5
Taco Intermedio	
Longitud de Carga	9.3
Lc/ Kg	750
Densidad Inicial	1.32
Densidad Final	1.15
Esponjamiento	0.7
Volumen	549
Tonelaje	1482
Densidad de Roca	2.7
Fp	0.506



c) Diseño de carga explosiva en los taladros de trim de fase 05

Para la determinación del diseño de carga se consideró los parámetros de perforación y el tipo de explosivo, de acuerdo con el P80 teórico estimado en el modelo ajustado de KUZ – RAM y por temas de cuidado del talud se coloca una carga explosiva desacoplada representando tres cuartas partes del taladro de producción en fase 05.

$$C_L = 0.507 \times D^2 \times \rho$$

Donde:

C_L : Carga Lineal
 D : Diámetro del taladro (pulgadas)
 ρ : Densidad del explosivo

$$LC = \frac{3}{4} LC_{Producción}$$

Donde:

LC : Longitud de carga (m)

$LC_{Producción}$: Longitud de carga del taladro de producción (m)

Figura 23

Ejemplo de diseño de carga explosiva Fortis Extra 70 en un taladro de trim en fase 05.

MEZCLA EXPLOSIVA		
	TRIM	
Diametro	11	4.1
Altura de Banco	15	
Sobre Perforacion	0	0.3
Espaciamiento	4	
Burden	5.2	
Taco superior	4.1	
Longitud de Carga Superior	4.3	4.3
Lc/ Kg	350	
Taco Intermedio	3	
Longitud de Carga Inferior	3.1	
Lc/ Kg	250	3
Densidad Inicial	1.32	
Densidad Final	1.15	
Esponjamiento	0.3	0.2
Volumen	338	
Tonelaje	842	
Densidad de Roca	2.7	
Fp	0.297	3.1

4.1.11.3. Perforación primaria.

En la fase 05 de mina Toquepala se utilizó 11 pulgadas como diámetro de los taladros de producción. Los taladros se perforaron de forma vertical, con una profundidad planeada de 15 metros, y una sobreperforación que varía entre 0.5 metros y 3 metros, dependiendo de las condiciones del terreno, como la estabilidad del taladro. La velocidad de perforación alcanzada por los equipos fue de 23.08 metros por hora.

De acuerdo con el plan de perforación para la fase 05 de mina Toquepala en el año 2023, las mallas de perforación se diseñaron con una configuración triangular, adaptando el burden y el espaciamiento de acuerdo con las características específicas de la fase de minado.

Tabla 7

Estándar de diseño de malla de perforación y voladura de fase 05.

Fase	Burden	Espaciamiento	Diámetro de taladro	Unidades litológicas predominantes
Fase 05	5.63 m	6.5 m	11"	Bx-ga, Di-ga, Dp-ga, Di-ga, Bx, Bx-gnral, Da-ga, Bxt-ga

4.1.11.4. Perforación Precorte.

c) Definición

El precorte consiste en perforar taladros a lo largo de una línea límite de excavación, con un ángulo de inclinación específico y un espaciamiento más reducido que el utilizado en una malla de perforación primaria.

En el proceso de precorte, se tomó en cuenta las siguientes consideraciones técnicas para el diseño:

- Ángulos de caras de banco e inter-rampas: Los ángulos económicos y operacionales para la perforación de precorte se establecen en 65°.
- Perforación: La perforación debe ser lo más precisa posible en cuanto a espaciamiento, inclinación y orientación, con el fin de lograr una pared uniforme.
- Sobre rotura en la cresta: La sobre perforación afecta el fracturamiento de la cresta, por lo que este aspecto debe ser considerado en la planificación del diseño.
- Diámetro de perforación: A medida que aumenta el diámetro del taladro, también lo hace el radio de rotura. Por lo tanto, los diámetros para precorte deben ser menores.

d) Objetivos

- Estabilidad de taludes: Asegurar taludes estables durante el proceso de minado.
- Preacondicionamiento del macizo rocoso: Atenuar las vibraciones producidas por la voladura principal.

e) Beneficios del precorte en fase 05 de la Unidad Minera Toquepala

- Formación de una pared de banco más estable.
- Generar el límite de penetración de la pala.
- Contribuye a reducir la vibración de la voladura primaria y la sobre excavación.
- Obtener las bermas programadas.
- Crear una percepción de seguridad

Durante el año 2023, la perforación de precorte alcanzó un promedio mensual de 36,320 metros perforados, con una velocidad de perforación de 16.44 metros por hora.

En fase 05 la configuración de la malla de perforación para el precorte se adapta de acuerdo con las características geomecánicas y estructurales del macizo rocoso. A continuación, se presentan los parámetros de perforación utilizados:

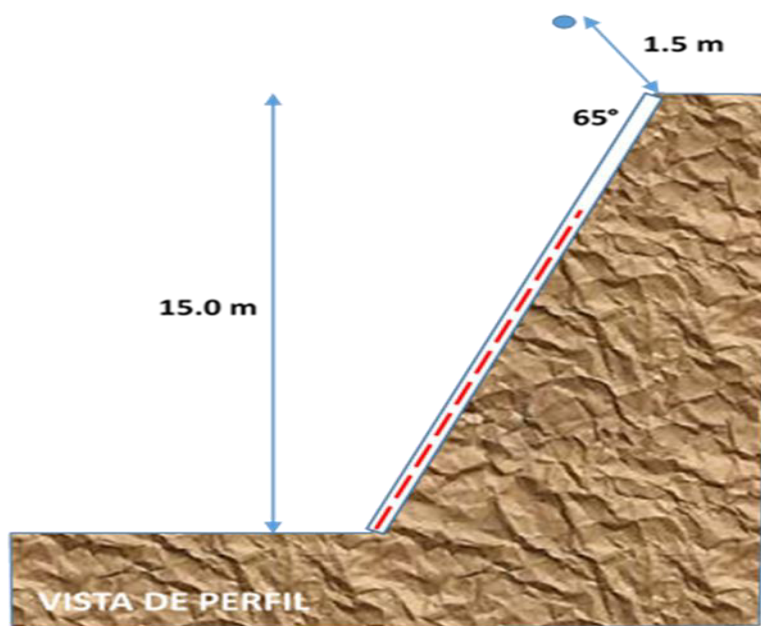
Tabla 8

Parámetros de perforación de precorte en mina Toquepala

Parámetros de perforación	Und	Valor
Diámetro de perforación	pulg	5
Altura de banco	m	15
Sobreperforación	m	1.5
Altura de perforación	m	16.5
Espaciamiento	m	1.5
Ángulo de inclinación	°	65

Figura 24

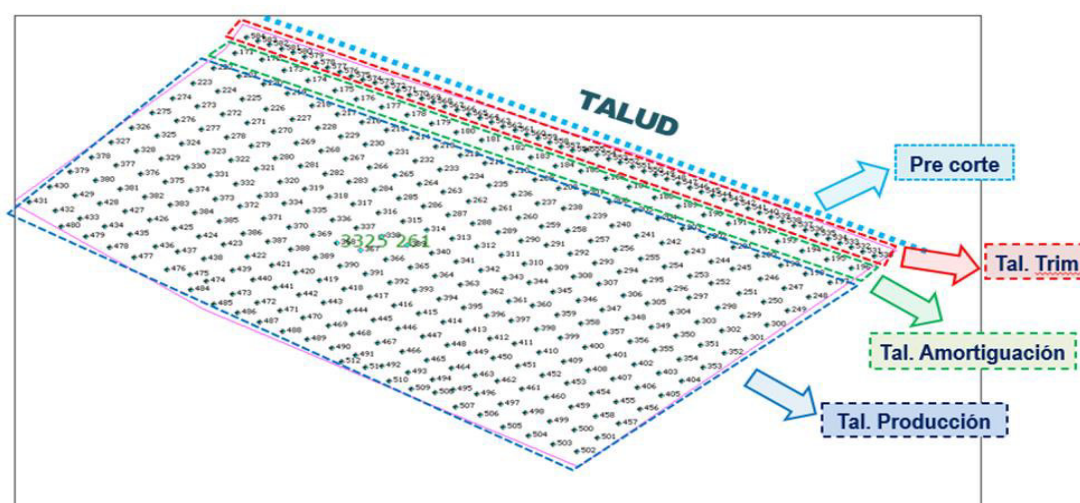
Vista de perfil de la perforación y carguío de taladros de precorte



Además, los parámetros de perforación dependieron del tipo de roca. En el caso de los taladros de precorte, estos se cargaron con explosivos para la voladura de contorno (carga desacoplada), y cuentan con una línea de 15.5 metros de explosivo encartuchado.

Figura 25

Distribución de los tipos de taladros presentes en una malla de perforación de fase 05.



4.1.12. Aceros de perforación primaria

La línea de perforación utilizada en la zona de mineral de la fase 05 está conformada por aceros seleccionados para asegurar un rendimiento confiable y estable en un macizo rocoso duro-abrasivo.

El conjunto inicia con un shock absorber King Cobra (Terelion), de 28" de diámetro exterior, equipado con hilo superior macho API 8" e hilo inferior hembra BECO 8", cuya función principal es disipar vibraciones y proteger la sarta durante la perforación.

Le sigue un top sub Agecomet de 9.25", con hilo superior macho BECO 8" e inferior hembra BECO 8", que actúa como elemento de transición entre la amortiguación y los aceros de perforación.

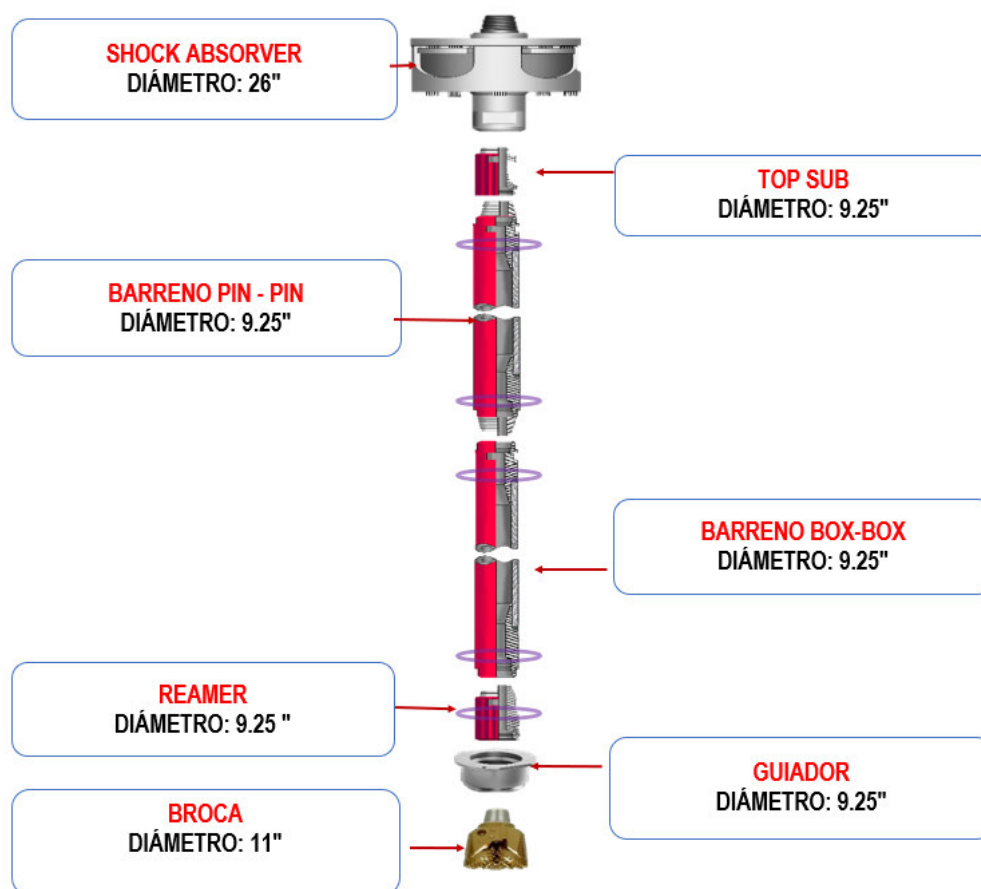
A continuación, se incluyen dos tipos de barrenos Agecomet, ambos de 9.25" con hilo BECO 9": un barreno pin-pin, con hilos macho en ambos extremos, y un barreno box-box, con hilos hembra superior e inferior, permitiendo configurar la sarta según el requerimiento operativo y garantizar una adecuada transmisión de energía.

Posteriormente se incorpora un reamer (bit sub) Agecomet, también de 9.25", equipado con hilo superior macho BECO 8" e inferior hembra BECO 8", cuya función es facilitar el acople y alineamiento con la broca. Para asegurar estabilidad dentro del pozo, el sistema incluye un anillo guiador Agecomet, con diámetro exterior de 16" y diámetro interior de 9.25", sin hilos de acople, encargado de mantener la sarta centrada y reducir desviaciones durante la perforación.

Finalmente, el trabajo de corte de la roca se realiza con brocas tricónicas de 11", específicamente los modelos RB67 (Terelion) y CN71 (Cenerg) con hilos 6 5/8" API regular, diseñadas para operar eficientemente en formaciones duras y altamente abrasivas, asegurando una penetración adecuada y una vida útil optimizada en este tipo de condiciones geológicas.

Figura 26

Aceros de perforación primaria en zona de mineral de fase 05.



4.1.13. Voladura

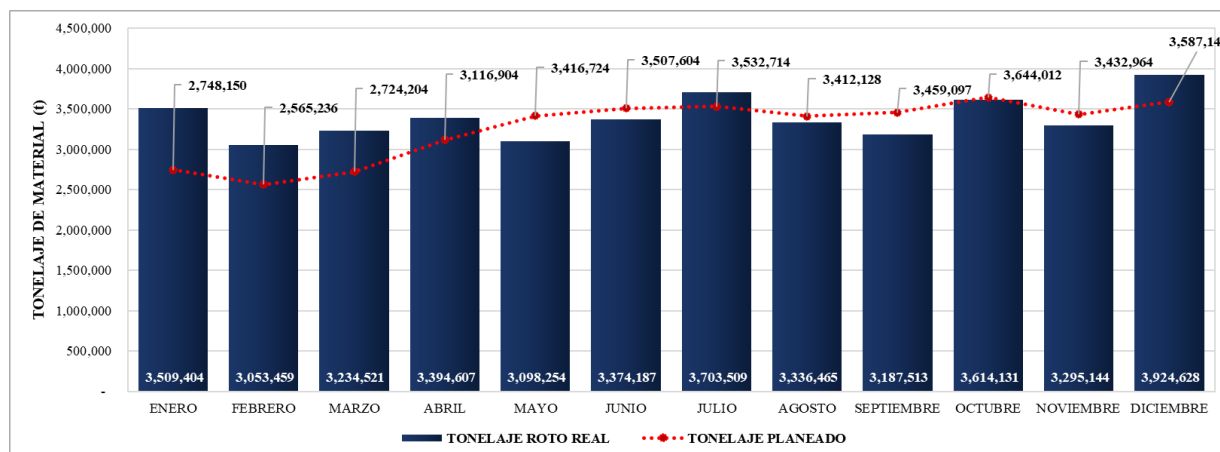
La voladura es una fase fundamental en la operación minera, cuyo objetivo principal fue fragmentar el macizo rocoso mediante la aplicación de cargas explosivas en los taladros perforados. Esta etapa marca el inicio del proceso de extracción del mineral, ya que permite reducir el tamaño del macizo rocoso a dimensiones más manejables, facilitando así las etapas de carguío, acarreo y chancado del material.

La fragmentación del material se logró gracias a la energía cinética liberada por los gases generados durante la detonación. Este proceso es la principal causa de la fragmentación en una voladura, en la cual las cargas explosivas están confinadas dentro de los taladros perforados.

Durante el año 2023, se alcanzó un tonelaje roto real de mineral acumulado de 40,725,820 toneladas, en comparación con el tonelaje roto planeado acumulado de 39,146,881 toneladas, lo que indica que se cumplió el plan con un excedente de 1,578,939 toneladas.

Figura 27

Tonelaje roto real vs tonelaje roto planeado de mineral de fase 05 en el año 2023



En fase 05 de la Unidad Minera Toquepala, se llevó a cabo dos tipos de voladura: la voladura primaria, realizada con taladros de producción de diámetro de 11 pulgadas) y la voladura de contorno, destinada a preservar la estabilidad de los taludes, empleando taladros de precorte (de 5 pulgadas de diámetro). La cantidad de mezcla explosiva utilizada en los taladros varía según varios factores, tales como las características y dureza del macizo rocoso, y la ubicación específica de los taladros, que pueden estar situados en la zona de cresta, zona intermedia o zona de toe.

4.1.13.1. Voladura Primaria.

La voladura primaria tiene como objetivo fragmentar el macizo rocoso hasta obtener fragmentos de un tamaño adecuado para su posterior manejo en las etapas de carguío, acarreo y chancado del material. En este proceso, la carga explosiva utilizada es de tipo acoplado a granel.

En años previos al 2023, en mina Toquepala, se empleaba la mezcla explosiva Heavy Anfo gasificado Quantex 73. Sin embargo, desde enero de 2023, se ha comenzado a utilizar la mezcla explosiva Fortis Extra 70 para las voladuras primarias en la mina.

a) Diseño de carga de fase 05 (Zona de Mineral)

La dureza de la roca varió entre media y dura. Se identificó dos tipos de roca en esta zona: una de dureza media y otra afectada por la alteración de Yeso Anhidrita, lo que provoca un cambio en la malla de perforación y en la distribución de la carga, de manera similar a lo que ocurre en la fase 05.

Figura 28

Distribución de taladros presentes en una malla de perforación en fase 05

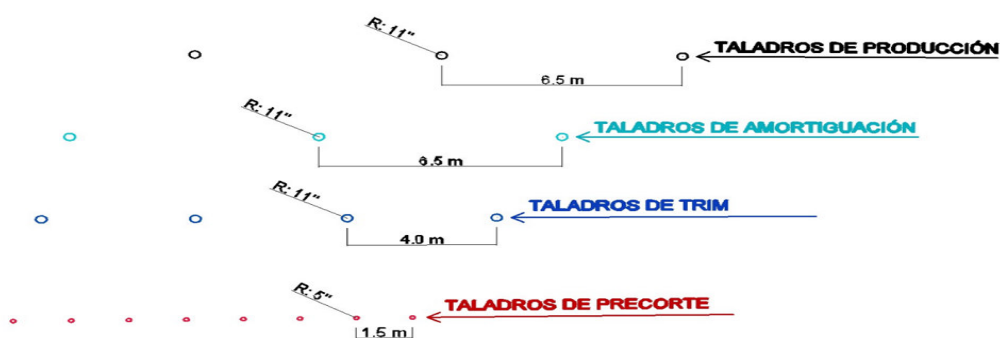
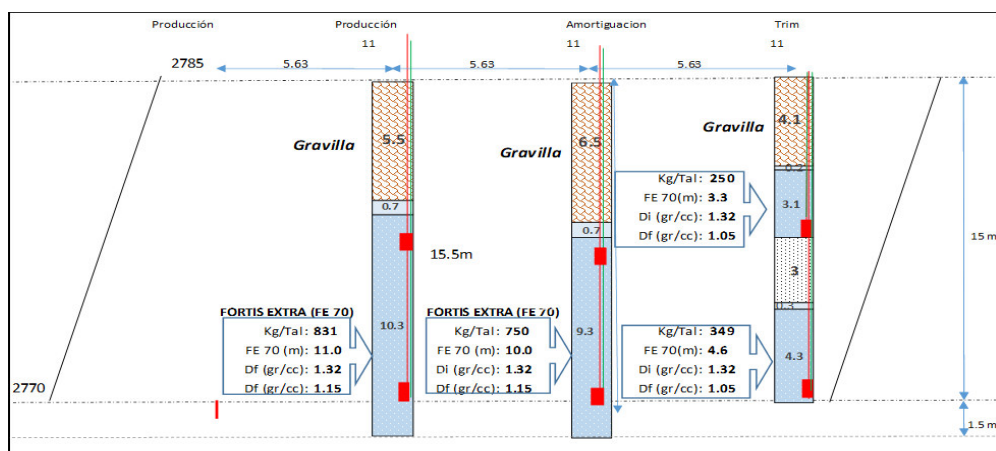


Figura 29

Diseño de carga de los tipos de taladros en una malla de perforación en fase 05.



Nota. Recuperado de Orica

Tabla 9*Explosivos y materiales relacionados por tipo de taladro en fase 05*

Fortis extra 70	Producción	Amortiguación	Trim
Diámetro (pulg)	11	11	11
Altura de Banco (m)	15	15	15
Sobreperforación (m)	1.5	1.5	0
Espaciamiento (m)	6.5	6.5	4
Burden (m)	5.63	5.63	5.63
Longitud de taco (m)	5.5	6.5	4.1
Longitud de taco intermedio (m)	0	0	3
Longitud de carga (m)	10.3	9.3	7.4
Cantidad de carga (kg)	831	750	599
Densidad inicial (gr/cc)	1.32	1.32	1.32
Densidad final (gr/cc)	1.15	1.15	1.15
Esponjamiento (m)	0.7	0.7	0.3
Cantidad de detonadores no eléctricos	2	2	2
Cantidad de detonadores eléctricos	2	2	2
Cantidad de boosters	2	2	2

4.1.13.2. Voladura de Contorno.

La voladura de contorno, también conocida como voladura de precorte, tuvo como objetivo crear un plano de fractura artificial que actúa como barrera para las vibraciones generadas por las voladuras circundantes. Esto contribuyó a preservar la estabilidad de los taludes, mejorando la seguridad y eficiencia de la operación minera.

En la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala se empleó un explosivo de emulsión encartuchada como carga desacoplada, lo que significa que existe un espacio de separación entre el diámetro del taladro y el explosivo. Además, no se utilizó material de taco en la parte superior del taladro. Los parámetros de voladura utilizados fueron los siguientes:

Tabla 10

Parámetros de voladura de precorte en la fase 05 de mina Toquepala

Parámetros de voladura	Und	Valor
Altura de banco	m	15
Altura de carga	m	12
Carga de explosivo	Kg	15.5
Diámetro de explosivo	pulg	1 1/2
VOD del explosivo	m/s	6000
Densidad del explosivo	g/cc	1.15
Tiempo de salida en el disparo	ms	0
Factor de potencia	Kg/m ²	0.86

La correcta ejecución de la voladura de precorte redujo significativamente los riesgos de desprendimientos y deslizamientos de material en el talud, lo que contribuye a crear un entorno de trabajo más seguro tanto para los operadores como para el personal en general.

Figura 30*Resultados de la voladura de precorte en fase 05***4.1.14. Accesorio de Voladura**

Un accesorio de voladura es un dispositivo diseñado para realizar voladuras controladas de manera eficiente y segura en actividades mineras y de ingeniería civil. Estos accesorios trabajan en conjunto con los explosivos, asegurando que la detonación se ejecute en el tiempo y la forma precisos, optimizando el control sobre el proceso de voladura.

4.1.14.1. Detonador Electrónico Ikon Extreme III.

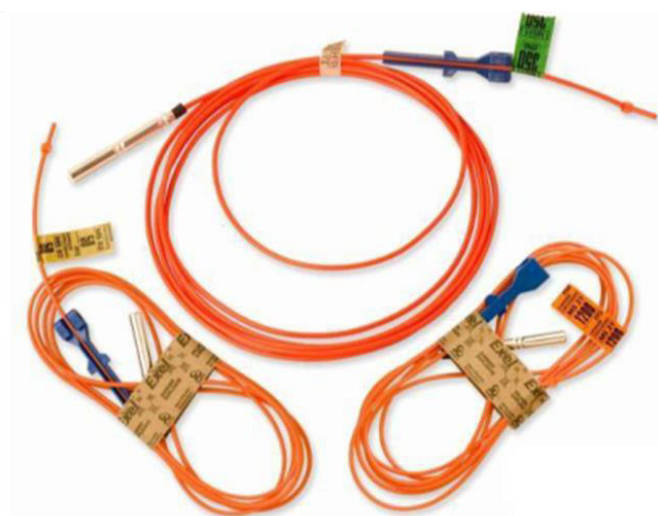
El Detonador Electrónico Ikon Extreme III es un dispositivo de última tecnología utilizado en voladuras controladas en los sectores de minería y construcción. Este detonador electrónico está diseñado para garantizar una precisión excepcional en el momento de la detonación, lo que facilita una fragmentación óptima de la roca y mejora la eficiencia en las voladuras.

El dispositivo permite una programación precisa de los retardos, ofrece una alta resistencia a condiciones extremas y reduce significativamente los fallos en la detonación, lo que incrementa la seguridad durante el proceso de voladura.

Tabla 12*Componentes del detonador no electrónico Exel*

Componente	Descripción
Cápsula de aluminio	Compuesta por una carga primaria de explosivos, una carga secundaria y un tren de retardo.
Tubo de señal	Es de color naranja, es la componente que transmite la señal a la cápsula de retardo.
Etiqueta de retardo	Elemento que indica el número de serie MS, su tiempo nominal, el largo del tubo y el número de lote asociado a su fecha de fabricación.
Conector J	Dispositivo que une el tubo de señal a la línea troncal de cordón detonante.

Nota. Recuperado de Orica

Figura 32*Detonador no electrónico Exel*

Nota. Recuperado de Orica

4.1.14.3. Booster 2 Lb Pentex.

El Booster 2 Lb Pentex es un explosivo de alta potencia utilizado en minería para mejorar la eficiencia de la detonación principal. Su función principal es amplificar la onda de choque generada por el detonador, transmitiéndola a los explosivos secundarios o a la carga primaria, lo que garantiza una detonación completa y efectiva de estos materiales.

Entre las principales características del Booster 2 Lb Pentex se destacan las siguientes:

- Material explosivo: Está compuesto por un material de alta energía, como el PETN (pentaeritritol tetranitrato) o RDX, que posee una velocidad de detonación extremadamente alta, lo que facilita una transmisión de energía eficiente.
- Forma y tamaño: Con un peso de 2 libras, su tamaño y forma están específicamente diseñados para facilitar su acoplamiento tanto con la carga de explosivos como con el detonador.
- Alta sensibilidad: El Booster Pentex es lo suficientemente sensible como para ser activado por un detonador, pero a la vez mantiene una alta estabilidad durante su manipulación y transporte.
- Uso seguro: Al no contener componentes eléctricos ni piezas móviles, el riesgo de iniciación accidental debido a electricidad estática o interferencias electromagnéticas se reduce significativamente.

Tabla 13

Propiedades técnicas del Booster 2 Lb Pentex

Propiedades técnicas	Parámetro
Densidad	$1.62 \pm 3\%$ g/cc
Velocidad de detonación	$7,200 \pm 3\%$ m/seg
Resistencia al agua	Excelente
Sensibilidad	Detonador N°8
Iniciador mínimo	Cordón Detonante 10 g/m
Presión de Detonación	216 kbar
Calor de Explosión / Energía	5,617 kJ/kg
Volumen de gases	668 L/kg
Color de envase	Naranja

Nota. Recuperado de Orica

Figura 33*Booster 2 Lb Pentex**Nota. Recuperado de Orica*

4.1.14.4. Cordón Detonante Cordtex.

El Cordón Detonante Cordtex es un tipo de cordón explosivo utilizado en voladuras para transmitir la detonación de manera continua a lo largo de una línea. Este dispositivo consta de una cubierta exterior de plástico que envuelve un núcleo de explosivo, generalmente PETN (Pentaeritritol tetranitrato), el cual se activa de manera fiable para iniciar otros explosivos a lo largo de su longitud.

Características principales del Cordón Detonante Cordtex:

- Alta velocidad de detonación: El núcleo de PETN en el cordón permite una velocidad de detonación superior a los 6,000 m/s, garantizando que la señal se propague rápidamente a lo largo de toda la línea.
- Flexibilidad: El Cordtex es altamente flexible y fácil de manejar, lo que facilita su colocación en el campo, incluso en configuraciones complejas de voladuras.
- Versatilidad: Este cordón detonante se puede utilizar en una variedad de entornos, tanto en minería como en obras civiles, para conectar cargas explosivas y asegurar que todos los puntos detonen de manera sincronizada.
- Seguridad y control: A pesar de su alta capacidad para transmitir energía explosiva, el Cordtex es seguro de manipular antes de la detonación, y su diseño lo hace resistente a iniciaciones accidentales por golpes o fricción.

Tabla 14*Propiedades técnicas del cordón detonante Cordtex*

Propiedades técnicas	Valor
Resistencia a la tracción	Excelente
Resistencia a la humedad	Excelente
Color de Cordtex W	Amarillo
Color de Cordtex P	Verde
Densidad de PETN	0.4 g/cm ³
Velocidad nominal de detonación	6,8000 m/s
Calor de explosión	5,800 kJ/kg

Nota. Recuperado de Orica**Figura 34**

Cordón detonante Cordtex

*Nota.* Recuperado de Orica**4.1.15. Mezclas Explosivas Heavy Anfo**

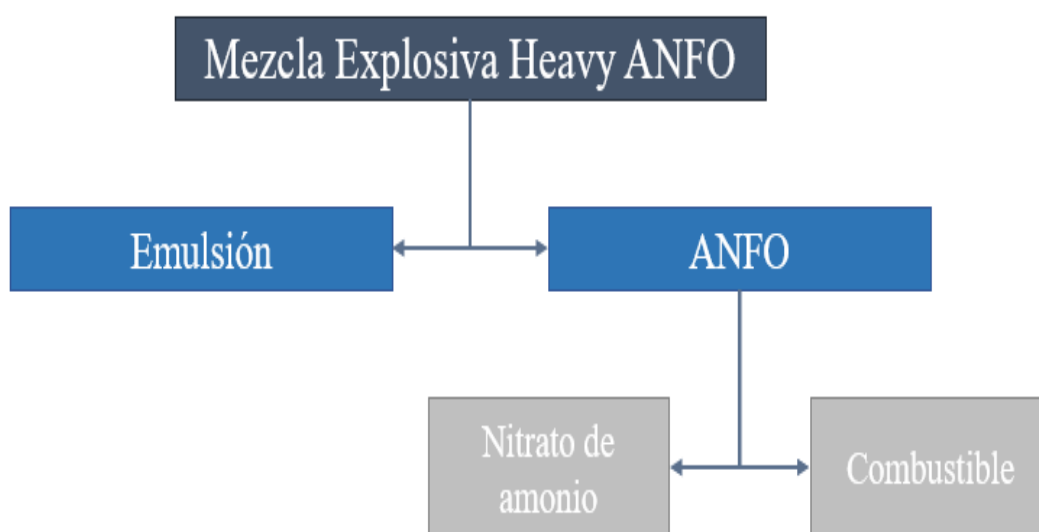
Las mezclas explosivas Heavy ANFO son una combinación de ANFO (Nitrato de Amonio y Combustible) con emulsiones explosivas, lo que da como resultado un explosivo más potente y denso que el ANFO convencional. Estas mezclas están diseñadas para optimizar las propiedades del ANFO, especialmente en situaciones donde se requiere una mayor liberación de energía o una mayor resistencia al agua.

Entre las principales características de las mezclas Heavy ANFO se destacan las siguientes:

- El ANFO tradicional está compuesto por nitrato de amonio y diésel u otro combustible. En las mezclas Heavy ANFO, se incorpora una emulsión explosiva, generalmente formada por nitrato de amonio, agua y aceite, lo que incrementa la capacidad energética del explosivo.
- La proporción de los componentes puede variar, pero generalmente contiene entre un 70-80% de ANFO y un 20-30% de emulsión explosiva.
- Mientras que el ANFO convencional es altamente sensible a la humedad y al agua, lo que limita su uso en áreas húmedas o subterráneas, las mezclas Heavy ANFO, debido a la emulsión añadida, son más resistentes al agua, lo que permite su uso en barrenos o taladros con presencia de agua.
- Las mezclas Heavy ANFO pueden ajustarse en cuanto a densidad, lo que permite personalizar el explosivo según las condiciones del sitio, brindando mayor flexibilidad para su aplicación en diferentes contextos geológicos.

Figura 35

Composición de la mezcla explosiva Heavy ANFO



4.1.15.1. Heavy ANFO Quantex 73.

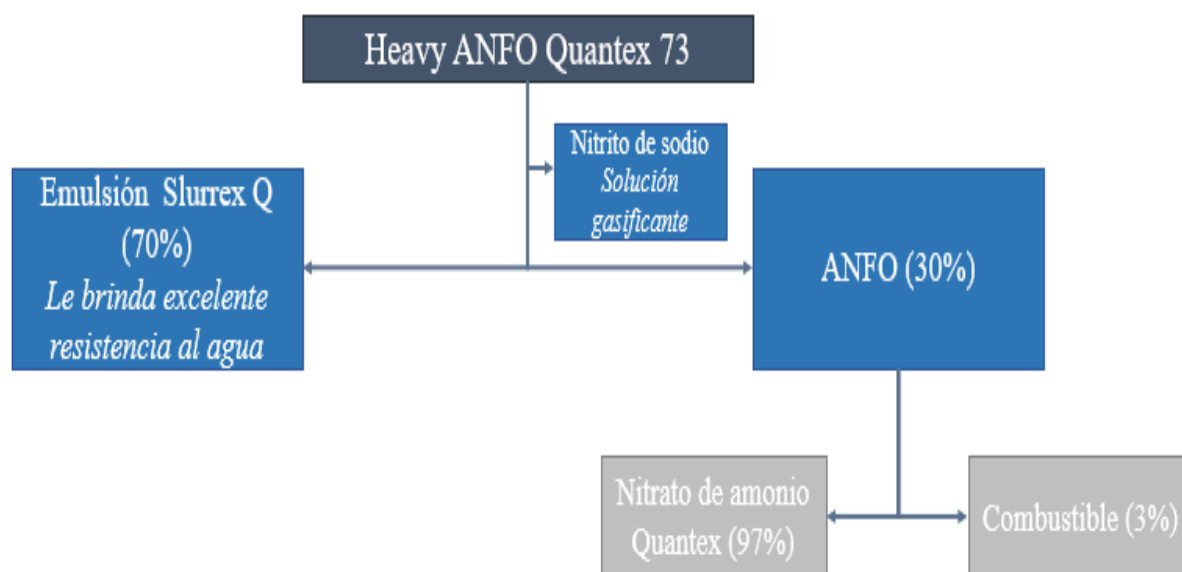
El Heavy ANFO Quantex 73 es una mezcla explosiva compuesta por un 70% de emulsión gasificable Slurrex Q, combinada con un 30% de nitrato de amonio Quantex. A esta mezcla se le adiciona una solución gasificante que proporciona la sensibilidad necesaria y la densidad adecuada, de acuerdo con los requisitos establecidos en el diseño de voladura.

Los principales beneficios del Heavy ANFO Quantex 73 incluyen:

- Excelente resistencia al agua, lo que permite su uso en condiciones húmedas o subterráneas sin perder eficacia.
- Facilidad de manejo en terreno, ya que es un explosivo a granel que puede ser bombeado o vaciado con facilidad.
- Adaptabilidad a diferentes tipos de terreno, gracias a su amplio rango de densidades.
- Bajo impacto ambiental, ya que reduce en un 18% la huella de carbono en comparación con explosivos convencionales (según SGS).
- Optimización de la voladura, lo que mejora significativamente los resultados en la fragmentación de la roca.
- Fácil verificación de gasificación, ya que su diseño permite identificar rápidamente si se ha logrado una gasificación adecuada.
- Eficiencia en el almacenamiento, ya que el Slurrex Q (inerte) no requiere distancias de seguridad adicionales según la legislación vigente.

Figura 36

Composición de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73

**Tabla 15**

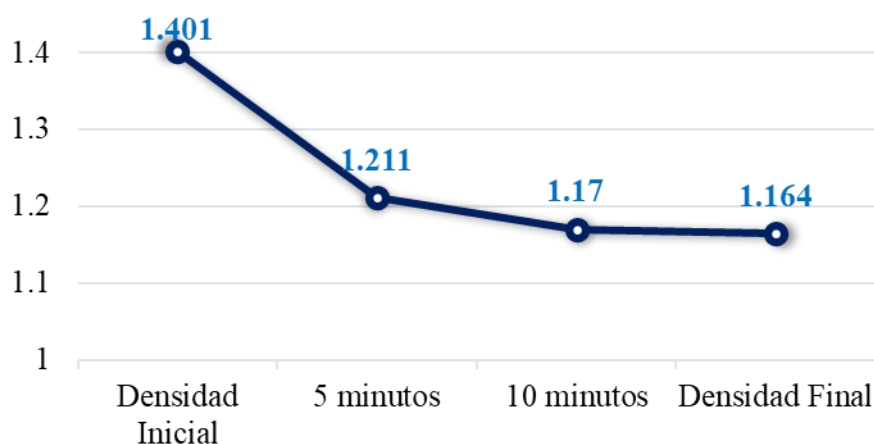
Especificaciones técnicas de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73

Especificaciones técnicas	Valor
Densidad	1.13 ± 5% g/cm ³
Diámetro crítico	4.0 pulg
Profundidad máxima de carga	18 m
Velocidad de detonación (VOD)	5,300 - 5,400 m/s
Tiempos de gasificación	20 - 30 min
Presión de detonación	24.0 - 107.0 kbar
Energía absoluta en peso (AWS)	2,410 kJ/kg
Energía absoluta en volumen (ABS)	3,214 - 3,575 J/cm ³
Potencia relativa efectiva al peso (RWS)	113%
Potencia relativa efectiva en volumen (RBS)	163%

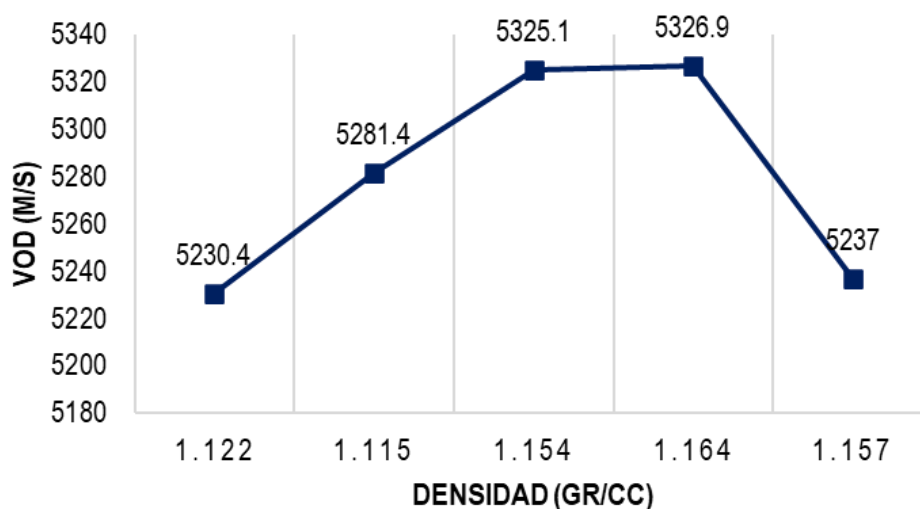
Nota. Recuperado de Orica.

Figura 37

Comportamiento de la densidad (g/cc) de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73

**Figura 38**

Promedio de VOD vs Densidad de la mezcla explosiva Heavy ANFO Quantex 73



4.1.15.2. Heavy ANFO Fortis Extra 70.

El Heavy ANFO Fortis Extra 70 es un explosivo compuesto por nitrato de amonio de baja densidad, lo que mejora la sensibilidad de la mezcla explosiva, optimiza el balance de oxígeno y aporta un mayor volumen de gases al proceso de detonación. El 30% de nitrato de amonio en esta mezcla contribuye a extender las grietas y facilita el desplazamiento del material fracturado en la Unidad Minera Toquepala.

Este nitrato, combinado con una emulsión ANE Extra de alta energía, permite su aplicación tanto en taladros secos como en aquellos con presencia de agua, generando beneficios para aumentar el rango de finos en el mineral y/o la expansión de malla en sectores de desmonte.

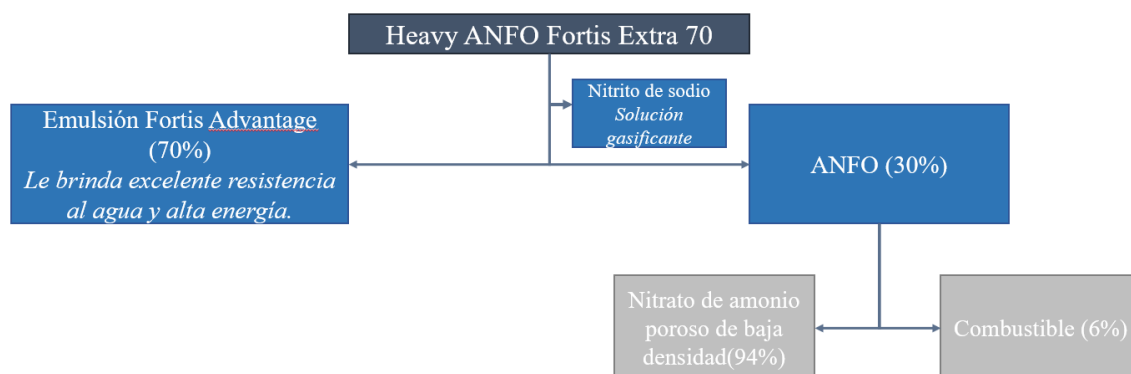
Diseñado especialmente para su uso en minería a cielo abierto, el Heavy ANFO Fortis Extra 70 es adecuado para las condiciones de voladura más exigentes. Es particularmente útil en situaciones donde se presentan pozos de voladura húmedos. Sin embargo, no es apropiado para terrenos que contengan sulfuro reactivo.

Los principales beneficios del Heavy ANFO Fortis Extra 70 incluyen:

- Tiempo de inactividad prolongado: Fortis Extra 70 está diseñado para ofrecer un tiempo de inactividad más extenso y un rendimiento confiable superior tanto en pozos secos como húmedos.
- Control preciso en su fabricación y entrega: Fortis Extra 70 se produce y distribuye con un control exacto a velocidades que se ajustan a las necesidades de productividad de la operación.
- Sistemas integrados de producto y entrega: Los sistemas de suministro de Fortis™ Extra 70 aseguran una alta precisión, productividad y fiabilidad en el abastecimiento.
- Versatilidad en cargas explosivas: Este producto puede cargarse a diferentes energías y densidades, lo que permite maximizar la fragmentación y el levantamiento, optimizando la productividad desde la mina hasta la planta.
- Cargas explosivas completamente acopladas: Fortis Extra 70 proporciona cargas que están perfectamente acopladas, garantizando así la maximización de los resultados en las voladuras.

Figura 39

Composición de la mezcla explosiva Heavy ANFO Fortis Extra 70

**Tabla 16**

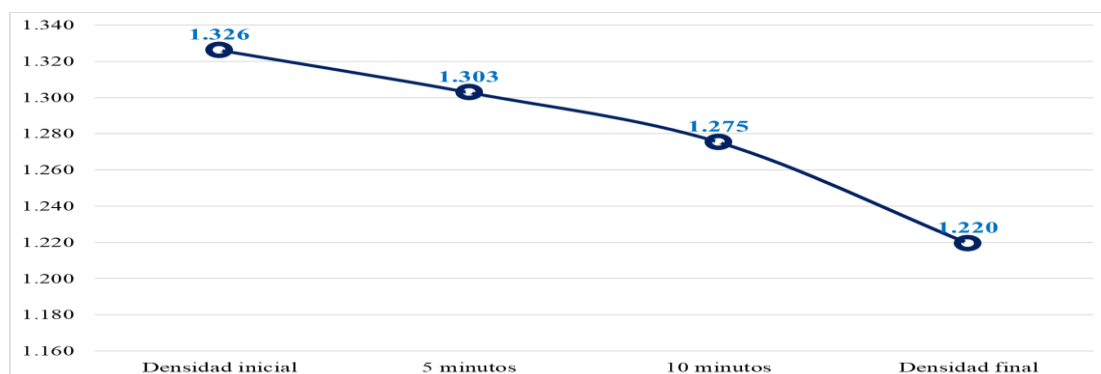
Especificaciones técnicas de la mezcla explosiva Heavy ANFO Fortis Extra 70

Especificaciones técnicas	Valor
Densidad	1.10-1.30 g/cm ³
Diámetro crítico	3.5 pulg
Tipo de taladro	Humedo y seco
Sistema de carguío	Bombeado
Velocidad de detonación (VOD)	5,500 a 6,200 m/s
Calor de detonación	2.69 MJ/kg
Potencia relativa efectiva al peso (RWS)	102-115 %
Potencia relativa efectiva en volumen (RBS)	180%
Sleep time	21 días

Nota. Recuperado de Orica

Figura 40

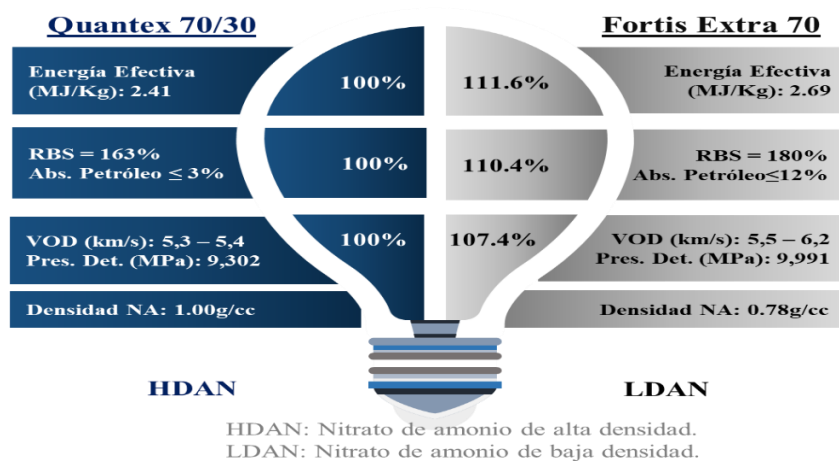
Comportamiento de la densidad de la mezcla explosiva Heavy ANFO Fortis Extra 70

**Figura 41**

Composición del Fortis Extra 70 vs Quantex 73 utilizado en fase 05 de mina Toquepala

**Figura 42**

Comparación técnica entre el H.A. Quantex 73 y H.A. Fostis Extra 70



4.1.16. Secuencia de salida de las voladuras.

En fase 05 de la Unidad Minera Toquepala se hizo uso de voladuras electrónicas, esto nos ayuda a tener mayor flexibilidad a la hora de elegir el mejor secuenciamiento de disparo, el cual puede variar desde la hora de la colocación del detonador en el taladro hasta la reunión de voladura donde se determina la secuencia del disparo. Asimismo, por medidas de seguridad se utilizó detonadores no eléctricos para garantizar que si la línea electrónica tiene algún corte o elongación que hace que su calidad se deteriore (fuga alta al momento de testearlo) pueda colocarse un detonador electrónico a modo de backup en la línea del detonador no eléctrico el cual tiene mejor resistencia; esto permitió que no afecte al secuenciamiento electrónico del resto de la malla.

Dentro de sus procedimientos se contempló que si algún detonador electrónico tiene al momento de testearse “fuga alta” puede perjudicar a toda la malla por lo que no se considerará para el amarre electrónico.

Por lo tanto, en la iniciación electrónica de los taladros se hizo uso de dos equipos: Logger y Blaster. El logger nos permitió testear la recepción de señal de los detonadores electrónicos en los taladros, el testeo puede realizarse: después de instalado, luego de colocada la mezcla explosiva y tapado de taladros, y la mañana del día del disparo; durante el amarre de los detonadores electrónicos para la voladura el logger nos permitió asignar un tiempo de retardo específico a los detonadores electrónicos en los taladros, según lo acordado en el diseño, el logger permaneció conectado a la troncal de la malla a volar mediante el cable de conexión común pero es alejado a una distancia de 200 metros para evitar que se dañe por la voladura.

Por otro lado, el blaster se utilizó durante el protocolo de voladura y es manejado fuera de los 500 metros de exclusión de personal de la voladura, pero mantiene comunicación inalámbrica con los loggers, en esa comunicación se hace recuento de la señal y calidad de los detonadores electrónicos los cuales deberán ser óptimos para dar pase a la autorización de

detonación. Una vez se confirma la autorización de detonación mediante el blaster se mandó la señal a los logger y estos mediante el cable a los detonadores para que detonen.

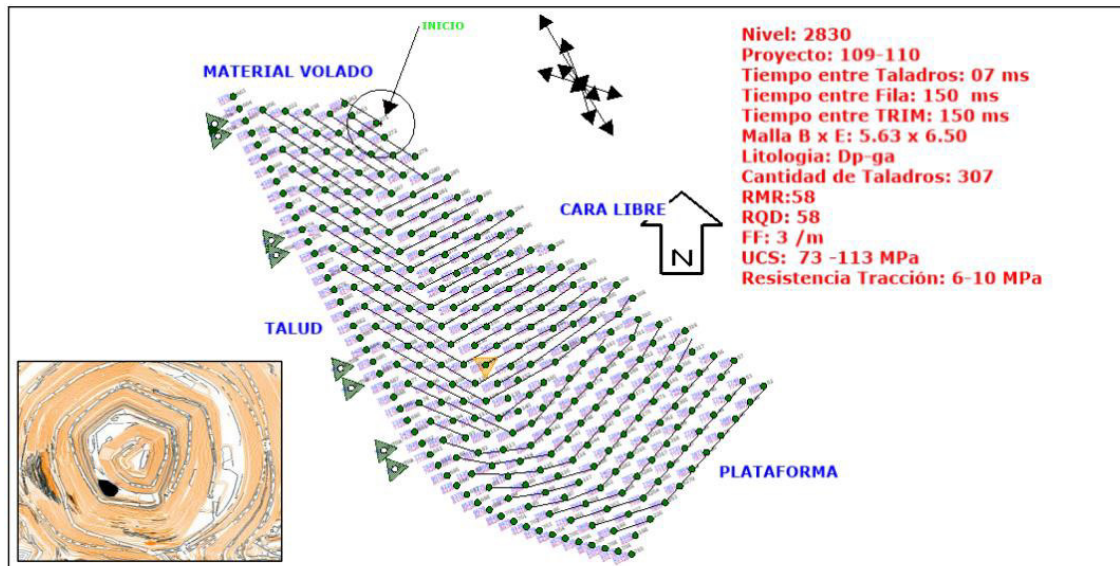
Figura 43

Imagen de instrumentos de iniciación de detonadores electrónicos: Logger en primer plano y Blaster en segundo plano



Figura 44

Detalle de amarre y secuenciamiento de los taladros primarios en fase 5.



4.1.17. Control de Densidad en Mezclas Explosivas

El control de la densidad en las mezclas explosivas es un factor determinante en su desempeño, ya que ha influido directamente en la forma en que se comportan durante la

detonación y en la cantidad de energía que pueden liberar. En términos generales, una mezcla con mayor densidad tiende a ofrecer una detonación más potente y estable, mientras que una densidad más baja puede limitar la velocidad de detonación y, por ende, reducir la efectividad de la voladura.

Este parámetro también es clave desde el punto de vista logístico y operativo, ya que tanto la adquisición como el almacenamiento y el uso del explosivo se gestionan en función de su peso. Por ello, la densidad se expresa comúnmente en términos de gravedad específica, que consiste en comparar la densidad del explosivo con la del agua. Este valor permitió determinar la cantidad exacta de explosivo que puede ser introducido en cada taladro de perforación.

Además, la densidad cumplió un rol importante en el diseño de la voladura, especialmente al momento de definir parámetros como el burden y el espaciamiento. En este contexto, se utilizó el concepto de densidad de carga, que representa el peso del explosivo aplicado por unidad de longitud y diámetro del taladro. En resumen, una densidad más alta está asociada a una mayor capacidad de liberación de energía, lo cual puede traducirse en una fragmentación más eficiente del macizo rocoso.

Tabla 17

Datos de las materias primas del Heavy Anfo Fortis Extra 70

Datos de materias primas del HA FE70	Valor
Densidad de la emulsión (g/cc)	1.336
Densidad del nitrato de amonio (g/cc)	0.724
Densidad del combustible (g/cc)	0.823
Densidad de solución gasificante (g/cc)	1.028
Densidad inicial del H.A. Fortis Extra 70 (g/cc)	1.301
Viscosidad de la emulsión (cP)	46,400
Temperatura de la emulsión (°C)	27.3

Antes de proceder con la medición de densidades en campo, es fundamental asegurar que tanto el camión fábrica como los instrumentos a emplear en esta actividad se encuentren

correctamente calibrados y en óptimas condiciones operativas. Esta verificación previa garantizó la confiabilidad de los resultados obtenidos, permitiendo un control preciso sobre las propiedades de la mezcla explosiva y asegurando la eficiencia del proceso de voladura.

Figura 45

Instrumentos empleados en la medición de densidades en campo

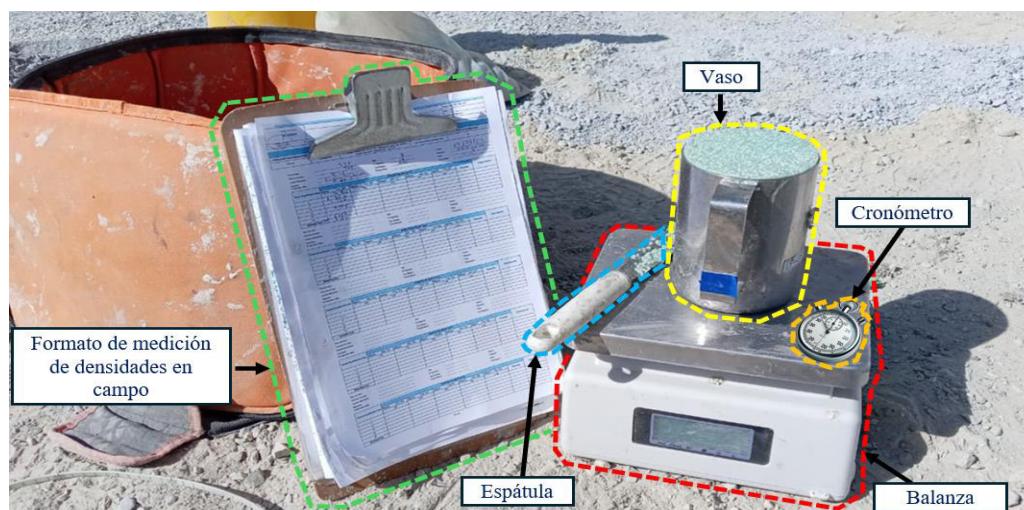


Figura 46

Proceso de medición de densidades en campo de la mezcla explosiva

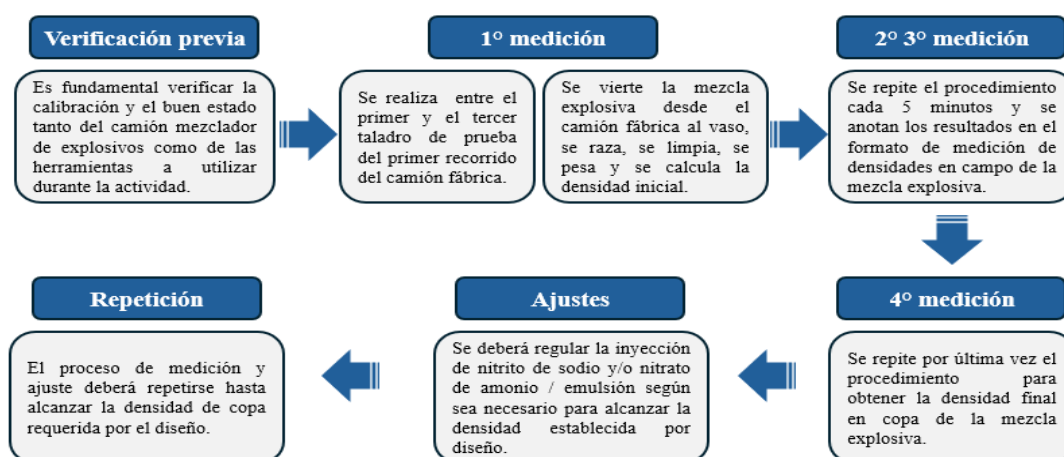


Figura 47

Medición y registro en campo de la densidad de la mezcla explosiva



4.1.18. Conservación de Energía Explosiva

La conservación de la energía explosiva se refiere al principio de aprovechar al máximo la energía liberada durante una voladura, orientándola de manera eficiente hacia la fragmentación del macizo rocoso. Este concepto busca minimizar las pérdidas de energía hacia el entorno, como vibraciones innecesarias o generación excesiva de gases, y maximizar su efectividad dentro del taladro.

Para lograrlo, es indispensable emplear un diseño técnico de la malla de perforación, seleccionar adecuadamente el tipo de explosivo y utilizar accesorios complementarios, como materiales de taco, que permitan confinar y direccionar la energía con mayor precisión. De esta manera, se optimiza el rendimiento de la voladura, mejorando tanto la calidad de la fragmentación como la eficiencia operativa en las etapas posteriores del proceso minero.

Preservar de manera eficiente la energía generada durante una voladura resulta fundamental para asegurar un rendimiento óptimo en toda la operación minera. Su adecuada gestión permitió obtener beneficios significativos en distintos aspectos del proceso:

- Eficiencia económica: Un aprovechamiento eficaz de la energía explosiva reduce el desperdicio de insumos y disminuye los gastos operativos relacionados con la voladura y el procesamiento del material extraído.
- Fragmentación uniforme del macizo rocoso: Cuando la energía se conserva y direcciona adecuadamente, se logra una rotura más homogénea del material, evitando la presencia de bloques sobredimensionados que dificultan su manipulación y tratamiento posterior.
- Optimización de las labores de carguío y acarreo: Una fragmentación más eficiente facilita la labor de los equipos de carguío, incrementando la velocidad de operación y mejorando el rendimiento del transporte del material.
- Reducción del impacto ambiental: Una voladura controlada disminuye la generación de efectos colaterales como las vibraciones, el ruido y la proyección de fragmentos, lo que contribuye a una operación más sostenible.
- Mejora de la seguridad operativa: Al dirigir adecuadamente la energía explosiva, se reduce el riesgo de eventos no deseados, brindando un entorno de trabajo más seguro para los operadores y las comunidades aledañas.

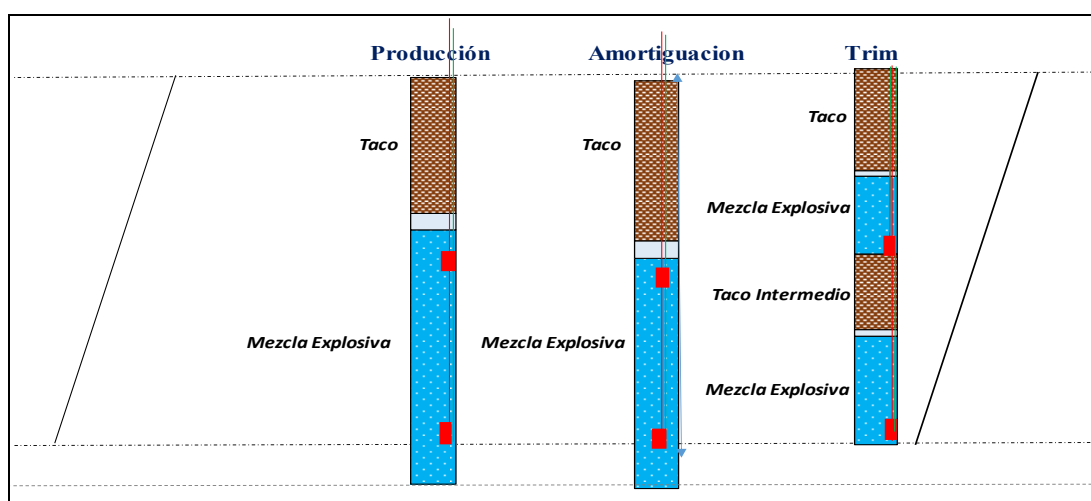
4.1.19. Taco

En las operaciones de voladura, el taco cumple una función esencial como elemento de confinamiento. Se trata de un material inerte que se emplea para sellar la parte superior del barreno una vez cargado con explosivo. Su finalidad es concentrar la energía generada durante la detonación, evitando su dispersión prematura y dirigiéndola de forma efectiva hacia el macizo rocoso.

El uso adecuado del taco no solo mejora la eficiencia de la voladura, sino que también contribuye a la reducción del ruido, las proyecciones de roca (flyrocks) y otros efectos no deseados. Para ello, es crucial que el taco tenga una longitud, densidad y compactación apropiadas. Una mala aplicación puede generar pérdidas de energía en el collar del barreno, afectando la fragmentación esperada y elevando los riesgos operacionales.

Figura 48

Distribución de carga explosiva y material de taco según tipo de taladro en fase 05.



4.1.20. Material de Tapado.

Para asegurar una voladura eficiente y segura, es fundamental elegir adecuadamente el material con el que se sellan los taladros. Este material, conocido como taco, debe cumplir con ciertas características físicas que garanticen su correcto desempeño en el confinamiento de la energía explosiva. A continuación, se describen los aspectos más relevantes:

Densidad del material: Un material de taco con una densidad apropiada permite un mejor confinamiento de los gases generados durante la detonación, lo que se traduce en una fragmentación más uniforme del macizo rocoso. Además, una mayor retención de energía contribuye a minimizar los riesgos de proyecciones incontroladas (flyrocks), mejorando la seguridad en el entorno de trabajo.

Granulometría: El tamaño de las partículas del material de tapado debe facilitar su ingreso al barreno. Fragmentos demasiado grandes pueden atascarse o dañar los componentes internos como las líneas de iniciación, mientras que un material excesivamente fino puede dificultar la compactación adecuada, disminuyendo la efectividad del taco.

Forma de las partículas: Idealmente, el material de taco debe presentar formas angulosas. Esta geometría favorece una mayor cohesión y compactación dentro del barreno, lo que mejora su capacidad de sellado frente a la presión de los gases de la explosión.

a) Detritus

El detritus es el residuo particulado que se genera durante el proceso de perforación de los taladros primarios en una malla de voladura. Este material, conformado principalmente por fragmentos de roca triturada, se acumula de forma natural en la boca del taladro, formando un cono alrededor del collarín. Su presencia es un indicador visual del avance de la perforación y, además, puede ser reutilizado posteriormente como material de taco, siempre que cumpla con las condiciones granulométricas necesarias.

Figura 49

Detritus obtenido de la perforación primaria



Figura 50

Uso del detritus como material de taco en un proyecto de voladura



b) Gravilla

La gravilla es un material granular que se obtiene del proceso de chancado y zarandeo de rocas inertes. Su aplicación principal en operaciones de voladura consiste en rellenar el espacio libre del taladro una vez que se ha colocado la carga explosiva. Este relleno, conocido también como taco, cumple una función esencial: confinar la energía generada durante la detonación, asegurando que esta se transmita eficientemente al macizo rocoso. Gracias a su granulometría adecuada y naturaleza no reactiva, la gravilla favorece una fragmentación más controlada, reduce los riesgos de proyecciones y contribuye a mejorar la seguridad y eficiencia del proceso de voladura.

Tabla 18

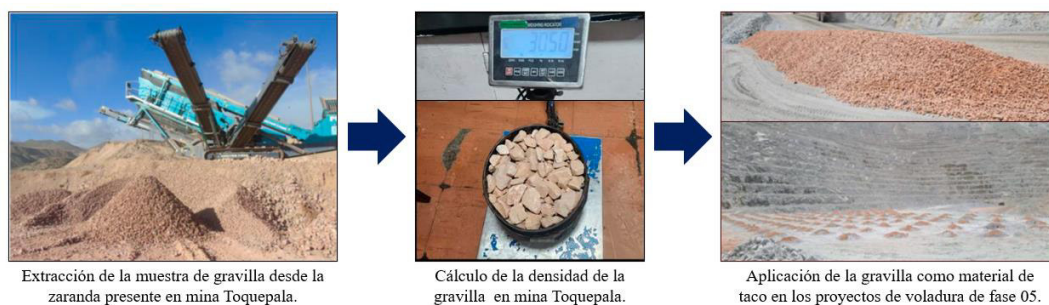
Densidad de la gravilla proveniente de la cantera Toquepala

Peso de la muestra (Kg)	Volumen del recipiente (cm3)	Densidad (g/cm3)
30.5	21,250	1.435

Nota. Recuperado de Orica

Figura 51

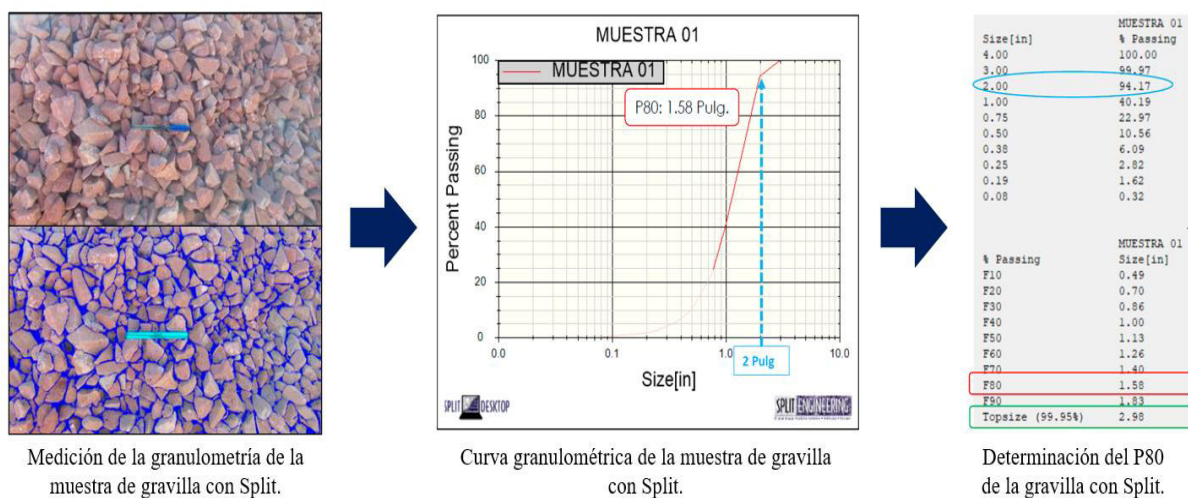
Cálculo de densidad de la gravilla y su aplicación en fase 05



Generalmente la gravilla está compuesta por fragmentos de roca de tamaño pequeño (entre 1" y 2" de diámetro).

Figura 52

Medición de la granulometría de la gravilla empleada en mina Toquepala



4.1.21. Longitud de Taco.

Determinar una altura adecuada para el taco es esencial para lograr un confinamiento efectivo de la carga explosiva dentro del taladro. Este factor no solo contribuye a una mejor distribución de la energía generada durante la detonación, sino que también reduce el riesgo de

pérdida de energía causada por la expulsión prematura del taco, un problema común cuando el material de sellado no es el apropiado en términos de densidad o granulometría.

Una manera técnica de evaluar el nivel de confinamiento es a través del parámetro conocido como Scaled Depth of Burial (SD). Este indicador relaciona el tipo de material utilizado para el taco con la cantidad de explosivo cargado en el taladro, considerando un volumen equivalente a diez veces el diámetro del barreno. Este enfoque permite ajustar las condiciones de tapado según las características específicas del explosivo y del terreno, optimizando así el desempeño de la voladura.

Figura 53

Cálculo de taco por Frank Chiapetta

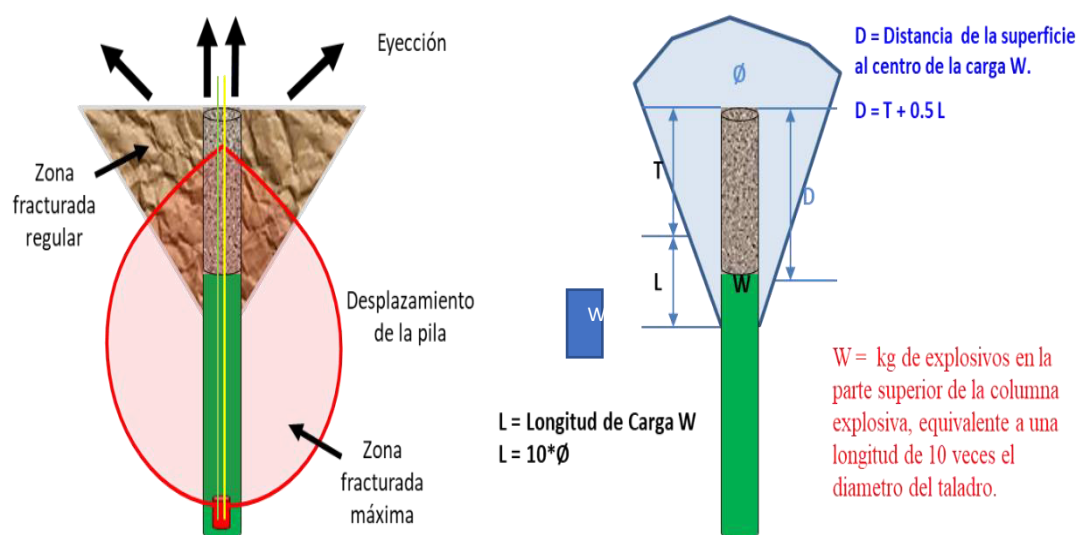
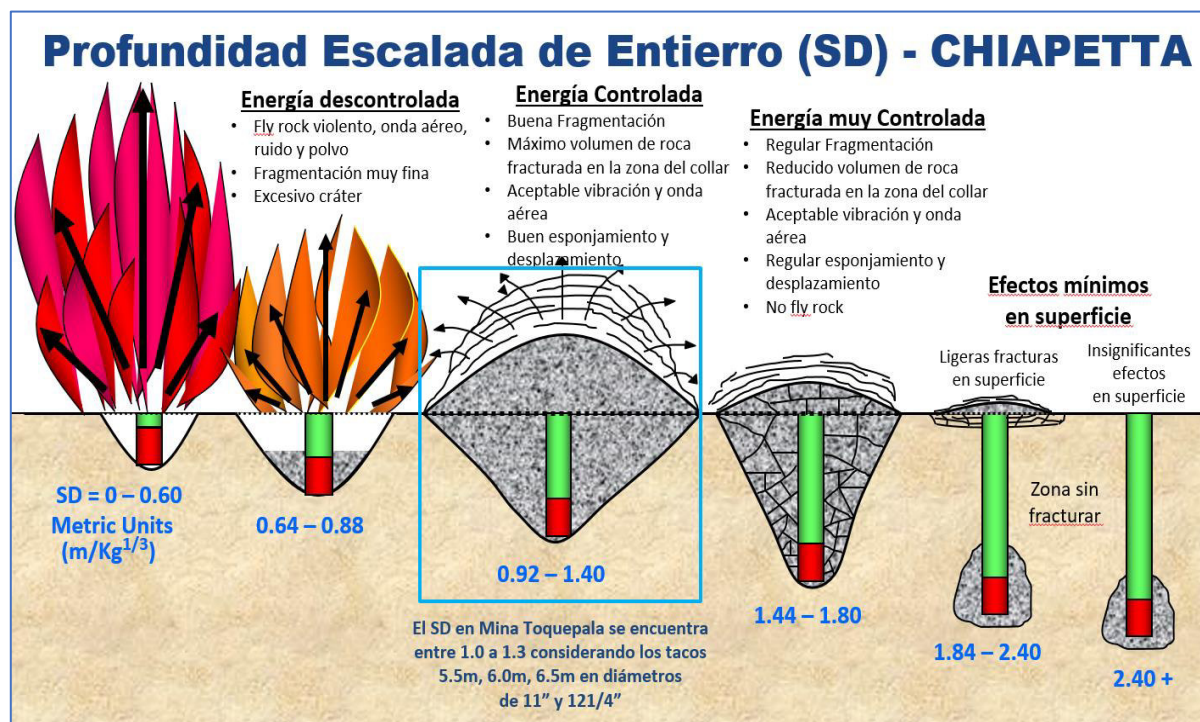


Figura 54*Profundidad escala de entierro (SD) – Chiapetta*

Nota. Recuperado de Frank Chiapetta de BAI

Según lo observado en la ilustración, se puede interpretar que, a medida que disminuye la profundidad de entierro escalada (Scaled Depth of Burial, SD), de derecha a izquierda, aumenta notablemente la probabilidad de que se generen proyecciones no controladas de material (flyrock). Esta condición incrementa tanto la velocidad de expulsión como el alcance de los fragmentos lanzados, comprometiendo la seguridad de la operación.

Para evitar este tipo de eventos, se recomienda mantener los valores de SD dentro de un rango óptimo, comprendido entre 0.92 y 1.4. Este intervalo ha demostrado ser efectivo para lograr una liberación controlada de energía, promoviendo una adecuada fragmentación del macizo rocoso, al mismo tiempo que se mitigan las vibraciones y se reducen los riesgos asociados a proyecciones peligrosas.

4.1.22. Accesorio para la retención de energía.

Los accesorios destinados a la retención de energía cumplen un rol clave en la mejora del rendimiento de las voladuras. Estos elementos, incorporados estratégicamente dentro del

sistema de iniciación, están diseñados para maximizar el aprovechamiento de la energía liberada por los explosivos.

Su función principal es canalizar dicha energía de forma más eficiente hacia el macizo rocoso, minimizando su dispersión en forma de vibraciones, rebotes o desplazamientos innecesarios de material. Gracias a esta optimización, se logra una fragmentación más controlada y uniforme, lo cual favorece la productividad y reduce los impactos negativos en el entorno de la operación minera.

a) Conigass

El Conigass es un accesorio de uso especializado en operaciones mineras, concebido para reforzar la seguridad y eficiencia durante los procesos de voladura. Su diseño tiene como propósito contribuir al control de la energía liberada durante la detonación, ayudando a dirigirla de manera más efectiva hacia el macizo rocoso y reduciendo así los riesgos de proyecciones o efectos no deseados.

Este dispositivo está fabricado con un polímero de alta resistencia, adecuado para soportar condiciones exigentes en campo. Además, cuenta con un sistema de sujeción mediante un orificio y una cuerda sintética, lo que facilita su instalación en los taladros y garantiza una fijación firme durante la ejecución del disparo.

Figura 55

Accesorio para la retención de energía Conigass



Tabla 19*Características del accesorio Conigass*

Características	Norma	Valores
Dureza (Shore D)	ASTM D2240	40
Carga de rotura (kg/cm ²)	ASTM D638	105
Alargamiento (%)	ASTM D638	65
Densidad (g/cm ³)	ASTM D792	0.93
Absorción de humedad (%)	ASTM D570	0.07

El accesorio cumple un papel clave en la contención de la energía generada durante la detonación, permitiendo que esta se concentre en la zona de trabajo prevista. Esta funcionalidad no solo mejora la eficiencia del proceso de fragmentación, sino que también contribuye significativamente a la reducción de impactos no deseados en áreas circundantes, como la dispersión de fragmentos o las vibraciones.

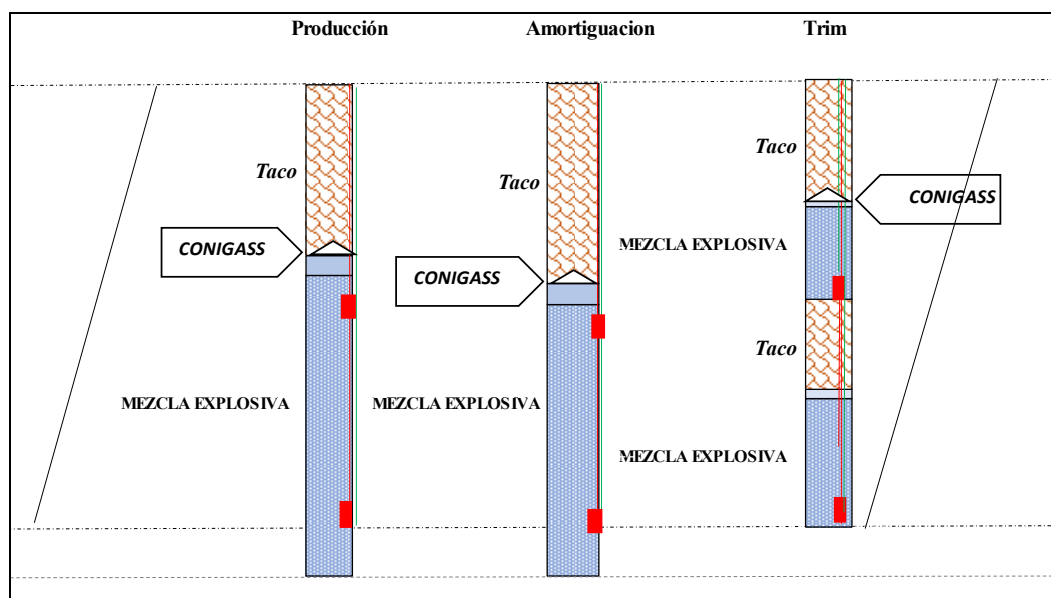
Entre los principales beneficios asociados a su uso, destacan:

- Mayor retención de energía explosiva, lo que permite una liberación más controlada y efectiva.
- Reducción de la expulsión del taco, evitando pérdidas de energía y mejorando la seguridad en el entorno de voladura.
- Uso más eficiente del explosivo, optimizando su rendimiento y reduciendo el desperdicio.
- Mejor calidad en la fragmentación, lo que facilita las operaciones posteriores de carguío y acarreo.
- Incremento en la productividad por taladro, al mejorar la distribución y el aprovechamiento de la energía.
- Control efectivo del fenómeno de flyrock, minimizando proyecciones peligrosas de roca.

- Disminución en la contaminación entre el explosivo y el taco, asegurando una mayor estabilidad del sistema de carga.
- Fabricación en material dieléctrico, con propiedades antiestáticas conforme a la normativa DS-024 MEM, lo que refuerza su seguridad durante la manipulación y el uso en campo.

Figura 56

Ubicación del conigass en los tipos de taladros en una malla voladura



4.1.23. Equipos de monitoreo de fragmentación.

El proceso de medición de la fragmentación en minería implica evaluar tanto el tamaño como la distribución de los fragmentos de roca generados durante una voladura. Esta medición es crucial para verificar si la fragmentación alcanzada cumple con los estándares operativos y de producción establecidos.

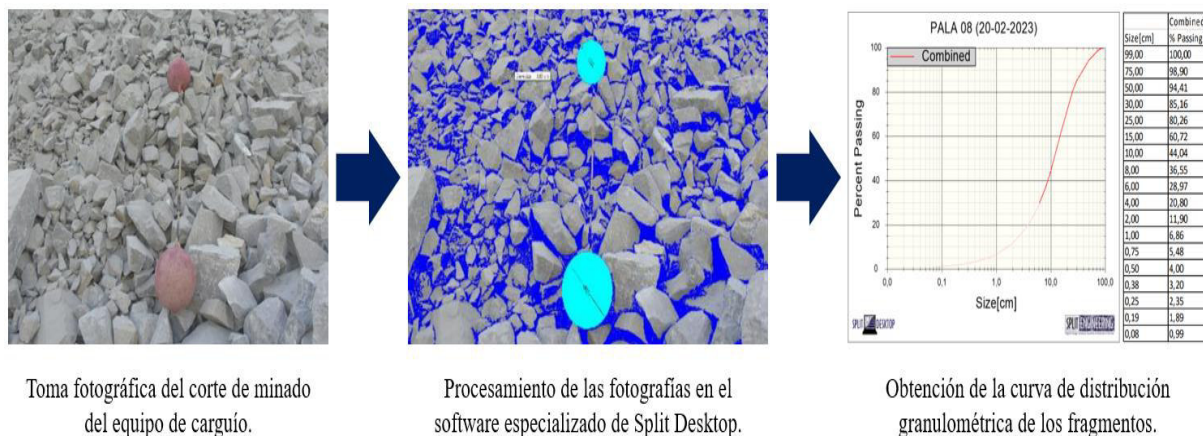
Para realizar esta medición en el corte de los equipos de carguío, existen diversos productos disponibles en el mercado, entre los cuales se emplearon los siguientes:

a) Split Desktop

Este proceso implica la toma de fotografías de diversos sectores del material volado en el frente de minado, utilizando dos objetos de escala (como balones) como referencia. Este método ayuda a mitigar el impacto de la pendiente en la medición. Posteriormente, las imágenes capturadas se procesan mediante el software especializado Split Desktop, que permite generar una curva de distribución del tamaño de los fragmentos. Este análisis proporciona valores clave como el P80, P50 y otros parámetros que permiten caracterizar la fragmentación del material.

Figura 57

Proceso de medición de fragmentación con el Split Desktop



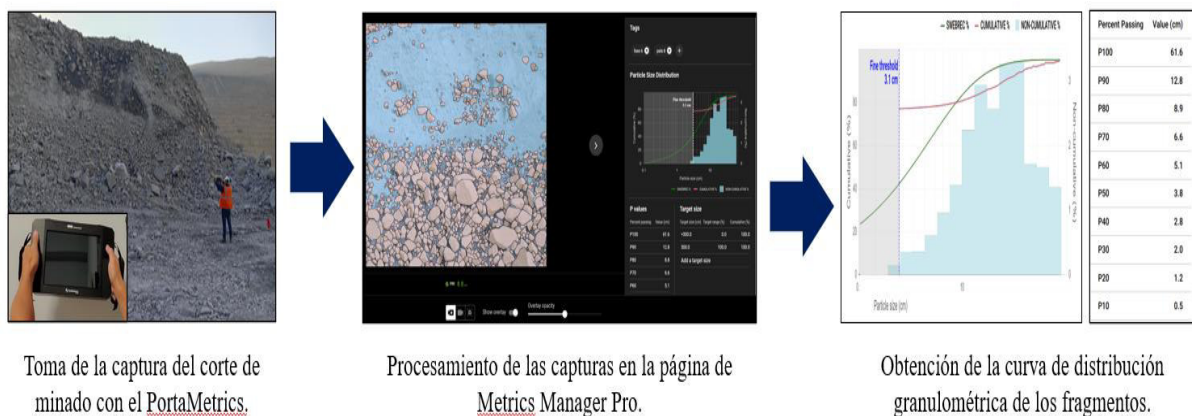
b) PortaMetrics

Este método implica la toma de capturas en el frente de minado utilizando una Tablet portátil equipada con inteligencia artificial y tecnología de imágenes 3D. A través de esta herramienta, es posible evaluar, en tiempo real, la distribución de tamaños de los fragmentos generados por la voladura, sin necesidad de un objeto de escala de referencia.

El uso de esta tecnología no solo mejora la precisión de las mediciones, sino que también reduce los riesgos asociados a la proximidad de la cara del banco, así como la necesidad de desplazarse a pie por la pila de material, minimizando así los peligros potenciales para los trabajadores.

Figura 58

Proceso de medición de fragmentación con el PortaMetrics



4.2. Diseño de Investigación

El objetivo de esta investigación es evaluar la efectividad de distintas mezclas explosivas utilizadas en las operaciones de voladura primaria en la zona mineralizada de fase 05 en la Unidad Minera Toquepala. Se enfocó específicamente en comparar los resultados de fragmentación generados por la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70, en relación con la mezcla explosiva H.A. Quantex 73, que ha sido utilizada previamente en las voladuras. Este análisis se realizó tanto en condiciones controladas en campo como en laboratorio, utilizando parámetros clave como el percentil P80, que define el tamaño de los fragmentos más pequeños, y la tasa de excavación (Dig Rate), que indica la eficiencia en el movimiento de material extraído.

Para llevar a cabo este estudio, se evaluaron los efectos de diversas combinaciones de explosivos y materiales de taco avanzados, tales como la gravilla y el retenedor de energía Conigass, cuyo propósito es optimizar la fragmentación del macizo rocoso y, a su vez, mejorar la productividad de los equipos de excavación. Estos materiales han mostrado un potencial significativo para aumentar la eficiencia de la voladura al reducir las pérdidas de energía y maximizar la transferencia de energía hacia el macizo rocoso.

Además, se establecieron protocolos para controlar variables externas como las condiciones climáticas y geológicas que puedan influir en los resultados, con el fin de asegurar la replicabilidad del estudio en otros contextos geológicos similares. De esta manera, se busca proporcionar soluciones prácticas para mejorar los procesos de voladura en la minería.

4.3. Población y Muestra

4.3.1. Población

La población de esta investigación está compuesta por todos los proyectos de voladura realizados en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala durante el año 2023.

4.3.2. Muestra

La muestra está conformada por 11 proyectos de voladura representativas realizadas en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala, seleccionadas bajo un criterio de representatividad geológica y operativa, a fin de garantizar que se cubran las distintas características del macizo rocoso presente en la zona y asegurar la consistencia de los resultados.

4.4. Procedimiento, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Información

El proceso de recolección de datos para esta investigación se estructuró en tres fases clave: preparación, ejecución y análisis. Cada una de estas fases fue cuidadosamente diseñada para asegurar que los datos obtenidos sean confiables y representativos. El objetivo principal es evaluar la optimización de la fragmentación en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala, analizando el impacto de diversas configuraciones de mezcla explosiva y materiales de taco en el proceso de voladura. La correcta implementación de cada fase garantizó

que los resultados reflejen con precisión las variables que influyen en la eficiencia operativa de la voladura.

4.4.1. Preparación

Durante esta fase, se llevó a cabo la planificación minuciosa de las voladuras, con el objetivo de establecer los parámetros operacionales, geológicos y técnicos que guiaron cada proyecto de voladura seleccionado. Esta etapa incluye la identificación de la zona específica de voladura dentro de la fase 05 de la Unidad Minera Toquepala, la definición de los parámetros de perforación, así como la preparación de las mezclas explosivas (H.A. Fortis Extra-70 y H.A. Quantex 73) y los materiales de taco, tales como la gravilla y el retenedor de energía Conigass. Adicionalmente, se establecieron las especificaciones de perforación y carga explosiva, siguiendo las normativas operativas de la unidad minera para asegurar que todas las operaciones sean consistentes y cumplan con los estándares establecidos.

En el desarrollo de la presente investigación se recopiló un conjunto integral de información técnica que permitió evaluar con precisión el desempeño del proceso de voladura y sus efectos en el macizo rocoso. Este compendio incluyó el monitoreo detallado de parámetros como la fragmentación resultante, la conformidad de los contornos de excavación, la presencia de roturas hacia atrás, la propagación de vibraciones y la ocurrencia de golpe de aire, todos ellos fundamentales para determinar la eficiencia y seguridad de la operación minera. Asimismo, se efectuó un registro sistemático de datos mediante formatos estandarizados, secuencias filmadas y evidencia fotográfica, garantizando la trazabilidad y objetividad de los hallazgos. Toda esta información ha sido organizada y se presentó íntegramente en los anexos, permitiendo su revisión detallada y asegurando la transparencia y rigurosidad del estudio (Anexo 4, 5 y 6).

Para el procesamiento y análisis de la información recopilada en campo, se llevó a cabo una compilación sistemática de todos los registros obtenidos durante el monitoreo de

fragmentación y parámetros asociados a la voladura. Los datos iniciales fueron organizados y depurados mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel, lo que permitió estructurar matrices comparativas, realizar cálculos estadísticos y facilitar la trazabilidad de cada medición. Posteriormente, se emplearon herramientas especializadas como Split Desktop, software que procesa imágenes capturadas en el frente de minado y genera curvas granulométricas precisas (P80, P50, entre otros), y PortaMetrics, tecnología portátil basada en inteligencia artificial y modelado 3D que permitió obtener distribuciones de fragmentos en tiempo real sin necesidad de objetos de escala. La integración de ambos sistemas garantizó un análisis robusto, combinando capacidad estadística, evidencia visual y modelamiento digital, cuyos resultados alimentan directamente el diseño metodológico presentado en la siguiente sección. Toda la información procesada se adjunta íntegramente en los anexos para asegurar la reproducibilidad del estudio.

Por otro lado, la correcta ejecución de las pruebas y la fiabilidad de los datos obtenidos dependieron en gran medida de la capacitación del personal involucrado. Se desarrollaron sesiones formativas orientadas a estandarizar criterios de medición, uso de instrumentos de registro, manejo de software especializado y aplicación de protocolos de seguridad durante el monitoreo. Esta preparación permitió que los operadores comprendieran no solo el procedimiento técnico, sino también la importancia de cada etapa del levantamiento de información para la calidad del estudio. La capacitación continua contribuyó así a minimizar errores humanos, fortalecer la consistencia de los registros y asegurar que las mediciones reflejaran adecuadamente las condiciones reales de operación (Anexo 7).

4.4.2. Ejecución

Una vez completada la fase de preparación, se procede a la ejecución de las voladuras bajo las cuatro configuraciones experimentales previamente definidas:

H.A. Quantex 73 + Detritus.

H.A. Fortis Extra-70 + Detritus.

H.A. Fortis Extra-70 + Gravilla.

H.A. Fortis Extra-70 + Gravilla + Conigass.

Durante la ejecución de cada voladura, se llevó a cabo un seguimiento riguroso de todas las fases del proceso, incluyendo perforación, carguío, tapado y detonación, para garantizar que los parámetros previamente establecidos se sigan con precisión. Además, se monitoreó de cerca cada etapa para asegurar el control y la calidad en la ejecución. Al finalizar cada voladura, se procedió con la medición y recolección de muestras de fragmentación, utilizando herramientas y técnicas especializadas para obtener datos precisos sobre la eficiencia de cada configuración experimental.

4.4.3. Recolección de Información

Para la recolección de datos sobre fragmentación y tasa de excavación, se emplearon herramientas avanzadas y sistemas de monitoreo de última generación:

- Fragmentación (P80): Se utilizó tecnología avanzada, como el sistema PortaMetrics y Split Desktop, que permite medir con alta precisión el tamaño de las partículas y calcular el valor del percentil P80. Este dispositivo es fundamental para obtener una distribución precisa del tamaño de los fragmentos resultantes de las voladuras y, por lo tanto, evaluar la calidad de la fragmentación en función de las configuraciones experimentales empleadas.
- Tasa de Excavación (Dig Rate): La tasa de excavación se midió mediante el monitoreo del rendimiento de las palas eléctricas en términos de toneladas excavadas por hora. Para ello, se utilizó sistemas de monitoreo de producción como SIO y JMineOps, que están instalados en los equipos de excavación. Estos sistemas permitieron realizar un seguimiento detallado del rendimiento de las palas durante las operaciones posteriores

a las voladuras, proporcionando datos valiosos para el análisis de la productividad y eficiencia operativa.

4.5. Análisis Estadístico

El análisis estadístico en esta investigación se llevó a cabo con el objetivo de evaluar las diferencias significativas entre los resultados obtenidos para la fragmentación y la tasa de excavación, utilizando las diversas configuraciones de voladura aplicadas en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala. Los datos obtenidos de las mediciones de fragmentación (P80) y de tasa de excavación (Dig Rate) serán procesados de manera sistemática, permitiendo identificar cómo las combinaciones de mezcla explosiva y material de taco influyen en estos indicadores clave de rendimiento.

Para este análisis, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, el cual permite comparar las medias de los resultados obtenidos en las cuatro configuraciones de voladura: H.A. Quantex 73 + Detritus, H.A. Fortis Extra-70 + Detritus, H.A. Fortis Extra-70 + Gravilla y H.A. Fortis Extra-70 + Gravilla + Conigass. Este tipo de análisis es adecuado para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en los resultados de fragmentación (P80) y tasa de excavación (Dig Rate) entre las distintas combinaciones de voladura.

Además, se calculó medidas descriptivas como la media, la desviación estándar y los intervalos de confianza, lo que facilitará la interpretación de las diferencias entre las configuraciones de voladura y proporcionó una visión más completa sobre la consistencia y variabilidad de los datos.

Los resultados del análisis son presentados mediante tablas y gráficos, lo que permitió una visualización clara de las comparaciones de las medias y una interpretación precisa de las diferencias significativas en los resultados. Este enfoque contribuyó a la toma de decisiones

informadas con relación a las mejores prácticas para optimizar los procesos de voladura en la Unidad Minera Toquepala.

CAPITULO V

RESULTADOS DE LA VOLADURA CON HEAVY ANFO QUANTEX 73 + DETRITUS

Se realizó el análisis de fragmentación (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 en fase 05 (fase de mineral) con la aplicación de detritus como material de taco en la Unidad Minera Toquepala.

Tabla 20

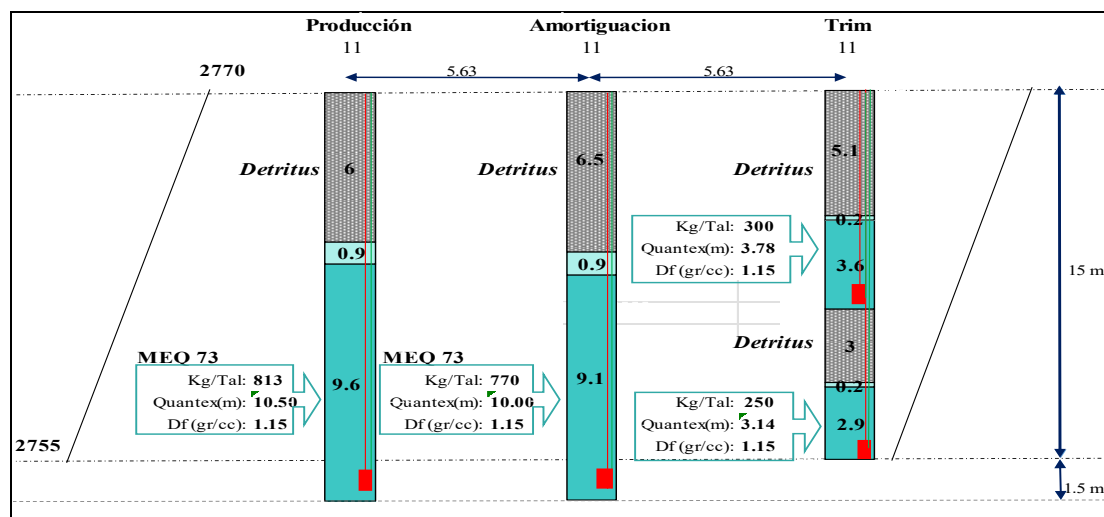
Parámetros del diseño de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus

Heavy Anfo Quantex 73 – Py. 2755 030 032 033 034	Producción	Amortiguado	Trim	
Diámetro (in)	11	11	11	
Altura de Banco (m)	15	15	15	
Sobre Perforación (m)	1.5	1.5	0	
Espaciamiento (m)	6.50	6.50	4.00	
Burden (m)	5.63	5.63	5.63	
Taco (m)	6.0	6.5	5.1	
Taco Intermedio (m)			3	
Longitud de Carga (m)	9.6	9.1	2.9	3.6
Mezcla Explosiva (kg)	813	770	250	300
Densidad Inicial (g/cc)	1.38	1.38	1.38	
Densidad Final (g/cc)	1.15	1.15	1.15	
Esponjamiento (m)	0.9	0.9	0.2	0.2
Volumen (m3)	549	549	338	
Tonelaje (TM)	1482	1482	912	
Densidad de Roca (g/cc)	2.7	2.7	2.7	
Factor de Potencia (kg/TM)	0.548	0.520	0.604	
Nivel		2755		
Energía Efectiva (MJ/Kg)		2.49		
Fuerza relativa en peso (RWS)		108		

Heavy Anfo Quantex 73 – Py. 2755 030 032 033 034	Producción	Amortiguado	Trim
Fuerza relativa en volumen (RBS)		165	
VOD (ms)		5500	
Presión de Detonación (kbar)		95	

Figura 59

Diseño de taladros con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco



Nota. Recuperado de Orica

Tras llevar a cabo las voladuras en los proyectos de mineral 2755, 030, 032, 033 y 034, utilizando la mezcla explosiva Heavy Anfo Quantex 73 y detritus como material de taco, se procedió al análisis de los resultados mediante el software especializado PortaMetrics. Este software permitió evaluar de manera detallada la fragmentación obtenida, proporcionando datos precisos sobre el tamaño de los fragmentos generados y permitiendo una comparación de la eficiencia de la voladura en términos de la distribución del material fragmentado.

Tabla 21

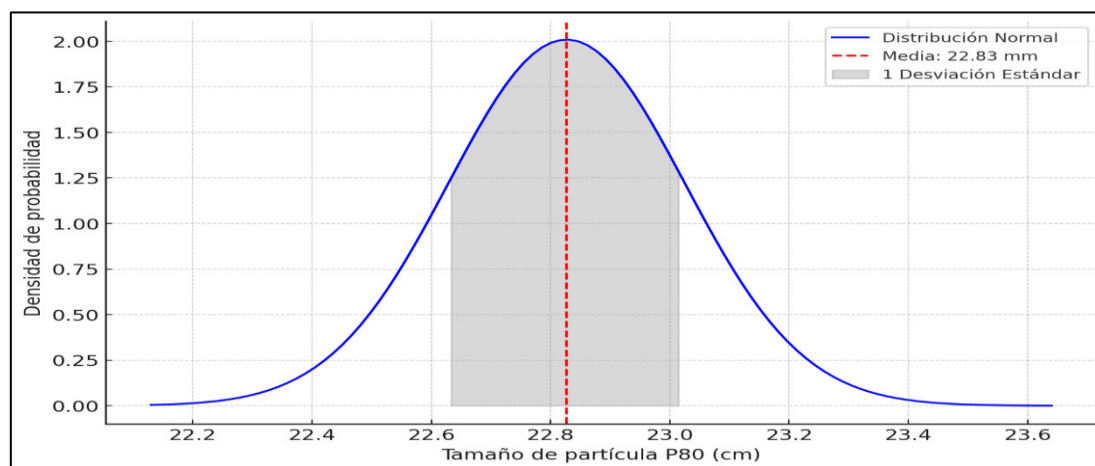
Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Quantex 73 y detritus

Percent Passing	S01-1	S01-2	S01-3	S01-4	S01-5	S01-6	S01-7	S01-8	S01-9	S01-10
P10	0.24	0.39	0.29	0.25	1.46	0.19	1.48	1.04	0.31	0.7
P20	1.11	1.53	1.29	1.14	3.56	0.94	3.71	2.85	1.32	2.25
P30	2.71	3.38	3.06	2.77	6	2.39	6.3	5.13	3.03	4.45
P40	5.09	5.89	5.62	5.18	8.72	4.61	9.17	7.79	5.44	7.25
P50	8.35	9.07	9.05	8.28	11.61	7.66	12.39	10.81	8.64	10.39
P60	12.29	12.69	12.77	12.12	14.87	11.25	15.48	14.02	12.27	13.88
P70	16.89	16.96	17.05	16.66	18.42	16.09	18.83	17.73	16.51	17.99
P80	23.13	22.93	22.76	22.65	22.68	22.8	22.94	22.64	22.63	23.14
P90	34.80	36.46	34.77	32.12	28.68	32.52	29.23	31.34	32.28	31.23
Topsize (99.95%)	74.17	130.36	81.94	109.64	54.73	99.94	50.06	72.93	72.26	60.03

La Tabla 21 presenta los resultados obtenidos de la fragmentación del macizo rocoso tras la voladura utilizando la mezcla explosiva Heavy Anfo Quantex 73 junto con detritus como material de taco. El análisis granulométrico se realizó en diez muestras distintas (S01-1 a S01-10), proporcionando el porcentaje de partículas que atraviesan diferentes mallas, y se detallan los valores correspondientes a los percentiles P10, P20, P30, P40, P50, P60, P70, P80, P90, así como el tamaño máximo, representado por el Topsizer 99.95%.

Figura 60

Gráfico estadístico de los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco



La Figura 60 ilustra la distribución normal o campana de Gauss de los tamaños de partícula P80 obtenidos en diez muestras tras la voladura. La línea azul representa la densidad de probabilidad de estos valores, mientras que la línea discontinua roja señala el tamaño promedio de partícula P80, que es de 22.83 cm. La zona sombreada en gris indica el rango de una desviación estándar alrededor de la media, lo que evidencia que la mayoría de los valores se agrupan cerca del promedio, mostrando una baja variabilidad.

En este análisis, los registros obtenidos del frente de minado de la Pala 01 permitieron generar la curva granulométrica correspondiente, la cual presenta el valor de P80, como se ilustra en la Figura 61.

Figura 61

Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco

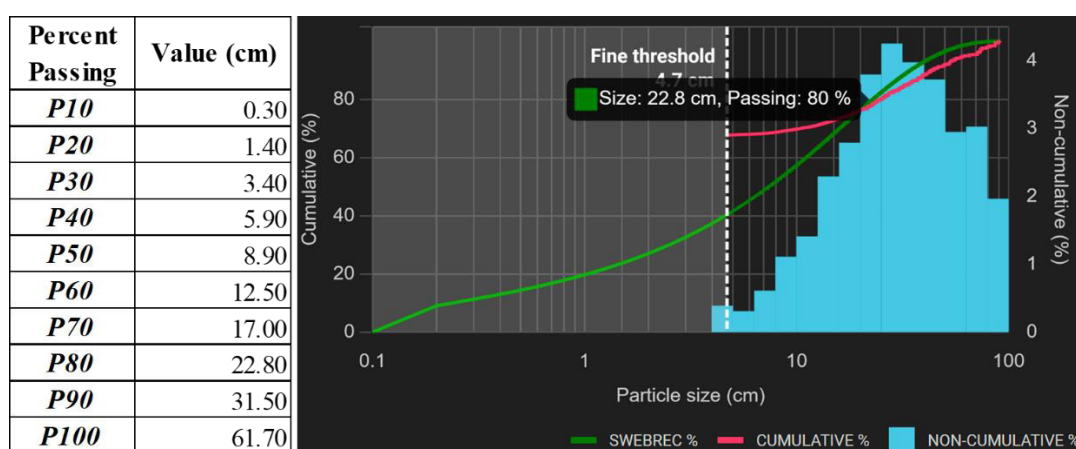
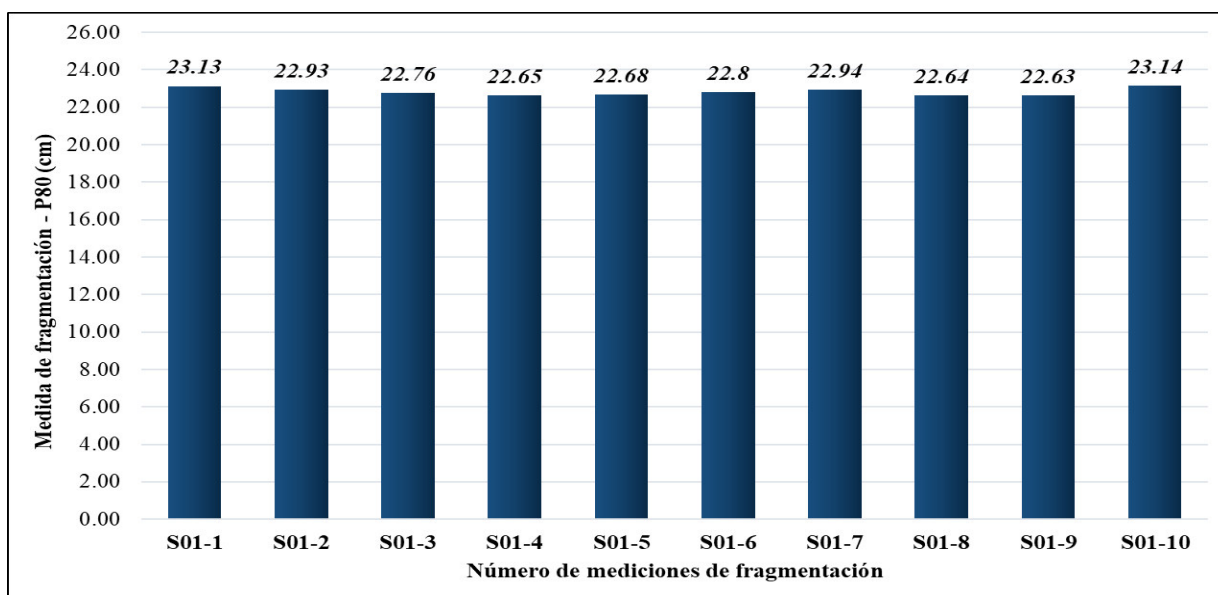


Figura 62

Medición de P80 (cm) a los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco



La Figura 62 revela que el valor de P80 obtenido presenta una variabilidad, con valores que fluctúan entre 22.63 (S01-9) y 23.14 (S01-10). En este caso, S01-9 muestra el mayor grado de fragmentación, seguido de cerca por los demás puntos de muestreo.

CAPITULO VI

RESULTADOS DE LA VOLADURA CON HEAVY ANFO FORTIS EXTRA-70 + DETRITUS / HEAVY ANFO FORTIS EXTRA-70 + GRAVILLA / HEAVY ANFO FORTIS EXTRA-70 + GRAVILLA + CONIGASS.

6.1. Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70 y Detritus como Material de Taco

Se llevó a cabo un análisis de fragmentación (P80) a los proyectos de voladura realizado con H.A. Fortis Extra-70 en la fase 05 (zona mineral) de la Unidad Minera Toquepala, utilizando detritus como material de taco.

Tabla 22

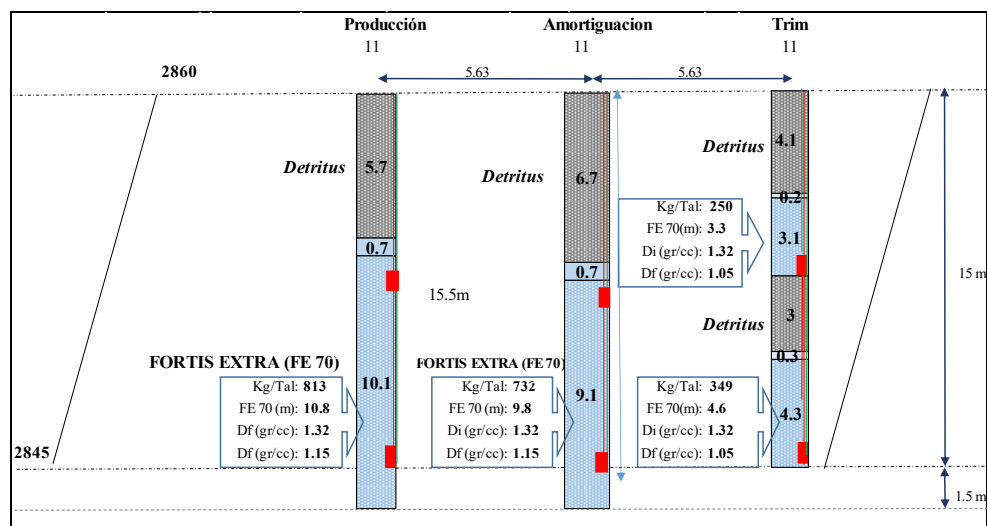
Parámetros del diseño de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus

Heavy Anfo Fortis Extra 70 – Py. 2845 112 114 115	Producción	Amortiguado	Trim	
Diámetro (in)	11	11	11	
Altura de Banco (m)	15	15	15	
Sobre Perforación (m)	1.5	1.5	0	
Espaciamiento (m)	6.50	6.50	4.00	
Burden (m)	5.63	5.63	5.63	
Taco (m)	5.7	6.7	4.1	
Taco Intermedio (m)			3	
Longitud de Carga (m)	10.1	9.1	4.3	3.1
Mezcla Explosiva (kg)	813	732	349	250
Densidad Inicial (g/cc)	1.32	1.32	1.32	
Densidad Final (g/cc)	1.15	1.15	1.05	
Esponjamiento (m)	0.7	0.7	0.3	0.2
Volumen (m3)	549	549	338	
Tonelaje (TM)	1482	1482	912	
Densidad de Roca (g/cc)	2.7	2.7	2.7	
Factor de Potencia (kg/TM)	0.549	0.494	0.382	
Nivel		2845		
Energía Efectiva (MJ/Kg)		2.62		

Fuerza relativa en peso (RWS)	113
Fuerza relativa en volumen (RBS)	175
VOD (ms)	5800
Presión de Detonación (kbar)	103

Figura 63

Diseño de taladros con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco



Nota. Recuperado de Orica

Después de ejecutar las voladuras en los proyectos de mineral 2845 112 114 115, empleando la mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70 y detritus como material de taco, se procedió a analizar los resultados utilizando el software PortaMetrics.

Tabla 23

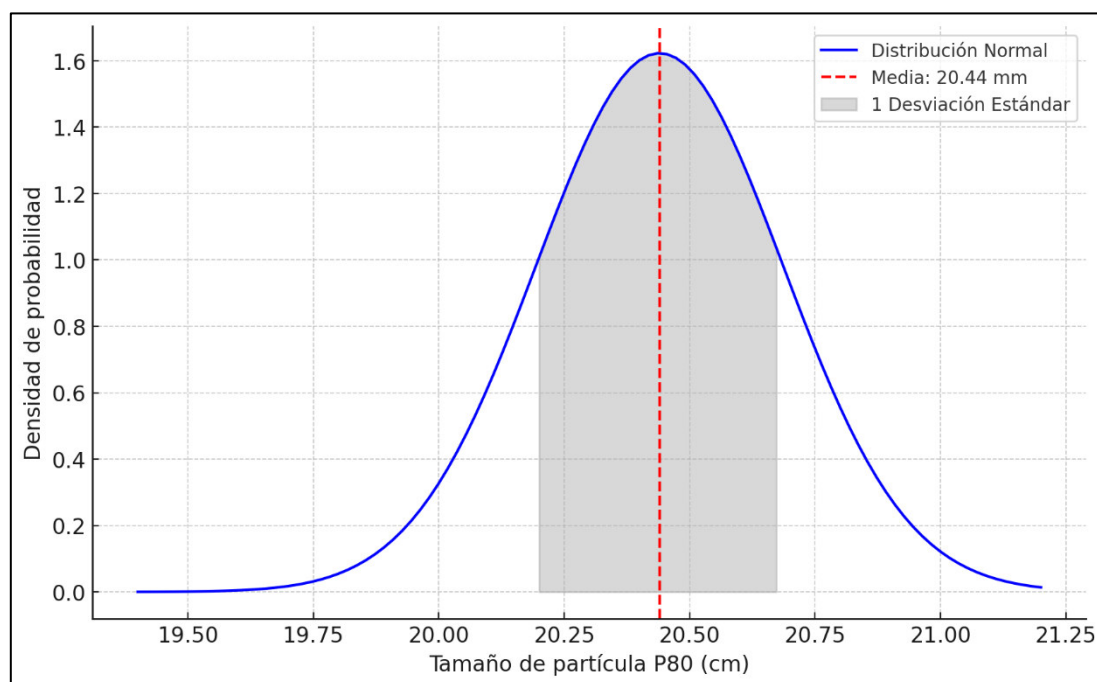
Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus

Percent Passing	S01-1	S01-2	S01-3	S01-4	S01-5	S01-6	S01-7	S01-8	S01-9	S01-10
P10	2.90	3.10	2.90	3.40	3.2	1.5	2.6	2.9	3	2.9
P20	3.40	3.80	4.40	4.10	3.9	3.8	3.2	4.1	4.1	4
P30	3.50	4.60	5.00	4.70	5.2	5.1	3.8	4.9	4.7	4.5
P40	3.70	6.50	6.50	5.50	7.1	6.9	4.9	6	5.8	5.2
P50	4.30	8.70	9.10	6.50	9.1	9.5	7	8.2	7.4	7.5
P60	7.30	11.10	11.80	9.40	11.5	12.4	9.8	11.2	10.4	10.4
P70	11.90	14.70	15.00	13.50	14.7	15.7	13.8	14.8	14	14
P80	20.40	20.60	20.20	20.50	20.3	20.6	20.7	20.6	20.6	19.9
P90	34.20	31.30	34.00	39.30	32.6	34	34.4	36	38.3	35.6
Topsite (99.95%)	102.90	157.70	181.10	185.80	128.4	166	105.6	145.3	164.1	143.8

La Tabla 23 muestra los resultados de la fragmentación del macizo rocoso luego de la voladura con el explosivo Heavy Anfo Fortis Extra-70 y detritus como material de taco. El análisis granulométrico presenta los fragmentos de roca de diez muestras diferentes (S01-1 a S01-10), indicando el porcentaje de partículas que atraviesan diversas mallas de acuerdo con los percentiles P10, P20, P30, P40, P50, P60, P70, P80, P90 y el tamaño máximo (Topsizer 99.95%).

Figura 64

Campana de Gauss para los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco



La Figura 64 muestra una distribución de tipo Gaussiana para los valores de tamaño de partícula P80 obtenidos de las muestras tras la voladura. La media de esta distribución, que se encuentra en 20.44 cm, está representada por la línea discontinua roja. El área sombreada en gris señala una desviación estándar alrededor de la media, lo que resalta que la mayoría de los valores de P80 están concentrados en un rango reducido cercano al promedio, indicando que

existe una baja variabilidad en el tamaño de las partículas en este percentil. Los valores de P80 oscilan entre 19.9 cm y 20.7 cm, con una dispersión mínima, lo que sugiere que la voladura ha producido una fragmentación uniforme y consistente en este tamaño de partícula crítico.

En este análisis, se generó la curva granulométrica correspondiente utilizando los registros obtenidos del frente de minado de la Pala 01, la cual incluye el valor de P80, como se muestra en la Figura 65.

Figura 65

Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra 70 y detritus como material de taco

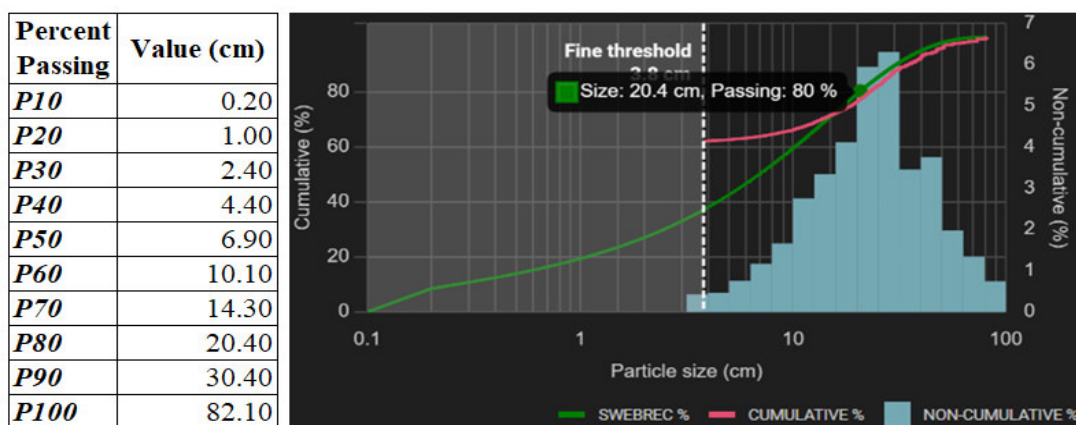
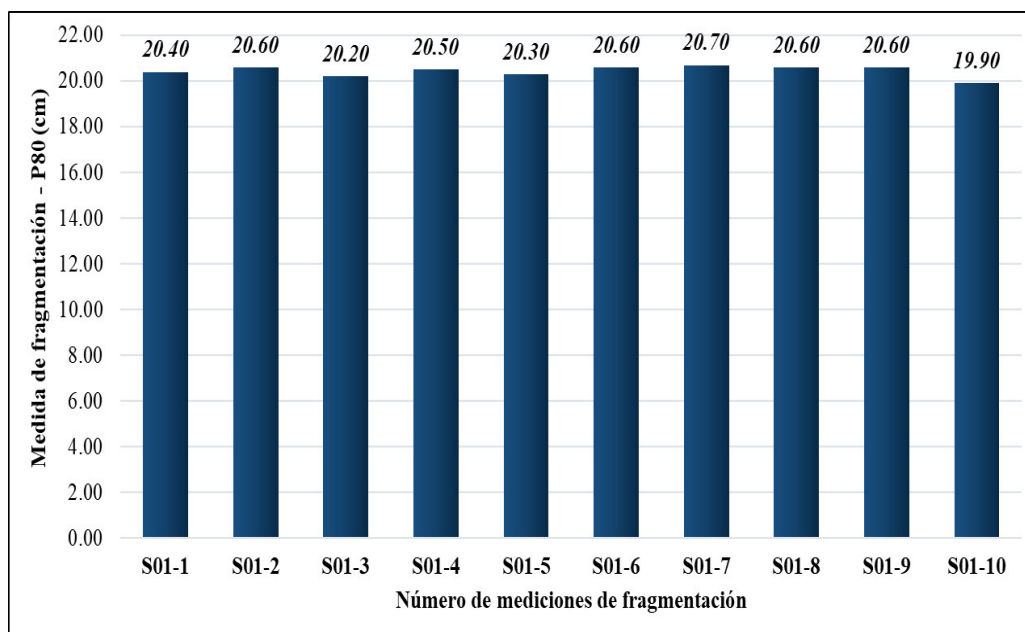


Figura 66

Medición de P80 (cm) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco



La Figura 66 muestra que el valor de P80 obtenido exhibe una variabilidad, con valores que oscilan entre 19.90 cm (S01-10) y 20.70 cm (S01-7).

6.2. Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70 y Gravilla como Material de Taco

El análisis de fragmentación (P80) fue llevado a cabo en el proyecto de voladura utilizando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en la fase 05 (zona mineralizada) de la Unidad Minera Toquepala, empleando gravilla como material de taco.

Tabla 24

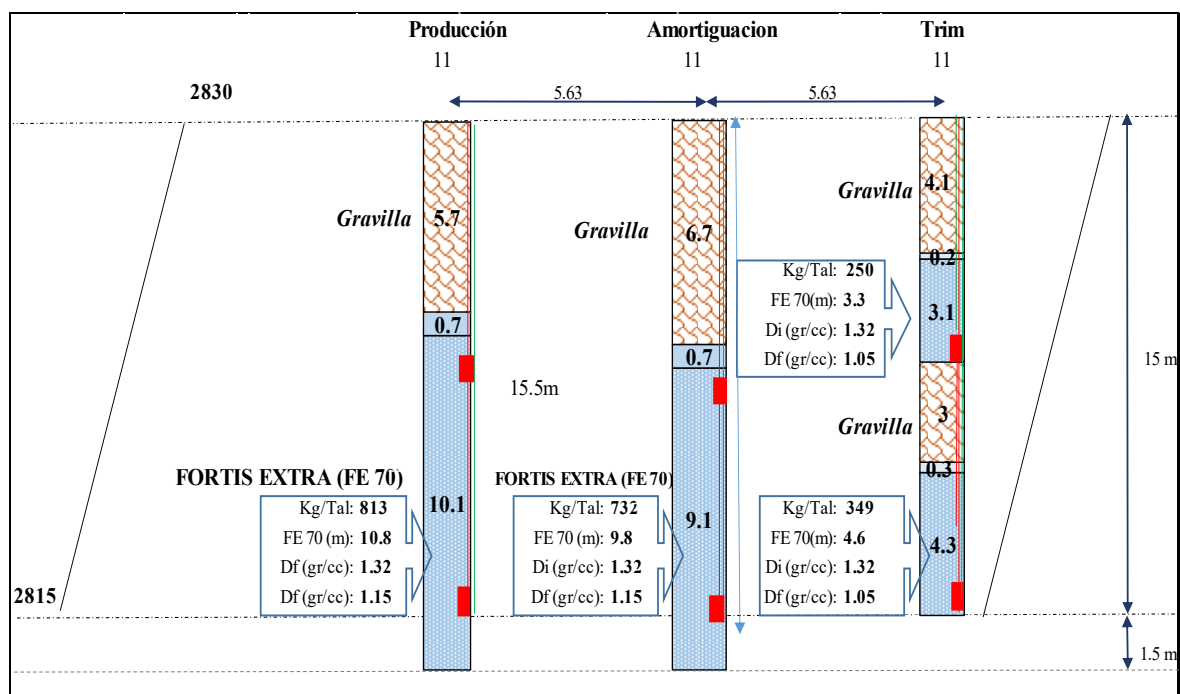
Parámetros del diseño de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla

Parámetros	Producción	Amortiguado	Trim	Valor
Diámetro (in)	11	11	11	
Altura de Banco (m)	15	15	15	
Sobre Perforación (m)	1.5	1.5	0	
Espaciamiento (m)	6.50	6.50	4.00	
Burden (m)	5.63	5.63	5.63	

Parámetros	Producción	Amortiguado	Trim	Valor
Taco (m)	5.7	6.7	4.1	
Taco Intermedio (m)			3	
Longitud de Carga (m)	10.1	9.1	4.3	3.1
Mezcla Explosiva (kg)	813	732	349	250
Densidad Inicial (g/cc)	1.32	1.32	1.32	
Densidad Final (g/cc)	1.15	1.15	1.05	
Esponjamiento (m)	0.7	0.7	0.3	0.2
Volumen (m3)	549	549	338	
Tonelaje (TM)	1482	1482	912	
Densidad de Roca (g/cc)	2.7	2.7	2.7	
Factor de Potencia (kg/TM)	0.549	0.494	0.382	
Nivel		2815		
Energía Efectiva (MJ/Kg)		2.62		
Fuerza relativa en peso (RWS)		113		
Fuerza relativa en volumen (RBS)		175		
VOD (ms)		5800		
Presión de Detonación (kbar)		103		

Figura 67

Diseño de taladros con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco



Nota. Recuperado de Orica

Después de llevar a cabo las voladuras en los proyectos de mineral 2815 078 081, utilizando la mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco, los resultados obtenidos fueron analizados con el software PortaMetrics.

Tabla 25

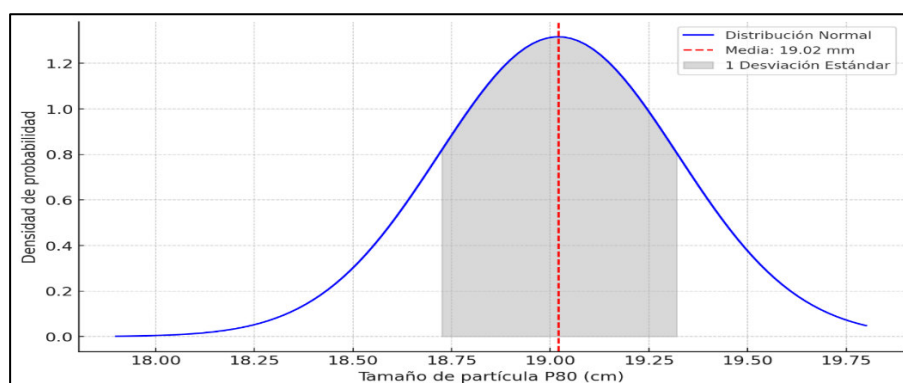
Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla

Percent Passing	S01-1	S01-2	S01-3	S01-4	S01-5	S01-6	S01-7	S01-8	S01-9	S01-10
P10	2.50	1.80	2.40	2.60	2.90	2.10	2.60	3.00	2.247	2.1533
P20	3.80	3.20	3.30	3.50	3.50	3.00	3.50	3.80	3.583	3.3233
P30	4.40	4.10	3.90	4.10	4.00	3.80	4.60	4.30	5.203	4.5633
P40	5.20	5.30	4.90	5.40	5.40	5.60	6.20	6.70	7.01	6.4867
P50	7.70	7.70	7.10	7.50	7.70	7.80	8.00	8.90	9.037	8.6433
P60	10.30	10.30	9.60	9.90	10.10	10.30	10.30	11.30	11.36	11.027
P70	13.50	13.70	13.00	13.20	13.40	13.80	13.40	14.30	14.24	14.17
P80	19.00	19.10	18.60	19.30	19.30	19.20	18.40	19.20	19.02	19.283
P90	31.80	30.20	28.90	29.90	29.60	28.40	28.50	27.90	29.2	30.74
Topsite (99.95%)	136.80	108.40	97.60	90.10	83.60	80.30	76.40	61.20	75.5	80.307

La Tabla 25 muestra los resultados obtenidos de la fragmentación del macizo rocoso luego de la voladura con el explosivo Heavy Anfo Fortis Extra-70, utilizando gravilla como material de taco.

Figura 68

Campana de Gauss para los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco



La Figura 68 ilustra la distribución normal, también conocida como campana de Gauss, de los tamaños de partícula P80 obtenidos en las muestras después del proceso de voladura. La distribución se centra en una media de 19.04 cm, indicada por la línea discontinua roja. La zona sombreada en gris representa el intervalo de una desviación estándar alrededor de la media, lo que indica que la mayoría de los valores de P80 están concentrados cerca del promedio, con una baja dispersión que varía entre 18.4 cm y 19.3 cm. Esta baja variabilidad sugiere que la fragmentación de las partículas ha sido uniforme y controlada. En este análisis, se generó la curva granulométrica correspondiente a partir de los diez registros obtenidos del frente de minado de la Pala 01. Esta curva muestra el valor de P80, como se observa en la Figura 96.

Figura 69

Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra 70 y gravilla como material de taco

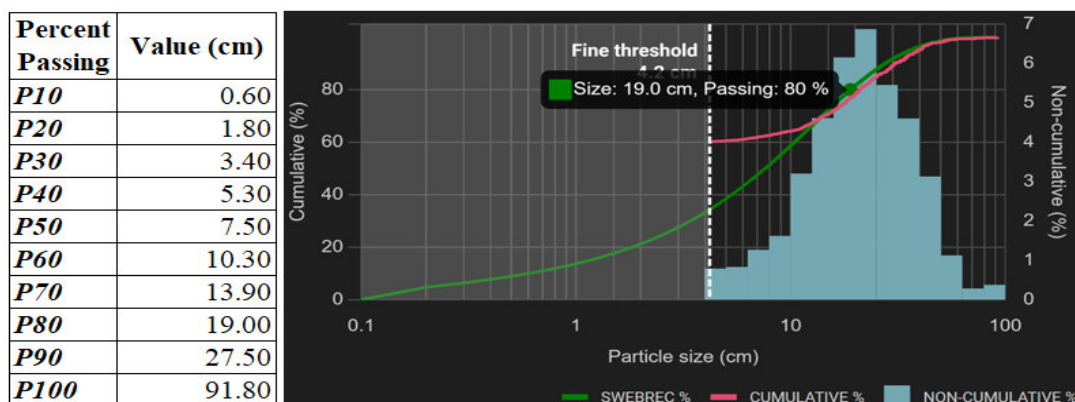
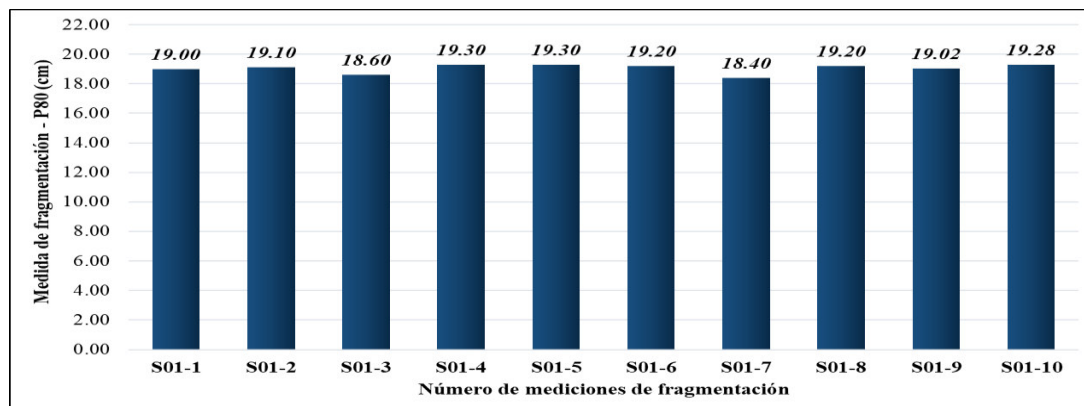


Figura 70

Medición de P80 (cm) a los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco



La Figura 70 muestra que el valor de P80 obtenido presenta una variabilidad, con los valores fluctuando entre 18.40 cm (S01-7) y 19.30 cm (S01-4 y S01-5).

6.3. Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70, Gravilla como Material de Taco y Retenedor de Energía Conigass

Se llevó a cabo un análisis de fragmentación (P80) en el proyecto de voladura utilizando la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en la fase 05 (fase de mineral) de la Unidad Minera Toquepala. En este proceso, se emplearon gravilla como material de taco y el retenedor de energía Conigass para evaluar su impacto en la fragmentación del material.

Tabla 26

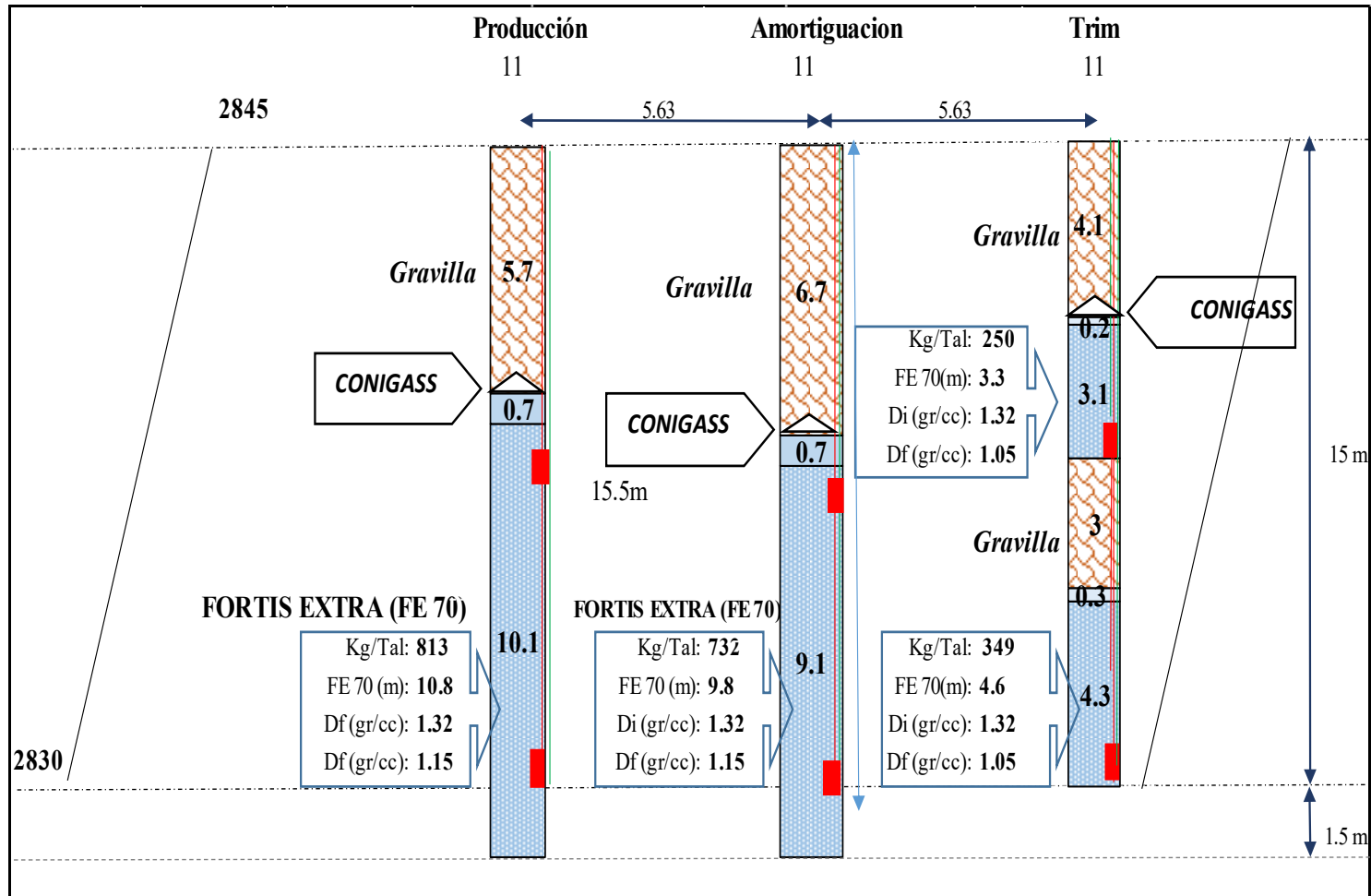
Parámetros del diseño de voladura con H.A. Fortis Extra 70, gravilla y retenedor de energía Conigass

Parametro	Producción	Amortiguado	Trim	Valor
Diametro (in)	11	11	11	
Altura de Banco (m)	15	15	15	
Sobre Perforacion (m)	1.5	1.5	0	
Espaciamiento (m)	6.50	6.50	4.00	
Burden (m)	5.63	5.63	5.63	
Taco (m)	5.7	6.7	4.1	
Taco Intermedio (m)			3	

Longitud de Carga (m)	10.1	9.1	4.3	3.1
Mezcla Explosiva (kg)	813	732	349	250
Densidad Inicial (g/cc)	1.32	1.32	1.32	
Densidad Final (g/cc)	1.15	1.15	1.05	
Esponjamiento (m)	0.7	0.7	0.3	0.2
Volumen (m3)	549	549	338	
Tonelaje (TM)	1482	1482	912	
Densidad de Roca (g/cc)	2.7	2.7	2.7	
Factor de Potencia (kg/TM)	0.549	0.494	0.382	
Nivel		2830		
Energía Efectiva (MJ/Kg)		2.62		
Fuerza relativa en peso (RWS)		113		
Fuerza relativa en volumen (RBS)		175		
VOD (ms)		5800		
Presión de Detonación (kbar)		103		

Figura 71

Diseño de taladros con H.A. Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass



Nota. Recuperado de Orica

Después de llevar a cabo las voladuras en los proyectos de mineral 2830, 109 y 110, utilizando la mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y el retenedor de energía Conigass, se procedió a analizar los resultados obtenidos a través del software PortaMetrics.

Tabla 27

Valores obtenidos luego de la voladura con H.A. Fortis Extra-70, gravilla y retenedor de energía Conigass

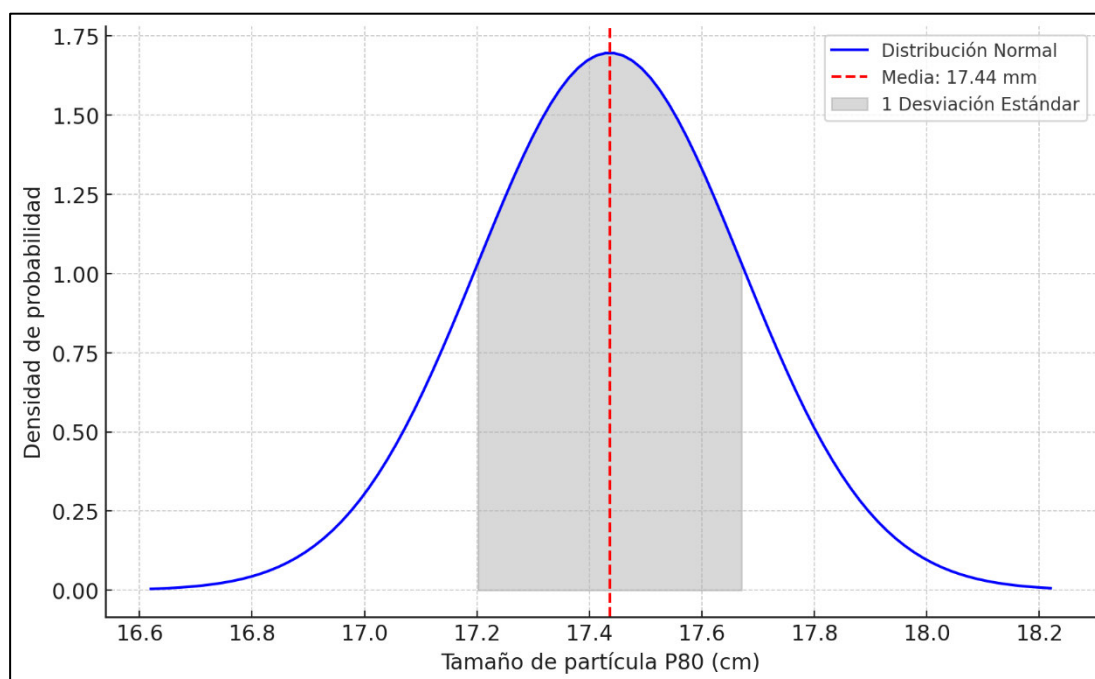
Percent Passing	S01-1	S01-2	S01-3	S01-4	S01-5	S01-6	S01-7	S01-8	S01-9	S01-10
P10	0.96	1.41	0.71	1.41	1.61	0.93	1.30	3.20	0.26	0.81
P20	2.41	3.20	2.12	2.89	3.45	2.39	3.20	4.50	1.04	2.25
P30	4.15	5.15	3.90	4.39	5.34	4.15	3.90	6.10	2.31	4.04
P40	6.08	7.26	5.92	5.85	7.27	6.16	4.70	7.70	4.04	6.11
P50	8.21	9.44	8.05	7.38	9.28	8.33	6.40	9.30	6.21	8.39
P60	10.55	11.71	10.47	9.24	11.45	10.71	9.10	11.20	8.7	10.81
P70	13.36	14.33	13.60	11.92	14.01	13.64	12.30	13.90	12.02	13.69
P80	17.20	17.68	17.72	17.12	17.63	17.55	17.30	17.40	17.13	17.68
P90	23.25	22.99	24.16	32.29	24.20	23.23	27.10	26.70	26.06	23.99
Topsize (99.95%)	44.93	65.89	56.59	75.82	53.76	45.26	87.80	70.30	48.87	48.56

La Tabla 27 muestra los resultados obtenidos de la fragmentación de roca después de realizar la voladura utilizando la mezcla explosiva Heavy Anfo Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y el retenedor de energía Conigass. Estos datos proporcionan una visión detallada de la distribución de los fragmentos generados, permitiendo una evaluación precisa de la eficacia de la voladura en términos de fragmentación.

Figura 72

Campana de Gauss para los valores de P80 de los proyectos de voladura con H.A. Fortis

Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor Conigass

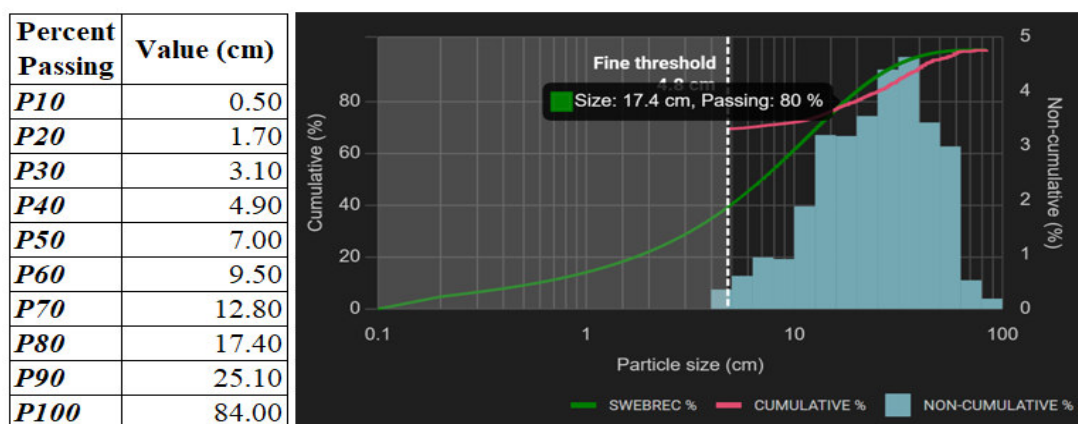


La Figura 72 ilustra la distribución de los tamaños de partícula P80 obtenidos tras el proceso de voladura, presentando una campana de Gauss centrada en una media de 17.44 cm, como se indica en la línea discontinua roja. La zona sombreada en gris representa el intervalo de una desviación estándar alrededor de la media, lo que muestra que la mayoría de los valores de P80 se concentran cerca del promedio, con una dispersión mínima que varía entre 17.12 cm y 17.72 cm. Esta baja variabilidad sugiere que el proceso de voladura ha logrado una fragmentación consistente en cuanto al tamaño de las partículas en el percentil P80, alcanzando así los objetivos de control de tamaño deseados para un rendimiento óptimo en las etapas posteriores del procesamiento.

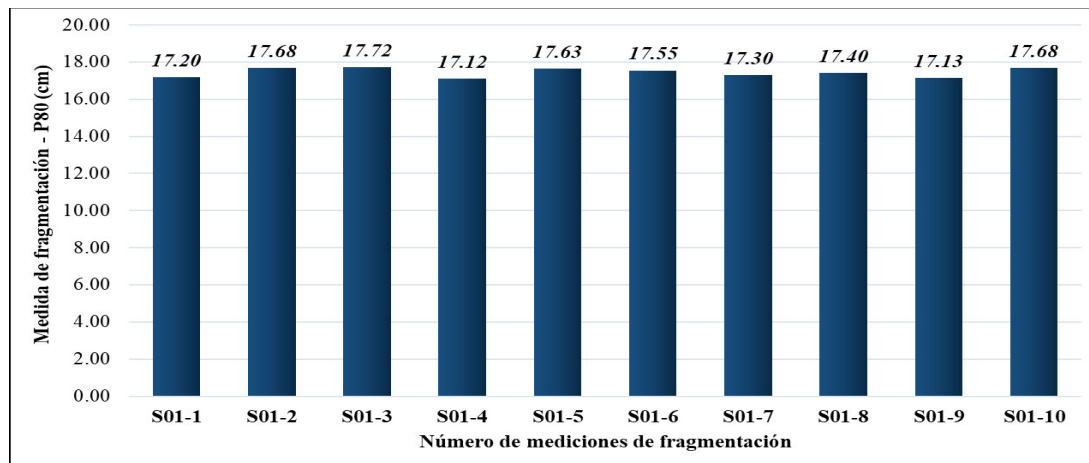
En este análisis, a partir de los diez registros obtenidos del frente de minado de la Pala 01, se generó la curva granulométrica correspondiente, la cual ilustra el valor de P80, como se puede observar en la Figura 100.

Figura 73

Curva granulométrica (P80) de los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra 70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass

**Figura 74**

Medición de P80 (cm) a los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass



La Figura 74 muestra que el valor de P80 obtenido presenta una variabilidad, con valores que oscilan entre 17.12 cm (S01-4) y 17.72 cm (S01-3).

CAPITULO VII

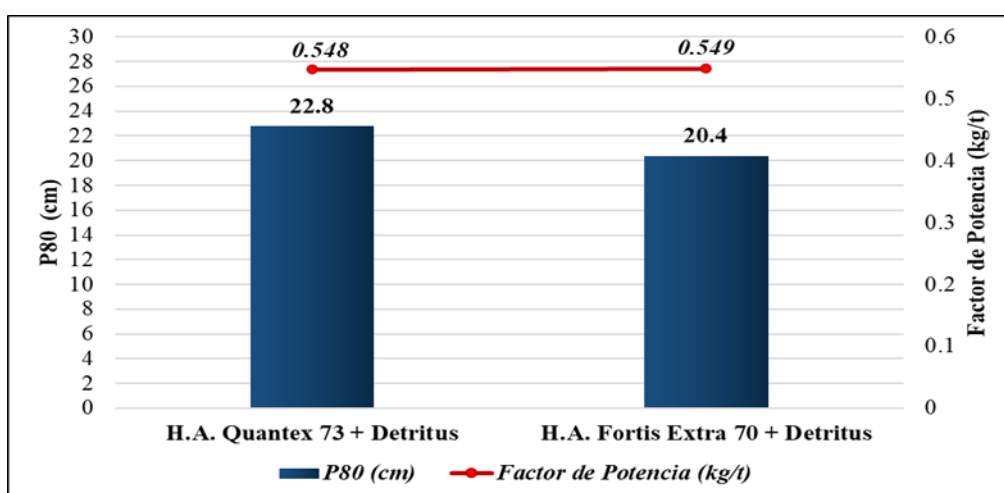
DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1. Análisis de Resultados

Para analizar el desempeño de las combinaciones de agentes de voladura con detritus, resulta clave comparar simultáneamente el tamaño de partícula P80 y el factor de potencia aplicado. Esta relación permite evaluar no solo cuánta energía se está entregando por tonelada de material, sino también qué tan eficiente es cada mezcla explosiva para generar una fragmentación más fina, condición esencial para reducir los costos posteriores de chancado y molienda.

Figura 75

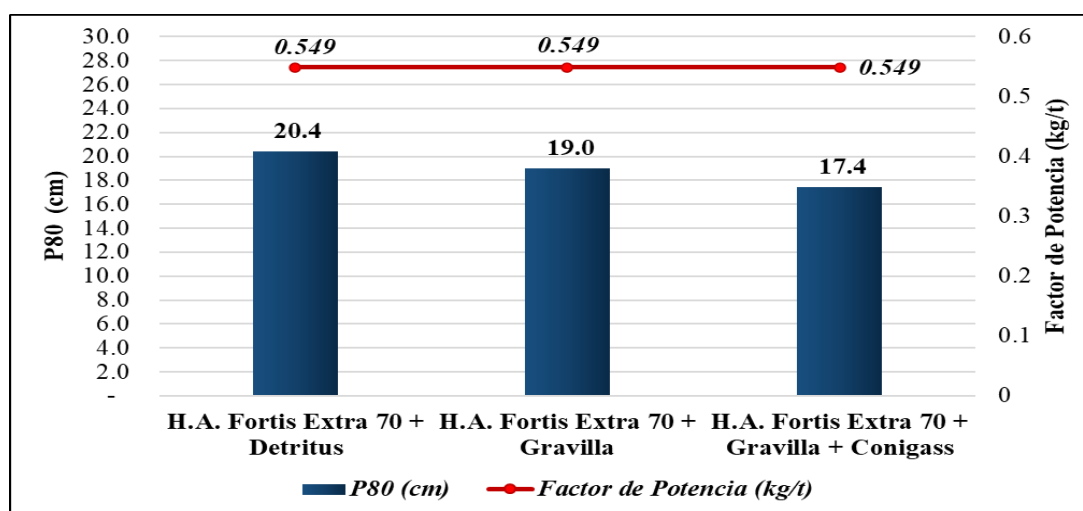
Comparativo de los resultados de P80 (cm) y factor de potencia (kg/t)



La Figura 75 compara el tamaño de partícula P80 y el factor de potencia para las combinaciones H.A. Quantex 73 + Detritus y H.A. Fortis Extra 70 + Detritus. El P80 disminuye de 22.8 cm con Quantex 73 a 20.4 cm con Fortis Extra 70, lo que implica una reducción del 10.53 % en el tamaño de partícula y evidencia una fragmentación más fina con esta última mezcla. El factor de potencia se mantiene prácticamente igual (0.548 kg/t vs. 0.549 kg/t), por lo que la mejora en la fragmentación no se debe a un mayor consumo de explosivo, sino a una mayor eficiencia del H.A. Fortis Extra 70. En síntesis, Fortis Extra 70 + Detritus ofrece mejor calidad de fragmentación con el mismo nivel de energía, lo que se traduce en beneficios operativos al reducir los costos y la energía requerida en las etapas de molienda y procesamiento del material volado.

Figura 76

Comparativo de los resultados de P80 (cm) y factor de potencia (kg/t)



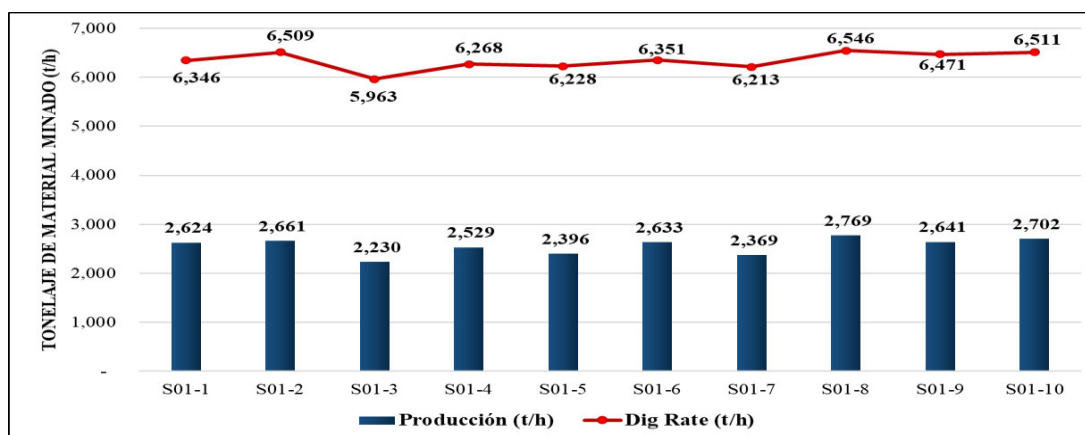
La Figura 76 compara el tamaño de partícula P80 y el factor de potencia para tres configuraciones de voladura con H.A. Fortis Extra 70 usando distintos materiales de retención de energía. El P80 disminuye de 20.4 cm (Fortis + Detritus) a 19.0 cm (Fortis + Gravilla) y alcanza su menor valor con 17.4 cm al emplear Fortis + Gravilla + Conigass, lo que evidencia una fragmentación más fina en esta última configuración. El factor de potencia se mantiene constante en 0.549 kg/t en los tres casos, por lo que la mejora en la fragmentación se debe

exclusivamente al tipo de material y accesorio usado, no a un mayor consumo de explosivo. En síntesis, Fortis + Gravilla + Conigass es la opción más eficiente, ya que logra menor tamaño de partícula con el mismo gasto energético, favoreciendo la reducción de costos y una molienda más eficiente.

Medición de Producción y Dig Rate de Pala 01 en los Proyectos de Voladura con H.A. Quantex 73 y Detritus como Material de Taco

Figura 77

Tonelaje de producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Quantex 73 y detritus como material de taco



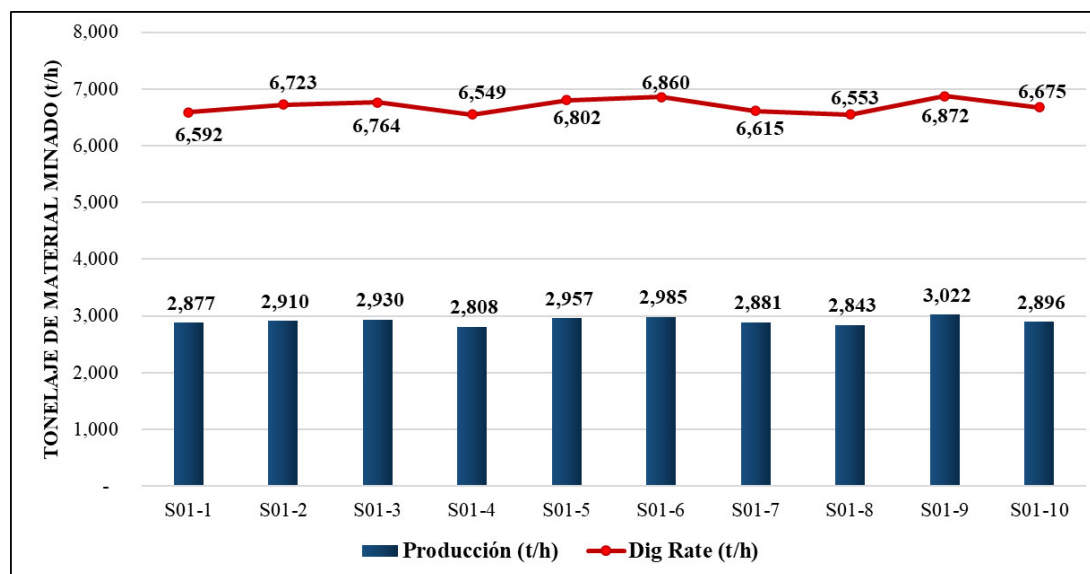
La Figura 77 compara la producción de material minado y la tasa de excavación (Dig Rate) en diez sectores (S01-1 a S01-10), mostrando una operación globalmente estable. La producción promedio es de 2555.6 t/h (DE = 171.03 t/h), con un mínimo de 2230 t/h en S01-3 y un máximo de 2769 t/h en S01-8. La tasa de excavación promedio es de 6340.5 t/h (DE = 180.64 t/h), con un mínimo de 5963 t/h en S01-3 y un máximo de 6546 t/h también en S01-8.

En conjunto, los valores se concentran cerca de los promedios, lo que indica una operación consistente y bien controlada. S01-8 destaca por su alta eficiencia, mientras que S01-3 aparece como un punto crítico donde se podrían aplicar mejoras operativas para elevar su rendimiento.

Medición de Producción y Dig Rate de Pala 01 en los Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70 y Detritus como Material de Taco

Figura 78

Tonelaje de producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y detritus como material de taco



La Figura 78 presenta el análisis de la producción de material minado y la tasa de excavación (Dig Rate) en diez sectores evaluados, reflejando un rendimiento general estable y coherente, con pequeñas fluctuaciones entre los diferentes sectores. La producción promedio se sitúa en 2910.9 toneladas por hora (t/h), con una desviación estándar de 64.8 t/h, lo que indica una baja variabilidad en la producción. Los valores observados varían entre 2808 t/h en el sector S01-4 y 3022 t/h en el sector S01-9.

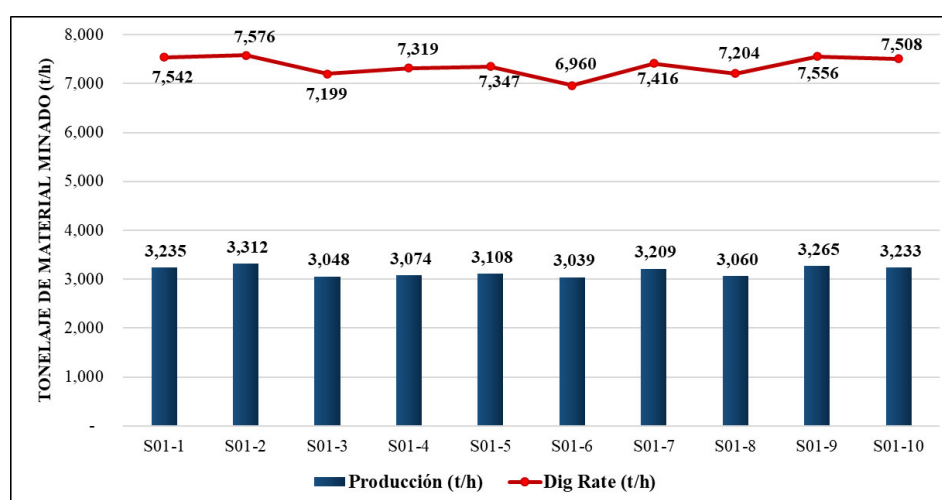
Por otro lado, en relación con la tasa de excavación, se obtuvo un promedio de 6700.5 t/h, con una desviación estándar de 122.05 t/h, lo que refleja una variabilidad moderada en los resultados de la tasa de excavación. Los valores más bajos de Dig Rate se registraron en el sector S01-4, con 6549 t/h, y los más altos en el sector S01-9, con 6872 t/h. Estos resultados

demuestran una consistencia en el desempeño, aunque con algunas diferencias que podrían indicar oportunidades de optimización en algunos sectores.

Medición de Producción y Dig Rate de Pala 01 en los Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70 y Gravilla como Material de Taco

Figura 79

Tonelaje de producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70 y gravilla como material de taco



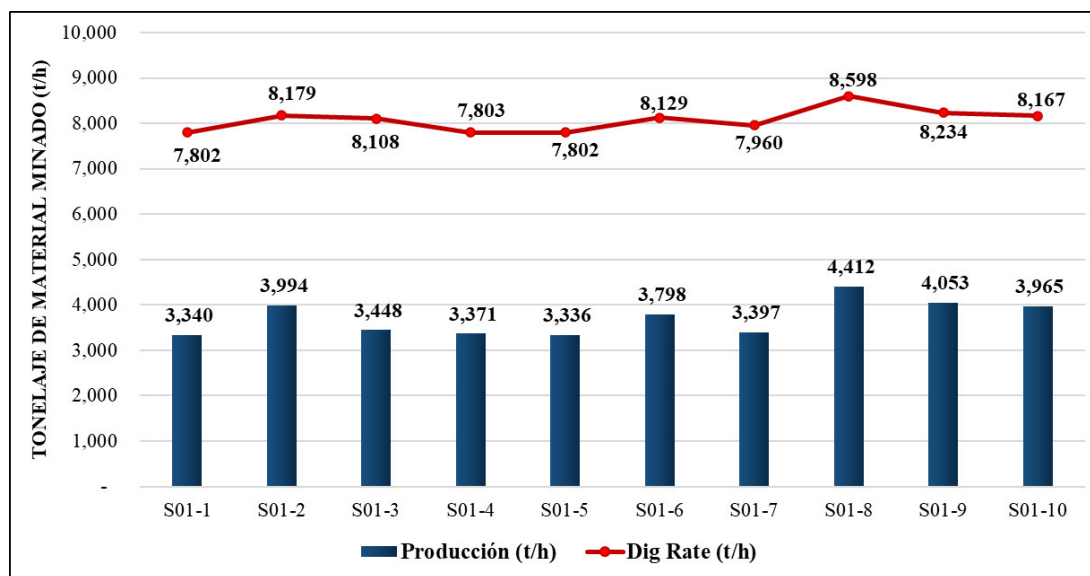
La Figura 79 presenta el análisis estadístico de la producción de material minado y la tasa de excavación (Dig Rate) en los diez sectores evaluados, destacando un desempeño consistente con una variabilidad moderada en ambos indicadores. La producción promedio es de 3158.2 toneladas por hora (t/h), con una desviación estándar de 102.7 t/h, lo que indica una variación controlada entre los diferentes sectores. Los valores de producción fluctúan entre un mínimo de 3039 t/h en el sector S01-6 y un máximo de 3312 t/h en el sector S01-2.

En cuanto a la tasa de excavación, se obtuvo un promedio de 7362.7 t/h, con una desviación estándar de 198.7 t/h, lo que indica una variabilidad moderada en los niveles de excavación entre los sectores. El sector S01-6 registró el valor más bajo de Dig Rate con 6960 t/h, mientras que el sector S01-2 alcanzó el valor máximo de 7576 t/h.

Medición de Producción y Dig Rate de pala 01 en los Proyectos de Voladura con H.A. Fortis Extra-70, Gravilla como Material de Taco y Retenedor de Energía Conigass

Figura 80

Producción y dig rate de pala 01 en los proyectos de voladura con H.A. Fortis Extra-70, gravilla como material de taco y retenedor de energía Conigass

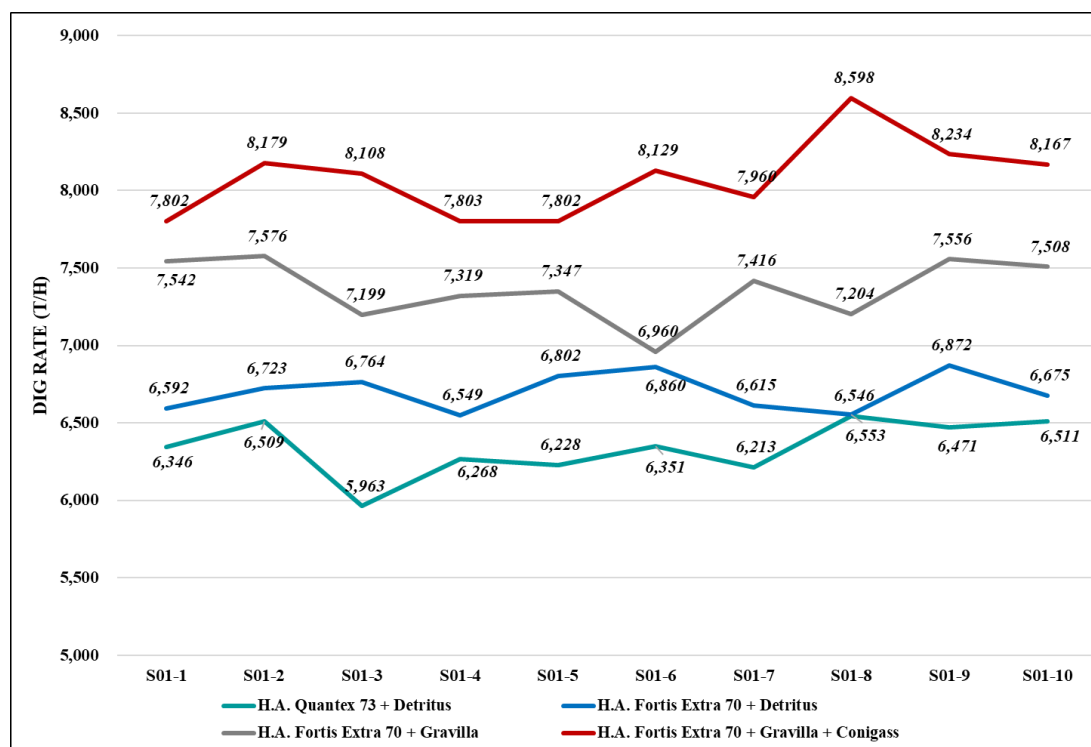


La Figura 80 presenta el análisis estadístico de la producción de material minado y la tasa de excavación (Dig Rate) en los diez sectores evaluados, evidenciando un desempeño constante y controlado, con una variabilidad moderada en ambos indicadores. La producción promedio alcanza las 3711.4 toneladas por hora (t/h), con una desviación estándar de 383.1 t/h, lo que indica un nivel de producción estable y relativamente homogéneo. Los valores de producción fluctúan entre un mínimo de 3336 t/h en el sector S01-5 y un máximo de 4412 t/h en el sector S01-8, este último destacándose como el punto de mayor eficiencia productiva.

En cuanto a la tasa de excavación, se obtuvo un promedio de 8078.2 t/h, con una desviación estándar de 249.01 t/h, lo que refleja una variabilidad moderada. Los valores más bajos de Dig Rate fueron registrados en los sectores S01-1 y S01-5, con 7802 t/h, mientras que el valor más alto se alcanzó en el sector S01-8, con 8598 t/h.

Figura 81

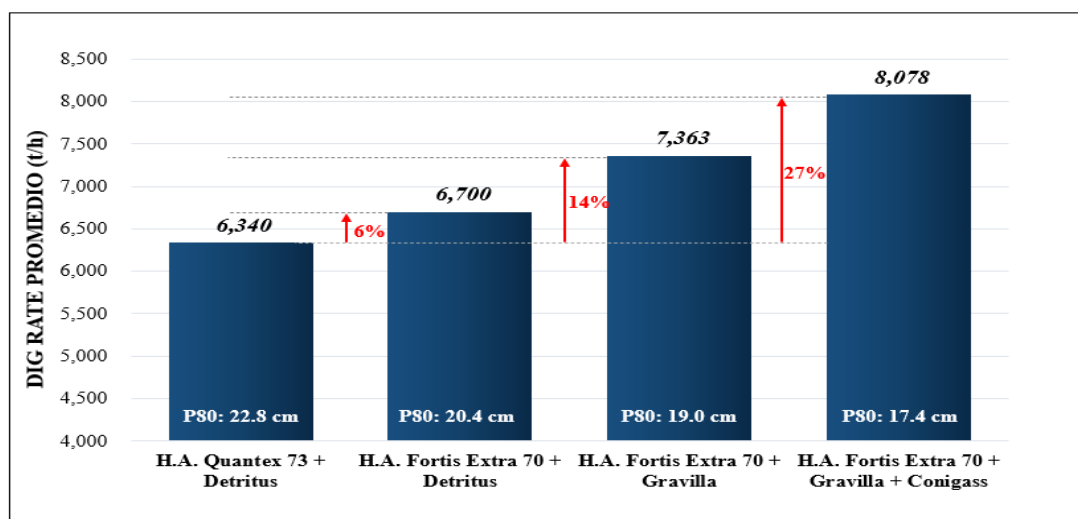
Comparativo de los resultados de Dig Rate de la pala 01 (t/h)



El análisis comparativo revela que la combinación "H.A. Fortis Extra 70 + Gravilla + Conigass" se destaca por lograr la mayor tasa de excavación en todos los sectores, mostrando una notable capacidad para optimizar tanto la fragmentación como el manejo del material volado. En un nivel intermedio se encuentra la combinación "H.A. Fortis Extra 70 + Gravilla", que ofrece una eficiencia moderada. Por otro lado, las configuraciones "H.A. Fortis Extra 70 + Detritus" y "H.A. Quantex 73 + Detritus" presentan tasas de excavación más bajas, siendo la segunda opción la que muestra los valores más reducidos en comparación.

Figura 82

Comparativo de los resultados de Dig Rate promedio (t/h) vs fragmentación (P80) de pala 01



La Figura 82 muestra una relación clara entre el tamaño de P80 y el Dig Rate promedio: a medida que disminuye el tamaño de P80, el Dig Rate promedio experimenta un aumento. Esto indica que una fragmentación más fina (es decir, un P80 más bajo) facilita una excavación más eficiente, lo que se traduce en un aumento en el Dig Rate. La combinación "H.A. Fortis Extra 70 + Gravilla + Conigass" se destaca por ser la más efectiva, ya que alcanza el P80 más bajo (17.4 cm) y el Dig Rate promedio más alto (8078 t/h). Esto resalta que una reducción en el tamaño de las partículas mejora el proceso de excavación y, por lo tanto, optimiza la productividad general.

Este análisis subraya cómo la elección adecuada de la mezcla explosiva, el material y los accesorios para la retención de energía durante la voladura impactan directamente en la fragmentación, y por ende, en la eficiencia de la operación minera. Las combinaciones que logran un P80 más bajo, como la "H.A. Fortis Extra 70 + Gravilla + Conigass," son recomendadas para maximizar el rendimiento en términos de Dig Rate, optimizando la excavación.

7.2. Discusión

Esta investigación se centró en evaluar cómo diferentes combinaciones de mezclas explosivas y materiales de taco afectan la fragmentación del macizo rocoso y la productividad de los equipos de excavación en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala. Los resultados obtenidos revelaron que la combinación de H.A. Fortis Extra-70 + Gravilla + Conigass produjo una fragmentación más fina, con un tamaño de partícula P80 de 17.4 cm, en comparación con los 22.8 cm observados al utilizar la mezcla base H.A. Quantex 73 + Detritus. Este hallazgo coincide con estudios previos que subrayan la relevancia de un diseño de voladura bien optimizado para mejorar la fragmentación y reducir la variabilidad en etapas posteriores, como el carguío y acarreo.

En términos de productividad, se registró un incremento del 27% en la tasa de excavación (Dig Rate) con la combinación mencionada, alcanzando un valor de 11,394.86 t/h, frente a los 10,341.78 t/h obtenidos con la configuración base. Este aumento está en línea con investigaciones previas que demuestran que una fragmentación más homogénea y controlada facilita la operación de los equipos de excavación, disminuyendo los tiempos de ciclo y los costos operativos.

La incorporación de Conigass, como material de taco, también resultó ser beneficiosa para mejorar la eficiencia de las voladuras. Diversos estudios indican que el uso adecuado de materiales de taco puede optimizar la distribución de la energía explosiva, lo que favorece una fragmentación más uniforme y reduce la formación de fragmentos de mayor tamaño, facilitando los procesos subsecuentes de carguío y chancado.

Es importante destacar que, aunque los resultados obtenidos son prometedores, la extrapolación de estos hallazgos a otras zonas de la mina o a diferentes condiciones geológicas debe hacerse con cautela. La heterogeneidad del macizo rocoso y las variaciones en las características geomecánicas pueden influir en la efectividad de las combinaciones de

explosivos y materiales de taco. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios adicionales en otras áreas de la mina para validar y ajustar las configuraciones de voladura propuestas.

En conclusión, la combinación de H.A. Fortis Extra-70 + Gravilla + Conigass demostró ser la más eficaz para optimizar la fragmentación y mejorar la productividad en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala. La implementación de esta configuración en futuras voladuras podría conducir a una mayor eficiencia operativa y una reducción de costos, alineándose con las mejores prácticas de la industria minera.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación de la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70 en las voladuras primarias de fase 05 ha demostrado ser altamente efectiva en la optimización de la fragmentación. La reducción significativa en el valor P80 refleja una mejora en la distribución de los fragmentos, lo que favorece la eficiencia del proceso de carga y acarreo.

La comparación entre las mezclas explosivas H.A. Fortis Extra-70 y H.A. Quantex 73 ha revelado que la primera produce una fragmentación significativamente más eficiente, con una reducción del 11% en el valor de P80. Este resultado demuestra que la mezcla H.A. Fortis Extra-70 no solo optimiza la fragmentación, sino que también mejora la homogeneidad de los fragmentos, lo que facilita los procesos posteriores en la cadena operativa.

Los retenedores de energía, particularmente la combinación de Gravilla y Conigass, mostraron un impacto notable en la reducción de la fragmentación del macizo rocoso, logrando una disminución del P80 de hasta un 14.7%. Este comportamiento subraya la importancia de seleccionar adecuadamente los materiales de taco, ya que contribuyen de manera significativa a mejorar la eficiencia y precisión de las voladuras, optimizando el aprovechamiento del material fragmentado.

La optimización de la fragmentación mediante el uso de la mezcla explosiva H.A. Fortis Extra-70, en combinación con materiales de taco como Gravilla y Gravilla + Conigass, resultó

en un aumento del 27% en la productividad de las palas eléctricas. Este incremento refleja la mejora en la eficiencia operativa, ya que una fragmentación más fina facilita el proceso de carga y acarreo, reduciendo los tiempos de ciclo y mejorando la rentabilidad global de la operación minera.

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda la adopción de la combinación de H.A. Fortis Extra-70 + Gravilla + Conigass en futuras voladuras en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala. Los hallazgos demuestran que esta configuración favorece una fragmentación más eficiente y mejora la tasa de excavación, lo que se traduce en un incremento en la productividad de los equipos de excavación y una reducción en los costos operativos. Se sugiere evaluar esta combinación en otros sectores de la mina con características geológicas similares, con el fin de validar su efectividad en distintos contextos operacionales.

Es crucial realizar un monitoreo constante de las configuraciones de voladura para evaluar su rendimiento a lo largo del tiempo. La implementación de un sistema de seguimiento de la fragmentación y la productividad de las palas eléctricas permitirá ajustar los parámetros según sea necesario, asegurando la continuidad de los resultados óptimos. Adicionalmente, es importante llevar a cabo un análisis detallado de los efectos de las mezclas explosivas y los materiales de taco en los costos asociados a cada fase del proceso minero, con el fin de garantizar que los beneficios operativos se traduzcan en una mejora económica sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carhuanchu, E. (2011). Optimización de la fragmentación aplicando valores de energía en voladura al tajo vidal, Nivel 4190 Cantera De Caliza Cerro Palo Cemento Andino S. A. [Licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/ecd2547e-3a58-45f6-95ac-5a739a8894ca>
- Mantilla, O. P. (2021). Beneficios del uso de anfo pesado en el proceso de voladura en minería a cielo abierto con la Empresa Enaex—Minera Yanacocha 2018. [Licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4484>
- Márquez, L. O. (2024). Reducción de fragmentación (P80) en la zona Fase 4 con la aplicación de gravilla de 2 pulgadas en la Unidad Minera de Toquepala [Licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. <https://hdl.handle.net/20.500.12920/13279>
- Ríos, J. (2019). Evaluación de la influencia de diferentes combinaciones de mezclas explosivas y materiales de taco en la fragmentación del macizo rocoso y la productividad de los equipos de excavación en la zona mineralizada fase 05 de la Unidad Minera Toquepala. [Maestría, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/3680>
- Romero, R. (2016). Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco Perú S.A. [Licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/items/77f36c72-6165-4bf5-a386-9b589ef5cf87>
- Salinas, K. R., & Ninahuanca, J. R. (2022). Análisis de las variables operacionales de perforación y voladura, y su incidencia en el rendimiento de los equipos de carguío bajo el concepto mine to mill, en una mina a tajo abierto—2021 [Licenciatura, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11378>

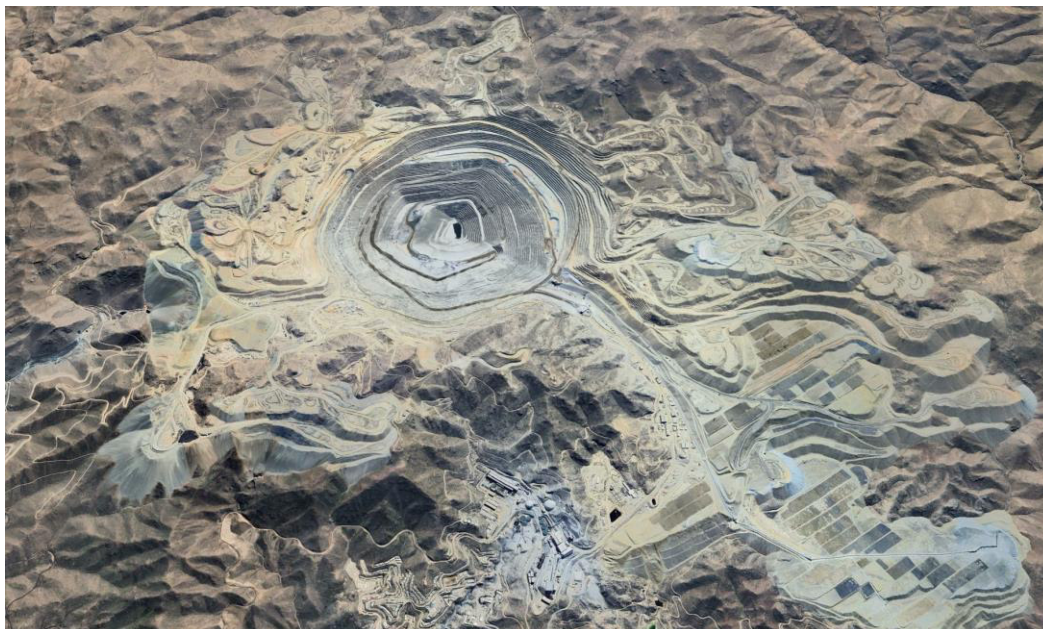
- Sánchez, M., & Paredes, I. (2023). Aplicación de las diferentes mallas de perforación y voladura para el control del digrate y grado de fragmentación en equipos de carguío en minera Chinalco Perú S. A. - 2022 [Licenciatura, Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13573>
- Yaranga, R. J. (2021). Análisis de la fragmentación de mineral producto de la voladura y su influencia en el rendimiento de equipos de carguío en una mina a tajo abierto, 2021 [Licenciatura, Universidad Continental].
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10533>

ANEXOS

Anexo 1. Método de Minado

Figura 83.

Vista de planta del tajo de mina Toquepala



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC.

Anexo 2. Planeamiento de Minado.

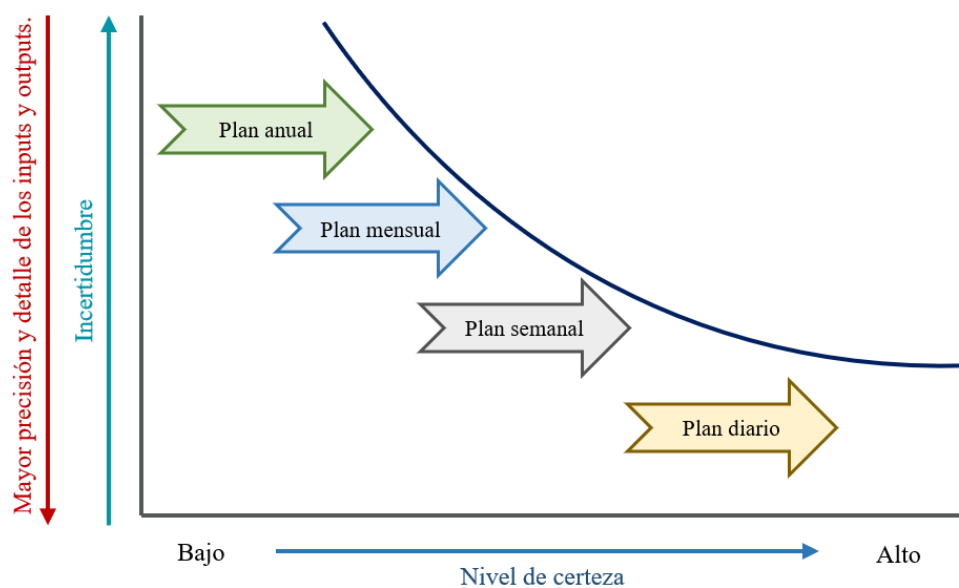
a) Planeamiento a corto y mediano plazo.

En la mina Toquepala, el ciclo de actividades y planificación a corto y mediano plazo se organiza en los siguientes elementos clave:

- Guías generales para la planificación a corto plazo
- Plan minero anual
- Plan minero mensual
- Plan minero semanal
- Seguimiento del plan minero
- Efectos generados en las operaciones.

Figura 84

Horizontes de planificación en el planeamiento a corto y mediano plazo en mina Toquepala



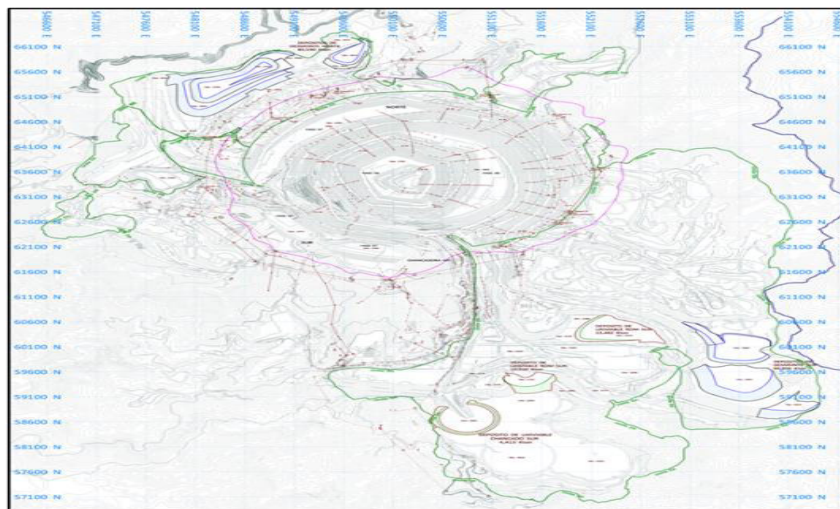
Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC.

El Plan Anual establece los objetivos a alcanzar durante el año, y se revisa por las siguientes áreas clave:

- Concentradora: Enfocada en las leyes y recuperaciones de mineral.
- Botaderos de Lixiviación: Se evalúa la capacidad de toneladas y las leyes de la chancadora lixiviable.
- Geología: Se analizan las características hidrotermales de la zona.

Figura 85

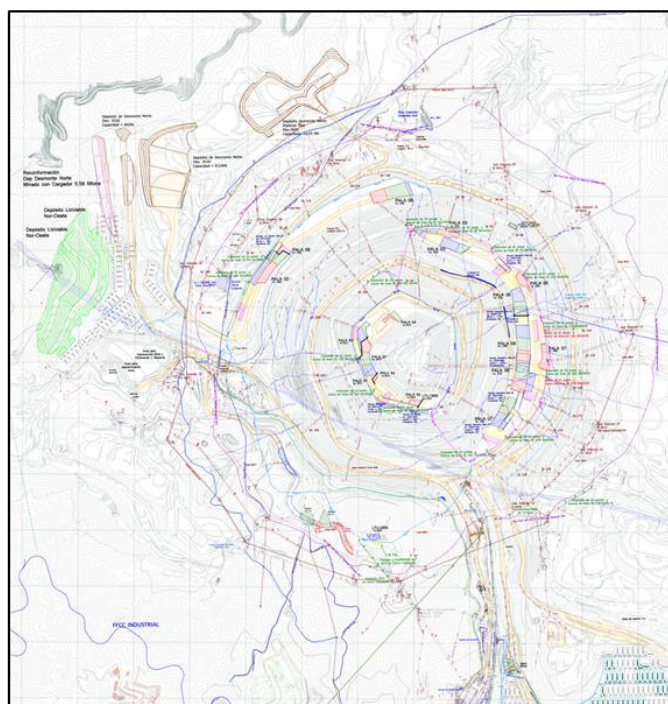
Modelo de plan de minado anual de mina Toquepala



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC.

Figura 86

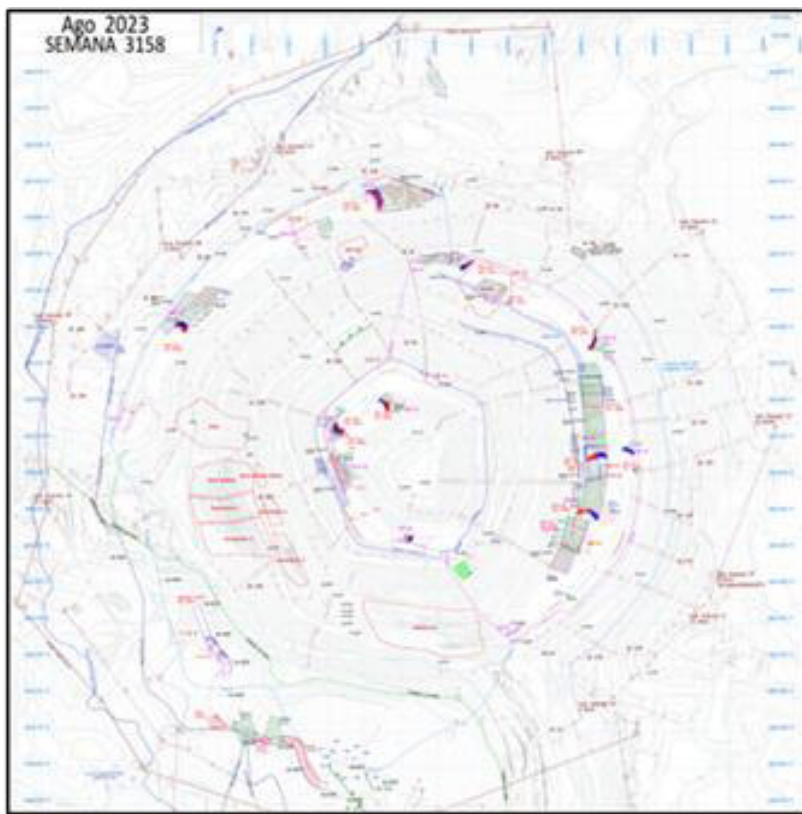
Modelo de plan de minado mensual de mina Toquepala.



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC.

Figura 87

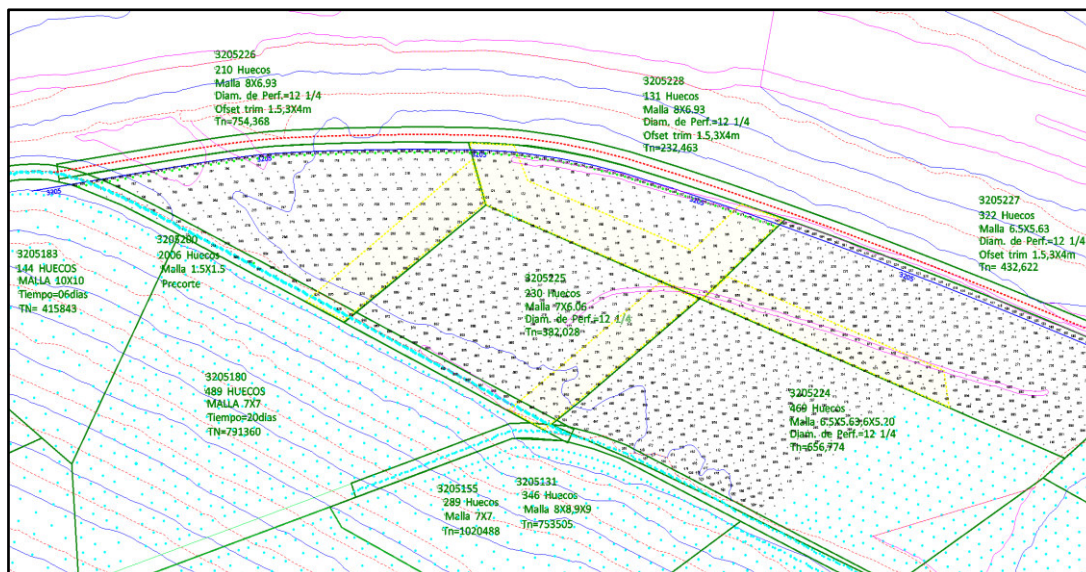
Modelo de programa de producción semanal de mina Toquepala



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

Figura 88

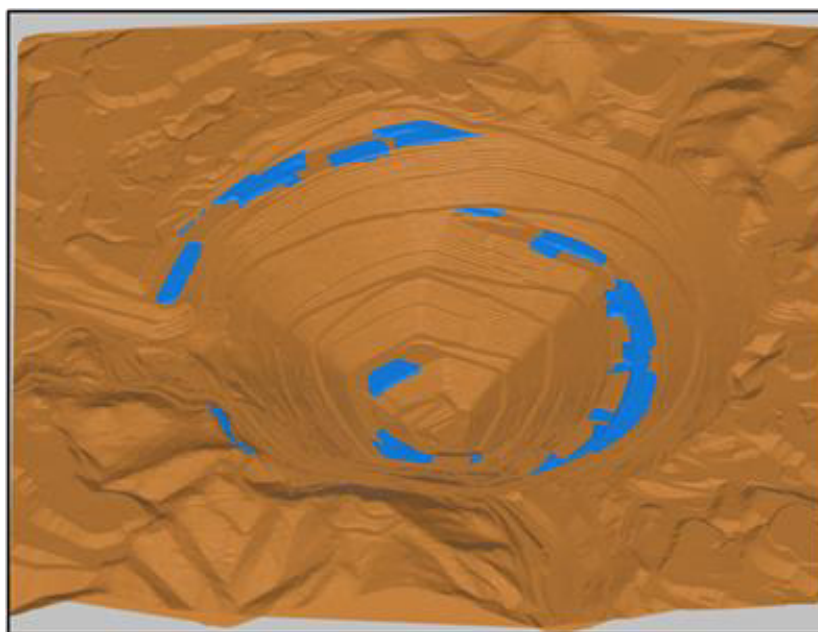
Modelo diseño de malla de perforación de mina Toquepala



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

Figura 89

Modelo de conciliación de producción mensual de mina Toquepala



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

b) Planeamiento a largo plazo.

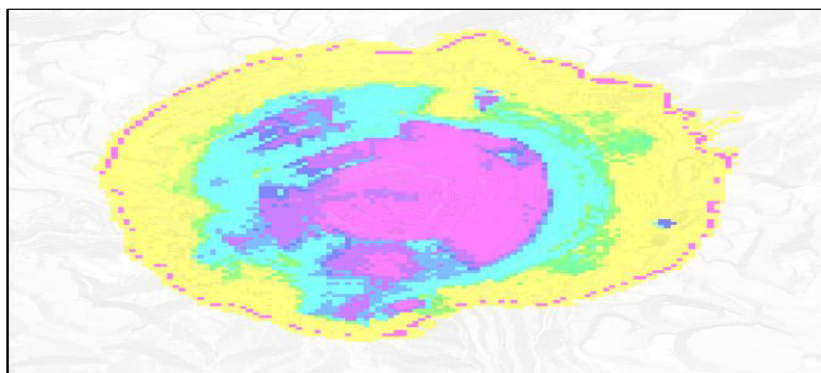
Entre las consideraciones económicas del tajo se incluyen:

- Topografía actualizada al 31 de diciembre del año pasado.
- Precios de largo plazo de cobre y molibdeno, según indicaciones de la Presidencia Ejecutiva.
- Último modelo geológico actualizado, con leyes de interpolación.
- Últimos ángulos entre rampas recomendados por los especialistas.
- Modelos de recuperación de cobre y molibdeno, entregados por Planta Concentradora.
- Modelo económico que considera los costos utilizados en el cálculo de reservas a diciembre de 2014 según indicaciones de la Dirección de Finanzas, actualizando el capital de sostenimiento (CAPEX) de cada proceso.
- Este informe incluye las reservas existentes en los stocks de lixiviación

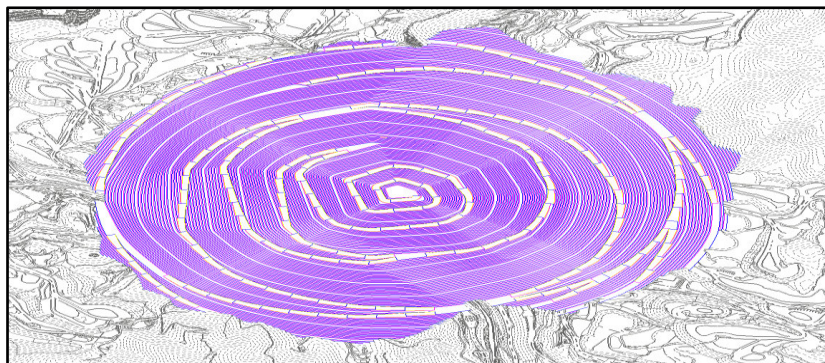
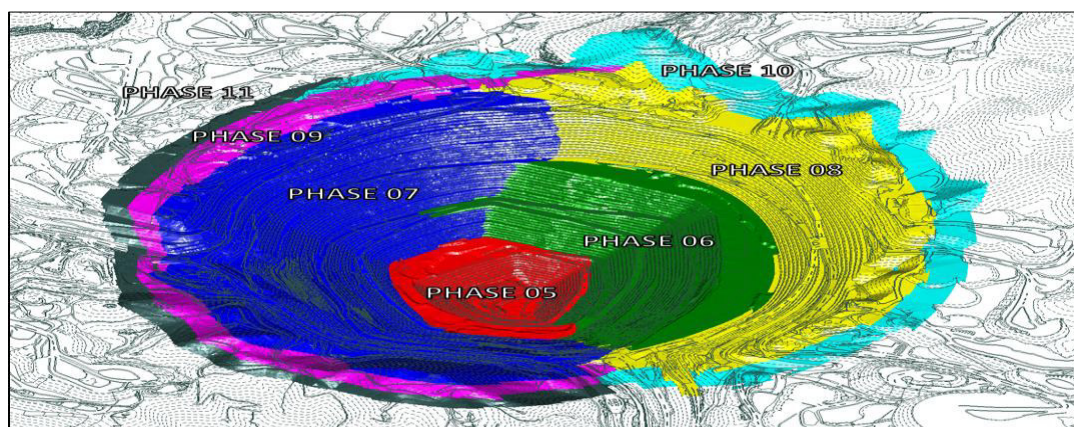
Consideraciones Operacionales del Tajo: Ancho de rampa: 37,5 metros, Pendiente de rampa: 8%, últimos ángulos entre rampas recomendados por los especialistas, y altura de banco de 15 metros.

Figura 90

Pit final económico de mina Toquepala



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

Figura 91*Pit final operativo de mina Toquepala**Nota.* Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC**Figura 92***Desarrollo de fases de minado de mina Toquepala**Nota.* Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC**Tabla 28***Plan a Largo Plazo – Estrategia de Ley de Corte Variable (COMET)*

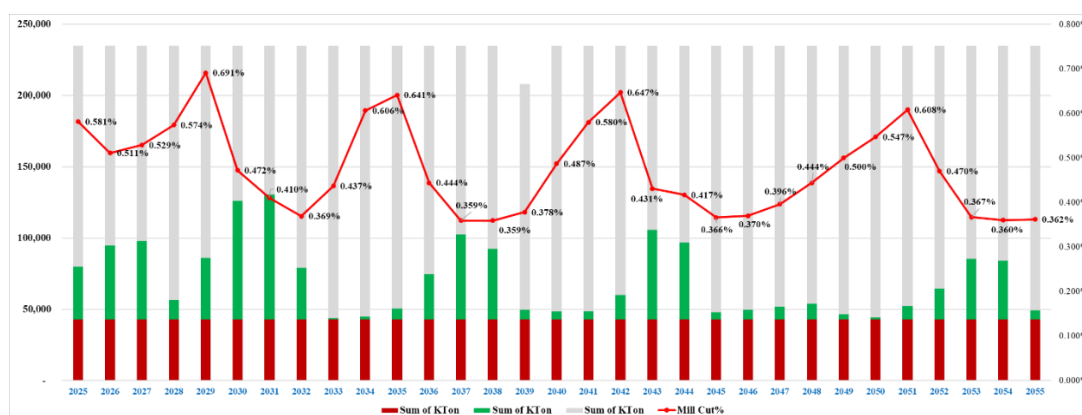
Year	To Mill (Kt)		To Leach (Kt)	To Waste (Kt)	Total Sum of KTon
	Sum of KTon	Mill Cut %	Sum of KTon	Sum of KTon	
2025	42.924	0,581%	36.969	155.107	235.000
2026	42.924	0,511%	51.752	140.324	235.000
2027	42.924	0,529%	55.070	137.006	235.000
2028	43.042	0,574%	13.591	178.367	235.000
2029	42.924	0,691%	43.155	148.921	235.000
2030	42.924	0,472%	83.123	108.953	235.000
2031	42.924	0,410%	87.588	104.488	235.000
2032	43.042	0,369%	36.132	155.827	235.001
2033	42.924	0,437%	1.009	191.067	235.000
2034	42.924	0,606%	2.093	189.983	235.000
2035	42.924	0,641%	7.474	184.602	235.000

2036	43.042	0,444%	31.670	160.289	235.001
2037	42.924	0,359%	59.688	132.388	235.000
2038	42.924	0,359%	49.458	142.618	235.000
2039	42.924	0,378%	6.660	158.416	208.000
2040	43.042	0,487%	5.337	186.621	235.000
2041	42.924	0,580%	5.854	186.222	235.000
2042	42.924	0,647%	16.943	175.133	23.500
2043	42.924	0,431%	62.680	129.396	235.000
2044	43.042	0,417%	53.765	138.194	235.001
2045	42.924	0,366%	4.865	187.211	235.000
2046	42.924	0,370%	6.546	185.530	235.000
2047	42.924	0,396%	9.082	182.994	235.000
2048	43.042	0,444%	10.753	181.205	235.000
2049	42.924	0,500%	3.611	188.465	235.000
2050	42.924	0,547%	1.510	190.566	235.000
2051	42.924	0,608%	9.339	182.797	235.000
2052	43.042	0,470%	21.546	170.412	235.000
2053	42.924	0,367%	42.427	149.649	235.000
2054	42.924	0,360%	41.122	150.954	235.000
2055	42.924	0,362%	6.279	185.797	235.000

Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

Figura 93

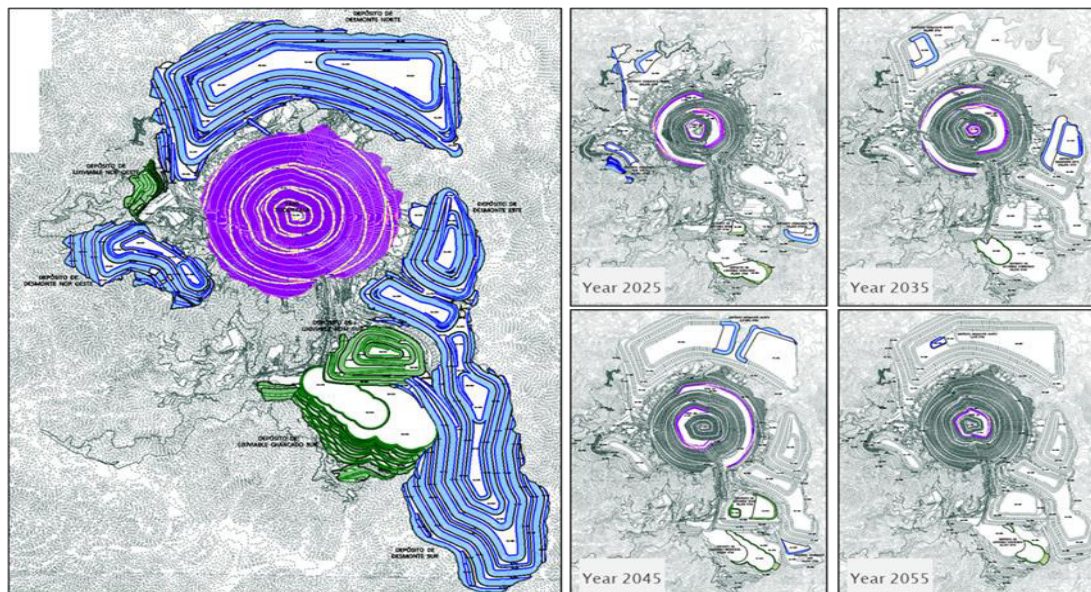
Movimiento de Materiales - Plan de Producción 2025 - 2055



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

Figura 94

Diseño final de botaderos: desarrollo del tajo y secuencia de botadero en mina Toquepala



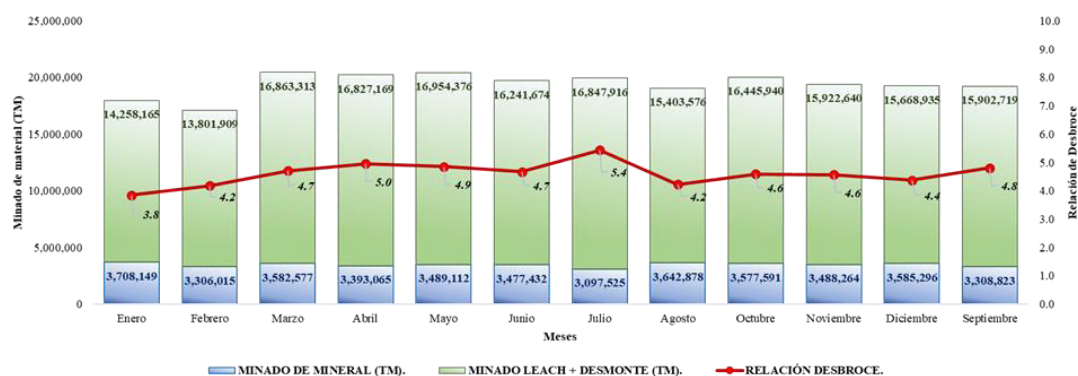
Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

Anexo 3. Relación de Desbroce

$$\text{Relación de desbroce} = \frac{\text{Desmonte} + \text{Lixiviable}}{\text{Mineral}}$$

Figura 95

Material minado vs Relación de Desbroce en el año 2023



Nota. Recuperado del departamento de Planeamiento de SPCC

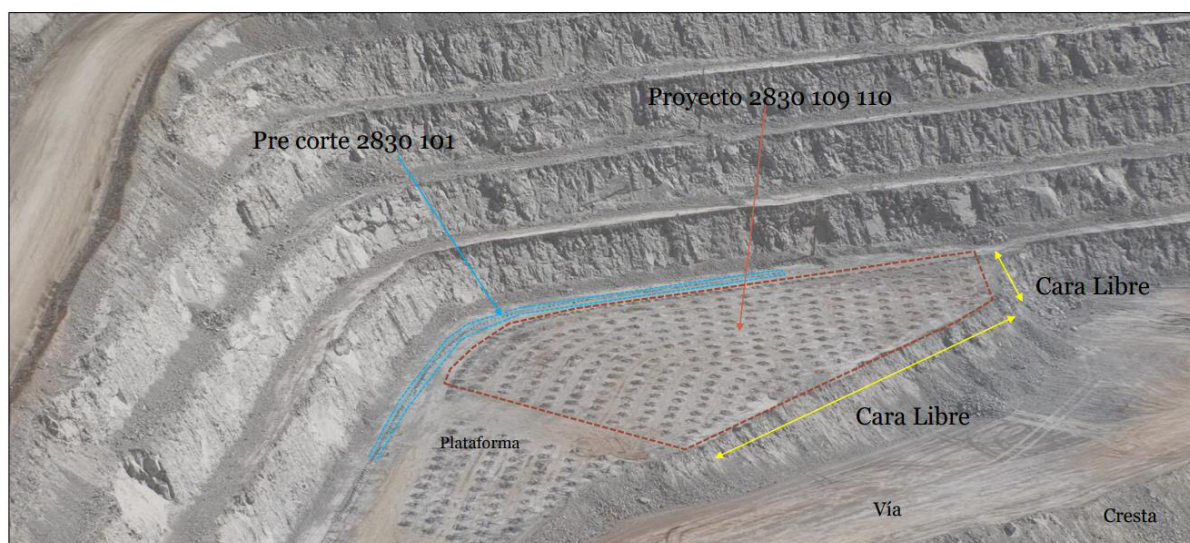
Anexo 4. Monitoreo de resultados

Resultados de fragmentación zona de mineral fase 5 - Sector Sur (Py 2830 109 110) Aplicación de fortis extra (fe-70), doble iniciación, material gravilla y Conigass

Se contempla los resultados de fragmentación obtenidos con la APLICACIÓN de FORTIS EXTRA (FE-70), DOBLE INICIACIÓN, GRAVILLA y CONIGASS que se realizó en el Proyecto 2830 109 110 – Fase 5 Sur, disparado el 30-06-23 en zona de Mineral.

Figura 96

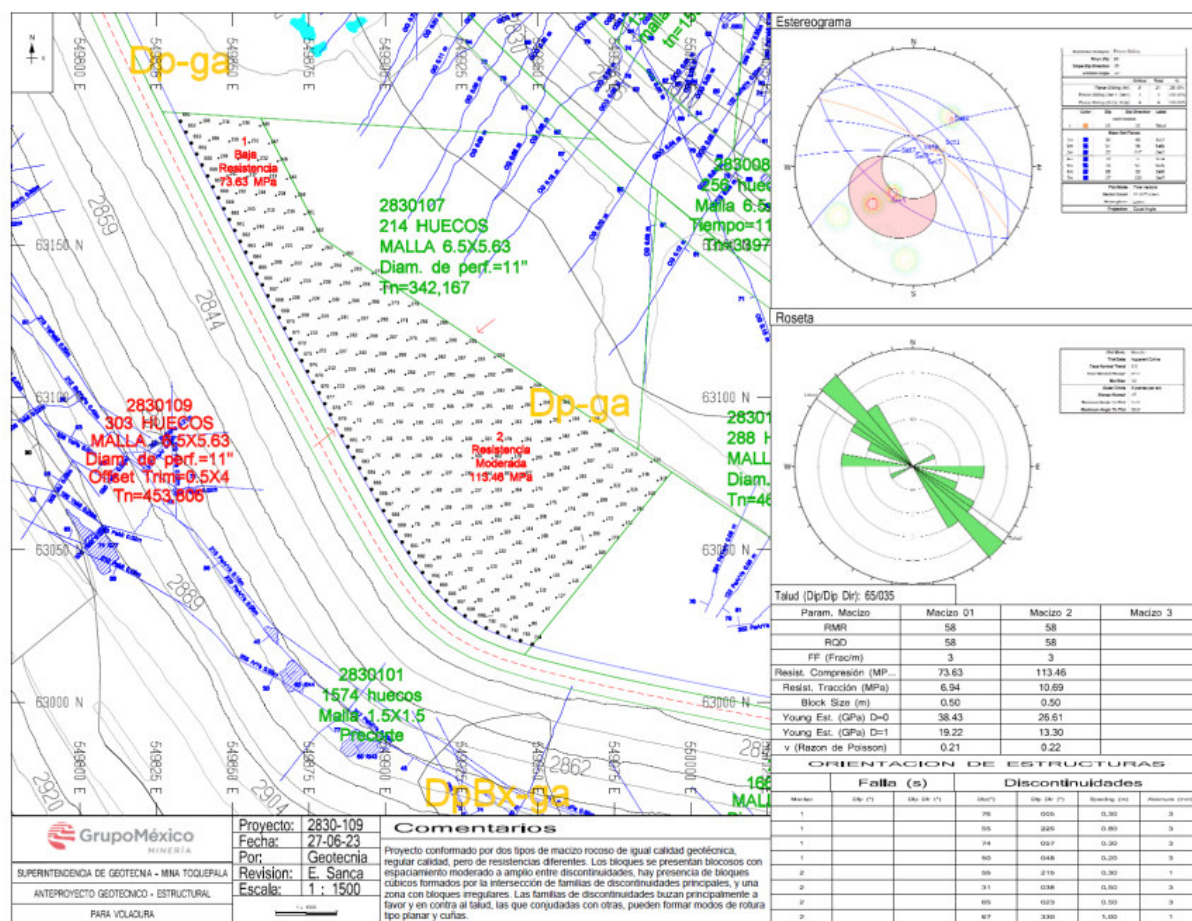
Disparo de prueba Py 2830 109 110 - FASE 5 (30-06-23)



El proyecto estuvo conformado por dos tipos de macizo rocoso de igual calidad geotécnica, regular calidad, pero de resistencias diferentes. Los bloques se presentan blocosos con espaciamiento moderado a amplio entre discontinuidades, hay presencia de bloques cúbicos formados por la intersección de familias de discontinuidades principales, y una zona con bloques irregulares. Las familias de discontinuidades buzan principalmente a favor y en contra al talud, las que conjugadas con otras, pueden formar modos de rotura tipo planar y cuñas.

Figura 97

Información geotécnica del Proyecto de prueba 2830 109



Nota. Recuperado del departamento de Geotecnia de SPCC

Figura 100

Uso de gravilla como material de taco en los taladros primarios de los proyectos de prueba

**Figura 101**

Imágenes de la voladura del proyecto 2830 109 110

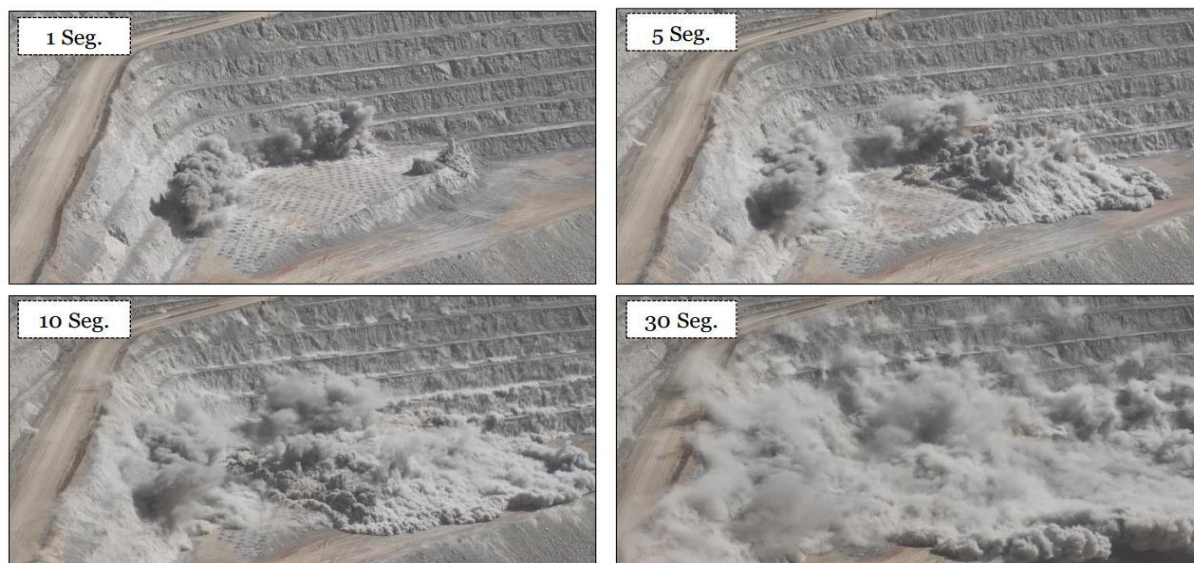
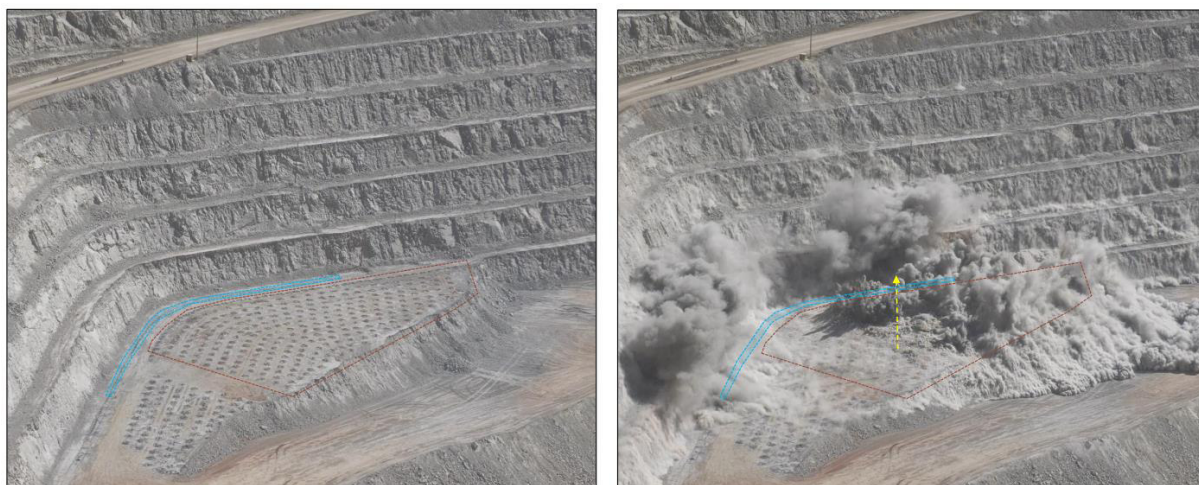


Figura 102

Evaluación durante la voladura del proyecto 2830 109 110

**Figura 103**

Evaluación post voladura del proyecto 2830 109 110



Anexo 6. Análisis de fragmentación mediante el uso de Portametrics

Figura 104

Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 03-07-2023



Figura 105

Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 05-07-2023

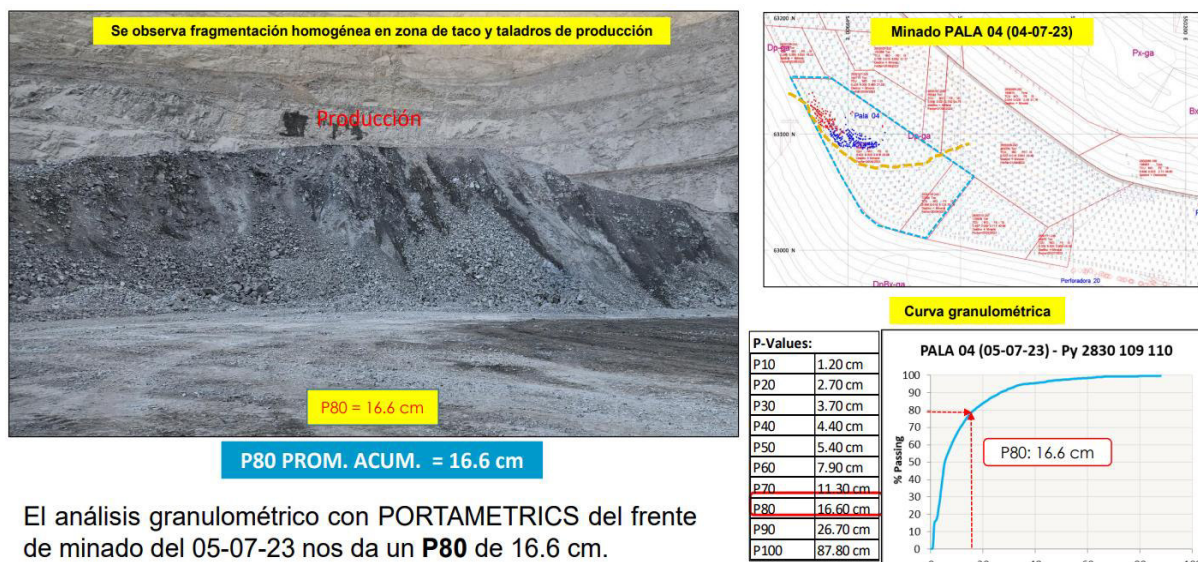
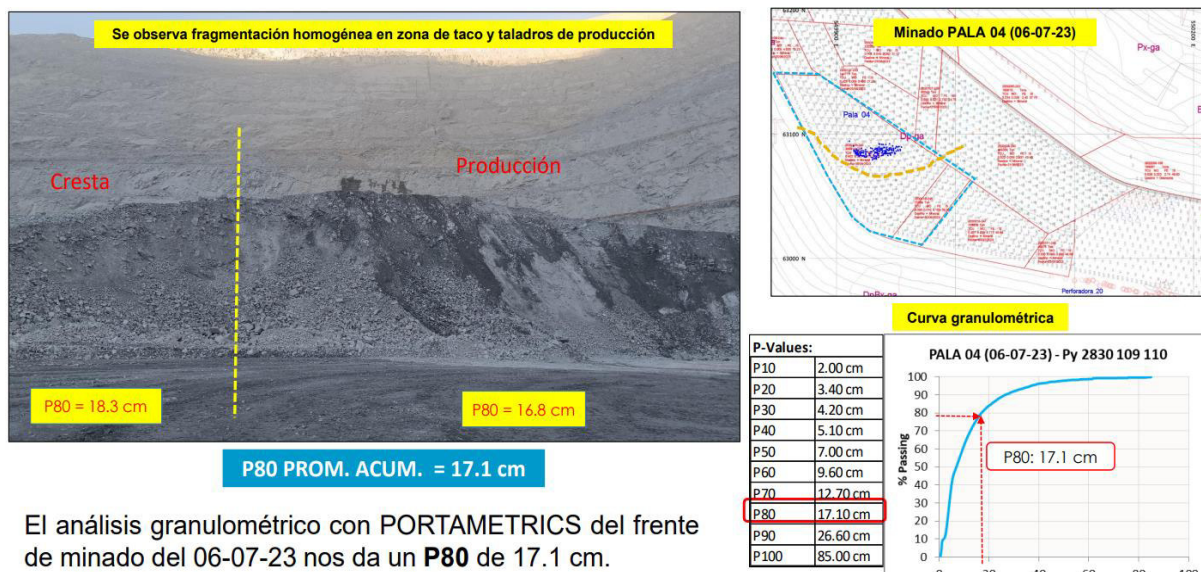
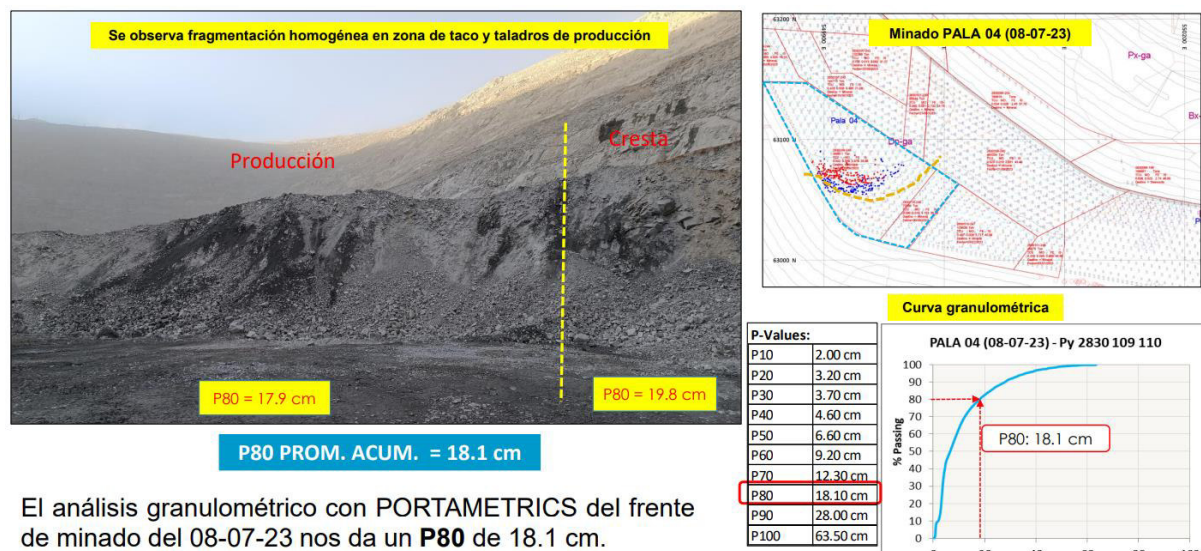


Figura 106

Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 06-07-2023

**Figura 107**

Análisis de fragmentación del py. 2830 109 110 el día 08-07-2023



Anexo 7. Registros de capacitaciones

Figura 108

Registro de capacitación a personal de Orica en la aplicación eficiente y segura del H.A. Fortis Extra 70

Grupo México MINERÍA Southern Perú		REGISTRO: INDUCCIÓN, CAPACITACIÓN, ENTRENAMIENTO, SIMULACRO DE EMERGENCIA, REUNIÓN DE SEGURIDAD DE 5 MINUTOS Y REUNIÓN GENERAL				Código: GPS-PG-19.F.01 Versión: 02	
Datos Empleador	Razón Social	RUC	Domicilio	Actividad Económica	N° Trabajadores		
	SOUTHERN PERU	20100147514	Asiento Minero de Toquepala	Minería	8		
Marcar (X)	Inducción () Capacitación (X) Entrenamiento () Simulacro de Emergencia () Reunión Seg. 5 minutos () Reunión General ()						
Tema	Entrenamiento operativo para el uso seguro y eficiente H.A. Fortis						
Fecha Inicio	17-05-2023		Fecha Término	17-05-2023			
Hora de Inicio	07:30 am.		Hora Término	15:30 pm.		N° Horas	8
Lugar	Planchas de Perforación y disparos		Institución	Southern Perú Cero Corporativo			
Nombre y Apellidos del Capacitador	Jesús Rafael Pantoja Pantoja		Firma del Capacitador				
N°	Registro	DNI	Apellidos y Nombres	Dpto. / Sección	Firma		
1	943261	28678397	Torres Valdivia, Miguel	OP mina			
2	98204	73936677	Antonio Portillo, Juan	OP Min			
3	93680	40530768	Paricahua Benavente, Nora Regal	Op. Min			
4	98168	45198931	Bustos Pacheco Roberto	Op. Min			
5	98331	45232147	Balboa del Pozo Alexis	OP-Mina			
6	98437	46295932	Alberto Lira Corralis	Op. Mina			
7	101709	75409197	Fredy Quispe Tacca	Op. Mina			
8	91427	4796754	Edy Salazar Sosa	Op. Mina			
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							

Grupo México MINERÍA Southern Perú		REGISTRO: INDUCCIÓN, CAPACITACIÓN, ENTRENAMIENTO, SIMULACRO DE EMERGENCIA, REUNIÓN DE SEGURIDAD DE 5 MINUTOS Y REUNIÓN GENERAL			Código: GPS-PG-19.F.01 Versión: 02	
Datos Empleado	Razón Social	RUC	Domicilio	Actividad Económica	N° Trabajadores	
	SOUTHERN PERU	20100147514	Asiento Minero de Toquepala	Minería	8	
Marcar (X)	Inducción () Capacitación ☒ Entrenamiento () Simulacro de Emergencia () Reunión Seg. 5 minutos () Reunión General ()					
Tema	Capacitación en buenas prácticas y seguridad en la aplicación del H.A. Fortis 70					
Fecha Inicio	19-05-2023		Fecha Término	19-05-2023		
Hora de Inicio	07:30 a.m.		Hora Término	N° Horas	8	
Lugar	Planta de Refinería y Disposición		Institución	Southern Peru Copper Corporation		
Nombre y Apellidos del Capacitador	Jorge Riquelme Riquelme		Firma del Capacitador			
N°	Registro	DNI	Apellidos y Nombres	Dpto. / Sección	Firma	
1	98768	45190931	Bustos Pacheco Roberto	OP. Mina		
2	93204	7393617	Guillem Portillo Juan Luis	OP. Mina		
3	94371	29678397	Torres Valdivia, Miguel	OP. mina		
4	93680	40500706	PARICAHUA BENAVENTE, NOC	OP. Mina		
5	93582	4018300	Walter Sotoca Garmoliz	OP. mina		
6	95617	43913798	GUILLÉN ALARCÓN-JAVIER	OP. MINA		
7	103355	76146853	Olivera Rivera Jorge	OP. Mina		
8	104162	76614494	Choque Collata Evelyn Yedith	Op. Mina		
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

Anexo 8. Fichas técnicas de accesorios de voladura

Figura 109

Ficha técnica del accesorio de voladura Pentex

Technical Data Sheet
The Power of Partnership




(Foto referencial)

Descripción

Es un moderno explosivo que provee un alto poder de iniciación en un amplio rango de aplicaciones. Ha sido desarrollado en base a PETN y TNT como materias primas, lo que le confiere la capacidad de ser un explosivo estable y excelente iniciador de cargas poco sensibles o insensibles, de ahí que tiene como característica principal desarrollar una alta presión de detonación.

Aplicación

- Los boosters *Pentex™ CD* están destinados a servir como iniciadores de cargas primarias poco sensibles tales como los nitrocarbonitratos, emulsiones y mezclas a granel en perforaciones de mediano y grandímetro.
- En el caso de los boosters *Pentex™ CO* se utilizan como carga explosiva en voladuras secundarias, reduciendo rocas de gran tamaño producidas por la voladura primaria.

Propiedades Técnicas

Densidad	1,62 ± 3% g/cc
Velocidad de detonación	7.200 ± 3% m/seg.
Resistencia al agua	Excelente
Sensibilidad	Detonador N°8
Iniciador mínimo	Cordón Detonante 10 g/m
Presión de Detonación	216 kbar
Calor de Explosión / Energía	5.617 kJ/kg
Volume de Gas	668 L/kg
Recubrimiento Exterior <i>Pentex™ CD</i>	Envase Plástico (HDPE)
Recubrimiento Exterior <i>Pentex™ CO</i>	Envase de Cartón
Color Envase	Naranja

Embalaje (Cantidades por caja)

Se encuentran disponibles dos tipos de boosters *Pentex™ CD* (cilíndrico), disponible en 150 g , 225 g , 450 g y 900 g ; así como *Pentex™ CO* (cónico), disponible en 450 g , 900 g , 1.350 g y 2.250 g.

Embalaje Booster Cilíndrico

Tipo	Unid. por caja	Peso Neto caja (Kg)	Peso Bruto caja (Kg)	Dimensión Emb. LargoXAnchoXAlto (mm)
<i>Pentex™ CD – 150</i>	80	12,0	12,5	379X343X137
<i>Pentex™ CD – 225</i>	56	12,6	13,1	379X343X137
<i>Pentex™ CD – 450</i>	30	13,5	14,0	379X343X137
<i>Pentex™ CD – 900</i>	15	13,5	14,0	379X343X137

Embalaje Booster Cónico

Tipo	Unid. por caja	Peso Neto caja (Kg)	Peso Bruto caja (Kg)	Dimensión Emb. LargoXAnchoXAlto (mm)
<i>Pentex™ CO – 450</i>	40	18,0	19,0	462X415X177
<i>Pentex™ CO – 900</i>	18	16,2	17,2	462X415X177
<i>Pentex™ CO – 1350</i>	12	16,2	17,2	462X415X177
<i>Pentex™ CO – 2250</i>	8	18,0	19,0	462X415X177

Recomendaciones de uso

- Usar el producto más antiguo en polvorines.
- Almacenamiento adecuado según reglamento de explosivos y polvorines.

Clasificación como Explosivo

Nombre autorizado : **Pentex™**
Nombre correcto de envío : **Cargas Multiplicadoras** sin detonador
: **Booster**, sin detonador

Número UN:	0042
Clasificación :	1.1D

Todas las reglamentaciones relacionadas con la manipulación y uso de tales explosivos son aplicables



Página 1 de 3



www.oricaminingsservices.com

Nota. Recuperado de Orica

Figura 110

Ficha técnica del accesorio de voladura Exel

Technical Data Sheet

Exel™ MS

The Power of Partnership



(Foto referencial)

Descripción

Corresponde un detonador no eléctrico de alta potencia con intervalos de retardo en milisegundos. Su aplicación está orientada principalmente a secuencias de voladura en superficie.

Los detonadores no eléctricos Exel™ MS están compuestos principalmente por 4 elementos:

- Cápsula de aluminio, compuesta por una carga primaria de explosivos, una carga secundaria y un tren de retardo.
- Tubo de señal de color naranja, componente que transmite la señal a la cápsula de retardo. En el momento que el tubo es iniciado, transmite interiormente una onda de choque de baja energía la cual inicia los mixtos de retardo. Esta señal es capaz de desplazarse a través del interior del tubo, sin afectar a ningún agente explosivo u otro accesorio con el cual esté en contacto directo.
- Etiqueta de retardo, elemento que indica el número de serie MS, su tiempo nominal, el largo del tubo y el número de lote asociado a su fecha de fabricación, entregando al usuario la confiabilidad del proceso de rastreo y/o trazabilidad para cada detonador.
- Conector J, dispositivo que une el tubo de señal a la línea troncal de cordón detonante.

Aplicación

El detonador Exel™ MS provee una serie de tiempos aplicables a voladuras de minería a cielo abierto como subterránea, dado el alto rango de tiempos que caracteriza a esta serie. Este producto inicia directamente tanto boosters como explosivos encartuchados, contándose entre sus beneficios:

- Mayor control de la voladura a través de una baja dispersión.
- Producto seguro y fácil de utilizar.

Recomendaciones de Uso

- No estirar, retorcer o aplicar una tensión indebida al tubo de señal ya que esto podría originar un mal funcionamiento.
- Usar el producto más antiguo almacenado en los polvorines.
- Este producto puede ser utilizado en ambientes de alta humedad y abrasión.
- Se recomienda no cortar el tubo debido a que la humedad podría penetrar impidiendo la iniciación.

Propiedades Técnicas

Los detonadores Exel™ MS se encuentran disponibles en los siguientes tiempos:

Número	Tiempo Nominal (ms)	Número	Tiempo Nominal (ms)
1	25	13	450
2	50	14	500
3	75	15	600
4	100	16	700
5	125	17	800
6	150	18	900
7	175	19	1000
8	200	20	1100
9	250	21	1200
10	300	23	1400
11	350		
12	400		

Clasificación como Explosivo

Nombre autorizado: **Exel™ MS**

Nombre correcto para envío:

Conjunto de detonadores no eléctricos para voladuras.

Número UN :	0360	0361
Clasificación :	1.1B	1.4B

Todas las reglamentaciones relacionadas con la manipulación y uso de tales explosivos son aplicables.



Página 1 de 3



www.oricaminingservices.com

Nota. Recuperado de Orica

Figura 111

Ficha técnica del accesorio de voladura I-kon III Extreme

FICHA DE DATOS TÉCNICOS

Detonador Electrónico i-kon™ III Extreme



Descripción

El sistema premium i-kon™ III de Orica es el Sistema de Voladura Electrónica más sofisticado del mercado. Los detonadores electrónicos i-kon™ III tienen múltiples características de seguridad, las que son inherentes al diseño del producto, como distancias disruptivas (entre electrodos), resistencias de entrada y de purga, y el chip mismo. El Sistema Extreme de i-kon™ III está compuesto por:

- Detonador electrónico Extreme de i-kon™ III
- Logger de i-kon™
- Logger II de i-kon™
- Blaster 400 de i-kon™ (Compatible solo con el Logger I)
- Blaster 3000 de i-kon™
- Software de diseño de voladuras SHOTPlus™.

Aplicación

El Sistema de Voladuras Electrónicas es el más avanzado del mercado, y ha sido diseñado para usar en voladuras complejas y de alto valor en superficies grandes y/o en operaciones subterráneas. La aislación de los cables de los detonadores Extreme de i-kon™ III son de gran calidad y resisten condiciones adversas de minería; son muy idóneos para la minería metalífera.

Beneficios Claves

- La muy resistente aislación, exclusiva de los cables de los detonadores Extreme de i-kon™ III son fiables para usar en minas metalíferas en que predominan las rocas filosas y abrasivas.
- Los cables de los Extreme de i-kon™ III son flexibles incluso en condiciones de baja temperatura.

Propiedades Técnicas

Color del Cable	Morado
Resistencia a la tracción (kg)	50
Peso de la carga de explosivos (mg)	900
Color del conector	Verde
Largo y diámetro del casquillo	89 x 7.6 mm
Material del casquillo	Bimetálico (aleación de aluminio y cobre)
Programabilidad (milisegundos)	1min a 30s
Tiempo máximo de retardo (segundos)	30
Precisión como coeficiente de la variación	0.005%

- Comunicación robusta entre el hardware y detonadores i-kon™ III.
- Diseño de voltaje dual inherentemente seguro.
- Es el detonador más preciso del mundo, lo que combinado con la ventana de tiempo de retardo más larga (30 segundos), permite el diseño de voladuras con una amplia diversidad de resultados.
- Su casquillo bimetálico resistente a la corrosión permite un desempeño fiable en la mayoría de los entornos desafiantes de minería.
- i-kon™ III es ideal para grandes voladuras ya que su tiempo de retardo se puede reprogramar en ShotPlus™ y así hacer más expedito el logging.
- Los detonadores programables i-kon™ III simplifican la gestión de inventario en el sitio.

Recomendaciones de Uso

- Los retardos de los detonadores Extreme de i-kon™ III se definen con los Logger de i-kon™ y se programan e inician mediante el uso de Blasters de i-kon™.



01/03/2022
1 de 3



orica.com

Nota. Recuperado de Orica

Figura 112

Ficha técnica del accesorio de voladura I-kon III Extreme

Ficha técnica

The Power of Partnership

Cordtex™

Cordtex™ W / Cordtex™



Cordtex™ 5W UG



Descripción

Cordón detonante resistente y flexible, compuesto por un núcleo de PETN recubierto por un tejido de fibra, que a su vez está envuelto por otro recubrimiento que puede ser plástico (Cordtex™ P) o de cera (Cordtex™ W).

El cordón detonante Cordtex™ satisface la mayoría de los requerimientos tanto en minería, canteras como en obras civiles.

Aplicación

Este producto puede ser usado en minería a cielo abierto, minería subterránea, canteras y obras civiles, sus funciones principalmente están referidas a conectar voladuras como líneas troncales, iniciar detonadores no eléctricos y ser utilizado en líneas descendentes.

Entre sus beneficios se cuenta con:

- Excelente resistencia a la tracción, abrasión y humedad.
- Producto seguro y fácil de conectar.

Recomendaciones de Uso

- Cada vez que se utilice cordón detonante en una voladura, el tendido de la línea troncal debe realizarse formando un circuito cerrado, para permitir que a todos los pozos conectados les llegue la señal de iniciación por dos vías distintas.
- Usar el producto más antiguo almacenado en los polvorines.
- Cuando el cordón detonante se conecte a través de nudos (líneas descendentes conectadas a líneas troncales), se recomienda que la conexión del nudo forme un ángulo recto.

- Cuando se conecte un detonador Exel™ a un cordón detonante Cordtex™ se debe utilizar el Conector J, con el fin de que el detonador quede firmemente unido al cordón detonante y en un ángulo recto.

Propiedades Técnicas

Los cordones detonantes Cordtex™ P y Cordtex™ W están disponibles en los siguientes gramajes:

Nombre	Carga Nominal PETN (g/m)	Color
Cordtex™ W		
Cordtex™ 3,6W	3,6	Rosado
Cordtex™ 5W	5,0	Amarillo
Cordtex™ 5W UG*	5,0	Amarillo
Cordtex™ 10W	10,0	Rojo
Cordtex™ P		
Cordtex™ 3,6P	3,6	Naranja
Cordtex™ 5P	5,0	Verde
Cordtex™ 10P	10,0	Rojo
Cordtex™ 42P	42,0	Naranja

*Producto fabricado especialmente para el mercado Australiano.

Composición

Nombre	Identificador	% (p/p)
PETN (Pentaerythrite tetranitrate)	(CAS No) 78-11-5	96 - 99
Cellulose, 2-hydroxyethyl ether	(CAS No) 9004-62-0	0.5 - 2
Glycerin	(CAS No) 56-81-5	0.5 - 2

Especificaciones

Item	Valor
Densidad de PETN	~0.4 g/cm3
Velocidad nominal de detonación	6,800 m/s
Calor de explosión	5,800 kJ/kg



Abril 2013

Página 1 de 3



www.oricaminingsservices.com

Nota. Recuperado de Orica

Anexo 9. Fichas técnicas de agentes de voladura

Figura 113

Ficha técnica del nitrato de amonio grado ANFO

TECHNICAL DATA SHEET																									
Nitrato de Amonio Poroso Orica / Nitropril™																									
Descripción Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™ es un producto prillado y poroso especial para el uso en la fabricación de ANFO. Su baja densidad y alta porosidad produce una muy buena absorción de petróleo y elevada velocidad de detonación.	reaccionar con materiales tales como fuertes agentes reductores y polvos de metal en altas temperaturas. Cuando se calienta hasta la descomposición (no confinado), Nitrato de Amonio Poroso Orica /Nitropril™ produce óxidos de nitrógeno y vapor blanco de nitrato de amonio. Humos marrones indican la presencia de óxidos tóxicos de nitrógeno.																								
Aplicaciones La principal aplicación del Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™ es la fabricación de ANFO, agente de voladura de bajo costo recomendado tanto para minería subterránea, como para voladuras de superficie. A su vez, el Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™ puede usarse para las mezclas de producto final (Anfos pesados) en distintas proporciones entre Emulsiones y ANFO.	Almacenamiento Nitrato de Amonio Poroso Orica /Nitropril™ puede ser almacenado en un área fresca, bien ventilada, lejos de fuentes de calor o ignición. Debe mantenerse seco. Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™ a granel debe ser almacenado en instalaciones diseñadas a medida. Los almacenes de nitrato de amonio deben cumplir con ciertas normas mínimas y, en la mayoría de los casos, este almacén debe contar con una licencia formal, emitida por la autoridad local correspondiente.																								
Beneficios claves - La baja densidad del producto reduce la cantidad de Nitrato de Amonio necesario para una perforación. - Sumado a su elevada VOD, se obtiene una buena fragmentación de roca con menor consumo de Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™, respecto a otros Nitratos de Amonio disponibles en el mercado.	Marcas registradas La palabra y el logotipo Orica™ son marcas registradas del grupo de compañías Orica™ y de Orica™ Explosives Technology Pty Ltd ACN 075 659 353, 1 Nicholson Street, East Melbourne, Victoria, Australia.																								
Desempeño <table border="1"> <thead> <tr> <th>Productos</th><th>Nitrato de Amonio Poroso Orica /Nitropril™</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Descripción</td><td>Nitrato de amonio poroso de baja densidad</td></tr> <tr> <td>Pureza (NH₄NO₃)</td><td>99,0% Min</td></tr> <tr> <td>Humedad</td><td>0,3% Max</td></tr> <tr> <td>pH 25°C (sol 10% w/w)</td><td>4,5 Min</td></tr> <tr> <td>Densidad</td><td>0,74 +/- 0,04 g/cc</td></tr> <tr> <td>Absorción de Aceite (F.O. N°2)</td><td>10% Min</td></tr> <tr> <td>Tamaño de partícula</td><td>>2mm – 15% Max <1mm – 5% Max</td></tr> </tbody> </table>	Productos	Nitrato de Amonio Poroso Orica /Nitropril™	Descripción	Nitrato de amonio poroso de baja densidad	Pureza (NH ₄ NO ₃)	99,0% Min	Humedad	0,3% Max	pH 25°C (sol 10% w/w)	4,5 Min	Densidad	0,74 +/- 0,04 g/cc	Absorción de Aceite (F.O. N°2)	10% Min	Tamaño de partícula	>2mm – 15% Max <1mm – 5% Max	Clasificación <table> <tr> <td>Nombre Autorizado:</td><td>Nitrato de Amonio Poroso/Nitropril™</td></tr> <tr> <td>Nombre para transporte:</td><td>Nitrato de Amonio</td></tr> <tr> <td>Nº NU:</td><td>1942</td></tr> <tr> <td>Clasificación:</td><td>5.1 (Agente oxidante)</td></tr> </table> Limitación de Responsabilidades Toda la información que contiene este documento es precisa y actualizada a la fecha de su publicación. Dado que las empresas del Grupo Orica no pueden prever ni controlar las condiciones en que esta información y sus productos pueden usarse, cada usuario debería revisar la información en el contexto específico de la aplicación prevista. Hasta el grado máximo permitido por la ley, las empresas del Grupo Orica no serán responsables por daños de ninguna naturaleza derivados del uso de la información contenida en este documento o de la confianza en ella. No se ofrecen garantías expresas ni implícitas más allá de las implícitas que exige la ley.	Nombre Autorizado:	Nitrato de Amonio Poroso/Nitropril™	Nombre para transporte:	Nitrato de Amonio	Nº NU:	1942	Clasificación:	5.1 (Agente oxidante)
Productos	Nitrato de Amonio Poroso Orica /Nitropril™																								
Descripción	Nitrato de amonio poroso de baja densidad																								
Pureza (NH ₄ NO ₃)	99,0% Min																								
Humedad	0,3% Max																								
pH 25°C (sol 10% w/w)	4,5 Min																								
Densidad	0,74 +/- 0,04 g/cc																								
Absorción de Aceite (F.O. N°2)	10% Min																								
Tamaño de partícula	>2mm – 15% Max <1mm – 5% Max																								
Nombre Autorizado:	Nitrato de Amonio Poroso/Nitropril™																								
Nombre para transporte:	Nitrato de Amonio																								
Nº NU:	1942																								
Clasificación:	5.1 (Agente oxidante)																								
Presentación Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™, está disponible en maxi sacos de 1.000 y 1.250 kg, los maxi sacos son de polipropileno con bolsa interior de polietileno.	Fabricado en plantas propias o por terceros bajo aprobación y autorización de Orica.																								
Seguridad Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™ es un agente oxidante, que reaccionará con materiales tales como fuertes agentes reductores y polvos de metal. Si bien no es combustible por sí solo, Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™ favorece la combustión y aumenta la intensidad de un fuego. Nitrato de Amonio Poroso Orica/Nitropril™ no detona fácilmente en condiciones no confinadas, pero puede	Distribuido por: Orica Mining Services Perú S.A. Oficina: Av. Dionisio Derteano 144 Piso 20 – San Isidro Lima Teléfono: +51 1 217 6000 Teléfonos de Emergencia Perú: +51 987226480 +51 949074230 +51 958343271																								

Nota. Recuperado de Orica

Figura 114

Ficha técnica de la Emulsión a granel no sensibilizada

TECHNICAL DATA SHEET

Sistema Fortis™ Extra

Descripción

El sistema de emulsión bombeable sensibilizada *Fortis™ Extra* está específicamente diseñado para aplicaciones de voladuras con agua. El rango de productos *Fortis™ Extra* son las emulsiones explosivas a granel más energéticas disponibles hoy en día.

Aplicaciones

Fortis™ Extra ha sido específicamente diseñado para ser usado en minería a cielo abierto y es apropiado para las situaciones más difíciles de voladuras. *Fortis™ Extra* puede ser usado dondequiera que se encuentren barrenos con agua. No se aconseja para terrenos contaminados con sulfuros reactivos. La mayor potencia y sensibilidad del sistema *Fortis™ Extra* brindará un desempeño superior a cualquier otro producto a base de emulsión a granel.

Beneficios claves

- Fortis™ Extra* está diseñado para soportar largos tiempos de espera en los barrenos de voladura y entrega una confiabilidad superior en barrenos secos y con agua.
- Fortis™ Extra* es elaborado y entregado con un preciso control de las tasas de carguío para adecuarse a su productividad.
- El sistema de entrega de *Fortis™ Extra* asegura exactitud, productividad y confiabilidad en el suministro.
- Fortis™ Extra* puede ser cargado a distintos niveles de energía y densidad, para maximizar la fragmentación y desplazamiento del material volado, mejorando la productividad mina a molino.
- Fortis™ Extra* proporciona una carga explosiva completamente acoplada para maximizar los resultados de las voladuras.

Recomendaciones para su uso

Longitud de carga de barreno

Fortis™ Extra es apropiado para uso en barrenos de hasta 30 metros en longitud, dependiendo del diámetro del barreno, inclinación y presencia de agua. Por favor póngase en contacto con un representante del servicio técnico de Orica para más información.

Primado e Iniciación

Fortis™ Extra puede ser iniciado confiablemente usando como mínimo un booster de pentolita de 450g junto con un detonador *Exel™* o

ikon™. No se recomienda el uso de cordón detonante con *Fortis™ Extra*.

Propiedades Técnicas

Productos	Sistema Fortis™ Extra		
	*65	*70	100*
Densidad Media (g/cm3) ⁽¹⁾	1.23 +/- 0.05		
Densidad de Copa (g/cm3)	1.13 +/- 0.05		
Diámetro mínimo barrenos (mm)	125		
Profundidad máxima barrenos (m)	30		
Máxima longitud de carga (m)	25		
Tipo de barrenos	Secos, con agua o desagüados		
Sistema de cargado	Bombeado		
Tipo de iniciador recomendado para el diámetro mínimo	<i>Pentex™</i> 450g		
VOD típico (m/s) ⁽²⁾	5.400-6.100		
VOD mínimo (m/s)	>4.000		
Calor de formación (MJ/kg)	3.23	3.14	2.97
Energía efectiva (MJ/kg) ⁽³⁾	2.79	2.70	2.62
Energía Relativa Efectiva (REE) ⁽⁴⁾			
Fuerza relativa en peso	121	117	114
Fuerza relativa en volumen	182 - 192	178 - 188	165 - 175
Volumen de gases (l/kg)	991	993	995
Emisión CO ₂ (kg/t) ⁽⁵⁾	174	169	170
Tiempo de espera ⁽⁶⁾	21 días		

**Productos gasificados*

Carguío

El Sistema a granel *Fortis™ Extra* es parte de un rango de productos a granel entregado por las unidades fábricas de Orica (*MMU™*). *Fortis™ Extra* es producido en los *MMU™* y bombeado dentro de los barrenos a pedido.

Tiempo de gasificación

Se debe dejar al menos 20 minutos entre el carguío y el taconeo del barreno.

Tiempo de espera en el barreno de voladura

El tiempo máximo de espera recomendado es de 21 días. El tiempo de espera depende de factores tales como diámetro del barreno, densidad, condiciones de agua del terreno y sistema de iniciación. El



Revisión: Enero de 2023
1 of 2

General



orica.com

Nota. Recuperado de Orica