

Optimización de la fragmentación mediante el uso de la emulsión gasificada San G Apu, en unidad minera Toquepala – 2025

por YAMIRA ELIANA BEGAZO HERRERA

Fecha de entrega: 05-nov-2025 11:53a. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2804437042

Nombre del archivo: tesis_2015201672_20251105_103231_7cf6a988-29f3-4f0e-8974-9be4e00aed40.pdf
(5.42M)

Total de palabras: 16728

Total de caracteres: 93593

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas



**Optimización de la fragmentación mediante ¹el uso de la emulsión gasificada
San G Apu, en unidad minera Toquepala – 2025**

Autor:

Begazo Herrera, Yamira Eliana

ORCID: 0009-0008-5738-6895

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Arias Quispe, Cesar Fabian

ORCID: 0000-0003-2663-5808

Arequipa – Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 27 de Octubre del 2025

Dictamen: 009063-C-EPIM-2025

Visto el borrador del expediente 009063, presentado por:

2015201672 - BEGAZO HERRERA YAMIRA ELIANA

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN MEDIANTE EL USO DE LA EMULSIÓN GASIFICADA
SAN G APU, EN UNIDAD MINERA TOQUEPALA - 2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



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



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



DEDICATORIA

A mi madre, Viviana, por su amor incondicional, por ser mi pilar y sostén en los momentos más desafiantes. Su ejemplo de dedicación y valentía ha sido una inspiración constante en mi vida.

A mi padre, Marco, por su apoyo firme y constante, por enseñarme el valor del esfuerzo y por confiar en mis capacidades desde el inicio.

A mi hermana, Nataly, por su cercanía, por su ánimo silencioso pero presente, y el gran esfuerzo por verme profesional.

A mi tía, Patricia, por su acompañamiento incondicional, su apoyo emocional y su presencia significativa en este proceso. Su respaldo ha sido invaluable.

A Juan, por ser esa persona especial cuya compañía, comprensión y aliento marcaron una diferencia profunda en mi vida durante este camino académico.

Finalmente, a mí misma, por haber enfrentado los retos con determinación, por mantener la perseverancia a pesar de las dificultades y por alcanzar este objetivo con compromiso y dedicación.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por ser mi guía, mi fortaleza y mi refugio en todo momento. Agradezco profundamente su presencia constante en cada paso de este camino, por darme serenidad en la incertidumbre, luz en la oscuridad y esperanza en los momentos de dificultad.

Este logro no sería posible sin su voluntad, sin la fe que me sostuvo y sin las bendiciones que me permitieron avanzar incluso cuando el camino parecía incierto. A Él dedico con humildad y gratitud este resultado, fruto del esfuerzo, la constancia y la fe.

5

Doy un agradecimiento especial a mi persona, por siempre mantenerse recto, luchando para culminar la carrera, dándolo todo siempre; sé que podemos más, así que, que esto solo sea el comienzo de todo lo que podemos lograr.

Este logro es, en gran parte, reflejo del acompañamiento y excelencia de esta casa de estudios.

EPÍGRAFE

“El futuro pertenece a quienes creen en la belleza de sus sueños”

RESUMEN

El presente informe de investigación, titulado “OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN MEDIANTE EL USO DE LA EMULSIÓN GASIFICADA SANGAPUEN LA UNIDAD MINERA TOQUEPALA”, tiene como objetivo general optimizar el proceso de voladura en la mina a través de la aplicación de un explosivo gasificado de alta energía, con el propósito de mitigar la generación de gases nitrosos y reducir el porcentaje de fragmentación gruesa del material volado.

El éxito de una voladura depende en gran medida de la precisión del diseño de perforación, que debe contemplar el control riguroso de los parámetros de voladura como: burden, espaciamiento, profundidad y geometría del diseño.

La implementación de emulsiones gasificadas ha permitido efectuar voladuras de gran escala, logrando una fragmentación más uniforme del macizo rocoso. Este resultado ha repercutido favorablemente en la eficiencia global del ciclo minero, evidenciándose en mayores índices de productividad y en mejoras sustanciales en los procesos de chancado y molienda, debido a la reducción del tamaño de partícula y la disminución de la carga de trabajo de los equipos.

La incorporación de la emulsión gasificada SANGAPUEN en los patrones de voladura de la mina Toquepala permitió reducir en un 90 % las emisiones de humos naranjas (NO_2) y gases nitrosos (NO_x), contaminantes que afectan la calidad del aire y representan un riesgo para la salud ocupacional. Las voladuras ejecutadas con esta tecnología presentan mayor eficiencia energética y menor impacto ambiental en comparación con las mezclas convencionales.

Palabras clave: Fragmentación, explosivo, gasificado

ABSTRACT

The present research report, entitled “OPTIMIZATION OF FRAGMENTATION THROUGH THE USE OF THE GASIFIED EMULSION SAN G APU IN THE TOQUEPALAMINING UNIT,” has the general objective of optimizing the blasting process in the mine through the application of a high-energy gasified explosive, with the purpose of mitigating the generation of nitrous gases and reducing the percentage of coarse fragmentation of the blasted material.

The success of a blasting operation largely depends on the accuracy of the drilling design, which must ensure strict control of the blasting parameters, such as burden, spacing, hole depth, and blast geometry.

The implementation of gasified emulsions has made it possible to carry out large-scale blasts, achieving a more uniform fragmentation of the rock mass. This outcome has had a favorable impact on the overall efficiency of the mining cycle, resulting in higher productivity levels and significant improvements in crushing and grinding processes, due to the reduction in particle size and the decreased workload on processing equipment.

The incorporation of the SAN G APU gasified emulsion into the blasting patterns of the Toquepala mine led to a 90% reduction in the emission of orange fumes (NO₂) and nitrous gases (NO_x), pollutants that negatively affect air quality and pose risks to occupational health. Blasts carried out with this technology demonstrate greater energy efficiency and lower environmental impact compared to conventional explosive mixtures.

Key words: Fragmentation, explosive, gasified

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 2

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1.1 Determinación del problema 3

1.2 Objetivo del proyecto 4

1.2.1 Objetivo general 4

1.2.2 Objetivos específicos..... 4

1.3 Preguntas de investigación 4

1.3.1 Pregunta principal 4

1.3.2 Preguntas específicas..... 5

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema..... 5

1.5 Palabra clave 5

1.6 Justificación e importancia..... 5

CAPÍTULO II 7

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 8

2.1 Estado del arte 8

2.1.1 Antecedentes de la investigación 8

2.2 Bases teóricas de la investigación 9

2.2.1	Minería a cielo abierto.....	9
2.2.2	Operaciones en minería superficial.....	10
2.2.3	Perforación	10
2.2.4	Voladura en minería superficial.....	13
2.2.5	Carguío y acarreo	16
2.2.6	Explosivos comerciales.....	20
2.2.7	Características y propiedades en el desempeño de explosivos	21
2.2.8	Agentes de voladura	26
2.2.9	Efecto de los parámetros controlables de voladura sobre la fragmentación	36
2.2.10	Medición y análisis de la fragmentación.....	38
2.2.11	Modelo de Larsson	38
2.2.12	Modelo de Svedefo.....	40
2.2.13	Modelo Kuz Ram	40
2.2.14	Modelos de utilización de otros explosivos	41
2.2.15	Definición de términos	42
2.3	Hipótesis.....	45
2.3.1	Variable dependiente	45
2.3.2	Variable independiente	45
CAPÍTULO III.....		47
3	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	48
3.1	Alcances y limitaciones.....	48
3.2	Tipo y nivel de investigación	49
3.2.1	Tipo de investigación	49
3.2.2	Nivel de investigación.....	49
3.3	Población y muestra	49

3.3.1	Población.....	49
3.3.2	Muestra.....	49
3.4	Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	50
3.4.1	Procedimiento y técnica de recolección de datos.....	50
3.4.2	Técnicas de recolección de datos	50
3.4.3	Instrumentos de medición:	50
3.4.4	Plan de análisis estadístico de los datos	51
3.5	Lugar de desarrollo de investigación.....	51
3.6	Ambiente que utilizar	53
3.6.1	Ubicación de la zona de estudio	53
3.7	Diseño de carga y parámetros	54
3.7.1	Esquema y recolección de datos.....	57
3.7.2	Control de calidad de la emulsión matriz.....	58
3.7.3	Control de calidad de la San G Apu	58
3.7.4	Comportamiento de la gasificación de la mezcla explosiva en relación al tiempo por camión Fabrica.....	63
3.7.5	Análisis de fragmentación (P80).....	64
3.7.6	Análisis de dig rate	67
3.7.7	Velocidad de onda de detonación	67
3.7.8	Procedimiento para la lectura del VOD	67
3.7.9	Monitoreo de vibraciones	70
3.7.10	Análisis de gases nitrosos.....	71
CAPÍTULO VI.....		72
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
4.1.1	Análisis de dig rate (t/h)	77

4.1.2	Velocidad de detonación.....	79
4.1.3	Monitoreo de vibraciones	84
4.1.4	Medición de densidades	85
4.1.5	Control QA/ QC perforación y voladura	87
4.2	CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		91
ANEXOS.....		92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros en perforación	12
Tabla 2 Parámetros de voladura.....	16
Tabla 3 Equipos de carguío en fase 05 – 06	17
Tabla 4 Equipos de acarreo.....	19
Tabla 5 Densidades según tipo de explosivo	26
Tabla 6 Propiedades de mezclas explosivas	27
Tabla 7 Características técnicas de la emulsión SANG APU	31
Tabla 8 Constante de volabilidad (S).....	39
Tabla 9 Operacionalización de variables	46
Tabla 10 Diseño de carga.....	55
Tabla 11 Parámetros de explosivos.....	55
Tabla 12 Total de carga explosiva	56
Tabla 13 Teoría del Cráter de Frank Chiappetta	56
Tabla 14 Densidades de las emulsiones.....	64
Tabla 15 Análisis de fragmentación	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Perforación de taladros	10
Figura 2 Carguío de taladros	14
Figura 3 Carguío de material.....	17
Figura 4 Carguío de material con pala Hidráulica	19
Figura 5 Clasificación de explosivos	21
Figura 6 Variación de la potencia de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión	22
Figura 7 Influencia del diámetro sobre el VOD	24
Figura 8 Diseño de carga con emulsión gasificable.....	30
Figura 9 Fabricación de emulsión gasificable	33
Figura 10 Proceso de fabricación de ANFO pesado Gasificable	34
Figura 11 Imagen satelital mina Toquepala.....	51
Figura 12 Ubicación mina Toquepala	52
Figura 13 Grafica de voladuras primera etapa	53
Figura 14 Grafica de voladuras segunda etapa	54
Figura 15 Esquema de voladura	57
Figura 16 Descarga de emulsión	58
Figura 17 Diseño de voladura	59
Figura 18 Verificación visual de la mezcla	60
Figura 19 Ubicación	61
Figura 20 Toma de 1ra muestra.....	61
Figura 21 Trazado de muestra	62
Figura 22 Medición de densidad	62
Figura 23 Emulsión HA 73 SGE.....	63
Figura 24 Curva de gasificación - FAM 6.....	63
Figura 25 Comportamiento de la gasificación - FAM 6.....	64
Figura 26 Target de distribución	65
Figura 27 Delimitación de zonas a analizar	66
Figura 28 Reporte de fragmentación	66
Figura 29 Instalación grafica del equipo Microtrap.....	69

Figura 30 Gráfica de medición del VOD	69
Figura 31 Geófono	71
Figura 32 Escala de gases nitrosos.....	71
Figura 33 Análisis en fragmentación de mineral San G Apu	76
Figura 34 Análisis de fragmentación de desmonte San G Apu	77
Figura 35 Dig rate SAN-G APU mineral	78
Figura 36 Dig rate SAN-G APU desmonte	78
Figura 37 Gráfica de velocidad régimen SAN-G APU 100%.....	79
Figura 38 Resumen de VOD SAN-G APU	80
Figura 39 Medición del VOD.....	81
Figura 40. Evaluación de gases NOx	82
Figura 41 Nivel de gases NOx voladuras emulsión SANG APU	83
Figura 42 Comparación nivel de gases NOx voladuras emulsión SANG APU Famesa vs Línea Base	83
Figura 43 Resumen de monitoreos de vibraciones.....	84
Figura 44 Monitoreo de vibraciones SAN-G APU	85
Figura 45 Medición de densidades y esponjamiento en campo	85
Figura 46 Matriz de riesgo de ocurrencia de gases NOx por densidad de la mezcla.....	86
Figura 47 Matriz de riesgo de ocurrencia de gases NOx por densidad de la mezcla.....	86
Figura 48 Medición de densidades in hole.....	87
Figura 49 Resultados de control QA/QC, por zonas de interés	87

INTRODUCCIÓN

La voladura de rocas constituye una de las operaciones unitarias fundamentales en la minería, tanto a cielo abierto como subterránea. Su desarrollo ha estado marcado por una evolución tecnológica constante, que abarca desde el uso de la pólvora negra en el siglo XVII, pasando por la invención de la dinamita en 1866, hasta la incorporación de agentes explosivos modernos como el ANFO, los hidrogeles y las emulsiones, los cuales han permitido mayor adaptabilidad y control frente a diversas condiciones geológicas.

En la actualidad, las técnicas de voladura se sustentan en principios científicos que consideran las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, tales como la resistencia a la compresión, la presencia y orientación de fracturas y discontinuidades, así como la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Estos factores influyen directamente ⁴ en el diseño de la voladura y, por ende, en la eficiencia del proceso de fragmentación.

Dentro del ciclo de minado, que comprende las fases de perforación, voladura, carguío y acarreo, la eficiencia en cada etapa resulta determinante para evitar cuellos de botella que afecten la productividad global y generen sobrecostos operativos. Una fragmentación deficiente, por ejemplo, puede incrementar los tiempos de carguío, acelerar el desgaste de los equipos, aumentar el consumo energético en el chancado y reducir la eficiencia del transporte.

La presente tesis propone la optimización de la fragmentación de la roca mediante el uso de la emulsión gasificada SAN G APU en la Unidad Minera Toquepala. El objetivo principal es evaluar su impacto técnico, buscando maximizar la eficiencia operativa del ciclo de minado a través de una fragmentación uniforme y de alta calidad.

CAPÍTULO I

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

La Unidad Minera Toquepala, específicamente en las fases 05 y 06, enfrenta importantes desafíos operativos durante el proceso de voladura, derivados de la dureza y heterogeneidad litológica del macizo rocoso, compuesto predominantemente por brechas volcánicas con una dureza estimada entre 5 y 6 en la escala de Mohs. Esta condición geomecánica ha generado resultados de fragmentación subóptimos, con tamaños de mineral superiores a 18 cm y de desmonte mayores a 23 cm, lo que repercute negativamente en las operaciones mineras. La fragmentación deficiente no solo incrementa los tiempos de ciclo y el desgaste de los equipos, sino que también eleva los costos operativos del ciclo de minado. Frente a esta problemática, la emulsión gasificada SAN-G APU surge como una alternativa tecnológica avanzada, cuyas propiedades fisicoquímicas como su alto poder energético, capacidad de gasificación controlada y adaptabilidad a diversas condiciones geológicas permiten una liberación de energía más uniforme y efectiva en el macizo rocoso.

Además de su eficiencia técnica, ³ la emulsión SAN-G APU reduce significativamente la generación de gases nitrosos (NOx y NO₂) post-voladura, lo cual representa una ventaja ambiental relevante para las condiciones actuales de la mina. Por tanto, se plantea como problema central la necesidad de optimizar la fragmentación en las fases activas de explotación mediante la aplicación de emulsión gasificada SAN-G APU, evaluando su rendimiento técnico y económico frente a explosivos convencionales, con el objetivo de mejorar la productividad global en la Unidad Minera Toquepala.

1.2 Objetivo del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Optimizar la fragmentación del macizo rocoso en la Unidad Minera Toquepala, mediante la aplicación ¹ de la emulsión gasificada SAN-G APU, con el propósito de alcanzar una distribución granulométrica adecuada.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar el efecto de la ⁷ emulsión gasificada SAN-G APU en la fragmentación de rocas en la Unidad Minera Toquepala.
- Analizar los parámetros de VOD, vibraciones y control de calidad ³ de la emulsión SAN-G APU.
- Optimizar la dosificación y aplicación de la ⁷ emulsión gasificada SAN-G APU para lograr la mejor fragmentación posible.
- Comparar la emisión de gases nitrosos a consecuencia de las operaciones de voladura, utilizando el explosivo gasificado SAN-G APU.
- Evaluar el efecto de la ⁷ emulsión gasificada SAN-G APU en la fragmentación de rocas en la unidad minera Toquepala.

1.3 Preguntas de investigación

1.3.1 Pregunta principal

¿De qué manera la emulsión gasificada ¹ SAN-G APU contribuye a la optimización de la fragmentación del macizo rocoso, permitiendo obtener una adecuada distribución granulométrica en la Unidad Minera Toquepala?

1.3.2 Preguntas específicas

- ¿Cómo determinar el nivel de fragmentación de las rocas usando la emulsión gasificada San G Apu en la unidad minera Toquepala?
- ¿Cómo determinar el nivel de gases nitrosos como consecuencia de la voladura usando San G Apu en la unidad minera Toquepala?
- ¿Cómo determinar los parámetros de VOD y vibraciones producto de la aplicación de la emulsión gasificada San G Apu?

1.4 Línea de investigación a la que corresponde el problema

Según las líneas de investigación de la Universidad Católica de Santa María para la Escuela Profesional de ingeniería de minas e indicando que se presentan según la Modalidad Presencial AUTO N° 019-VRINV-2019; la presente investigación corresponde a “Optimización de procesos mineros”, ya que, se optimizará la voladura de rocas con la emulsión gasificante San G Apu.

1.5 Palabra clave

- Optimización
- Emulsión
- Fragmentación
- Carguío
- Acarreo

1.6 Justificación e importancia

Los aportes que brindan la siguiente investigación son los siguientes: La presente investigación se justifica por su relevancia técnica y operativa en el contexto de la actividad minera

a cielo abierto. En particular, se enfoca en evaluar el impacto del uso de la emulsión gasificada SAN-G APU en el proceso de voladura dentro de la Unidad Minera Toquepala, en comparación con el explosivo convencional Heavy ANFO.

El explosivo SAN-G APU representa una evolución en tecnología de voladura al ofrecer:

- Mejora la fragmentación al tener mayor liberación de energía.
- Eliminación de los gases nitrosos generados durante la voladura.
- Al mejorar la fragmentación se mejora los tiempos de carguío y acarreo del mineral.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

2.1.1 Antecedentes de la investigación

En la tesis titulada “Emulsión gasificada bombeable y su impacto en la productividad – Mina Huarón – Pan American Silver S.A – 2019”, publicado en el año 2020. La cual detalla la investigación en el uso de emulsión gasificada por parte de la minera Pan American Silver S.A, se detalla que en 2019 en una muestra de 33 disparos con emulsión gasificada a un avance de 3.52 m/disparo.

Mientras que en el 2018 empleando dinamita gelatina especial tuvo un avance de 3.14 m/disparo. Esto se traduce que empleando la emulsión gasificada se logró un 12% en el incremento de m/disparo lo cual lleva al incremento de productividad (Muñoz, 2020)

En la tesis titulada “Propuesta del uso de emulsión gasificada en el carguío de taladros para reducir costos en voladura en una mina a tajo abierto con depósitos tipo Skarn, Arequipa 2020” publicado en el año 2020. La cual aplica un análisis estadístico de comparación con el uso del Fortis Mex 60, el cual se venia empleando en la mina, con los nuevos prospectos a utilizar, los cuales son, Fortis Advantage 60 1.1gr/cc, Fortis Advantage 70 1.1gr/cc, Fortis Advantage 70 1.05gr/cc, Fortis Advantage 100 1.1gr/cc, Fortis Advantage 100 1.05gr/cc y Fortis Advantage 100 1.0gr/cc.

Se aplico un experimento en el desmonte con una variación en la altura de agua, el cual da como resultado en un desmonte de 6 metros que el Fortis Advantage 100 1.0gr/cc da un ahorro del 11% comparado con el uso del Fortis Mex 60 (Alcocer & Salas, 2020)

En la tesis titulada “Optimización de la fragmentación en la mina Toquepala, mediante la aplicación de explosivo gasificado” Se ve la reducción de costos y de los gases nitrosos generados por la voladura.

También se busca con esto la reducción de la fragmentación gruesa generada, lo cual no cumple los estándares requeridos para la molienda. En la presente tesis se aplica la tecnología explosiva Quantex, en el cual con el uso del Quantex se redujo en un 90% la generación de gases nitrosos (Quispe, 2018)

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 Minería a cielo abierto

La gran minería del Perú con recursos importantes suele optar por la aplicación de minería a cielo abierto, para emplear este método se necesita una delimitación geográfica en el cual se encontrará una envolvente económica, pero en el caso de minería a cielo abierto o superficial tiene una restricción, la cual es, ley de corte la cual puede ser calculada con:

$$Ley\ de\ corte = \frac{C_m + C_p}{(P_m - C_r) * RM}$$

Donde:

- C_m : Costo de minado [$\$/b$].
- C_p : Costo de planta de procesamiento de mineral [$\$/b$].
- P_m : Precio del metal [$\$/b$].
- RM : Recuperación mineralógica [%].
- C_r : Costo de refinación [$\$/b$].

2.2.2 Operaciones en minería superficial

El proceso de producción de Toquepala inicia con la minería para la extracción del mineral. Seguidamente, este mineral es llevado a una planta concentradora para su procesamiento. El producto resultante, los concentrados, se desplaza hasta un puerto para su envío. Finalmente, los desechos del proceso metalúrgico se confinan en una presa de relaves.

2.2.3 Perforación

Los trabajos de perforación son realizados con perforadoras eléctricas marca Bucyrus y P&H, con diámetro de perforación de taladros de 11" - 12 1/4" (aproximadamente 280 mm y 311 mm). Para los cuidados de las paredes finales, utilizan voladura contralada con pre-cortes en bancos simples y dobles, para la perforación de pre-cortes utilizan perforadoras marca Epiroc con diámetro de perforación de 5".

Figura 1
Perforación de taladros



Nota: Taladro de perforación en la unidad minera.

1

Los diámetros de los taladros a varían según el tipo de taladro a perforar, siendo estos de la siguiente manera:

▪ Taladros de pre-corte:

- ❖ Modelo: Sandvik Titon 600 (Down-the-Hole, DTH).
- ❖ Diámetro de perforación: 5" (aproximadamente 127 mm).
- ❖ Espaciamiento de taladros: 1.5 m a 2.0 m.
- ❖ Longitud de perforación: 16 m.
- ❖ Inclinación: 65° a 80°.
- ❖ Potencia del compresor: 28 m³/min.

▪ Taladros de producción y buffer:

- ❖ Modelos: P&H 100XP, P&H 120, Bucyrus 49R-III, Bucyrus 49HR.
- ❖ Diámetros de perforación: 11" y 12 ¼" (aproximadamente 280 mm y 311 mm).
- ❖ Malla de perforación: Patrón triangular equilátero con espaciamiento de 5.6 m a 12 m.
- ❖ Longitud de perforación: 15 m.
- ❖ Sobreperforación: 1.5 a 2.0 m.
- ❖ Método de perforación: Rotativa con brocas tricónicas, utilizando barras de acero para transmitir energía a la broca, que está equipada con botones de carburo de tungsteno para triturar la roca.

- Equipos adicionales:

- ❖ Perforadora Down-the-Hole (DTH): Sandvik Titon 600, utilizada específicamente para las operaciones de precorte.

- ❖ Perforadoras giratorias eléctricas: Hasta fines de 2017, se contaba con 13 perforadoras primarias y 5 perforadoras de precorte.

1 Los parámetros de burden y espaciamento varían de acuerdo con el tipo de material que se perfora si es mineral o estéril y con variaciones dependiendo la dureza del mismo.

Tabla 1
Parámetros en perforación

Parámetro	Mineral	Desmante
Diámetro de perforación	11" (280 mm)	11" (280 mm)
Malla de perforación	Patrón triangular equilátero de 6.5 m a 12.0 m	Patrón triangular equilátero de 6.5 m a 12.0 m
Longitud de perforación	15 m	15 m
Sobreperforación	1.5 m a 2.0 m	1.5 m a 2.0 m
Equipos utilizados	Perforadoras P&H 100XP, P&H 120, Bucyrus 49R-III, Bucyrus 49HR	Perforadoras P&H 100XP, P&H 120, Bucyrus 49R-III, Bucyrus 49HR
Método de perforación	Rotativa con brocas tricónicas	Rotativa con brocas tricónicas

Nota: Parámetros de voladura en mineral y desmante.

Es importante destacar que los parámetros de perforación como el diámetro del taladro, la malla de perforación y la longitud se mantienen constantes tanto para el mineral como para el desmante. No obstante, la diferencia radica en la forma en que estos parámetros se aplican

operacionalmente, ya que se ajustan según las características geomecánicas del material a perforar, buscando optimizar la fragmentación.

2.2.4 Voladura en minería superficial

La voladura se divide en dos áreas:

- Área de diseño: Es la encargada de diseñar las mallas de perforación y las cargas, esto depende del tipo de roca en la cual se realizará la voladura.
- Trabajo en campo: Supervisa el carguío de taladros con explosivos y los accesorios de voladura.

El carguío de taladros y su supervisión, está realizada por la empresa Famesa Explosivos S.A.C, este trabajo se realiza con los camiones fábricas, sus capacidades son las siguientes:

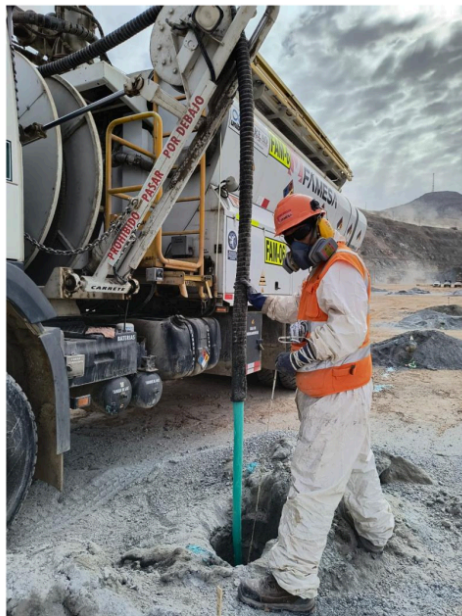
- 10 toneladas de nitrato de amonio.
- 15 toneladas de emulsión.
- 30 galones de petróleo o aceite residual.
- Nitrito de Sodio.

Los camiones fábrica están capacitados para ejecutar dos tipos de carguío, dependiendo de las condiciones específicas de la voladura. Estos métodos son:

- Sistema bombeable: Consiste en el carguío de los taladros de forma ascendente (de abajo hacia arriba) hasta alcanzar la altura requerida. Este sistema se emplea principalmente en taladros con presencia de agua y profundidades mayores a un metro.

- Sistema vaciable: En este método, el explosivo se introduce ¹ por gravedad desde la boca del taladro. Para ello, se utiliza el brazo articulado del camión junto con una manga que facilita la descarga del material. Es el sistema preferido para taladros secos.

Figura 2
Carguío de taladros



Nota: Carguío de taladros en la unidad minera efectuado por un personal de piso.

Explosivos y accesorios utilizados en voladuras

Para las voladuras primarias se emplean agentes explosivos como emulsiones a granel y ANFO (Nitrato de Amonio con Fuel Oil), este último preparado a partir de petróleo o aceites residuales.

En el caso de las voladuras secundarias y de precorte, se utilizan emulsiones encartuchadas junto con cordón detonante, permitiendo una aplicación más precisa y segura en zonas específicas.

Accesorios de voladura:

- Se utilizan boosters de 1 lb y 2 lb, dependiendo del diseño de la malla y la energía requerida.
- Los detonadores electrónicos son el sistema principal de iniciación, complementados con un sistema de respaldo de detonadores no electrónicos, lo que permite ejecutar voladuras controladas.
- Como medida adicional de seguridad, se emplean detonadores no eléctricos de 18,0 metros de longitud con un retardo de fondo de 800 milisegundos.

Características del taco y factor de potencia:

- La longitud del taco es de 6,5 metros en zonas con mineral y de 7,0 metros en zonas de desmonte.
- El factor de potencia, producto de la distribución de carga, varía entre 0,30 y 0,34 kg/t, garantizando una fragmentación eficiente y controlada.

Tabla 2*Parámetros de voladura*

TIPO DE TALADRO	MEZCLA EXPLOSIVA	ACCESORIOS
Pre-corte	Famecorte S	Cordón detonante
Buffer	SAN G - APU	Booster 1 lb, detonador electrónico
Producción	SAN G - APU	¹ Booster 1 lb, detonador electrónico
Secundario	Emulsión encartuchada	Booster 2 lb, detonador electrónico

Nota: Área de voladura (Famesa , 2019).

2.2.5 Carguío y acarreo

En la operación de Toquepala, ¹el carguío del material fragmentado en los distintos frentes de minado se realiza mediante equipos de alta capacidad, optimizados según el tipo de material y la estrategia de producción. Los principales equipos de carguío utilizados son:

- Palas eléctricas P&H: Ideales para el carguío de grandes volúmenes de material en ciclos continuos, ofreciendo alta eficiencia operativa en frentes amplios.
- Cargadores frontales Komatsu y Caterpillar (CAT): Se utilizan en zonas de difícil acceso o de menor volumen, con gran versatilidad para maniobras rápidas y precisas.

La delimitación de los frentes de carguío se realiza mediante el diseño de polígonos de minado, los cuales permiten definir con precisión el tipo de material (mineral o desmonte) a cargar.

Asegurando una distribución eficiente del material hacia chancadoras, stockpiles o botaderos, según corresponda.

Figura 3
Carguío de material



Nota: Recolección de material con equipo de carga.

Tabla 3
Equipos de carguío en fase 05 – 06

Modelo	Capacidad Nominal del Balde	Peso de Operación	Producción Estimada
P&H 4100XPC AC	73–82 t	~1,300 t	7,183–9,578 MTPH
P&H 7495	100 t	~1,370 t	Datos no especificados
P&H 2800XPB	54 t	~1,100 t	Datos no especificados
P&H 2100BL	23 t	~500 t	Datos no especificados

Nota: Capacidad de equipos de carga.

Las palas eléctricas en Toquepala han demostrado un alto rendimiento y disponibilidad operativa. Según datos de 2021, las palas P&H 7495 lograron una disponibilidad física superior al 93%, superando el promedio del 88 al 90% observado en otras operaciones mineras. Este alto nivel de disponibilidad se atribuye a un riguroso proceso de mantenimiento y reparación, lo que garantiza una operación continua y eficiente.

2.2.5.1 Especificaciones técnicas

- P&H 4100XPC AC: Esta pala eléctrica es reconocida por su alta capacidad de carga y eficiencia operativa. Su diseño permite una carga nominal de hasta 82 toneladas, con una producción estimada que varía entre 7,183 y 9,578 toneladas métricas por hora (MTPH). Es ideal para operaciones en terrenos exigentes como los de Toquepala.
- P&H 7495: Con una capacidad de balde de 100 toneladas, esta pala es una de las más grandes en el mercado. Su robustez y capacidad de carga la hacen adecuada para manejar grandes volúmenes de material en operaciones de gran escala.
- P&H 2800XPB: Esta pala tiene una capacidad de balde de 54 toneladas. Es versátil y se utiliza en diversas aplicaciones mineras, ofreciendo un equilibrio entre capacidad de carga y eficiencia operativa.
- P&H 2100BL: Con una capacidad de balde de 23 toneladas, esta pala es más compacta y se emplea en operaciones donde se requiere mayor maniobrabilidad y precisión en el carguío.

Figura 4
Carguío de material con pala Hidráulica



Nota: Carguío con pala en frente de trabajo.

El acarreo es realizado mediante camiones Caterpillar CAT 793C de 231 toneladas, Caterpillar CAT 793D de 231 entre otros especificados en la tabla 4.

Tabla 4
Equipos de acarreo

Modelo	Capacidad de Carga	Tipo de Equipo	Observaciones
Komatsu 930E	290 tm	Camión volquete	Operativo en Toquepala
Komatsu 830E	218 tm	Camión volquete	Operativo en Toquepala
Caterpillar 793C	231 tm	Camión volquete	Operativo en Toquepala

Modelo	Capacidad de Carga	Tipo de Equipo	Observaciones
Caterpillar 793D	231 tm	Camión volquete	Operativo en Toquepala
Caterpillar 794AC	320 tm	Camión volquete	Operativo en Toquepala
Caterpillar 797F	364 tm	Camión volquete	Operativo en Toquepala
Caterpillar 798AC	400 tm	Camión eléctrico	Operativo en Toquepala

Nota: Área de operaciones mina.

Esta flota de equipos permite a Toquepala manejar eficientemente grandes volúmenes de material, optimizando los procesos de carguío y acarreo en sus operaciones de tajo abierto.

2.2.6 Explosivos comerciales

Un explosivo es una sustancia química capaz de transformarse rápidamente en productos gaseosos mediante una reacción exotérmica, liberando de forma violenta su energía almacenada en forma de gases, calor y ondas de choque. Esta liberación de energía, particularmente la elevada presión y temperatura de los gases generados, es la responsable de la fragmentación del macizo rocoso.

¹ En la industria minera, la voladura es considerada el método más eficiente para la excavación en roca dura, debido a su capacidad de romper grandes volúmenes de material en tiempos reducidos y con alta efectividad operativa.

Los explosivos utilizados en minería se clasifican bajo diversos sistemas, los cuales consideran criterios como su sensibilidad, velocidad de detonación, estado físico, forma de aplicación y condiciones del entorno donde serán utilizados.

Figura 5
Clasificación de explosivos



Nota: ¹ Clasificación de los explosivos (EXSA, 2019).

2.2.7 Características y propiedades en el desempeño de explosivos

Potencia

La energía contenida en un explosivo y su potencial para realizar un trabajo mecánico se cuantifican mediante un parámetro conocido como potencia. Es importante señalar que no existe un criterio de medición universalmente aceptado por todos los fabricantes; en su lugar, se emplean diversos métodos de prueba, tales como la prueba balística de mortero, la prueba de Trauzl, la caracterización y el método de potencia sísmica.

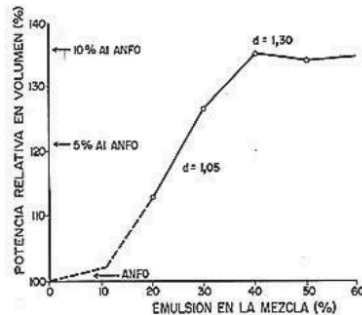
La potencia puede ser expresada en términos de ¹ potencia absoluta por volumen (ABS) o potencia absoluta por peso (AWS). Adicionalmente, es común expresar la potencia de un explosivo

de forma relativa, comparándola con la energía del ANFO, al cual se le asigna un valor del 100%.
1 Esto permite obtener la potencia relativa por peso o la potencia relativa por volumen, facilitando así una comparación directa entre distintos tipos de explosivos.

1 En la siguiente figura se muestra la variación de potencia de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión.

Figura 6

Variación de la potencia de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión



2 Nota: Variación de la potencia de un ANFO pesado (Lopez Jimeno y otros, 2003).

En la figura 07, se ha observado que la potencia de una mezcla de ANFO pesado alcanza su punto máximo y empieza a decrecer si el contenido de emulsión excede el 40% o 50%. Este fenómeno se atribuye a que, con un porcentaje elevado de emulsión, la distancia entre las partículas de ANFO aumenta, lo que las vuelve menos eficientes para iniciar la reacción (actuar como puntos calientes) y para transmitir la onda de choque explosiva.

Brisance

Se denomina brisance al impacto inicial y destructivo que un explosivo ejerce sobre la roca, provocando su rompimiento. Este efecto dinámico es una consecuencia directa ¹ de la onda de choque generada, y su intensidad está estrechamente relacionada con la densidad del explosivo y su velocidad de detonación, parámetros que frecuentemente sirven de base para comparaciones.

La brisancia no solo tritura la roca, sino que también intensifica ¹ el efecto de expansión y empuje del material roto, facilitando su desplazamiento y la formación de la pila de escombros. Tanto la brisancia como la potencia de un explosivo son elementos cruciales que se combinan en el proceso de voladura.

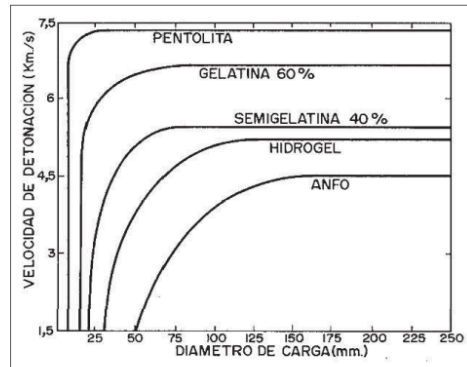
Velocidad de detonación

Se conoce como velocidad de detonación a la rapidez con la que la reacción química de una onda de detonación avanza a lo largo de la columna explosiva. Este parámetro es crucial, ya que define directamente la tasa a la que se libera la energía contenida en el explosivo.

Varios factores influyen en esta velocidad: ¹ la densidad de la carga, el diámetro del explosivo, el confinamiento (es decir, la presión o resistencia que rodea al explosivo), la iniciación (cómo se detona) y el envejecimiento del material.

Es importante destacar que, en el caso de la densidad, el diámetro y el confinamiento, un incremento en estos parámetros resulta en un aumento considerable de la velocidad de detonación (Lopez Jimeno y otros, 2003)

Figura 7
Influencia del diámetro sobre el VOD



Nota: **Influencia del diámetro sobre el VOD** (Lopez Jimeno y otros, 2003).

Resistencia al agua

La resistencia al agua de un explosivo se refiere a su capacidad para conservar sus propiedades fisicoquímicas y su rendimiento operativo tras estar expuesto a la humedad o a la inmersión directa en agua. Esta característica es crucial en ambientes mineros donde existen condiciones de perforación con presencia de agua subterránea o filtraciones.

Aunque no existe un estándar de medición numérico universalmente adoptado, esta propiedad se evalúa generalmente en horas de inmersión. La prueba consiste en sumergir el explosivo durante un período determinado y luego detonar la carga para verificar si mantiene su comportamiento energético esperado.

La resistencia al agua depende de factores como la composición del explosivo, su envoltura (en el caso de explosivos encartuchados), y la presencia de emulsificantes o componentes hidrofóbicos que impiden la degradación por humedad.

Balance de oxígeno

Todo explosivo comercial, al detonar, libera una variedad de subproductos. Estos incluyen partículas de polvo, óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), vapor de agua (H₂O) y óxidos de carbono (CO y CO₂). En casos donde el explosivo contiene azufre o aluminio, también se pueden generar gases sulfurosos como H₂S, SO₃ y AlO₂. Entre los gases producidos, una parte corresponde a "humos", que son sustancias irritantes, tóxicas o incluso letales, destacando el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno. La concentración de estos gases tóxicos es crucial para establecer escalas de clasificación por grado de toxicidad, lo que ayuda a evaluar la seguridad del personal expuesto tras la detonación.

Es esencial que la formulación de una mezcla explosiva garantice una combustión total, lo que no solo maximiza su potencia, sino que también minimiza la producción de gases tóxicos. Para conseguir esto, se requiere un control preciso de la proporción de oxígeno suministrada a los componentes combustibles. Ajustar esta cantidad, ya sea aumentándola o disminuyéndola, permite que los componentes alcancen su nivel óptimo de oxidación.

Densidad

La densidad de un explosivo, habitualmente expresada como gravedad específica (la comparación con la densidad del agua), es una característica fundamental. Esta propiedad no solo indica cuánto pesa un explosivo en relación con su volumen, sino que también es un factor determinante para calcular la cantidad de explosivo que puede ser cargada en un taladro de un tamaño específico. La densidad de la mayoría de los explosivos comerciales se encuentra en un rango de 0.8 a 1.6 g/cm³ ver tabla 5. En términos generales, a mayor densidad del explosivo, se obtiene una capacidad de rompimiento superior.

Tabla 5*Densidades según tipo de explosivo*

TIPO DE EXPLOSIVO	DENSIDAD (g/cc)
Emulsión a granel	1.1 - 1.6
ANFO cargado neumáticamente	0.8 - 1
ANFO vaciado	0.8 - 0.9
ANFO encartuchado	1.1 - 1.2
ANFO pesado	1.1 - 1.4
Dinamitas	1.05 - 1.5
Hidrogeles	1.15 - 1.30

Nota: Tabla de densidades según el tipo de explosivo (Konya & Albarrán , 1998).

Los explosivos están diseñados para operar dentro de un rango de densidades óptimo. Si su densidad se desvía de estos límites, ya sea por ser excesivamente baja o alta, se califica como densidad crítica o "muerta". Cuando esto ocurre, el explosivo compromete severamente sus características de detonación, e incluso podría no reaccionar en absoluto. En el caso de los agentes de voladura granulares, la densidad es un factor especialmente crucial. Si su densidad es demasiado baja, pueden volverse excesivamente sensibles al cordón detonante axial, provocando una deflagración incontrolada antes de que el iniciador principal actúe. Inversamente, si la densidad es muy alta, el explosivo puede volverse insensible a la detonación (un fenómeno de insensibilidad inducida por alta presión).

2.2.8 Agentes de voladura

Nitrato de amonio

El nitrato de amonio es una sal inorgánica blanca, con una temperatura de fusión de 169.6 °C. En estado puro no es un explosivo; solo detona al combinarse con una pequeña cantidad de combustible, reaccionando de forma violenta con el oxígeno. El nitrato de amonio se presenta en varias formas; para la fabricación de explosivos se utilizan prills porosos, que tienen la capacidad de absorber y retener combustibles líquidos, siendo fáciles de manipular sin formar grumos ni adherencias.

ANFO

El ANFO es un explosivo común en muchas minas a nivel global, con una densidad cercana a 0.84 g/cm³ y compuesto por un 94% de Nitrato de Amonio y un 6% de petróleo. Además, es un componente fundamental en la producción de ANFOS Pesados.

ANFO Pesado

El ANFO Pesado es una mezcla de ANFO y Emulsión Base, un avance en el ámbito de los explosivos. Posee espacios intersticiales que son llenados por un explosivo líquido, como la Emulsión, que funciona como una matriz energética.

Tabla 6

Propiedades de mezclas explosivas

TIPO DE EXPLOSIVO	DENSIDAD (g/cc)	VOD (m/s)
ANFO	0.80 ± 0.01	3800 4450
HA 28	0.92 ± 0.01	4350 4600
HA 37	1.08 ± 0.01	4700 4900
HA 46	1.23 ± 0.01	4800 5300
HA 55	1.27 ± 0.01	5100 5400
HA 64	1.29 ± 0.01	4800 5200
HA 73	1.31 ± 0.01	4300 5100
Emulsión estándar	1.33 ± 0.01	5350 5550

Nota: Tipos de explosivos Famesa (Famesa , 2019).

Explosivos Gasificados

Los explosivos gasificados son un tipo de emulsión explosiva a la que se le ha incorporado un gas, generalmente nitrógeno, durante su fabricación o poco antes de su aplicación en campo. Este proceso forma microburbujas dentro de la matriz del explosivo, lo que mejora su sensibilidad al detonador y aumenta su velocidad de detonación y potencia.

Características clave de los explosivos gasificados:

- Mayor sensibilidad: Las microburbujas actúan como puntos de iniciación, facilitando la detonación sin necesidad de sensitizadores externos.
- Mejor transmisión de onda de choque: Aumenta la continuidad de la detonación en columnas largas.
- Ajuste de propiedades en campo: En muchos casos, la emulsión se gasifica dentro del taladro mediante sistemas de bombeo que inyectan aire o gas, permitiendo adaptar la mezcla a condiciones específicas del terreno.
- Menor densidad aparente: La gasificación reduce la densidad del explosivo, lo que puede mejorar la fragmentación en ciertos tipos de roca.

En resumen, la gasificación convierte una emulsión base inicialmente poco sensible en un explosivo de alto desempeño, ideal para aplicaciones a gran escala en minería.

² Emulsión

Las emulsiones explosivas son clasificadas como agentes de voladura del tipo "agua en aceite". Se componen de dos fases: una fase acuosa que incluye sales inorgánicas con propiedades oxidantes disueltas en agua, y una fase aceitosa que consiste en un combustible líquido, comúnmente diésel 2, que no se mezcla con el agua.

El tamaño de los componentes en esta mezcla (tanto el oxidante como el combustible) tiene un impacto directo en la velocidad de detonación del explosivo y, en general, en su desempeño total. Históricamente, ¹el proceso de fabricación de explosivos ha avanzado hacia una disminución gradual del tamaño de las partículas, progresando desde explosivos sólidos, pasando por

soluciones salinas con sólidos, hasta llegar a las microscópicas gotas que caracterizan a las emulsiones explosivas actuales.

Una emulsión explosiva en su estado puro no es capaz de detonar, ya que carece de la sensibilidad necesaria, incluso frente a un *booster*, debido a su considerable densidad. Para conferirle esta sensibilidad, se emplean principalmente dos mecanismos. El primero es un mecanismo físico, que implica la creación de burbujas de gas. Estas burbujas, al ser sometidas a una compresión adiabática, generan "puntos calientes" (*hot spots*) que son cruciales tanto para iniciar como para propagar la detonación. Para introducir estas burbujas, se pueden utilizar agentes gasificantes como el poliestireno expandido¹ o las microesferas de vidrio. Adicionalmente, existe un método de sensibilización química que consiste en la incorporación² de una solución gasificante, como el nitrito de sodio.

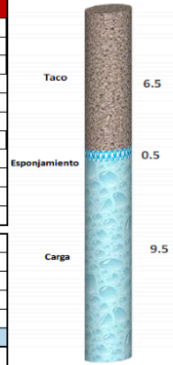
Emulsión gasificable

Emulsión gasificable es un explosivo formulado con emulsión que adquiere su sensibilidad para detonar justo cuando se encuentra dentro del taladro de voladura. Esto se logra mediante la adición de un agente gasificante químico, cuya composición está específicamente diseñada para reaccionar con el nitrito de sodio. Como resultado de esta sensibilización, se forma una mezcla explosiva con una densidad menor y variable, cuyo valor final depende directamente de la cantidad de gasificante que se haya incorporado. El incremento de volumen (o "esponjamiento") que se produce dentro del taladro gracias a este proceso permite reducir la cantidad de explosivo¹ necesaria para llenar el taladro, logrando a la vez la altura de carga¹ de diseño deseada.

Para ilustrar este concepto, una representación gráfica compara la gasificación que ocurre en un taladro cargado con esta emulsión gasificable frente a uno con ANFO pesado basado en emulsión matriz, donde la carga lineal permanece inalterada debido a su densidad constante.

Figura 8
Diseño de carga con emulsión gasificable

DISEÑO DE CARGA		PRODUCCIÓN
PARAMETROS		
Burden	m	8.66
Espaciamiento	m	10.0
Altura de Banco	m	15.0
Sobreperforación	m	1.5
Altura Total	m	16.5
Diametro de Tal.	pulg	12 1/4
Densidad Inicial	gr/cc	1.32
Densidad Final	gr/cc	1.15
Densidad Lineal Inicial	Kg/m	100.4
Densidad Lineal Final	Kg/m	87.5
Taco	m	6.5
Esponjamiento	m	0.5
Longitud de Carga Inicial	m	9.5
Longitud de Carga Final	m	10.0
Aire Deck	m	0.0
Cantidad de Explosivo	Kg	950
Factor Potencia	Kg/tn	0.24



Nota: Parámetros de diseño de carga.

A continuación, se detallan los aspectos más importantes que diferencian la emulsión gasificada SAN-G APU:

- Alta velocidad de detonación, del orden de 4800m/s a 6000 m/s aproximadamente.
- Densidad de la emulsión matriz 1.32 +/- 2 g/cm³.
- Densidad de la emulsión sensibilizada 1.15 g/cm³.
- Alto grado de resistencia al agua.
- Homogeneidad de la sustancia dentro del taladro.
- Adecuado balance de oxígeno y no producción de gases nitrosos de detonación.

- Apropriado acoplamiento en el taladro por su alta viscosidad.

La emulsión SAN-G APU es un tipo de explosivo diseñado para gasificarse, cuya composición se basa en una solución oxidante microscópica que se encuentra dispersa en una fase combustible continua. Esta mezcla se mantiene estable gracias a la acción de un emulsificante. Las propiedades técnicas específicas de este explosivo pueden consultarse en la Tabla

Tabla 7

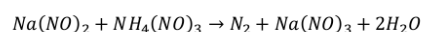
Características técnicas de la emulsión SANG APU

EMULSION GASIFICADA	UNIDAD	VALOR
Densidad inicial	g/cc	1.32 ± 3%
Densidad sensibilizada	g/cc	0.80 a 1.20
Viscosidad en condiciones normales (*)	Cp	Min. 12000
VOD de la emulsión sensibilizada (**)	m/s	4800 a 5800
Presión de detonación	Kbar	51 a 98
Energía	Kcal/kg	805
Volumen normal de gases	L/kg	1025
Potencia relativa en peso (***)	%	90
Potencia relativa en volumen (***)	%	152
Resistencia al agua		Excelente
Categoría de humos		Primera
Diámetro crítico	mm	76
Tiempo de permanencia en el taladro	días	7

Nota: Valores de emulsión gasificada.

Sensibilización y proceso de gasificación de la emulsión

La sensibilización de una mezcla explosiva a base de emulsión se logra mediante la producción de burbujas de gas que producen los puntos calientes. Esto se consigue al añadir un agente gasificante, específicamente el nitrato de sodio (NaNO₂). Este componente químico reacciona con el nitrato de amonio (NH₄NO₃) presente en la mezcla, lo que resulta en la formación de diminutas burbujas de gas nitrógeno. A continuación, se detalla la reacción química involucrada:



Solución Gasificable

Se trata de un agente sensibilizante que consiste en ² una solución acuosa de sales oxidantes, químicamente balanceada y de naturaleza iónica. Este compuesto es inerte, lo que significa que carece de capacidad de detonación por sí solo. Su función es ser mezclado in situ (en el lugar de uso) con la emulsión gasificable en diferentes proporciones, justo antes de que la mezcla sea ¹ cargada en los taladros produciendo una mezcla explosiva homogénea de menor densidad.

¹ Factores que afectan la gasificación

- **Cantidad de solución gasificante:** La variación en la ² adición de la solución gasificante provoca cambios en el grado de gasificación, lo que a su vez altera la densidad del explosivo. Al incrementar la cantidad inyectada, se obtiene un mayor volumen de esponjamiento. Sin embargo, es importante considerar que esta mayor expansión se traduce en una disminución proporcional de ² las propiedades de energía y la velocidad de detonación del explosivo.
- **Temperatura de emulsión:** La temperatura es un factor determinante en el proceso de gasificación. Existe una relación inversa entre la temperatura y la cantidad de solución gasificante necesaria: a temperaturas más altas, se necesita inyectar menos solución para lograr la densidad objetivo, mientras que, a temperaturas más bajas, se requerirá una mayor cantidad para obtener el mismo resultado.

¹ Fabricación de la emulsión gasificada en campo

La emulsión gasificable se carga en los taladros utilizando ¹ camiones fábrica especializados. A diferencia de los vehículos que transportan ANFO pesado, estas unidades cuentan con un ¹ compartimento dedicado a la solución gasificante y están equipadas con un sistema diseñado para

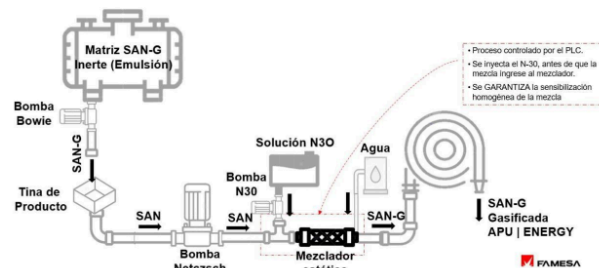
gasificar la emulsión en el momento ¹ de la carga. El producto puede ser introvucido en el taladro tanto por gravedad como por bombeo.

Figura 9

Fabricación de emulsión gasificable

EMULSIONES Gasificadas Puras

Esquema Fabricación FAMESA Sistema Bombeable

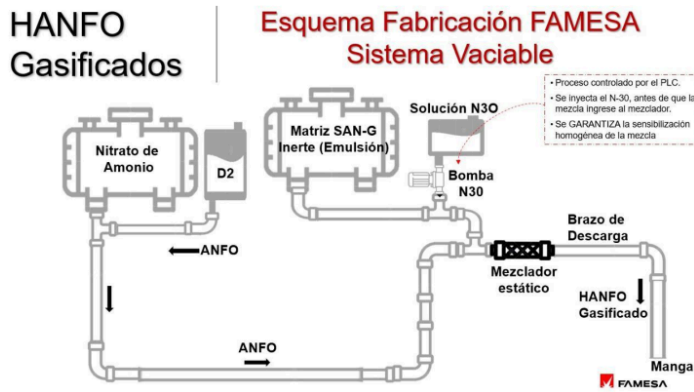


Nota: Esquema de fabricación de emulsión gasificada – Sistema bombeable.

Como ilustra la Figura 10, la emulsión gasificable se transfiere por bombeo ¹ desde su compartimento hacia un mezclador estático. En este punto, se dosifica la solución gasificante y se combina de manera homogénea con la emulsión. Posteriormente, se añade una cantidad específica ¹ de agua con el propósito de reducir la presión en la bomba final que impulsa el producto hacia el taladro.

Figura 10

Proceso de fabricación de ANFO pesado Gasificable



Nota: Esquema de fabricación de emulsión gasificada – Sistema vaciable.

ANFO pesado gasificable

El proceso de gasificación del ANFO Pesado implica una modificación clave en su composición: la emulsión matriz convencional es reemplazada por una emulsión gasificable. A esta nueva mezcla se le incorpora una solución gasificante que, al reaccionar, forma diminutas burbujas. Estas burbujas actúan como "puntos calientes" adicionales, potenciando la acción de los prills de ANFO. El resultado directo de esta gasificación es una mejora sustancial en las propiedades del explosivo, específicamente en su Velocidad de Detonación (VOD), potencia y energía, superando así el rendimiento de un ANFO pesado convencional.

Fragmentación de la roca

La fragmentación de rocas mediante voladura es el resultado de la interacción entre la energía liberada por un explosivo y la respuesta mecánica del macizo rocoso circundante. Este proceso involucra múltiples fenómenos físicos en un intervalo de tiempo extremadamente corto,

tales como la generación de ondas de presión, liberación de energía termodinámica, comportamiento dinámico del material y propiedades geomecánicas de la roca (Torres, 2017). Se trata de un mecanismo complejo y aún no completamente comprendido, por lo que diversas teorías han sido propuestas para explicar su funcionamiento.

Entre las principales teorías que abordan la mecánica de fragmentación por voladura, destacan:

- **Teoría de la reflexión:** Basada en la formación de ³ ondas de tensión reflejadas en caras libres.
- **Teoría de expansión de gases:** Atribuye la fracturación al empuje de los gases generados tras la detonación.
- **Teoría de ruptura flexural:** Describe la fractura como resultado de la presión de los gases en planos de debilidad.
- **Teoría de torque o cizallamiento:** Considera la torsión inducida en el macizo rocoso por la acción de la onda expansiva.
- **Teoría de caracterización:** Analiza el comportamiento de fractura con base en las propiedades físicas y estructurales del macizo.
- ³ **Teoría de energía de los frentes de onda:** Enfocada en la acción combinada de ondas de compresión y tensión.
- **Teoría de liberación súbita de cargas:** Sostiene que la fracturación ocurre por el alivio repentino de esfuerzos internos. (Valenzuela, 2013)

2.2.9 ¹ Efecto de los parámetros controlables de voladura sobre la fragmentación

La fragmentación de la roca en una voladura es influenciada por un conjunto de más de veinte factores. La manera en que ¹ las variables de diseño de la voladura interactúan y afectan esta fragmentación ha sido ampliamente investigada. Entre las variables más estudiadas se incluyen el factor de potencia, el patrón de perforación (malla), el diámetro de los taladros, los tiempos de retardo aplicados y cualquier inexactitud en la perforación.

Perforación

Cuando la carga explosiva en un taladro es limitada y su radio de acción sobre la roca es pequeño, cualquier error en la alineación de la perforación conducirá a una fragmentación ineficiente. En el caso de detonaciones independientes, cada taladro genera una zona cilíndrica de roca fracturada a su alrededor. Para asegurar la fractura total del macizo rocoso en una voladura, es crucial que cada punto dentro del banco esté cubierto por la influencia de fractura de, al menos, uno de estos taladros.

¹ Secuencia de salida del Disparo

El diseño de la secuencia de salida de un disparo es fundamental, ya que define la trayectoria que seguirá la onda de iniciación a través del ¹ explosivo cargado en los taladros. Un requisito primordial durante el avance de la voladura es la formación constante de una cara libre. Esta superficie proporciona un punto ¹ de reflexión esencial para la onda de choque, lo cual es indispensable para lograr una adecuada fragmentación del macizo rocoso. Si no se forma esta cara libre, los resultados de la voladura serían considerablemente deficientes. Con este objetivo en mente, la secuencia de salida determina cómo se moverá y dirigirá ¹ la roca, asegurando la creación de una cara libre para los taladros y filas que se detonen posteriormente.

En los proyectos de voladura, se utilizan diversos patrones de secuencia de salida, como el de fila a fila, diagonal o el tipo V. La selección adecuada de la secuencia de salida puede conducir a un resultado óptimo en la voladura, mejorando aspectos como la fragmentación, el desplazamiento del material y el control de los taludes. Esto se atribuye en gran medida a la relevancia del burden efectivo en cualquier voladura. Al modificar el diseño de la secuencia de salida, tanto el burden efectivo como la relación entre espaciamiento y burden también se ven alterados.

Selección de retardo

La selección adecuada del intervalo de retardo representa una de las tareas más desafiantes en el diseño de una voladura. La importancia del retardo radica en su capacidad para afectar integralmente cada faceta del proceso, desde la calidad de la fragmentación y la estabilidad del macizo rocoso, hasta la facilidad de excavación, el impacto ambiental y la minimización del sobrequebre. A continuación, se detallan las razones por las que se aplican retardos a los taladros:

- Conseguir una mejor calidad de fragmentación del material excavado.
- Obtener un control más preciso sobre cómo se desplaza la pila de escombros.
- Disminuir tanto el sobrequebre (daño a la roca más allá del área de diseño) como los niveles de vibración generados por la explosión.

Detonadores no eléctricos

Estos sistemas se caracterizan por transmitir una onda de choque de baja velocidad (alrededor de 2000 m/s) a través de un tubo de plástico que contiene una fina película de material explosivo HMX conduciendo la reacción hacia el detonador.

Esta reacción no es violenta, es relativamente silenciosa y no interrumpe ni al explosivo ni al taco. Por otro lado, la exactitud de un detonador hace referencia a cuán cercanos están los tiempos de retardo individuales de una serie de detonadores del mismo tipo respecto a su tiempo medio. Desde el punto de vista estadístico, la precisión se cuantifica mediante el coeficiente de dispersión, que es la división entre la dispersión y la media.

Detonadores electrónicos

Para optimizar las voladuras y controlar las vibraciones, la precisión de los detonadores ha ganado importancia en las últimas décadas. La última generación de detonadores electrónicos ofrece alta precisión al usar un circuito integrado (chip) en lugar del retardo pirotécnico. Estos accesorios brindan un control excepcional sobre la fragmentación, las vibraciones y las proyecciones de roca.

2.2.10 Medición y análisis de la fragmentación

La granulometría es el proceso utilizado para analizar el tamaño de las partículas y su distribución dentro de una muestra de material fragmentado, que contiene granos de diversas dimensiones. Las diferentes proporciones de material, separadas por tamaño, revelan el grado de finura de la muestra. Esta finura se cuantifica mediante el porcentaje en peso del material que es retenido en una malla de tamaño determinado.

2.2.11 Modelo de Larsson

El modelo en cuestión fue desarrollado por Larsson en 1973 con el propósito de determinar el K_{50} , una medida que representa la abertura de malla cuadrada a través de la cual puede pasar el 50% del material después de una voladura. Similar al modelo de Kusnetsov, este enfoque integra

en su ecuación diversos factores, incluyendo parámetros específicos del ¹ diseño de la voladura, las propiedades inherentes del explosivo utilizado y las características propias del macizo rocoso.

$$K_{50} = s * e^{(0.58 \cdot \ln(B) - 0.45 \cdot \ln \frac{S}{B} - 1.18 \cdot \ln (\frac{CE}{C}) - 0.82)}$$

¹
Donde:

K₅₀: La apertura de una malla cuadrada.

B: Burden (m).

S/B: Relación Espaciamiento/Burden.

CE: Consumo específico del explosivo (kg/m³).

C: Constante de roca. Equivale al consumo específico del explosivo gelatinoso necesario para fragmentar la roca, normalmente varía entre 0.3 y 0.5 kg/m³

S: constante de volatilidad, es un factor que tiene en cuenta la heterogeneidad y discontinuidad del macizo rocoso.

Tabla 8

Constante de volatilidad (S)

Roca muy fisurada y diaclasada muy próxima	S=0.60
Roca diaclasada	S=0.55
Roca normal con algunas grietas	S=0.50
Roca relativamente homogénea	S=0.45
Roca homogénea	S=0.40

Nota: Constante de Larsson (Lopez Jimeno y otros, 2003).

A partir de esta ecuación fundamental, se han derivado ábacos y curvas granulométricas teóricas. Estas herramientas facilitan la estimación de la granulometría del material fragmentado en una tronadura, utilizando como base los parámetros establecidos en el diseño de la misma. De

manera inversa, también brindan la capacidad de calcular los parámetros de diseño requeridos para lograr una distribución granulométrica específica y predeterminada.

2.2.12 Modelo de Svedefo

La ecuación desarrollada por Svedefo se distingue de la de Larsson por incluir en su ¹ cálculo del tamaño medio de fragmentación ¹ el efecto de la altura del banco y la longitud del retacado, factores que Larsson no contempla.

$$X_{50} = S * \left[1 + 4.67 * \left(\frac{T}{L} \right)^{2.51} \right] * e^{(0.29 * \ln(\frac{CE}{C})^{-0.82})}$$

¹ Las nuevas variables son:

- T = Longitud de retacado (m)
- L = Profundidad del barrenado (m)
- S = Constante de volabilidad (m)
- ¹ CE: Consumo específico del explosivo (kg/m³)
- C: Constante de roca. Equivale al consumo específico del explosivo gelatinoso necesario para fragmentar la roca, normalmente varía entre 0.3 y 0.5 kg/m³

2.2.13 Modelo Kuz Ram

El modelo en cuestión fue desarrollado por Claude Cunningham en 1983, en colaboración con AECI de Sudáfrica. Su creación se fundamenta en dos elementos clave: ¹ la curva de distribución granulométrica de Rosin-Rammler y la fórmula empírica de V.M. Kusnetsov (1973). Esta última permite estimar el ¹ tamaño de los fragmentos resultantes de las voladuras, tomando en cuenta el tipo de roca. Gran parte de la información utilizada para este modelo se adaptó de publicaciones

previas de Cunningham (1983, 1987). Kusnetsov (1973) también estableció una relación entre el tamaño medio del fragmento y la energía aplicada a la voladura por unidad de volumen de roca (conocida como carga específica), en función de las características de la roca. Su ecuación se presenta a continuación:

$$T_b = F_r * \left[\frac{VR_0}{Q} \right]^{0.8} * Q^{1/6}$$

Donde:

- T_b : Tamaño medio de los fragmentos de voladura (cm)
- F_r : Factor de roca
- VR_0 : Volumen de roca fragmentada por barreno (m^3)
- Q : Cantidad de TNT equivalente a la carga de explosivo por barreno (kg)

2.2.14 Modelos de utilización de otros explosivos

Posteriormente, Cunningham realizó una mejora en la ecuación de Kuznetsov para ampliar su aplicabilidad a otros tipos de explosivos además del TNT. La ecuación resultante, que permite **determinar el tamaño promedio de la fragmentación de la roca utilizando cualquier explosivo, se presenta a continuación:**

Si consideramos la potencia relativa en peso de un explosivo, donde ANFO tiene un valor de 100 y TNT es 115, la relación se calcularía de la siguiente manera:

$$X = A \left(\frac{V_0}{Q_e} \right)^{0.8} * Q_e^{\frac{1}{6}} * \left(\frac{E}{115} \right)^{-19/30}$$

Donde:

- Q_e : Masa del explosivo en kilogramo por taladro a cargar

- E : potencia relativa por peso del explosivo a usar. Los valores están disponibles en la hoja técnica del fabricante
- V_0 : Volumen estimado de roca fragmentada por taladro en metros cúbicos
- X : Tamaño del fragmento medio que se quiere obtener en cm
- A : Factor de rotura calculado en base al índice de volabilidad

2.2.15 ¹ Definición de términos

Acoplamiento

El término ¹ se refiere a qué tan bien el explosivo en un taladro se adapta y contacta con las paredes de la roca circundante. ¹ Cuando el diámetro del material explosivo es inferior al del taladro, se dice que la carga está desacoplada. La razón de desacople se calcula como la proporción del volumen de la carga explosiva respecto al volumen total del taladro. Es importante mencionar que los explosivos que se cargan ¹ a granel alcanzan un factor de acoplamiento de 1, lo que indica un contacto total. Cabe destacar que algunos autores también definen la razón de acoplamiento como la relación entre el diámetro de la carga y el diámetro del taladro.

Angulo de fricción

El ángulo de fricción se define como la pendiente del esfuerzo de corte en función del esfuerzo normal aplicado. Tanto el ángulo de fricción (ϕ) como la cohesión (c) están interrelacionados con el esfuerzo normal (σ_n) y la fuerza de corte (τ) a través de la ecuación que se presenta a continuación:

$$\tau = c + \sigma * \tan(\phi)$$

- τ : fuerza de corte

- C : Intercepción con el eje de tensión cortante
- φ : Ángulo de fricción

Balance de oxígeno

El balance de oxígeno de un explosivo se refiere a la cantidad de oxígeno, expresada como porcentaje del peso, que se libera tras la combustión completa del material explosivo, produciendo CO_2 , H_2O , SO_2 y Al_2O_3 . Esto se considera un balance de oxígeno positivo. Por el contrario, si la cantidad de oxígeno es insuficiente para una oxidación completa, se dice que el compuesto tiene un balance de oxígeno negativo. Es crucial que los explosivos comerciales presenten un balance de oxígeno cercano a cero. Esto ayuda a reducir al mínimo la formación de gases tóxicos en los humos, especialmente monóxido de carbono y gases nitrosos.

Burden

El Burden se define como la distancia mínima entre un taladro y la cara libre más próxima, la cual se mide de forma perpendicular a la dirección de la fila de taladros. Por lo general, cuando se habla de Burden, se hace referencia al Burden perforado, que es la dimensión lineal que existe hasta la cara libre presente en el banco de roca.

Espaciamiento

Es el espaciamiento es la distancia existente entre los taladros ubicados en una misma fila. Estos taladros pueden ser detonados simultáneamente o con retardos secuenciales que sean mayores dentro de la misma fila.

El cálculo de esta distancia se basa en la longitud del Burden, la secuencia de encendido planificada y el tiempo de retardo específico entre cada taladro.

Diámetro crítico

El diámetro crítico se define como la medida mínima que debe tener una carga explosiva para asegurar su detonación. Es notable que la incorporación de gas finamente disperso tiene la capacidad de disminuir significativamente este diámetro.

Sin embargo, para una considerable cantidad de emulsiones y acuageles comercializados a granel, este diámetro crítico puede alcanzar un tamaño considerable (cerca de 125 mm).

Factor de carga

El factor de carga es un término que cuantifica la proporción de explosivo que se emplea para fracturar una unidad de volumen del material rocoso. Se expresa habitualmente en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

Hay quienes, al calcularlo, tienen en cuenta la potencia en peso del explosivo, ajustándola a un equivalente de potencia en peso del ANFO (es decir, $W_{\text{teff}} = W_t * \text{potencia en peso relativa}$). Por otro lado, algunos usuarios optan por emplear la medida inversa, que describe la cantidad de roca fragmentada por cada unidad de peso de explosivo (toneladas por kilogramo).

2.3 Hipótesis

La aplicación de la emulsión gasificada San G Apu mejora la fragmentación del macizo rocoso y reduce la generación de gases nitrosos, lo que contribuye a la optimización del costo unitario de voladura y al cumplimiento de estándares ambientales en la operación minera.

2.3.1 *Variable dependiente*

- Optimización de la fragmentación de rocas
- Diseño de carga
- Eficiencia en procesos operativos

2.3.2 *Variable independiente*

- Emulsión SAN-G AP

Tabla 9
Operacionalización de variables

Tipo de variable	Variable	Definición operacional	Indicadores
Dependiente	Optimización de la fragmentación de rocas	Calidad de la fragmentación medida después de la voladura	-Tamaño promedio de fragmentos (cm). -18 cm en mineral. - 23 cm en desmante
Dependiente	Diseño de carga	Distribución de la mezcla explosiva en los taladros	-Cantidad de explosivo por tonelada movida kg/t
Dependiente	Eficiencia en procesos operativos	Reducción de costos y tiempos en carguío, chancado y transporte debido a mejor fragmentación	-Tiempo de carguío y acarreo (min). -Costos operativos (S/).
Independiente	Emulsión SAN-G APU	Aplicación y gasificación de la emulsión SAN-G APU en el proceso de voladura	-Gasificación de la emulsión (g/cc). -Parámetros de carga explosiva por taladro

Nota: Tipo de variables aplicado en la tesis que tiene como base la emulsión gasificada San G Apu.

CAPÍTULO III

3 ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 Alcances y limitaciones

El presente estudio tiene como finalidad maximizar la eficiencia y optimizar la rotura del macizo rocoso durante la extracción del mineral en la Unidad Minera Toquepala.

El alcance de la investigación se centra en la implementación de la ⁷emulsión gasificada SAN-G APU, cuya aplicación busca mejorar la fragmentación del mineral y del desmonte, contribuyendo a un aumento en la productividad de las operaciones mineras.

Asimismo, la utilización de SAN-G APU permitirá optimizar los parámetros de velocidadde detonación (VOD) y minimizar la emisión de gases nitrosos (NOx) generados durantelasvoladuras, promoviendo una operación más eficiente, segura y ambientalmente responsable.

Limitaciones

- El estudio se limita a las voladuras ejecutadas con la emulsión gasificada SAN-GAPU en las fases 05 y 06 de la Unidad Minera Toquepala, durante el periododeevaluación considerado por la investigación.
- La información analizada se basa en los registros de 33 voladuras correspondientes a dichas fases, que comprenden tanto material de desmonte como de mineral.
- El alcance de la investigación queda delimitado por los datos técnicos obtenidos en estas 33 voladuras, sin incluir otras fases operativas ni variables externas(como condiciones climáticas o de perforación) que puedan influir en los resultados.

3.2 Tipo y nivel de investigación

3.2.1 Tipo de investigación

El tipo de nivel de investigación es aplicada, ya que se brinda una solución a los problemas de fragmentación del mineral y desmonte con la implementación de la emulsión gasificada San G Apu.

3.2.2 Nivel de investigación

La investigación adoptó una metodología cuantitativa porque se examinaron cifras y estadísticas producidas por las detonaciones para medir el nivel de fragmentación tanto del mineral como del desmonte.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población del estudio está constituida por las voladuras efectuadas en la minera a tajo Toquepala con San G Apu, esto para fines de investigación.

3.3.2 Muestra

La muestra del estudio se da en el tajo Toquepala que reúne 2 fases de trabajo, fase 5 y fase 6, donde la fase 5 es zona de mineral y fase 6 es desmonte, desde el nivel 2100 m hasta el nivel 3470 m.

La muestra del presente estudio estará compuesta por 33 voladuras ubicadas entre la fase 5 y fase 6 de la unidad minera Toquepala que fueron efectuadas entre noviembre del 2023 hasta mayo del año 2024. Estas 16 voladuras se han seleccionado para evaluar la calidad de fragmentación con emulsión SAN-G APU.

3.4 Método, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Procedimiento y técnica de recolección de datos

Para la recolección de datos del presente estudio, se realizaron actividades de campo directamente en el área de operaciones y voladura de la Unidad Minera Toquepala, mediante observación directa y procesamiento de información obtenida posterior a las voladuras.

3.4.2 Técnicas de recolección de datos

- Observación experimental: Se recolecta la información sobre las características de la roca, propiedades de la emulsión SAN-G APU, control de calidad, resultados de los análisis de fragmentación.
- Análisis documental: Se llevará a cabo un análisis detallado de la documentación técnica de las 33 voladuras en el periodo 2023 y 2024, con recopilación de data y resultados de dichas pruebas. Este enfoque permitirá una comprensión del uso de la emulsión SAN-G APU en la fase 5 y fase 6 de la unidad minera Toquepala.

3.4.3 Instrumentos de medición:

- Software I – Blast: Utilizado para la simulación de voladuras, así como la dirección y el desplazamiento del material una vez efectuado la voladura.
- Equipo Microtrap: Determina la velocidad de onda de detonación.
- Equipo Instantel: Mide las vibraciones ocasionadas por la voladura en el macizo rocoso.
- Kit de densidades: Mide la densidad inicial y final del SAN-G APU, según ficha técnica.

- Equipo Portametrics: Análisis de fragmentación de roca en un área determinada.
- Dron: Documentación de fotos y videos de los resultados de la voladura.

3.4.4 Plan de análisis estadístico de los datos

Se efectuó un análisis estadístico descriptivo, de la rotura de rocas con la aplicación de la emulsión gasificada San G Apu, con el cual se busca demostrar la eficiencia de la fragmentación de la roca mineral y de desmonte.

3.5 Lugar de desarrollo de investigación

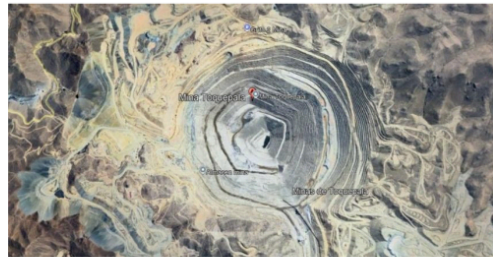
El área de estudio se localiza en el flanco suroeste de la Cordillera Occidental de los Andes del Sur de Perú. Específicamente, está en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna. Sus coordenadas UTM son Datum WGS 84 - Zona 18S.

- 8°118,900 - 8°087,200 Norte 308,900 - 336,400 Este

La altitud promedio está definida entre los 3,125 m.s.n.m. y 3,675 m.s.n.m., se encuentra al Oeste de la Cordillera del Barroso, en la Cordillera Occidental de Los Andes.

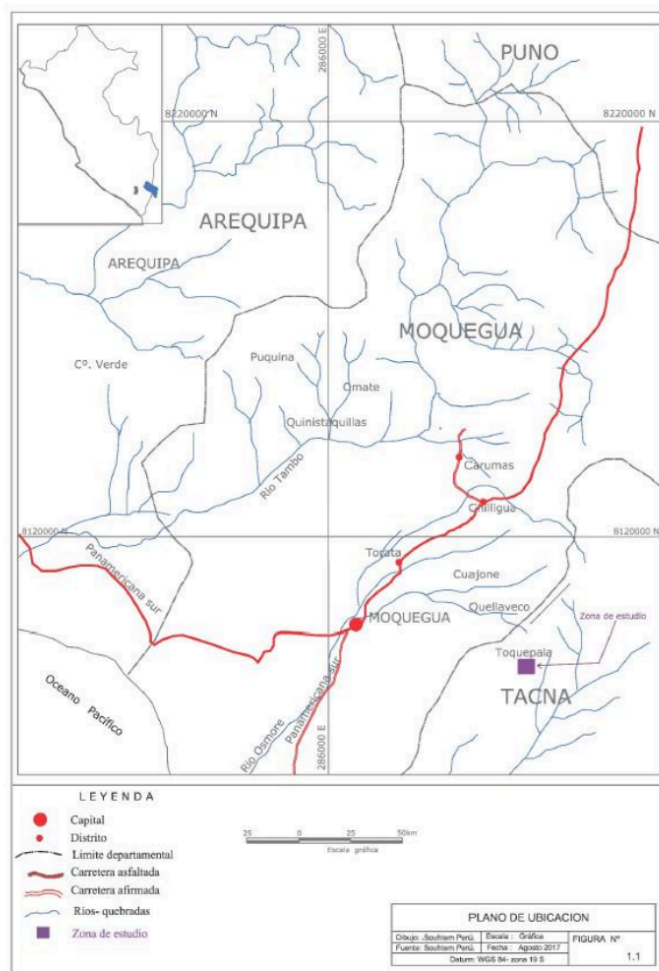
Figura 11

Imagen satelital mina Toquepala



Nota: Fuente Google Earth.

Figura 12
Ubicación mina Toquepala



Nota: Plano de ubicación geográfica de mina.

3.6 Ambiente que utilizar

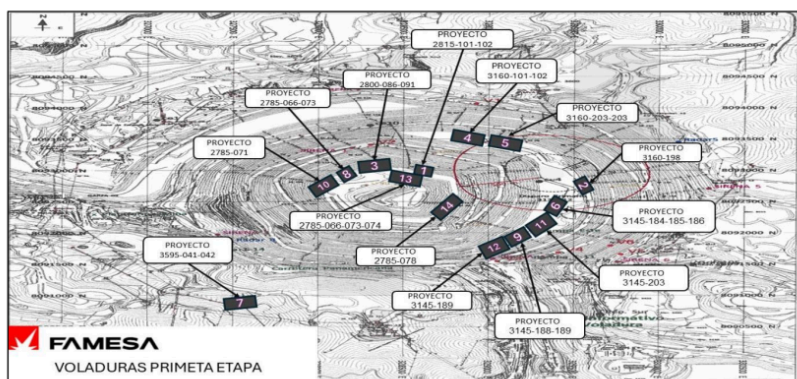
En la presente investigación se empleó las zonas fase 05 y fase 06 para utilizar la emulsión gasificada San G Apu, para las pruebas, en la unidad minera Toquepala en el departamento de Tacna.

3.6.1 Ubicación de la zona de estudio

Durante la etapa fueron efectuadas 33 voladuras, correspondientes a fase 05 y fase 06 del tajo Toquepala, en las siguientes imágenes se muestra la ubicación de cada proyecto.

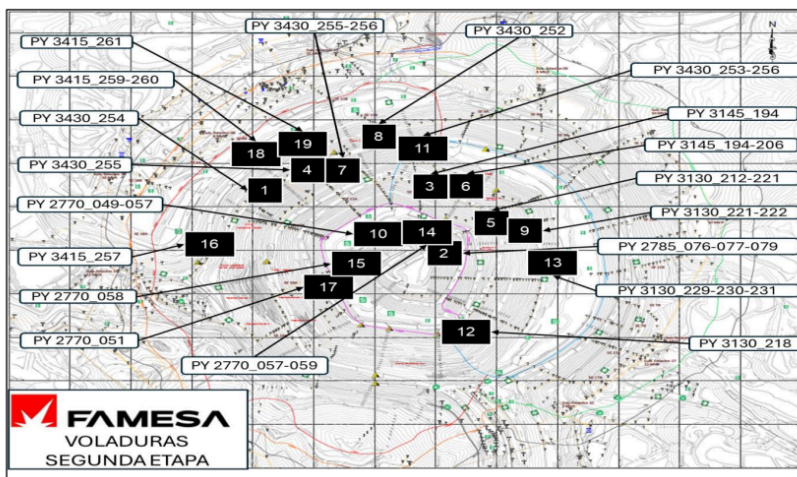
Figura 13

Grafica de voladuras primera etapa



Nota: Voladuras en primera etapa.

Figura 14
Grafica de voladuras segunda etapa



Nota: Voladuras en segunda etapa.

3.7 Diseño de carga y parámetros

En relación con la línea base existente, esta constituye el punto de partida sobre el cual se diseña la distribución de carga explosiva en cada voladura. Se define cómo, cuánto y con qué tipo de explosivo se cargará cada taladro perforado, considerando factores como la geología del macizo rocoso, el tipo de material (mineral o desmonte) y las condiciones operativas del tajo.

Tabla 10
Diseño de carga

DISEÑO DE CARGA				
PARÁMETROS DE PERFORACIÓN				
		TRIM	AMORTIGUACIÓN	PRODUCCIÓN
	Und	SAN G APU	SAN G APU	SAN G APU
Tipo de explosivo				
Tipo de roca		Mineral	Mineral	Mineral
Densidad de roca	gr/cm3	2.72	2.72	2.72
Altura de banco	m	15.00	15.00	15.00
Sobreperforación	m	0.00	1.50	1.50
Longitud de taladro	m	15.00	16.50	16.50
Burden	m	5.63	5.63	5.63
Espaciamiento	m	4.00	6.50	6.50
Volumen roto por taladro	m3/tal	337.80	548.93	548.93
Toneladas rotas por taladro	t/tal	918.82	1493.08	1493.08

Nota: Parámetros de perforación.

Tabla 11
Parámetros de explosivos

PARÁMETROS DE EXPLOSIVOS				
		TRIM	AMORTIGUACIÓN	PRODUCCIÓN
	Und	SAN G APU	SAN G APU	SAN G APU
Densidad Inicial del explosivo	gr/cm3	1.32	1.32	1.32
Densidad Final del explosivo	gr/cm3	1.15	1.15	1.15
Diámetro de taladro	pulg	11	11	11
Densidad lineal inicial	kg/m	80.98	80.98	80.98
Ensanchamiento	0%	0%	0%	0%
Carga lineal real inicial	kg/m	80.98	80.98	80.98

Taco final	m	4.85	6.50	5.50
Carga 1				
Altura de carga 1	m	3.00	9.20	10.20
Esponjamiento 1	m	0.30	0.80	0.80
Carga Explosiva 1	kg	243	745	826
Cámara de Aire/Taco Int.	m	3.00	0.00	0.00
Carga 2				
Altura de carga 2	m	3.50	0.00	0.00
Esponjamiento 2	m	0.35	0.00	0.00
Carga Explosiva 2	kg	283.42	0.00	0.00

Nota: Parámetros de explosivos.

Tabla 12

Total de carga explosiva

TOTAL DE CARGA EXPLOSIVA				
	Und	SAN G APU	SAN G APU	SAN G APU
Altura de carga inicial	m	6.50	9.20	10.20
Carga por taladro	kg/tal	526	745	826
Factor de Potencia	Kg/tn	0.57	0.50	0.55

Nota: Total de carga explosivas.

Tabla 13

Teoría del Cráter de Frank Chiappetta

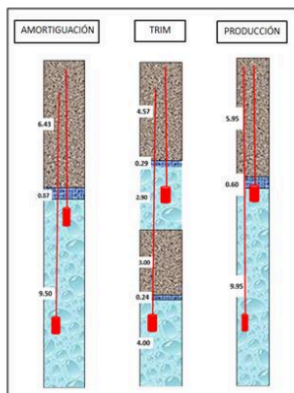
Teoría del Cráter de Frank Chiappetta				
Longitud de la carga (10ø)	L	2.79	2.79	2.79

Dist. de la sup. al centro carga	D	6.25	7.90	6.90
Cantidad de carga explosiva en L	W	205.68	208.15	209.80
	W ⅓	5.90	5.93	5.94
Prof. Escalada de Entierro	SD	1.06	1.33	1.16

Nota: Tabla de Cráter de Frank Chiappetta.

Figura 15

Esquema de voladura



Nota: Diseño de carga.

3.7.1 ¹ Esquema y recolección de datos

Se realizaron parámetros de medición con lo cual se hizo la comparación con datos de línea base existentes de la unidad minera Toquepala, para así demostrar la calidad del explosivo.

- Control de Calidad de la emulsión matriz
- Control de Calidad de la San G Apu
- Análisis de fragmentación (P80)
- Análisis de DIG RATE (t/h)

- Velocidad de Onda de Detonación (m/s)
- Monitoreo de vibraciones (mm/s)
- Análisis de Gases nitrosos (NOx)

3.7.2 Control de calidad de la emulsión matriz

Se realizaron 2 pruebas de calidad durante la descarga de la emulsión matriz en los silos, la primera el control de densidad de la emulsión matriz que llega desde la planta la Joya - Arequipa, la segunda prueba de calidad es la medición de la viscosidad.

Descarga de emulsión

La emulsión matriz que se traslada a los polvorines es enviada con previos controles de despacho, los cuales se corroboran insito antes de su descarga.

Figura 16

Descarga de emulsión

		
Capacidad: 30 TN	Temperatura: ideal <40°C Densidad: 1.28 – 1.38 gr/cm3	Viscosidad: 9 000 cp - 16000 cp

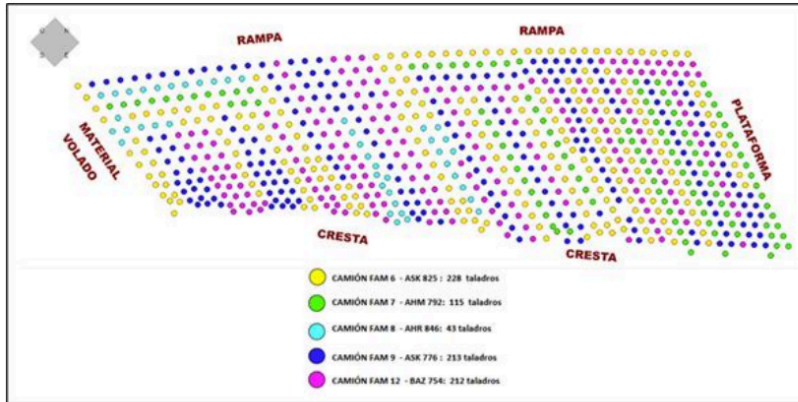
Nota: Control de calidad de la matriz de emulsión.

3.7.3 Control de calidad de la San G Apu

En campo se realizó el control de calidad al HA 65 - 35 SGE, SANG ENERGY, SAN G APU Y HA 63 SGE los agentes son mezclados en los camiones fábrica, donde se realiza una serie de pasos para dicho control, que dependen de la temperatura, caudal, tipo de mezcla, % N30, etc.

Para realizar la toma de muestra, se hace el seguimiento a cada camión fábrica hasta estabilizar la mezcla explosiva y llegar a la densidad optima.

Figura 17
Diseño de voladura



Nota: Diseño de voladura y disposición de taladros.

Verificación visual de la muestra

Antes de iniciar la toma de muestra, se realiza la expulsión del remanente de mezcla explosiva del brazo de descarga del camión fábrica, ya sea en modo vaciable o bombeable, para asegurar que el producto sea representativo del carguío actual.

Ubicación del kit de densidad

Por motivos de seguridad, el kit debe colocarse a dos filas de taladros paralelas al camión fábrica, fuera de la línea de fuego. Se debe delimitar el área con conos de seguridad y calibrar la balanza antes de iniciar cualquier medición.

Toma de muestra

La primera muestra debe obtenerse desde el segundo taladro a cargar, o bien, luego de que el camión fábrica haya descargado entre 80 y 100 kg de mezcla explosiva. La muestra se recoge llenando el vaso de forma uniforme, y a partir de ahí, se ejecutan los controles de calidad en campo.

Medición de densidad y gasificación

Se mide inicialmente la temperatura del explosivo (aproximadamente 40 °C) y su densidad inicial, que debe estar cerca de 1,32 +/- 2 g/cm³. Se monitorea la evolución de la densidad (gasificación) a los 0, 2, 5, 10, 15 y 20 minutos con el objetivo de verificar la formación de los puntos calientes. Al cabo de 20 minutos, la densidad ideal esperada debe descender a aproximadamente 1,15 g/cm³.

Figura 18

Verificación visual de la mezcla



Nota: visualización de mezcla.

Figura 19
Ubicación



Nota: Ubicación de zona de voladura.

Figura 20
Toma de 1ra muestra



Nota: Primera muestra.

Figura 21
Trazado de muestra



Nota: Trazado de muestra en campo.

Figura 22
Medición de densidad



Nota: Medición de densidad en campo.

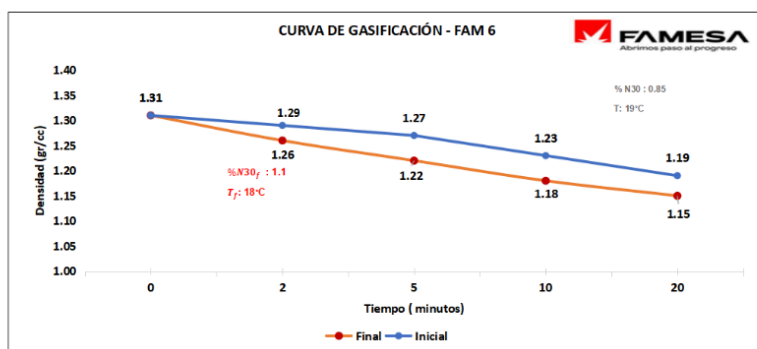
Figura 23
Emulsión HA 73 SGE



Nota: Emulsión gasificada.

3.7.4 Comportamiento de la gasificación de la mezcla explosiva en relación al tiempo por camión Fabrica

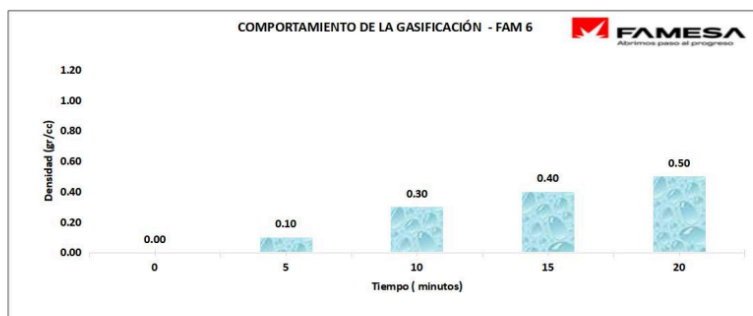
Figura 24
Curva de gasificación - FAM 6



Nota: Curva de gasificación.

Figura 25

Comportamiento de la gasificación - FAM 6



Nota: Comportamiento de gasificación.

Tabla 14

Densidades de las emulsiones

EQUIPO	N30	T°	DENSIDADES					GASIFICACIÓN				
			D0	D2	D6	D10	D20	D0	D6	D10	D16	D18
FAM-6	0.73	21	1.31	1.26	1.22	1.18	1.15	0.00	0.10	0.30	0.40	0.50
FAM-7	0.67	23	1.31	1.25	1.21	1.17	1.14	0.00	0.20	0.30	0.50	0.60
FAM-8	0.72	22	1.32	1.25	1.22	1.18	1.15	0.00	0.20	0.40	0.50	0.50
FAM-9	0.65	25	1.31	1.24	1.21	1.17	1.14	0.00	0.10	0.30	0.40	0.50
FAM-10	0.8	23	1.32	1.30	1.28	1.22	1.15	0.00	0.10	0.30	0.50	0.50

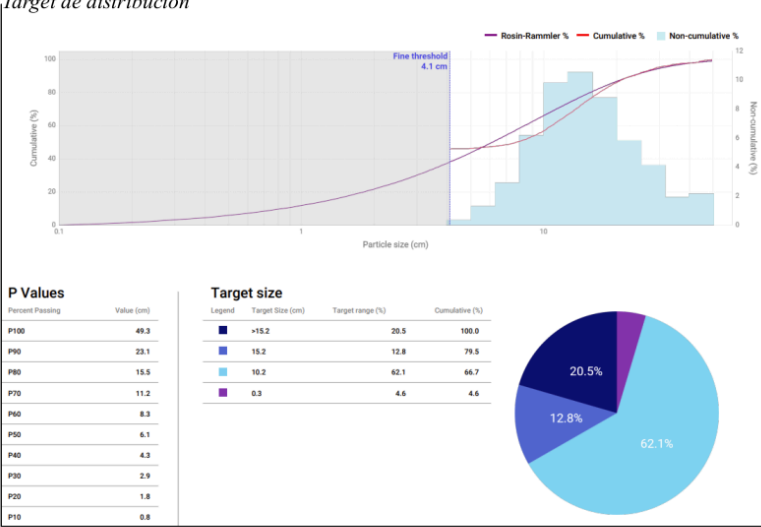
Nota: Tabla de densidades de emulsiones.

3.7.5 Análisis de fragmentación (P80)

Para los análisis de granulometría de los frentes volados con emulsión SAN-G APU, se utilizó el sistema de medición de fragmentación PortaMetrics G2, un instrumento que utiliza tecnología de imagen 3D y una pantalla táctil,

El PortaMetrics procesa la imagen para brindarnos la distribución de tamaño de fragmentos y es capaz de formar la curva granulométrica, sin necesidad de tener un objeto como referencia, asimismo se utilizó MetricsManager Pro para los análisis a detalle con el uso de algoritmos de inteligencia artificial.

Figura 26
Target de distribución



Nota: Distribución del target.

Durante el cambio de turno, se realiza la toma fotográfica con el equipo PortaMetrics Gen2, identificando tres zonas clave para el análisis de fragmentación: zona de control, zona de producción y zona de cresta. Para garantizar la representatividad y precisión del análisis, se capturan seis fotografías por cada zona, cubriendo distintos ángulos y áreas del frente volado.

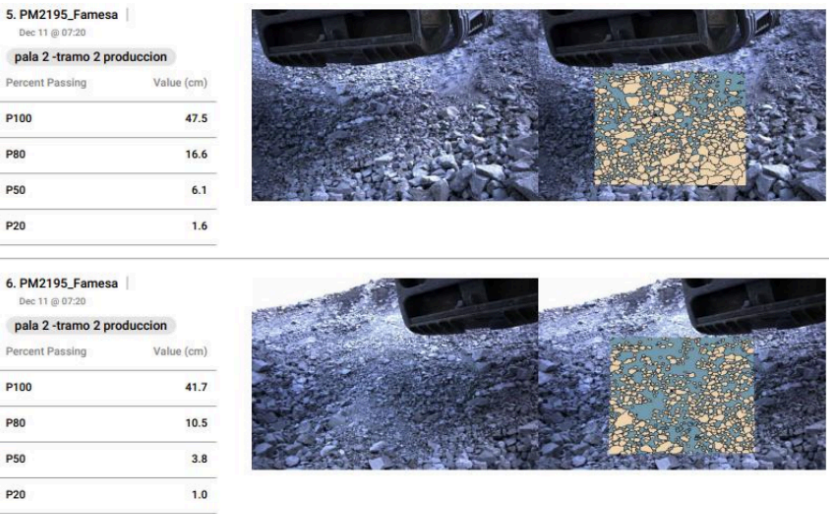
Es fundamental que, durante la captura, el equipo se mantenga estable y firmemente posicionado, y que exista una iluminación adecuada, ya que estas condiciones influyen directamente en la 64 capacidad del dispositivo para reconocer y procesar correctamente los fragmentos mediante su sistema de visión 3D.

Figura 27
Delimitación de zonas a analizar



Nota: Delimitación de zonas.

Figura 28
Reporte de fragmentación



Nota: Reporte de fragmentación: Muestra el análisis de los fragmentos, identificando el tamaño de las rocas entre gruesos y finos:

3.7.6 *Análisis de dig rate*

El DIG-RATE, o tasa de excavación, se define como la velocidad con la que se remueve material ya sea mineral o desmonte, y se expresa comúnmente en unidades de toneladas por hora (t/h) o metros cúbicos por hora (m³/h). Este indicador es clave para evaluar la productividad de los equipos de carguío y la eficiencia operativa posterior a la voladura.

Con el fin de analizar la eficiencia ¹ de la emulsión gasificada SAN-G APU en relación con el desempeño de los equipos de minado, se evaluó el DIG-RATE registrado en proyectos de mineral y desmonte, en distintos turnos operativos. Esta información fue proporcionada por el cliente, detallando el avance por turno y la ubicación específica de las palas de carguío.

3.7.7 *Velocidad de onda de detonación*

La onda de detonación es un fenómeno físico que ocurre durante una explosión, especialmente en el contexto de voladuras en minería y se refiere a la onda de choque extremadamente rápida, de alta presión que se genera al detonar un explosivo con la finalidad de que el explosivo complete su reacción química y garantice la eficacia del explosivo.

3.7.8 *Procedimiento para la lectura del VOD*

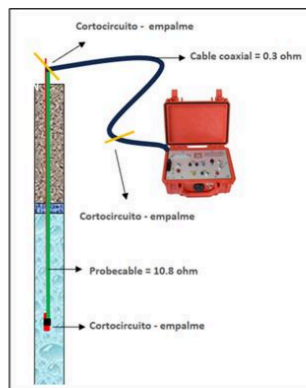
- Seleccionar los taladros destinados a la medición, preferentemente aquellos ubicados al inicio o al final de la secuencia de disparo de la malla, asegurándose de que se encuentren completamente secos y sin presencia de agua.
- Unir los conductores del cable resistivo en uno de sus extremos (cortocircuito) y, a continuación, proteger dicha unión utilizando cinta aislante para evitar cualquier contacto eléctrico no deseado.

- Fijar el iniciador o la prima al extremo del cable resistivo previamente cortocircuitado, asegurándolo firmemente con cinta aislante para mantener su posición durante el proceso de carga.
- Realizar la carga del taladro con el explosivo correspondiente, y luego efectuar el taco cuidadosamente, procurando no dañar ni mover el cable resistivo. Es recomendable que esta operación se efectúe el mismo día en que se planifica la voladura, para garantizar la integridad del sistema.
- Se comprueba la continuidad del cable resistivo utilizando un multítester, asegurándose de que no haya interrupciones en el circuito.
- Ya en el área de prueba, se conecta el cable resistivo con el cable coaxial, asegurándose de que ambos estén en óptimas condiciones y con continuidad eléctrica.
- Se determina la distancia y el lugar adecuado para instalar y dejar el equipo Microtrap, el cual debe ubicarse en una zona segura, fuera del área de proyecciones de la voladura y libre de tránsito de equipos pesados.
- Se procede a instalar el equipo Microtrap, conectándolo al cable coaxial tipo N° 58 de manera firme y segura.
- ³ Se activa el equipo Microtrap, se protege con su respectiva caja metálica y se señala el área utilizando conos de seguridad para advertir su presencia y restringir el acceso.

- La información registrada es procesada mediante el software MREL, y los resultados obtenidos se documentan en el formato establecido para tal fin.

Figura 29

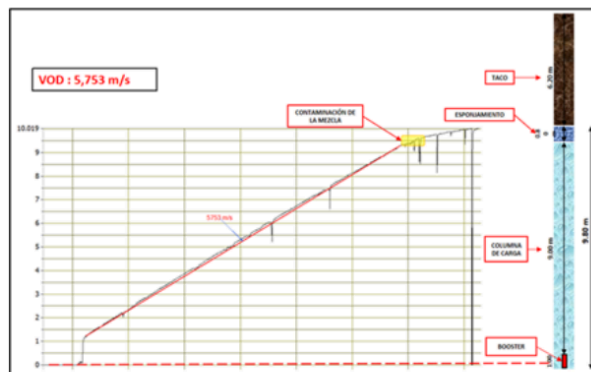
Instalación grafica del equipo Microtrap



Nota: Representación gráfica del equipo Microtrap.

Figura 30

Gráfica de medición del VOD



Nota: Medición del VOD.

En la gráfica se puede observar que la curva de VOD se mantiene constante a lo largo de la columna de carga, demostrando un buen desempeño de la mezcla explosiva.

En la parte final del registro se observa que existe una caída en la curva correspondiente a los últimos 0.50m de la columna de carga lo cual indicaría que existe una contaminación del explosivo con material del taco (no se utilizó separador de gravilla en este taladro).

3.7.9 Monitoreo de vibraciones

Medir con la huincha desde la última fila de pozos ubicada hacia donde se instalará el equipo (a 50 metros de esa fila). El lugar donde se instale el equipo debe ser terreno no tronado, preferentemente.

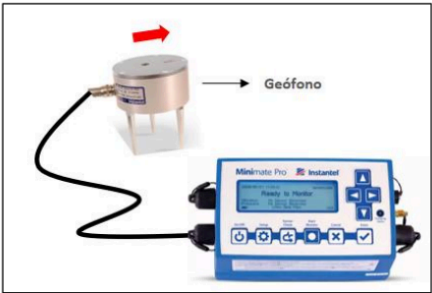
Hacer un hoyo pequeño con la ayuda de una pala para instalar el geófono, colocando sus 3 estacas.

El geófono debe ir siempre con la flecha superior apuntando a la tronadura. Una vez bien posicionado, fijarlo enterrando sus estacas lo mejor que se pueda, presionando con las manos, no pisando.

Colocar sobre el geófono material tronado, y con ella tapar el geófono. Esto se hace para mantener el equipo fijo, a modo que estuviera empotrado bajo tierra.

Conectar el geófono al sismógrafo en “VIBRATION”, como muestra la imagen. Poner el sismógrafo en la caja metálica de protección y señalar el área.

Figura 31
Geófono



Fuente: Representación gráfica del geófono.

3.7.10 ⁴ Análisis de gases nitrosos

Para evaluar los resultados de las voladuras realizadas con la emulsión SAN-G APU, se empleó la escala visual de gases nitrosos propuesta por la Australian Explosives Industry and Safety Group Inc. (AEISG).

Figura 32
Escala de gases nitrosos

Level	Typical Appearance
Level 0 No NOx gas	
Level 1 Slight NOx gas	
1A Localised	
1B Medium	
1C Extensive	
Level 2 Minor yellow/orange gas	
2A Localised	
2B Medium	
2C Extensive	
Level 3 Orange gas	
3A Localised	
3B Medium	
3C Extensive	
Level 4 Orange/red gas	
4A Localised	
4B Medium	
4C Extensive	
Level 5 Red/purple gas	
5A Localised	
5B Medium	
5C Extensive	

Nota: Nivel de escala de gases nitrosos.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron 31 de las 33 voladuras primarias realizadas con emulsión SAN-G APU, quedando dos voladuras pendientes de extraer. Los resultados se muestran en la siguiente tabla resumen:

Tabla 15
Análisis de fragmentación

PROYECTO	LITOL OGÍA	MATE RIAL	EXPLOSIVO	P80 (cm)	TARGE T P80 (cm)	LINEA BASE P80 (cm)
2770-049-057	Dp/Ba	Mineral	SANG APU 100	18.2	18.0	21.1
2770-051	Dp/Ba	Mineral	SANG APU 100	18.7	18.0	21.1
2770-057-059	Dp-Ga	Mineral	SANG APU 100	18.5	18.0	21.1
2770-058	Dp-Ga	Mineral	SANG APU 100	17.7	18.0	21.1
2785-066-073- 074	Dp/Bx	Mineral	SANG APU 100	18.9	18.0	21.1
2785-071	Dp/Bx- Ang	Mineral	SANG APU 100	19.9	18.0	21.1
2785-076-077- 079	Px/Bx- Ga	Mineral	SANG APU 100	22.5	18.0	21.1
2785-078	Bx-Ang	Mineral	SANG APU 73	20.3	18.0	21.1
2800-086-091	Da/Bx- Ang	Mineral	SANG APU 100	18.0	18.0	21.1
2815-101-102	Dp/Bx- Ang	Mineral	SANG APU 100	16.5	18.0	21.1
3130-212-221	Dp	Desmo nte	SANG APU 73	18.3	23.0	21.9
3130-218	Di-qs	Desmo nte	SANG APU 73	20.5	23.0	21.9

PROYECTO	LITOL OGÍA	MATE RIAL	EXPLOSIVO	P80 (cm)	TARGE T P80 (cm)	LINEA BASE P80 (cm)
3130-221-222	Dp/Bt	Desmo nte	SANG APU 100	19.9	23.0	21.9
3130-229-230- 231	Di-prop	Desmo nte	SANG APU 73	19.8	23.0	21.9
3145-184-185- 186	Gdi/Di	Desmo nte	SANG APU 73	20.8	23.0	21.9
3145-188-189	Di-prop	Desmo nte	SANG APU 73	21.3	23.0	21.9
3145-189	Di-prop	Desmo nte	SANG APU 73	21.6	23.0	21.9
3145-194	Da/ Bx	Desmo nte	SANG APU 73	20.7	23.0	21.9
3145-194-206	Da/Lp	Desmo nte	SANG APU 100	19.8	23.0	21.9
3145-203	Gdi/Di	Desmo nte	SANG APU 73	21.5	23.0	21.9
3160-198	Gdi	Desmo nte	SANG APU 73	21.3	23.0	21.9
3160-201-202	Da- Bx/LP/D a/BxT	Desmo nte	SANG APU 73	17.2	23.0	21.9
3160-202-203	Da- Bx/LP/D a/BxT	Desmo nte	SANG APU 73	17.3	23.0	21.9
3415-257	Di-prop	Desmo nte	SANG APU 100	20.8	23.0	21.4
3415-259-260	Di-prop	Desmo nte	SANG APU 100/ SANG APU 73	21.0	23.0	21.4
3430-252	Gdi/Di	Desmo nte	SANG APU 73	19.8	23.0	21.4

PROYECTO	LITOL OGÍA	MATE RIAL	EXPLOSIVO	P80 (cm)	TARGE T P80 (cm)	LINEA BASE P80 (cm)
3430-253-256	Di-prop	Desmo nte	SANG APU 73	21.0	23.0	21.4
3430-254	Di-ga	Desmo nte	SANG APU 73	21.6	23.0	21.4
3430-255	Tq	Desmo nte	SANG APU 100	21.5	23.0	21.4
3430-255-256	Tq	Desmo nte	SANG APU 73	21.1	23.0	21.4
3595-041-042	BxT/Tr/ Di-prop	Desmo nte	SANG APU 73	17.4	23.0	21.4

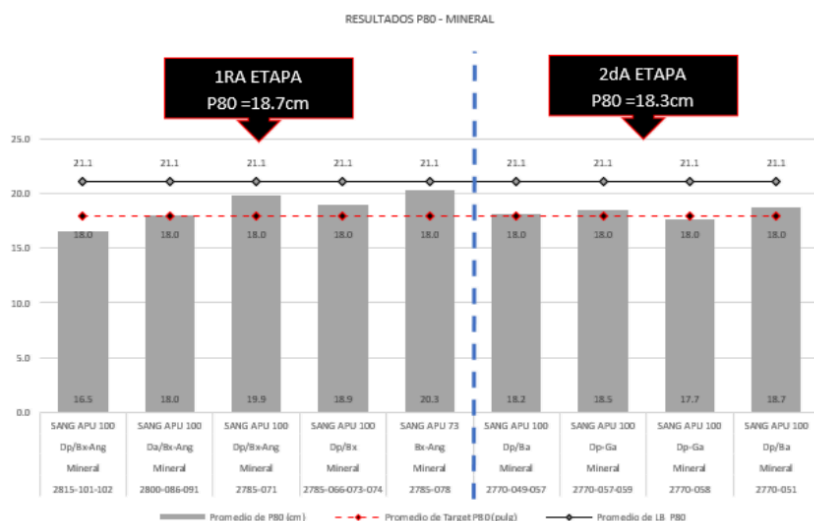
Nota: Autoría propia

Para los análisis de granulometría de los frentes volados con emulsión SAN-G APU, se utilizó el sistema de medición de fragmentación PortaMetrics G2, un instrumento que utiliza tecnología de imagen 3D. El PortaMetrics procesa la imagen para brindarnos la distribución de tamaño de fragmentos, asimismo se utilizó MetricsManager Pro para los análisis a detalle con el uso de algoritmos de inteligencia artificial.

Para los proyectos en mineral y desmonte con emulsión SAN-G APU Famesa tiene los siguientes resultados:

- P80 Mineral: [16.5 – 20.3 centímetros]
- P80 Desmonte: [17.2 – 21.6 centímetros]

Figura 33
Análisis en fragmentación de mineral San G Apu

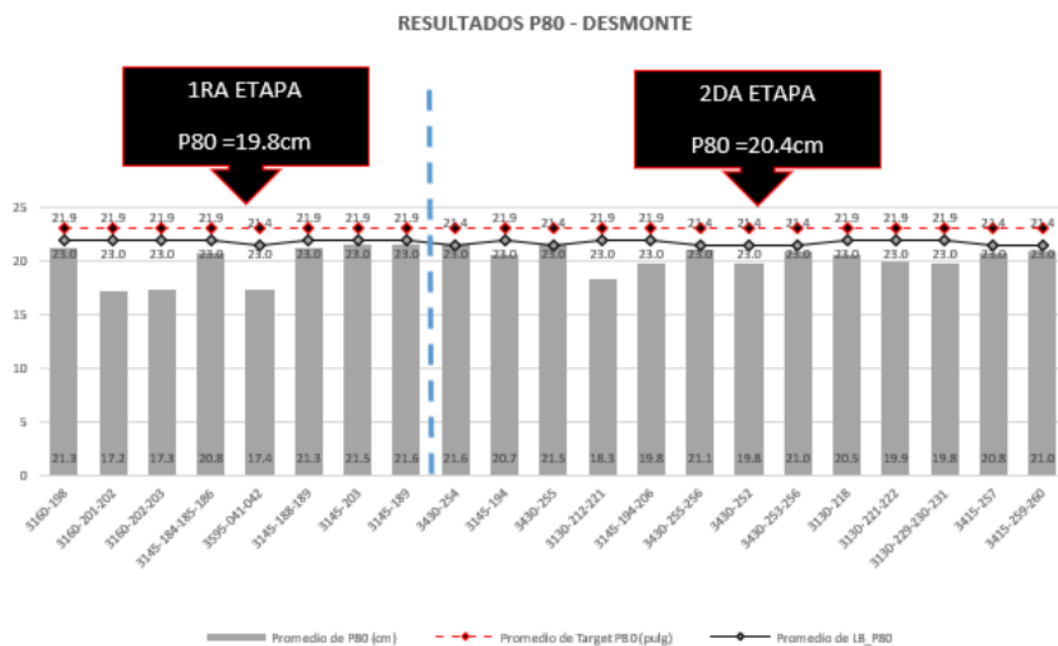


Nota: Fragmentación de mineral con San G Apu.

Se observa que el P80 promedio en la segunda etapa disminuyó en un 2% con respecto al P80 alcanzado en la primera etapa.

El proyecto 2785-076-077-079 se disparó a inicios de la segunda etapa de pruebas; sin embargo, no se considera en el análisis debido a que tuvo algunas consideraciones adicionales donde se priorizó el control del desplazamiento, dada su ubicación (al borde de la cresta) y su geometría (zonas de 4 filas de taladros). Asimismo, en este proyecto se evidenció que en la zona de cresta, los taladros quedaban a una distancia mucho mayor a los parámetros de diseño con respecto a los bordes del proyecto, lo que generó presencia de sobre tamaños durante el minado.

Figura 34
Análisis de fragmentación de desmonte San G Apu



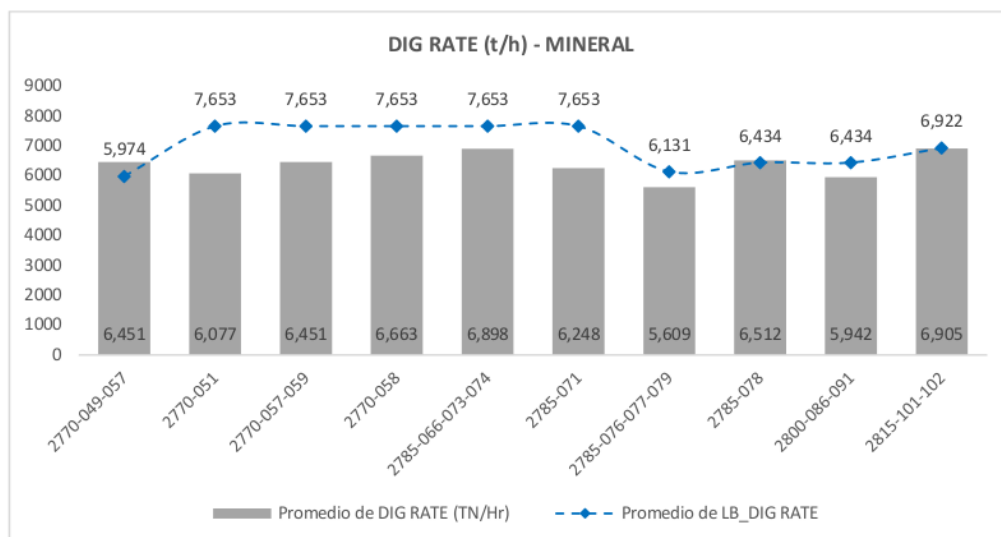
Nota: Fragmentación de desmonte con San G Apu.

4.1.1 Análisis de dig rate (t/h)

Para medir la eficiencia de la emulsión SAN-G APU en función de los equipos de minado, se analizó el dig rate (t/hr) registrado durante el minado de los proyectos de mineral y desmonte:

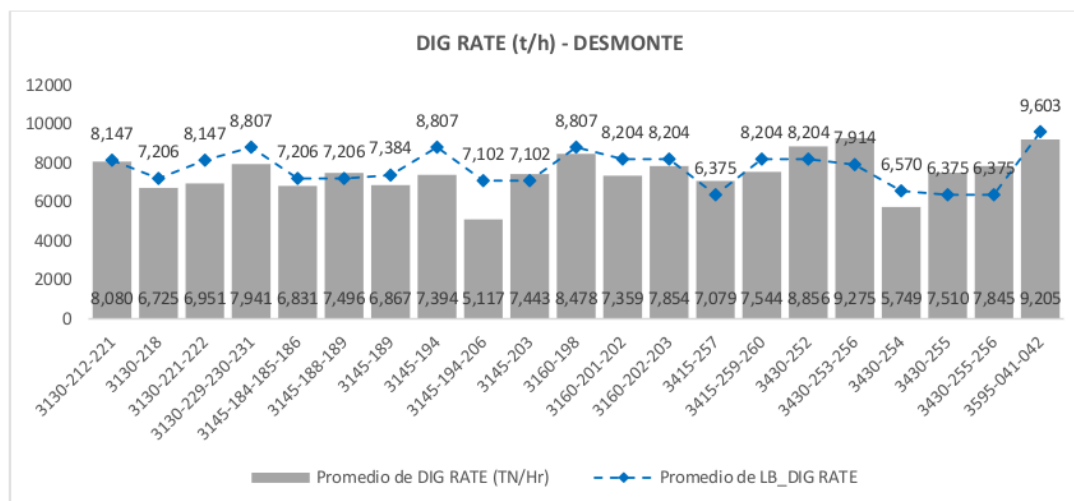
- Dig Rate Mineral : [5,609 – 6,905 t/h].
- Dig Rate Desmonte : [5,117 – 9,274 t/h].

Figura 35
Dig rate SAN-G APU mineral



Nota: Grafica de DIG RATE – Mineral.

Figura 36
Dig rate SAN-G APU desmonte



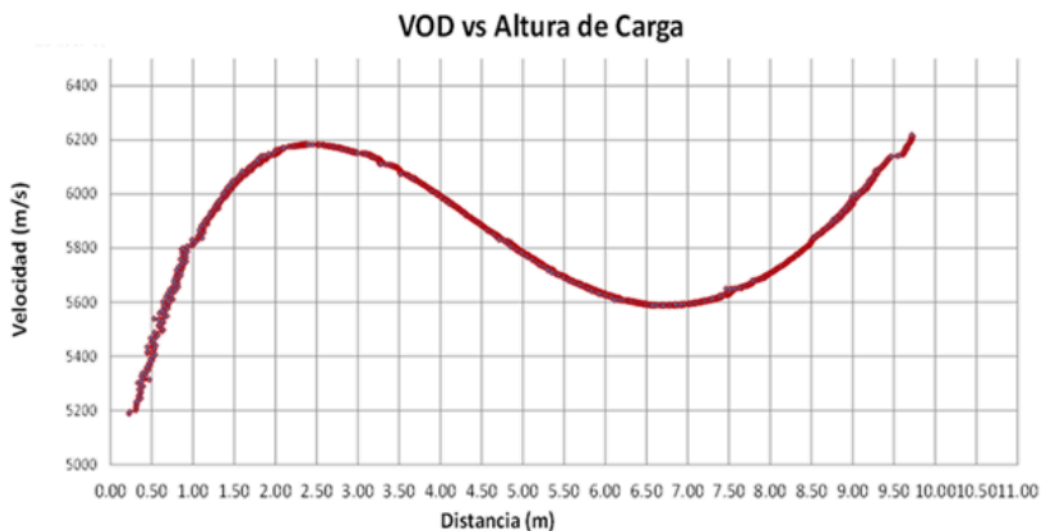
Nota: Grafica de DIG RATE – Desmonte.

4.1.2 Velocidad de detonación

Se realizaron un total de 20 mediciones de VOD de las cuales cinco (12) fueron en taladros de 11 Pulgadas y uno (8) en taladros de 12 ¼ pulgadas de diámetro. De acuerdo a los resultados obtenidos se demuestra que la emulsión SAN-G APU cumple con los parámetros establecidos en la ficha técnica.

Figura 37

Gráfica de velocidad régimen SAN-G APU 100%



Nota: VOD vs Altura de carga.

Figura 38
Resumen de VOD SAN-G APU

N° REGISTRO	FECHA	PROYECTO	DIÁMETRO (Pulg)	EXPLOSIVO	DENSIDAD FINAL (g/cm3)	VOD (m/s)
1	19/12/2023	2815-101-102	11	SANG APU 100	1.15	5,668.00
2	5/01/2024	2800-086-091	11	SANG APU 100	1.15	5,881.00
3	10/01/2024	3160-201-202	11	SANG APU 73	1.15	5,723.00
4	21/01/2024	3160-202-203	12 1/4	SANG APU 73	1.15	5,780.00
5	3/02/2024	3595-041-042	11	SANG APU 73	1.15	5,610.00
6	18/02/2024	2785-071	11	SANG APU 100	1.15	5,780.00
7	23/03/2024	2785-076-077-079	11	SANG APU 100	1.15	5,722.00
8	26/03/2024	3145-194	11	SANG APU 73	1.18	5,574.00
9	30/03/2024	3430-255	12 1/4	SANG APU 100	1.15	5,810.00
10	31/03/2024	3130-212-221	11	SANG APU 73	1.15	5,590.00
11	5/04/2024	3430-255-256	12 1/4	SANG APU 73	1.15	5,690.00
12	14/04/2024	3130-221-222	11	SANG APU 100	1.14	5,873.00
13	20/04/2024	2770-049-057	11	SANG APU 100	1.14	5,691.00
14	23/04/2024	3430-253-256	12 1/4	SANG APU 73	1.15	5,692.00
15	26/04/2024	3130-218	12 1/4	SANG APU 73	1.15	5,660.00
16	27/04/2024	3130-229-230-231	12 1/4	SANG APU 73	1.15	5,596.00
17	1/05/2024	2770-058	11	SANG APU 100	1.15	5,758.00
18	10/05/2024	2770-051	11	SANG APU 100	1.15	5,753.00
19	12/05/2024	3415-259-260	12 1/4	SANG APU 100	1.15	5,801.00
20	20/05/2024	3415-261	12 1/4	SANG APU 100	1.15	5,721.00

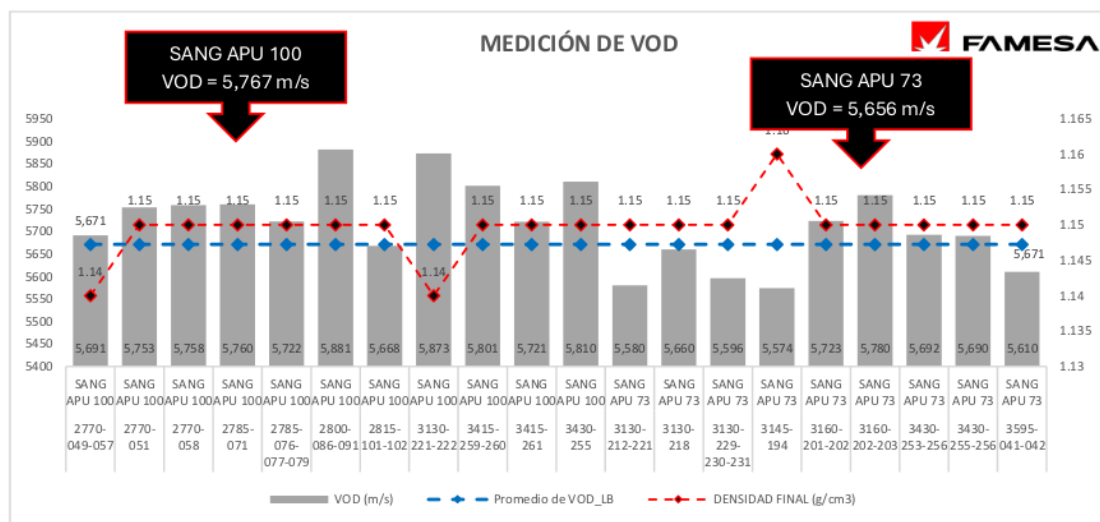
Nota: Registro del VOD – San G APU.

De las mediciones de VOD realizadas en los dos tipos de mezcla explosiva se obtuvieron los siguientes rangos:

- SANG APU 100: [5,691 – 5,881 m/s].
- SANG APU 73: [5,580 – 5,780 m/s].

En el gráfico siguiente se muestran los valores de VOD obtenidos en relación a la densidad final de la mezcla explosiva alcanzada, comparada con los valores de promedio de la Línea Base.

Figura 39
Medición del VOD



Nota: Medición de San G APU 100 y San G APU 73.

Para la medición de los resultados de las voladuras con la emulsión SAN-G APU se utilizó la escala visual de gases nitrosos según la Australian Explosives Industry and Safety Group Inc – AEISG.

En la siguiente tabla se muestra el Resumen de las voladuras con evaluación de Gases Nitrosos. Se tiene el nivel de gases NOx siguiente:

- Nivel 0: 23 Voladuras.
- Nivel 1: 9 Voladuras.
- Nivel 2: 1 Voladura

Figura 40.
Evaluación de gases NOx

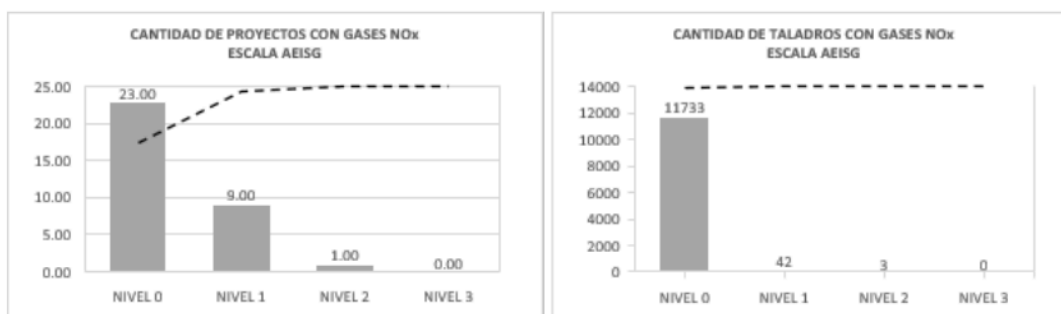
FECHA	PROYECTO	EXPLOSIVO	DENSIDAD FINAL (g/cm3)	N° TALADROS	PRESENCIA DE AGUA	ESCALA DE GASES
19/12/2023	2815-101-102	SANG APU 100	1.15	388	NO	0
22/12/2023	3160-198	SANG APU 73	1.15	84	NO	0
5/01/2024	2800-088-091	SANG APU 100	1.15	190	NO	0
10/01/2024	3160-201-202	SANG APU 73	1.15	371	NO	1A
21/01/2024	3160-202-203	SANG APU 73	1.15	337	NO	1B
23/01/2024	3145-184-185-188	SANG APU 73	1.15	212	NO	0
3/02/2024	3595-041-042	SANG APU 73	1.15	356	NO	0
8/02/2024	2785-066-073	SANG APU 100	1.15	526	NO	0
13/02/2024	3145-188-189	SANG APU 73	1.15	281	NO	1A
18/02/2024	2785-071	SANG APU 100	1.15	285	SI	0
18/02/2024	3145-203	SANG APU 73	1.15	156	NO	0
20/02/2024	3145-189	SANG APU 73	1.15	158	NO	1A
22/02/2024	2785-066-073-074	SANG APU 100	1.15	352	SI	0
28/02/2024	2785-078	SANG APU 73	1.15	287	SI	1A
18/03/2024	3430-254	SANG APU 73	1.14	285	SI	1A
23/03/2024	2785-076-077-079	SANG APU 100	1.15	872	NO	0
28/03/2024	3145-194	SANG APU 73	1.16	499	SI	1C
30/03/2024	3430-255	SANG APU 100	1.15	351	NO	0
31/03/2024	3130-212-221	SANG APU 73	1.15	277	SI	1B
3/04/2024	3145-194-206	SANG APU 100	1.15	431	NO	0
5/04/2024	3430-255-256	SANG APU 73	1.15	284	NO	0
11/04/2024	3430-252	SANG APU 73	1.15	516	SI	1A
14/04/2024	3130-221-222	SANG APU 100	1.14	667	SI	0
20/04/2024	2770-049-057	SANG APU 100	1.14	419	SI	0
23/04/2024	3430-253-256	SANG APU 73	1.15	636	NO	0
26/04/2024	3130-218	SANG APU 73	1.15	418	SI	2B
27/04/2024	3130-229-230-231	SANG APU 73	1.15	129	NO	0
30/04/2024	2770-057-059	SANG APU 100	1.15	240	SI	0
1/05/2024	2770-058	SANG APU 100	1.15	221	NO	0
4/05/2024	3415-257	SANG APU 100	1.15	141	NO	0
10/05/2024	2770-051	SANG APU 100	1.15	369	SI	0
12/05/2024	3415-259-260	SANG APU 100/ SANG APU 73	1.15	811	NO	0
20/05/2024	3415-261	SANG APU 100/ SANG APU 73	1.15	249	NO	0

Nota: Escala de gases nitrosos

En el siguiente gráfico se puede observar que en el 70% de voladuras generó un nivel de gases NOx nivel cero; mientras que, considerando el número de taladros disparados, el 99.6% de taladros no generaron gases NOx.

Figura 41

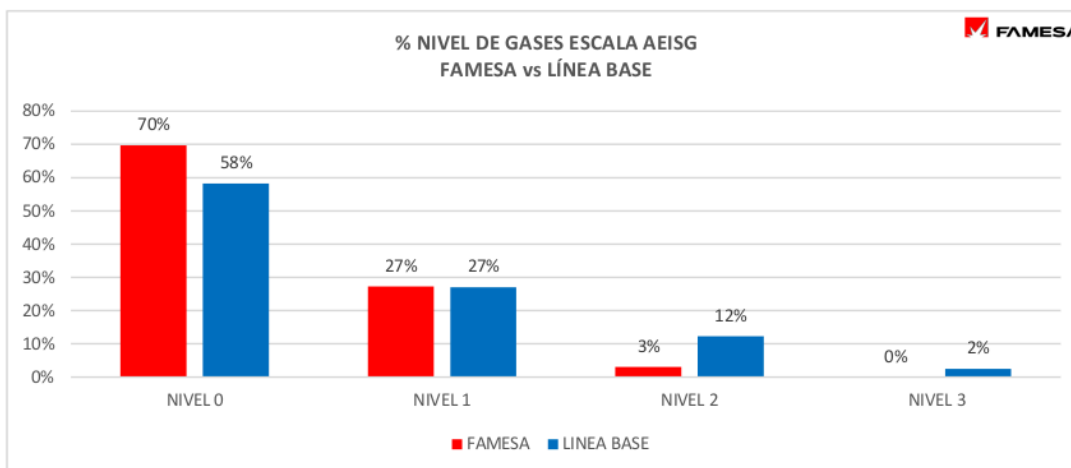
Nivel de gases NOx voladuras emulsión SANG APU



Nota: Gases nitrosos – Emulsión San G Apu.

Figura 42

Comparación nivel de gases NOx voladuras emulsión SANG APU Famesa vs Línea Base



Nota: Escala AEISG.

4.1.3 Monitoreo de vibraciones

Para los monitoreos de vibraciones se usó un sismógrafo de marca InstanTel. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

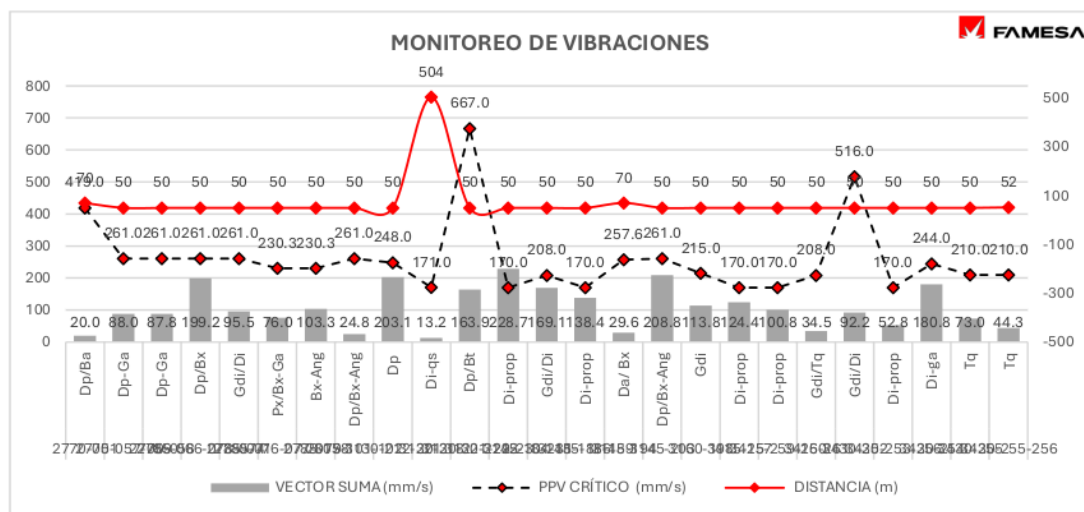
Figura 43
Resumen de monitoreos de vibraciones

FECHA	DOMINIO LITOLOGICO	VECTOR SUMA (mm/s)	PPV CRÍTICO (mm/s)	DISTANCIA (m)
2770-051	Dp/Ba	20	419	70
2770-057-059	Dp-Ga	88.04	261	50
2770-058	Dp-Ga	87.81	261	50
2785-066-073-074	Dp/Bx	199.2	261	50
2785-071	Gdl/Di	95.49	261	50
2785-076-077-079	Px/Bx-Ga	75.96	230.33	50
2785-078	Bx-Ang	103.3	230.33	50
2815-101-102	Dp/Bx-Ang	24.79	261	50
3130-212-221	Dp	203.1	248	50
3130-218	Di-qs	13.19276	171	504
3130-221-222	Dp/Bt	163.9	667	50
3130-229-230-231	Di-prop	228.7	170	50
3145-184-185-186	Gdl/Di	169.1	208	50
3145-188-189	Di-prop	138.4	170	50
3145-194	Da/ Bx	29.64	257.56	70
3145-203	Dp/Bx-Ang	208.8	261	50
3160-198	Gdl	113.8	215	50
3415-257	Di-prop	124.4	170	50
3415-259-260	Di-prop	100.8	170	50
3415-261	Gdl/Tq	34.51	208	50
3430-252	Gdl/Di	92.17	516	50
3430-253-256	Di-prop	52.84	170	50
3430-254	Di-ga	180.8	244	50
3430-255	Tq	73.03	210	50
3430-255-256	Tq	44.3	210	52

Nota: Monitorio de vibraciones.

De acuerdo con la tabla se tienen valores entre [13 – 229 mm/s], para distancias de monitoreo de 50m, manteniéndose los niveles de vibración por debajo de los límites establecidos por SPCC.

Figura 44
Monitoreo de vibraciones SAN-G APU

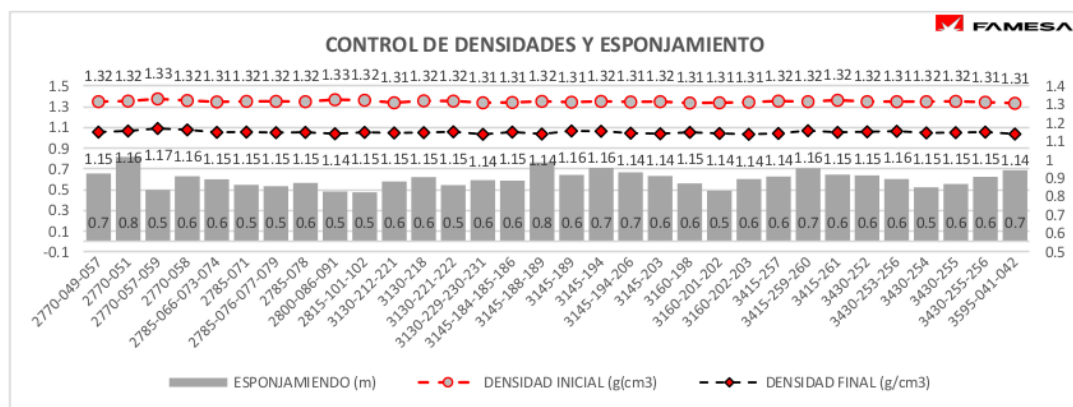


Nota: Grafica de monitoreo de vibraciones.

4.1.4 Medición de densidades

Se realizaron los controles de calidad de la mezcla explosiva en campo, medición de densidades y esponjamiento, obteniéndose los resultados siguientes.

Figura 45
Medición de densidades y esponjamiento en campo



Nota: Grafica de control de densidades y esponjamiento.

Además, con nueva tecnología adquirida por Famesa Explosivos, se implementó la medición de densidad en el interior del taladro, lo cual nos permite establecer una matriz de resultados esperados del desempeño del explosivo debido a la variación de la densidad del producto luego del carguío.

Figura 46

Matriz de riesgo de ocurrencia de gases NOx por densidad de la mezcla

DENSIDAD IN HOLE	RIESGO GASES NOx	DESCRIPCIÓN
Menor a 1.20	BAJO	No debería producirse gases NOx debido a la densidad. Si se producen NOx, tendrían origen en las condiciones de terreno-explosivo.
1.20 - 1.25	MODERADO	Pueden producirse gases NOx en algunos taladros.
Mayor a 1.25	ALTO	Se producen gases NOx y disminuye el sleep time

Nota: Matriz de riesgo NOx.

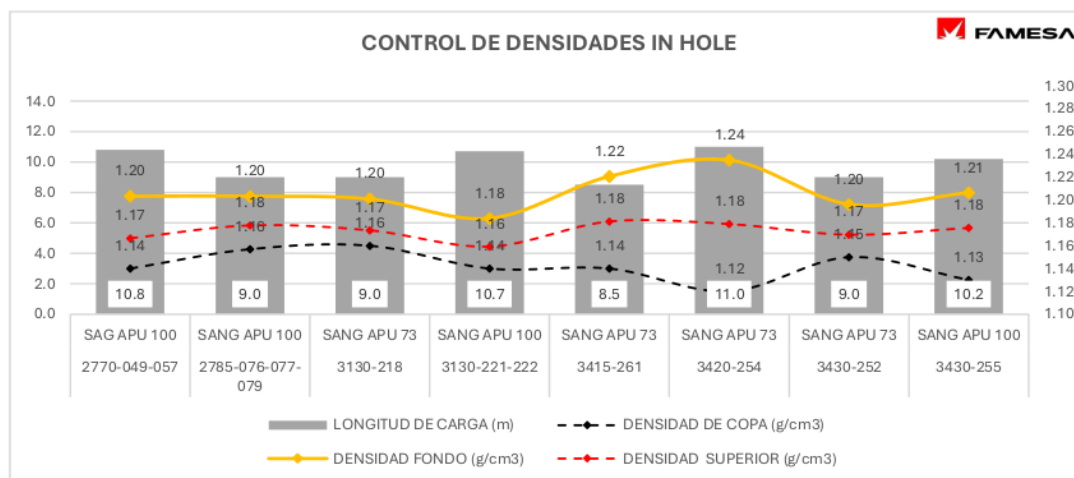
Figura 47

Matriz de riesgo de ocurrencia de gases NOx por densidad de la mezcla

PROYECTO	MEZCLA	LONGITUD DE CARGA (m)	DENSIDAD DE COPA (g/cm3)	DENSIDAD SUPERIOR (g/cm3)	DENSIDAD FONDO (g/cm3)	RIESGO GASES NOx
2770-049-057	SAG APU 100	10.8	1.14	1.17	1.20	BAJO
2785-076-077-079	SANG APU 100	9.0	1.16	1.18	1.20	BAJO
3130-218	SANG APU 73	9.0	1.16	1.17	1.20	BAJO
3130-221-222	SANG APU 100	10.7	1.14	1.16	1.18	BAJO
3415-261	SANG APU 73	8.5	1.14	1.18	1.22	MODERADO
3420-254	SANG APU 73	11.0	1.12	1.18	1.24	MODERADO
3430-252	SANG APU 73	9.0	1.15	1.17	1.20	BAJO
3430-255	SANG APU 100	10.2	1.13	1.18	1.21	MODERADO

Nota: Riesgo de gases NOx.

Figura 48
Medición de densidades in hole

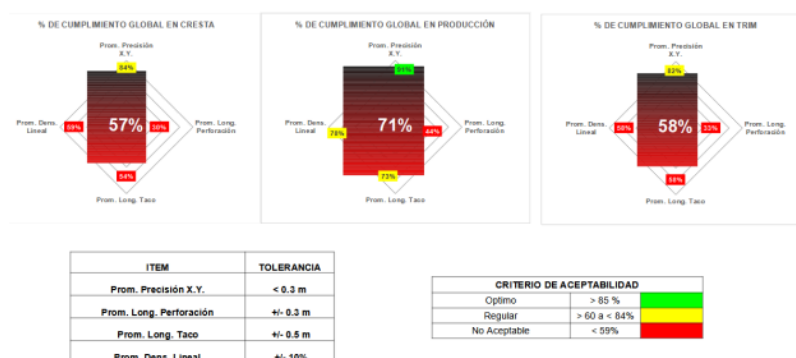


Nota: Grafica del control de densidades in hole.

4.1.5 Control QA/QC perforación y voladura

Para evidenciar el estado de las operaciones de perforación y carguío se implementó el control QA/QC a cada actividad del proceso, analizando un total de 7 proyectos (3 en mineral y 4 en desmonte), de los cuales se controlaron un total de 1,778 taladros en fase 5, 6 y 7.

Figura 49
Resultados de control QA/QC, por zonas de interés



Nota: Resultados control QA/QC.

De los 4 aspectos controlados (precisión (X,Y), longitud de perforación, longitud de taco y densidad lineal de carga) se obtuvieron los siguientes resultados globales en cada zona de estudio:

- Cumplimiento en PRODUCCIÓN: 71%.
- Cumplimiento en CRESTA: 57%.
- Cumplimiento en TRIM: 58%.

4.2 CONCLUSIONES

- Se acumularon 44,425 Horas Hombre Trabajadas sin eventos que reportar, lo cual mantuvo los índices de seguridad en cero.
- Se obtuvo ³ un Factor Potencia promedio de 0.42 kg/tn, para las 23,705,327 toneladas conciliadas con SPCC.
- Se consumieron 7,710 toneladas de emulsión gasificable SAN-G APU, 1,405 toneladas de nitrato de amonio y 72.45 toneladas de aditivo gasificante N-30.
- ⁴ En la zona de mineral, se alcanzó un P80 promedio de 18.5 centímetros, y un P80 promedio de 20.19 centímetros en desmonte.
- Las velocidades ³ de detonación (VOD) de la mezcla SAN-G APU 100 oscilaron entre [5668 – 5881] m/s, mientras que con la mezcla SAN-G APU 73 se obtuvo un rango de VOD entre [5574-5780]⁴m/s. Valores ⁴ que se encuentran dentro de las especificaciones establecidas en la ficha técnica del producto.
- ¹ Con el uso de la emulsión SAN-G APU, se logró un 99.62% de los taladros detonados con un nivel cero (0) de gases nitrosos.
- El Dig rate promedio obtenido en mineral fue de 6,375 t/h, mientras que en desmonte se obtuvo un di grate promedio de 7,504 t/h.
- Se dispararon un total de 17,600 detonadores electrónicos Digishot Plus 4G, de los cuales se tuvieron 3 back up. Generando una tasa de back up de 0.017%.

- Se realizó el control de densidades in hole, generando un riesgo de generación de gases NOx de bajo a moderado, por causa de la densidad del explosivo.
- Del control QA/QC se observaron oportunidades de mejora respecto a las longitudes de perforación, longitud de taco y densidad de carga lineal.
- Se vienen realizando pruebas con Emulnor Bag a la altura del taco en zonas de mineral, con la finalidad de mejorar la fragmentación. Se continúa con el seguimiento a los proyectos de prueba para validar su influencia en la fragmentación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcocer Pinto, E. J., & Salas Bernedo, J. E. (2020). *Propuesta del uso de emulsión gasificada en el carguío de taladros para reducir costos en voladura en una mina a tajo abierto con depósitos tipo Skarn, Arequipa 2020*. [Tesis de titulación, Universidad Continental], Repositorio de la Universidad Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10239/1/IV_FIN_110_TE_Alcocer_Salas_2020.pdf
- EXSA. (2019). *Manual Práctico de Voladura* (5 ed.).
- Famesa . (2019). *Manual de perforacion y voladura*. Famesa explosivos S.A.C.
- Konya, C. J., & Albarrán , E. (1998). *Diseño de voladuras* .
- Lopez Jimeno, E., Lopez , J. C., Pernia Llera, J. M., & Ortiz de Urbina, F. (2003). *Manual de perforacion y voladura de rocas*.
- Muñoz Huaman, M. E. (2020). *Emulsión gasificada bombeable y su impacto en la productividad - mina huaron- pan american silver s.a. – 2019*. [Tesis de maestria, Universidad nacional del centro de Peru]. Repositorio institucional UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7179>
- Quispe Cuaila, M. A. (2018). *Optimización de la fragmentación en la mina Toquepala, mediante la aplicación de explosivo gasificado*. [Tesis de titulación, Universidad Continental]. Repositorio institucional de la Universidad Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5022/1/IV_FIN_110_TE_Quispe_Cuaila_2018.pdf

ANEXOS

FICHA TECNICA SAN G APU



Abrimos paso
al progreso

FICHA TÉCNICA

SAN-G APU

Denominación Genérica SUCAMEC: EMULSIÓN O HIDROGEL A GRANEL NO SENSIBILIZADA

DESCRIPCIÓN Y COMPOSICIÓN:

La SAN-G APU es una emulsión gasificable formada por una solución microscópica oxidante dispersa en una fase combustible continua y estabilizada por un emulsificante.

La SAN-G APU puede ser sensibilizada en las operaciones mineras antes de su carguo en los taladros con la solución gasificante, produciendo una mezcla explosiva de menor densidad, resistente al agua, muy viscosa y de mayor velocidad de detonación que el ANFO, también puede ser sensibilizada con ANFO en diferentes proporciones y ser gasificada.



USOS:

La SAN-G APU se ha diseñado especialmente para ser usado en minería superficial en macizos rocosos cuya temperatura esté comprendida entre 0°C y 40°C. Para temperaturas diferentes se recomienda contactarse con el área de Asistencia Técnica.

La SAN-G APU debe ser cargada por camiones fábrica de FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. que a diferencia de las unidades convencionales que cargan Anfo Pesado, están provistos de un sistema de gasificación de la emulsión matriz, constituido por una unidad de programación lógica (PLC) que permite programar la cantidad de emulsión matriz, Anfo, solución gasificante y agua a dosificar; así como controlar en tiempo real la temperatura del agente y la presión del bombeo. Posee un sistema de seguridad que detiene automáticamente el proceso de bombeo y gasificación cuando la presión de la bomba de trabajo alcanza 180 psi.

La SAN-G APU puede ser cargado mediante bombeo o por gravedad directamente desde los camiones fabrica hacia el interior de los taladros. Una vez cargado los taladros se deja transcurrir unos 20 minutos para la colocación del "taco" en el taladro.

Entre las ventajas de usar la SAN-G APU se tiene:

- Puede utilizarse en terrenos secos, húmedos o inundados, y con rocas de diferente dureza.
- Al cargar los taladros, las columnas explosivas se acoplan por completo, desarrollando con dicha condición toda la energía que se deposita en ellas.
- Su uso representa un trabajo seguro, toda vez que la emulsión matriz se sensibiliza al final de la unidad mecanizada; vale decir que se trata de un producto no explosivo antes de ingresar en los taladros.
- Puede ser cargado a diferentes densidades y energías, para cumplir siempre con el objetivo de producir una buena fragmentación y mejorar la productividad desde la mina hasta su molienda en la planta o su disposición en las canchas de lixiviación.
- Por su alto poder rompedor es posible ampliar las plantillas de perforación y de reducir los costos involucrados.
- Permite reducir el tiempo del carguo por su practicidad.
- La SAN-G APU sensibilizado debe ser iniciado por una prima conformada por un Booster HDP, de un peso conocondante con el peso de las columnas explosivas usadas y con un detonador Fanel.
- También puede ser sensibilizado con ANFO en diferentes proporciones para formar Anfo Pesado y Anfos Pesados Gasificables.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

	UNIDAD	SAN-G APU
Densidad relativa de la matriz	g/cm ³	1,32 ± 3%
Densidad relativa de la matriz sensibilizada	g/cm ³	0,80 a 1,20
Viscosidad de la matriz en condiciones normales (°)	cP	Min. 12 000

FT-003-PE/ES | Rev. 02 | 24/07/2023

Velocidad de detonación de la matriz sensibilizada (**)	m/s	4 800 a 6 000
Presión de detonación	Kbar	47 a 99
Energía	kcal/kg	805
Volumen normal de gases	l/kg	1 025
Potencia relativa en peso (***)	(%)	90
Potencia relativa en volumen (***)	(%)	152
Resistencia al agua	---	Excelente
Categoría de humos	---	Clase 1
Diámetro crítico	mm	76 (3 pulgadas)
Tiempo de permanencia en el taladro	días	7

(*) Medido en el viscosímetro BROOKFIELD HA DVII a 50 RPM.

(**) VOD sin confinar en diámetro de 12 ¼ pulgadas a una densidad de 1,10 g/cm³.

(***) Potencias relativas referidas al ANFO, con potencia convencional de 100.

Los valores expresados son resultados a condiciones normales (20°C y 1 atm).

PRESENTACIÓN:

La SAN-G APU es presentada a granel y transportada en forma segura en camiones cisternas.

TRANSPORTE:

Clase : 5
División : 5.1
Nº ONU : 3375



ALMACENAMIENTO Y GARANTÍA:

La SAN-G APU debe ser almacenada en polvorines a temperaturas entre 0°C y 40°C, ubicados en zonas seguras, bien ventiladas, secas, protegidos de la lluvia y el calor. A su vez, debe rotarse el inventario del explosivo, evitando el uso de materiales nuevos antes de usar materiales antiguos. Y se debe almacenar en concordancia con la tabla de compatibilidad vigente de la autoridad competente.

La SAN-G APU conservado en su embalaje original y almacenado en las condiciones de temperatura anteriormente mencionado tiene una **garantía de 3 meses** después de su fecha de producción.

ATENCIÓN:

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. tiene productos seguros, pero en manos inexpertas se constituye en elementos peligrosos.

El adquiriente o usuario debe cumplir con lo establecido por las normas correspondientes al momento de su transporte, almacenaje y uso; así como de entrenar debidamente a todo el personal encargado de su carga y manipuleo, proporcionando ayudas mecánicas para cargas superiores a los 25 kg por persona.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. no asume responsabilidad alguna por el transporte, almacenaje y/o uso inadecuado que pudiera darse a sus productos.

La información y recomendación aquí descrita no cubren necesariamente todas las aplicaciones del producto ni las distintas condiciones bajo las cuales éste sea utilizado. Estas se basan en la experiencia, investigación y pruebas realizadas por Famesa Explosivos S.A.C., quien no garantiza resultados favorables ni asume responsabilidad alguna, expresa o implícita en conexión con el uso de estas sugerencias. Este producto puede ser modificado sin previo aviso.

FICHA TECNICA SUPERFAM DOS



Abrimos paso
al progreso

FICHA TÉCNICA

SUPERFAM DOS

Denominación Genérica SUCAMEC: ANFO

DESCRIPCIÓN Y COMPOSICIÓN:

El SUPERFAM DOS es un agente explosivo granular compuesto con Nitrato de amonio en prills grado ANFO, un combustible líquido y un colorante. La mezcla se realiza en equipos modernos de alta precisión que, sumados a la alta calidad de los componentes, nos permite producir un agente de voladura de óptima calidad.

El Nitrato de amonio con el cual se fabrica el SUPERFAM DOS presenta una alta capacidad de retención de petróleo, con lo cual obtenemos un producto más estable, de manera que no migre el combustible después de un prolongado tiempo de fabricación.



USOS:

Se utiliza principalmente en minería superficial como también en minería subterránea, obras civiles y donde el tipo de roca sea blanda o semidura.

Cuando se usa en taladros de diámetros convencionales en minería subterránea, con el propósito de optimizar su rendimiento recomendamos iniciarlo con Dinamita tipo Semigelatina o Gelatina o Emulsiones tipo Emulnor 3000; ambas fabricadas por FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. para diámetros mayores se debe emplear cebos de alta densidad tipo Booster HDP.

El rango de temperatura de manipulación del SUPERFAM DOS es de 0°C hasta 30°C. Para temperaturas diferentes se recomienda contactarse con el área de Asistencia Técnica.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

		UNIDAD	SUPERFAM DOS
Densidad aparente		g/cm ³	0,80 ± 0,05
Velocidad de detonación	Confinado en tubo de fierro de 2"	m/s	3 000 ± 300
	Confinado en tubo de fierro de 4"	m/s	4 000 ± 300
Energía teórica por peso		kcal/kg	932
Volumen normal de gases		l/kg	1056
Energía relativa	Por peso	%	100
	Por volumen	%	100
Presión de detonación		kbar	51
Resistencia al agua		---	Nula
Diámetro crítico		mm	38

Los valores expresados son resultados a condiciones normales (20°C y 1 atm).

PRESENTACIÓN:

Se presenta envasado en doble bolsa: la bolsa interior es de polietileno con características impermeables, mientras que la bolsa exterior es de polipropileno, material resistente al manipuleo y almacenamiento en la cual se exhibe la identificación del producto.

Embalaje 1.5D

	MATERIAL	PESO NETO (kg)	PESO BRUTO (kg)	DIMENSIONES EXTERIORES (cm)
SUPERFAM DOS	Plástico	25,0	25,3	83,8 x 50,8

TRANSPORTE:

Clase : 1
División : 1.5D
Nº ONU : 0331



ALMACENAMIENTO Y GARANTÍA:

El SUPERFAM DOS debe ser almacenado en polvorines a temperaturas entre 5°C y 30°C, ubicados en zonas seguras, bien ventiladas, secas, protegidos de la lluvia y el calor. A su vez, debe rotarse el inventario del explosivo, evitando el uso de materiales nuevos antes de usar materiales antiguos. Y se debe almacenar en concordancia con la tabla de compatibilidad vigente de la autoridad competente.

El SUPERFAM DOS conservado en su embalaje original y almacenado en las condiciones de temperatura anteriormente mencionado tiene una **garantía de 6 meses** después de su fecha de producción.

ATENCIÓN:

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. tiene productos seguros, pero en manos inexpertas se constituye en elementos peligrosos.

El adquiriente o usuario debe cumplir con lo establecido por las normas correspondientes al momento de su transporte, almacenaje y uso; así como de entrenar debidamente a todo el personal encargado de su carga y manipuleo, proporcionando ayudas mecánicas para cargas superiores a los 25 kg por persona.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. no asume responsabilidad alguna por el transporte, almacenaje y/o uso inadecuado que pudiera darse a sus productos.

La información y recomendación aquí descrita no cubren necesariamente todas las aplicaciones del producto ni las distintas condiciones bajo las cuales éste sea utilizado. Estas se basan en la experiencia, investigación y pruebas realizadas por Famesa Explosivos S.A.C., quien no garantiza resultados favorables ni asume responsabilidad alguna, expresa o implícita en conexión con el uso de estas sugerencias. Este producto puede ser modificado sin previo aviso.

FICHA TECNICA ANFO PESADO



Abrimos paso
al progreso

FICHA TÉCNICA

ANFO PESADO

Denominación Genérica SUCAMEC: ANFO PESADO

DESCRIPCIÓN Y COMPOSICIÓN:

El ANFO PESADO fabricado por FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. es un agente de voladura de alto nivel de energía con componentes sensibilizantes que le permiten obtener una alta velocidad de detonación y presión de detonación, es seguro, resistente al agua y proporciona una buena calidad de los gases de voladura que asegura como efecto una mejora en los avances y en los volúmenes de rotura.

USOS:

El ANFO PESADO soporta altas presiones hidrostáticas y generan un elevado volumen y presión de gases, para su iniciación se recomienda usar un Primer de tamaño y peso adecuado según diámetro y profundidad.

El rango de temperatura de manipulación del ANFO PESADO es de 5°C hasta 30°C. Para temperaturas diferentes se recomienda contactarse con el área de Asistencia Técnica.



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

	UNIDAD	ANFO PESADO
Densidad relativa	g/cm ³	1,23 ± 5%
Velocidad de detonación (*)	m/s	5 000 ± 600
Presión de detonación	kbar	90
Energía	cal/g	3 140
Volumen normal de gases	l/kg	1 001
Potencia relativa en peso (**)	%	84
Potencia relativa en volumen (**)	%	128
Resistencia al agua	---	Excelente
Sensibilidad al Booster HDP	---	1 libra

(*) Velocidad de detonación confinado en tubo de hierro de 6 pulgadas de diámetro.

(**) Potencias relativas referidas al ANFO con potencia convencional de 100.

Los valores expresados son resultados a condiciones normales (20°C y 1 atm).

PRESENTACIÓN:

Se presenta envasado en doble bolsa: la bolsa interior es de polietileno con características impermeables, mientras que la bolsa exterior es de polipropileno, material resistente al manipuleo y almacenamiento en la cual se exhibe la identificación del producto.

Embalaje 1.5D

	MATERIAL	PESO NETO (kg)	PESO BRUTO (kg)	DIMENSIONES EXTERIORES (cm)
ANFO PESADO	Plástico	20,0	20,2	104,1 x 33,0

TRANSPORTE:

Clase : 1
División : 1.5D
Nº ONU : 0332

**ALMACENAMIENTO Y GARANTÍA:**

El ANFO PESADO debe ser almacenado en polvorines a **temperaturas entre 5°C y 30°C**, ubicados en zonas seguras, bien ventiladas, secas, protegidos de la lluvia y el calor. A su vez, debe rotarse el inventario del explosivo, evitando el uso de materiales nuevos antes de usar materiales antiguos. Y se debe almacenar en concordancia con la tabla de compatibilidad vigente de la autoridad competente.

El ANFO PESADO conservado en su embalaje original y almacenado en las condiciones de temperatura anteriormente mencionado tiene una **garantía de 6 meses** después de su fecha de producción.

ATENCIÓN:

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. tiene productos seguros, pero en manos inexpertas se constituye en elementos peligrosos.

El adquiriente o usuario debe cumplir con lo establecido por las normas correspondientes al momento de su transporte, almacenaje y uso; así como de entrenar debidamente a todo el personal encargado de su carga y manipuleo, proporcionando ayudas mecánicas para cargas superiores a los 25 kg por persona.

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. no asume responsabilidad alguna por el transporte, almacenaje y/o uso inadecuado que pudiera darse a sus productos.

La información y recomendación aquí descrita no cubren necesariamente todas las aplicaciones del producto ni las distintas condiciones bajo las cuales éste sea utilizado. Estas se basan en la experiencia, investigación y pruebas realizadas por Famesa Explosivos S.A.C., quien no garantiza resultados favorables ni asume responsabilidad alguna, expresa o implícita en conexión con el uso de estas sugerencias. Este producto puede ser modificado sin previo aviso.

Optimización de la fragmentación mediante el uso de la emulsión gasificada San G Apu, en unidad minera Toquepala – 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	13%	1%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unsaac.edu.pe	8%
	Fuente de Internet	
2	repositorio.unsa.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.unam.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
6	repositorio.unap.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.unasam.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		