

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Análisis del impacto en la productividad por implementación de
emulsión bombeable en minería subterránea**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

José Luis Reyna Mas

ID [0009-0003-1742-3923](#)

Asesor

M.Sc. José Antonio Corimanya Mauricio

ID [0000-0003-1078-4155](#)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Reyna Mas [1]
Referencia/Reference	[1] J. Reyna Mas, “ <i>Impacto en la productividad por implementación de emulsión bombeable Emultex PDBG en minería subterránea</i> ”
Estilo/Style: IEEE (2020)	[Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.

Citar/How to cite	(Reyna, 2025)
Referencia/Reference	Reyna, J. (2025). <i>Impacto en la productividad por implementación de emulsión bombeable Emultex PDBG en minería subterránea</i> .
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	[Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.

Dedicatoria

A mi madre, Rosa Victoria, por su amor incondicional y la confianza que siempre ha depositado en mí. A mis abuelos, José y Luzdina, por la inspiración que me han brindado.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería por la oportunidad de desarrollarme profesionalmente. Agradezco tambien a cada una de las empresas que han contribuido a mi crecimiento profesional y personal.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar los beneficios del agente explosivo Emultex PDBG, así como su impacto en el mejoramiento de la productividad y reducción de costos operativos de la extracción de mineral.

Se opta por el uso de la emulsión gasificada bombeable en la operación ya que al ser un explosivo que se prepara en campo acorde al tipo de roca y frente que se presenta, muestra una gran versatilidad y facilidad de mecanización, mejorando así la gestión de seguridad porque disminuye la exposición de personal al peligro.

Como resultado de las pruebas de uso de Emultex, se obtiene mejoras significativas en la productividad de la mina: se disminuye la cantidad de taladros por frente, disminuyendo el tiempo de perforación en 8 %; a pesar que la cantidad de explosivo aumenta, el tiempo de carguío disminuye en 45 %; el factor de avance aumenta en 40 % y la sobre-rotura disminuye en 22 %. Dichas mejoras en indicadores de productividad repercuten en los costos operativos asociados: obviamente el costo por explosivos aumenta al ser el Emultex una nueva tecnología, pero es sopesado por los ahorros en consumo de acero, sostenimiento, extracción y transporte de material; así como el incremento de valor económico al tener mayor cantidad de mineral por el mayor avance por disparo. En resumen, la implementación de emulsión bombeable Emultex genera ahorros de 177,370.6 dólares por mes para la mina.

Palabras claves — Emulsión bombeable, productividad, perforación, voladura, costos

Abstract

The purpose of this research is to determine the benefits of the explosive agent Emultex PDBG, as well as its impact on improving productivity and reducing operating costs in mineral extraction.

The use of pumpable gasified emulsion is chosen in the operation since, being an explosive that is prepared in the field according to the type of rock and face that is presented, it shows great versatility and ease of mechanization, thus improving safety management because it reduces personnel exposure to danger.

As a result of the tests using Emultex, significant improvements are obtained in the productivity of the mine: the number of drills per face is reduced, decreasing the drilling time by 8%; despite the fact that the amount of explosive increases, the loading time decreases by 45%; the advance factor increases by 40% and the over-breakage decreases by 22%. These improvements in productivity indicators have an impact on the associated operating costs: obviously the cost of explosives increases as Emultex is a new technology, but it is outweighed by the savings in steel consumption, support, extraction and transport of material; as well as the increase in economic value by having a greater quantity of mineral due to the greater advance per shot. In summary, the implementation of Emultex pumpable emulsion generates savings of 177,370.6 dollars per month for the mine.

Keywords — Pumpable emulsion, productivity, drilling, blasting, costs

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación	1
1.2 Formulación del problema.....	2
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos.....	2
1.3 Objetivo del estudio	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Hipótesis del estudio.....	3
1.4.1 Hipótesis general	3
1.4.2 Hipótesis específicas	3
1.5 Operacionalización de variables	3
1.5.1 Variable dependiente (V.D.).....	3
1.5.2 Variable independiente (V.I.):.....	3
1.6 Antecedentes investigativos.....	6
1.6.1 Antecedentes internacionales	6
1.6.2 Antecedentes nacionales	7
1.6.3 Antecedentes Locales.....	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	9
2.1 Marco Teórico.....	9
2.1.1 Propiedades de los explosivos.....	9
2.1.2 Explosivos y Accesorios utilizados.....	15
2.1.3 Factores que afectan el rendimiento de los explosivos:	30

2.2	Marco conceptual	32
	Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	34
3.1	Unidad de estudio.....	34
3.1.1	Ubicación y accesibilidad.....	34
3.1.2	Geología general	35
3.1.3	Métodos de minado	39
3.2	Metodología de investigación.....	43
3.2.1	Alcance.....	43
3.2.2	Metodología de pruebas	44
3.3	Resultados de pruebas de carguío de Emultex PDBG – Etapa N ^a 1	45
3.3.1	Voladuras realizadas con emulsión bombeable Emultex PDBG.....	45
3.3.2	Resultados pre-voladura.....	47
3.3.3	Resultados post-voladura	47
3.3.4	Instrumentación	50
3.4	Resultados de pruebas de carguío de Emultex PDBG – Etapa N ^a 2	53
3.4.1	Voladuras realizadas con emulsión bombeable Emultex PDBG.....	53
3.4.2	Calibración del equipo (pruebas de gasificación)	56
3.4.3	Resultados pre-voladura.....	59
3.4.4	Resultados post-voladura	60
3.4.5	Instrumentación	65
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	71
4.1	Análisis de productividad	71
4.1.1	Mecanización.....	71
4.1.2	Perforación	72
4.1.3	Voladura	75
4.1.4	Avance y Sobre-rotura	78
4.2	Análisis de costos	83
4.2.1	Consumo de aceros.....	83

4.2.2	Consumo de explosivos	84
4.2.3	Incremento económico por avance adicional	85
4.2.4	Sostenimiento	86
4.2.5	Extracción y transporte	87
4.3	Validación de hipótesis	90
	Conclusiones	93
	Recomendaciones	96
	Referencias bibliográficas	97
	Anexos	99

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Operacionalización de variables e indicadores	4
Tabla 2 : Matriz de consistencia	5
Tabla 3 : Características de la emulsión matriz.....	17
Tabla 4 : Características de la emulsión bombeable gasificada	18
Tabla 5 : % ácido acético versus temperatura.....	18
Tabla 6 : Velocidad de gasificación a 20 ºC.....	22
Tabla 7 : Número de voladuras con emulsión bombeable Emultex PDBG por zona y nivel	45
Tabla 8 : Voladuras en frentes realizadas con Emultex PDBG	46
Tabla 9 : Fragmentación obtenida con Emultex PDBG	50
Tabla 10: Voladuras en frentes realizadas con Emultex PDBG	54
Tabla 11: Número de voladuras con emulsión bombeable Emultex PDBG por zona y nivel	55
Tabla 12: Tiempo de gasificación de la emulsión - 1	57
Tabla 13: Tiempo de gasificación de la emulsión - 2	58
Tabla 14: Tiempo de gasificación de la emulsión - 3	59
Tabla 15: Labores de medición de VOD	66
Tabla 16: Labores de medición de vibraciones	68
Tabla 17: Mecanización del ciclo de minado.....	71
Tabla 18: Parámetros de perforación - Emulsión Encartuchada.....	72
Tabla 19: Parámetros de perforación - Emulsión Bombeable.....	73
Tabla 20: Resultados de perforación - 13 pies	73
Tabla 21: Resultados de perforación - 15 pies	73
Tabla 22: Parámetros de voladura - Emulsión Encartuchada.....	75
Tabla 23: Parámetros de voladura - Emulsión Bombeable.....	76

Tabla 24: Resultados de voladura - 13 pies	76
Tabla 25: Resultados de voladura - 15 pies	76
Tabla 26: Resultados de voladura - etapa N ^a 1 de Emulsión Bombeable	78
Tabla 27: Resultados de voladura - etapa N ^a 2 de Emulsión Bombeable	78
Tabla 28: Parámetros de avance y sobre-rotura - Emulsión Encartuchada	81
Tabla 29: Parámetros de avance y sobre-rotura - Emulsión Bombeable	81
Tabla 30: Resultados de avance y sobre-rotura - 13 pies.....	81
Tabla 31: Resultados de avance y sobre-rotura - 15 pies.....	82
Tabla 32: Incidencia de desarrollo de labores.....	83
Tabla 33: Ahorro de costos por consumo de aceros.....	84
Tabla 34: Costos adicionales por sobreconsumo de explosivos	85
Tabla 35: Incremento de valor económico por avance adicional.....	86
Tabla 36: Resumen de incremento económico por avance adicional.....	86
Tabla 37: Consideraciones por variación de área a sostener.....	87
Tabla 38: Ahorro de costos por sostenimiento	87
Tabla 39: Consideraciones por variación de sobreexcavación.....	88
Tabla 40: Ahorro de costos por extracción y transporte	88
Tabla 41: Ahorros totales por mes	89
Tabla 42: Resumen de datos de tiempos de perforación y carguío.....	90

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Curva de diámetro crítico versus VOD	11
Figura 2 : Ensayo al aire de un explosivo altamente sensible (dinamita).....	14
Figura 3 : Ensayo al aire de un explosivo de sensibilidad reducida (gel).....	14
Figura 4 : Fases de la emulsión encartuchada.....	15
Figura 5 : Esquema de emulsión bombeable	20
Figura 6 : Diagrama de flujo de materiales.....	21
Figura 7 : Proceso de gasificación de emulsión	22
Figura 8 : Esquema de un detonador no eléctrico.....	23
Figura 9 : Esquema de un detonador electrónico.....	25
Figura 10 : Cordón detonante	25
Figura 11 : Posibles uniones de cordón detonante	26
Figura 12 : Booster de TNT	28
Figura 13 : Mecha de seguridad	28
Figura 14 : Especificaciones técnicas - emulsiones encartuchadas.....	29
Figura 15 : Especificaciones técnicas - detonadores no eléctricos	29
Figura 16 : Especificaciones técnicas - cordón detonante	30
Figura 17 : Distribución de carga lineal	31
Figura 18 : Ubicación y accesibilidad de la mina San Cristóbal.....	35
Figura 19 : Plano geológico de mina San Cristóbal.....	36
Figura 20 : Actividad de la perforación de preparación del subnivel.....	39
Figura 21 : Actividad de la perforación de taladros largos tajeos	40
Figura 22 : Actividad de la voladura del slot o cara libre	40
Figura 23 : Voladura de las primeras secciones del lado oeste del tajo	41
Figura 24 : Limpieza de las primeras secciones del lado oeste del tajo	42
Figura 25 : Limpieza y relleno detrítico a los tajos.....	42

Figura 26 : Tiempos de caguío por secciones	47
Figura 27 : Eficiencia de avances	48
Figura 28 : Factor de carga equivalente en Emulnor 3000.....	49
Figura 29 : Resultados de sobre-rotura.....	49
Figura 30 : Medición de VOD en el frente	50
Figura 31 : Medición de VOD del día 2-Mar	51
Figura 32 : Medición de VOD del día 2-Mar	51
Figura 33 : Medición N ^o 1 de vibraciones.....	52
Figura 34 : Medición N ^o 2 de vibraciones.....	53
Figura 35 : Número de Voladuras realizadas por guardia	56
Figura 36 : Pareto de las condiciones de caguío	56
Figura 37 : Gasificación de la emulsión - 1	57
Figura 38 : Gasificación de la emulsión - 2	58
Figura 39 : Gasificación de la emulsión - 3	59
Figura 40 : Tiempos de caguío de emulsión por secciones	60
Figura 41 : Eficiencia de avances por tipo de sección.....	61
Figura 42 : Eficiencia de avances por longitud de perforación (pies).....	61
Figura 43 : Eficiencia de avances por RMR	62
Figura 44 : Eficiencia de avances por seccion	62
Figura 45 : Factor de carga equivalente en Emulnor 300.....	63
Figura 46 : Factor de carga equivalente en Emulnor 3000 por RMR y tipo de labor.....	64
Figura 47 : Resultados de sobre rotura.....	64
Figura 48 : Resultados de sobre rotura por RMR.....	65
Figura 49 : Medición de VOD del día 21-May	66
Figura 50 : Medición de VOD del día 7-Jun	66
Figura 51 : Medición de VOD del día 9-Jun	67
Figura 52 : Medición de VOD del día 10-Jun	67

Figura 53 : Medición N ^a 1 de vibraciones.....	68
Figura 54 : Medición N ^a 2 de vibraciones.....	69
Figura 55 : Equipo de Medición VOD y Vibraciones.....	69
Figura 56 : Medición N ^a 3 de vibraciones.....	70
Figura 57 : Mecanización del Ciclo de Minado - Emulsión Encartuchada	71
Figura 58 : Mecanización del Ciclo de Minado - Emulsión Bombeable	72
Figura 59 : N° de taladros vs tiempo de perforación - 13 pies.....	74
Figura 60 : N° de taladros vs tiempo de perforación - 15 pies.....	74
Figura 61 : Cantidad de explosivo vs tiempo de carguío - 13 pies	77
Figura 62 : Cantidad de explosivo vs tiempo de carguío - 15 pies	77
Figura 63 : Eficacia y eficiencia de avance - sobre rotura - Etapa N ^a 1	79
Figura 64 : Eficacia y eficiencia de avance - sobre rotura - Etapa N ^a 2.....	80
Figura 65 : Factor de avance y sobre excavación - 13 pies	82
Figura 66 : Factor de avance y sobre excavación - 15 pies	83
Figura 67 : Tabla de probabilidad t-student.....	91

Introducción

El desarrollo del trabajo de investigación cuenta con cuatro capítulos detallados a continuación.

El Capítulo I, se llama Parte introductoria del trabajo, donde se abarca la descripción del problema con su respectiva formulación de problema general y específico, objetivo general y específicos e hipótesis general y específica. Se detalla las variables independiente y dependiente, con sus respectivos indicadores. Así como los antecedentes referenciales.

El Capítulo II, se titula Marco teórico y conceptual, donde se detallará teoría de explosivos a analizar y se muestra conceptos generales asociados a la investigación.

El Capítulo III, se titula Desarrollo del trabajo de investigación, donde se mostrará información general de la mina donde se realizó las pruebas. Y se mostrara los datos obtenidos de las dos etapas de evaluación de la emulsión bombeable en frentes de minado.

El Capítulo IV, llamado el Análisis y discusión de resultados, se mostrará el análisis de los datos obtenidos en el capítulo 3, enfocándonos en dos aspectos: productividad y costos. Se realizarán tablas y gráficos para mostrar las mejoras y ahorros por la implementación de la emulsión bombeable. Posterior a ello se hará la validación de hipótesis mediante métodos estadísticos.

Para finalizar se presenta las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado. Así como las referencias bibliográficas usadas.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

Es de conocimiento, la importancia que tiene la minería para la economía peruana, siendo este sector económico en las últimas décadas, uno de los más importantes por su trascendencia al crecimiento económico del país, sin embargo, a medida de su expansión han surgido un incremento de conflictos, generados por temas relacionados a la seguridad y el impacto al medio ambiente, es por ello, que la supervisión y fiscalización de dicha actividad económica resulta necesario.

El futuro de la minería subterránea en el Perú es desarrollar a corto y mediano plazo nuevas tecnologías y métodos de trabajo seguro para la rentabilidad del mineral, por lo tanto, las compañías mineras están sujetas a cambios inmediatos que puedan generar mayores ganancias y mejorar su sistema de gestión de seguridad minimizando los accidentes que se puedan presentas en las operaciones mineras.

La misión principal de Operaciones Mina es proveer a Planta un mineral en las condiciones óptimas para su chancado y molienda, al menor costo posible desde el punto de vista del Negocio de la Compañía, en el corto y largo plazo, propendiendo al bienestar de toda la Comunidad y respetando el Medioambiente.

Actualmente la preparación, desarrollo y explotación, de las minas lleva a recurrir a producir un mayor tonelaje para así reducir sus costos fijos dentro de la variable costos de las empresas, con la finalidad de poder incrementar la cantidad de sus reservas. Es la razón por las cual este Plan de Tesis busca dar respuesta a esta interrogante mediante la obtención de los siguientes resultados:

Cuantificar e identificar los Ahorros y Potenciales Beneficios en la Minería Subterránea, entregados por el uso de las nuevas tecnologías disponibles en el campo de la voladura.

Realizando un proceso comparativo de los resultados medidos en las etapas de Levantamiento Línea Base (Disparos con Emulsión Encartuchada) y Pruebas con Emulsión Bombeable mediante el carguío mecanizado.

Los cuáles serán representados mediante los indicadores más representativos del proceso de Perforación y Voladura como el performance de avance, eficiencia, sobre-rotura y sobre-dilución de todos los disparos ejecutados en mina, adicionalmente se cuantificará el tiempo de carguío, dimensionamiento de flota y costos asociados al proceso.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera una inadecuada elección de emulsión explosiva afecta el proceso de perforación y voladura obteniendo indicadores de productividad bajos?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿De qué manera una inadecuada emulsión explosiva en la operación expone mayor tiempo al peligro durante los procesos de carguío de taladros?
- ¿De qué manera una inadecuada elección de emulsión explosiva nos genera mayores costos de operación por extracción de mineral?

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

Analizar el impacto en la productividad de los procesos de perforación y voladura por la implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea.

1.3.2 Objetivos específicos

- Mejorar la gestión de seguridad en los procesos de perforación y voladura reduciendo la exposición al peligro de los operadores durante el carguío de la emulsión bombeable.
- Determinar los potenciales ahorros en costos operativos asociados al proceso extractivo de mineral por la implementación de emulsión bombeable en la operación.

1.4 Hipótesis del estudio

1.4.1 Hipótesis general

La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea permitirá generar incremento en la productividad de la operación.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea permitirá mejorar la gestión de seguridad en los procesos unitarios de perforación y voladura.
- La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea permitirá obtener ahorros potenciales en costos operativos asociados al proceso extractivo de mineral.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 Variable dependiente (V.D.)

- X1: Emulsión bombeable PDBG

1.5.2 Variable independiente (V.I.):

- Y1: Productividad
 - Tiempo de perforación (min/taladro)
 - Tiempo de carguío (min/taladro)
 - Factor de avance (kg/m)
 - Sobre-rotura (%)
 - Fragmentación (P80)
- Y2: Gestión de seguridad
 - Tiempo de perforación (horas)
 - Tiempo de carguío (Horas)
- Y3: Costos operativos
 - Costos perforación (\$/mes)

- Costos explosivos (\$/mes)
- Costos sostenimiento (\$/mes)
- Costos extracción y transporte (\$/mes)

Tabla 1

Operacionalización de variables e indicadores

CLASE	VARIABLE	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
Independiente (X)	X1: Emulsión bombeable PDBG	Es un tipo de explosivo industrial. Este explosivo se basa en una mezcla de fases, generalmente de una solución acuosa de nitrato de amonio (fase continua o externa) y una fase dispersa o interna formada por aceites o combustibles	Kilogramos por disparo	(Kg)
	Y1: Productividad	Es un indicador clave que mide la relación entre la cantidad de producción (en términos de toneladas de mineral, metros cúbicos de material movido, etc.) y los insumos empleados (como mano de obra, equipos, energía, tiempo, y capital).	Tiempo de perforación Tiempo de carguío Factor de avance Sobre-rotura Fragmentación	(min/taladro) (min/taladro) (kg/m) (%) (P80)
Dependiente (Y)	Y2: Gestión de seguridad	Conjunto de prácticas que abarca tanto aspectos de seguridad física como de salud ocupacional, tomando en cuenta los desafíos específicos del entorno minero	Tiempo de perforación Tiempo de carguío	(Horas)
	Y3: Costos operativos	Se refieren a todos los gastos asociados a las actividades necesarias para mantener las operaciones mineras en funcionamiento. Estos costos abarcan tanto los procesos de extracción como los de procesamiento	Costos perforación Costos explosivos Costos sostenimiento Costos extracción y transporte	(\$/mes)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2*Matriz de consistencia*

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES		INDICADOR
			INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE	
¿De qué manera una inadecuada elección de emulsión explosiva afecta el proceso de perforación y voladura obteniendo indicadores de productividad bajos?	Determinar los impactos en la productividad de los procesos de perforación y voladura por la implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea.	La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea permitirá generar incremento en la productividad de la operación.	Y1: Productividad		Tiempo de perforación (min/taladro) Tiempo de carguío (min/taladro) Factor de avance (kg/m) Sobre-rotura (%) Fragmentación (P80)
PROBLEMA ESPECIFICO	OBJETIVO ESPECIFICO	HIPOTESIS ESPECIFICAS	X: Emulsión Bombeable PDBG	Y2: Gestión de seguridad	Tiempo de perforación (horas) Tiempo de carguío (Horas)
¿De qué manera una inadecuada emulsión explosiva en la operación expone mayor tiempo al peligro durante los procesos de carguío de taladros?	Mejorar la gestión de seguridad en los procesos de perforación y voladura reduciendo la exposición al peligro de los operadores durante el carguío de la emulsión bombeable.	La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea permitirá mejorar la gestión de seguridad en los procesos unitarios de perforación y voladura.			
¿De qué manera una inadecuada elección de emulsión explosiva nos genera mayores costos de operación por extracción de mineral?	Determinar los potenciales ahorros en costos operativos asociados al proceso extractivo de mineral por la implementación de emulsión bombeable en la operación.	La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea permitirá obtener ahorros potenciales en costos operativos asociados al proceso extractivo de mineral.	Y3: Costos operativos		Costos perforación (\$/mes) Costos explosivos (\$/mes) Costos sostenimiento (\$/mes) Costos extracción y transporte (\$/mes)

Fuente: Elaboración propia

1.6 Antecedentes investigativos

A continuación, se describen los antecedentes relacionados al tema de investigación, realizados en los ámbitos internacionales, nacionales y locales.

1.6.1 Antecedentes internacionales

Alcaino, J. (2018) en su investigación concluye que las emulsiones son los explosivos más recomendables en este tipo de labores, pues poseen un alto poder rompedor y mantienen sus características al entrar en contacto con el agua. Además, el carguío mecanizado permite adaptarse a las condiciones del terreno, variando la densidad de carga. Luego de registrar los resultados se determinó que el ritmo de trabajo es mucho más rápido y eficiente al seleccionar el Emultex PDBG ya que en promedio avanza 10 cm más por disparo y se tarda 16 segundos menos en cargar un tiro. Además, el costo diario de construcción de una labor disminuye pues se necesita de menos tiempo para completar un mismo trabajo. Los daños generados en las inmediaciones de la excavación pueden ser controlados realizando una perforación adecuada y diseñando diagramas apropiados, aprovechándose al máximo la energía del Emultex PDBG en fragmentar la roca sin provocar sobreexcavación excesiva. El tiempo de ventilación de los gases tóxicos es de aproximadamente una hora para ambos explosivos y, además, las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad no afectan en gran medida en su rendimiento.

Calvo, A. (2019) en su investigación determina que las emulsiones gasificadas presentan variaciones en su composición de acuerdo al tipo de tensoactivo usado, que afecta considerablemente la viscosidad y estabilidad de la emulsión. La evaluación de la estabilidad fisicoquímica comprende las mediciones de tamaños de partícula, viscosidad, grado de cristalización entre otras; a fin de fijar los parámetros de estabilidad de cada tipo de emulsión que puedan contribuir a mejorar los procesos de almacenamiento y transporte. La importancia de este estudio radica, en dar respuestas desde el punto de vista fisicoquímico a los problemas de estabilidad, que se tienen actualmente frente al uso emulsiones explosivas como agentes de voladura, en operaciones de minería y

construcción, específicamente durante su transporte y almacenamiento, debido a que se produce una disminución en la velocidad de detonación, a causa de la perdida de estabilidad. Las emulsiones explosivas son del tipo agua en aceite donde la fase dispersa está compuesta por una solución de sales oxidantes, que se dispersan como gotas en la fase externa o fase combustible.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Cahuata, M. (2022) en su investigación afirma que Emulgran Qhana y Emulfrag como explosivos bases para generar un mayor avance a un menor costo; mientras que para controlar el exceso de sobre-rotura en los contornos de la labor, se implementó en primera instancia el uso del Famecorte E-20. La mejor alternativa fue el Emulfrag, gracias a presentar: un acoplamiento total al taladro, esponjamiento de la mezcla (permitiendo reducir la cantidad usada) y una alta variabilidad de la densidad del explosivo gracias al control de esta mediante el PLC del Famejet. El ahorro obtenido tras pasar de la línea base Emulnor a la emulsión bombeable Emulfrag fue de: 26.9 USS/m para roca suave, 26.9 USS/m para roca media y 26.9 USS/m para roca dura. En lo que respecta al daño inducido al macizo rocoso, el efecto deflagrante del Emulfrag a una densidad de 0.8 g/cm³ se logró disminuir favorablemente las zonas de intenso fracturamiento y creación de nuevas fracturas.

Soto, J. (2022) en su investigación concluye que la utilización de los métodos de la voladura controlada obtiene excavaciones bien definidas, una adecuada fragmentación, buen avance y una mínima sobre-rotura, esto da lugar a excavaciones más estables y acelerar las operaciones de desarrollo. los costos asociados al sostenimiento, explosivos, deberes y el uso de equipos que se reducen evidentemente. También se pretende demostrar la viabilidad y la rentabilidad de la Emulsión Bombeable Gasificada EMULFRAG en los laboreos de U.P. Andaychagua. El trabajo describe el avance de las pruebas que se realizaron a lo largo del año 2020, así como sus resultados demuestran una importancia de reducción de costos en el proceso perforación y voladura en la mina Andaychagua. Finalmente, con esta nueva tecnología de aplicación de explosivo se ha logrado un buen

avance, en el carguío del explosivo en menor tiempo, vibración y fragmentación adecuada, logrando obtener un beneficio económico mensual de 100.36 \$/m y por los 180 m lineales programadas al mes se obtiene un beneficio de 18,064.8 \$/mes; y tomando en cuenta en forma anual sería de 216,777.6 \$/año.

1.6.3 Antecedentes Locales

Clemente, R. (2020) en su tesis concluye que las pruebas con Emulsión Explosiva a Granel mediante el carguío mecanizado. Emitieron resultados favorables como el incremento de la eficiencia de avance hasta un 98%, reducción de la sobre-rotura hasta un 6% y la sobre-dilución en un 5%; esto impacto significativamente en el ahorro anual de \$ 220 Mil en Perforación y Voladura de los cuales el costo de perforación ascendió a \$ 60 Mil y en voladura (explosivos) ascendió a \$ 160 Mil. En cuanto al tipo de investigación, nuestra tesis es una investigación científica, de tipo descriptiva de causas y efectos, y de aplicación en campo. Desarrollaremos y emplearemos como herramienta un sistema de indicadores y gráficos, para poder discutir sobre la viabilidad de los datos obtenidos en la operación, con el objetivo de poder generar un análisis económico de las ventajas obtenido producto de la implementación de estas nuevas tecnologías en la mina Animon.

Flores, E (2020) en su tesis concluye que de migración al sistema mecanizado de carguío es económicamente más viable respecto al sistema tradicional, se recopiló 10 voladuras como línea base y analizó sus resultados logrando obtener 3.65 m avance efectivo entre lo más relevante. Luego se rediseño las mallas de perforación y realizó nuevos diseños de carguío y finalmente se realizaron demostraciones un total de 10 voladuras. Los resultados evidencian mejoras en avance efectivo de voladura, reducción de sobreexcavación, tiempos de carguío y menor exposición de personal al frente de trabajo, y por consiguiente un ahorro mensual en costo global de voladura de US\$ 27,037.14. Por lo tanto, la propuesta de migración a un sistema de carguío mecanizado tiene beneficios comprobados y se recomienda su aplicación en voladuras horizontales minas subterráneas.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Propiedades de los explosivos*

Los explosivos civiles para voladura son una mezcla íntima de ciertas sustancias, explosivas o no. Unas son combustibles (fuel, aceite o ceras), otras son oxidantes (nitrato amónico) y otras actúan como sensibilizantes (NG, burbujas de nitrógeno); rebajando la energía de activación de la reacción y aportando puntos calientes que permiten su progresión a lo largo de la columna de explosivo. La reacción de detonación se produce normalmente a regímenes entre 4,000 m/s a 6000 m/s en los diámetros de perforación más habituales; la liberación de energía se da en un tiempo ínfimo por lo que proporcionan una gran potencia de trabajo. Es fundamental que las características del explosivo sean compatibles con las condiciones en las que se va a llevar a cabo la voladura; por lo que, los fabricantes disponen de una gama de productos para cubrir cualquier necesidad. Cada tipo de explosivo posee su lista de características que lo hacen más o menos adecuado en cada operación.

2.1.1.1 Velocidad de detonación (VOD). Mide la velocidad de reacción de detonación que se propaga a través del explosivo y por tanto es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. Es una medida de la capacidad rompedora del explosivo (a mayor velocidad de detonación, mayor poder rompedor y mayor capacidad de fragmentación); depende fundamentalmente de la formulación del explosivo, el grado de confinamiento, el diámetro de carga y el tipo de iniciación. La presión de detonación se puede calcular a partir de la velocidad de detonación y la densidad del explosivo, es una característica importante a la hora de elegir un tipo de iniciador u otro. Tanto la velocidad de detonación como la presión de detonación se pueden medir directamente en el taladro en condiciones reales de voladura.

2.1.1.2 Energía. Es una medida de la capacidad del explosivo para realizar trabajo útil (fragmentar y desplazar el material); se refiere al contenido energético del explosivo.

Esta energía total, expresada en MJ/kg, se divide en dos tipos: una energía de choque que fractura fuertemente la roca y una energía de gases que fragmenta más el material y lo proyecta. La energía de un explosivo se suele mostrar como porcentaje de un explosivo patrón, para ello se emplea generalmente el ANFO.

De esta manera se obtiene la energía relativa al ANFO tanto en peso (RWS) como en volumen (RBS), siendo esta última la más importante a la hora de realizar cálculos y comparaciones de energía en una voladura.

Dado que el valor de RBS depende de la densidad, este valor puede variar a lo largo de la longitud de un barreno en banco, siendo mayor en el fondo.

Este efecto, que se debe a la presión hidrostática de la columna de explosivo y al agua que pueda existir en el barreno, es pronunciado cuando se emplean explosivos sensibilizados con gas.

2.1.1.3 Densidad relativa. Es la relación entre la masa y el volumen, expresada en g/cm³. Prácticamente expresa la masa en gramos de una sustancia explosiva contenida en un volumen de 1 cm³.

La densidad propia o “de masa” de los explosivos varía entre 0,8 a 1,6 g/cm³ en relación con la unidad (agua a 4 °C y 1 atm).

Además de afectar al valor de la energía relativa en volumen RBS, es de importancia en otra serie de cuestiones como la capacidad de cargar barrenos con agua, la sensibilidad del explosivo o la velocidad de detonación.

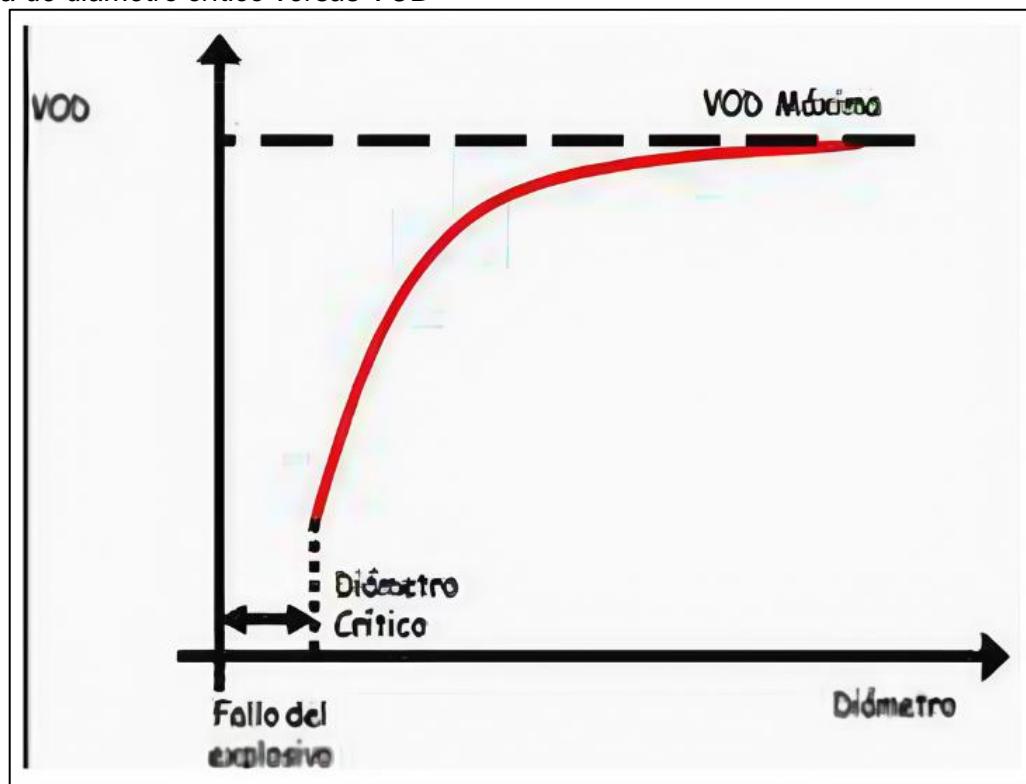
2.1.1.4 Presión de detonación. La presión de detonación es calculada a partir de la velocidad de detonación y la densidad del explosivo, es la primera presión en entrar en contacto con la roca, la cual genera una onda de choque que provoca el fracturamiento del macizo rocoso. Se mide en unidades de presión (principalmente en KBar o Megapascales).

2.1.1.5 Presión de taladro. Esta presión varía con el acoplamiento del explosivo en el taladro. Por ejemplo, un explosivo granel con densidad 0.85 g/cm³ y una VOD de 4,000 m/s puede alcanzar una presión de taladro o explosión de 1,500 MPa en taladro confinado al 100%, cuando se llena sólo al 90% llega aproximadamente a 1,300 MPa y cuando sólo se llena al 80% bajará hasta cerca de 1,100 MPa.

2.1.1.6 Diámetro crítico. Es el diámetro de carga por debajo del cual la detonación no es capaz de progresar. Parámetro para tener en cuenta de manera especial si se perforan taladros de un diámetro reducido. Las hojas técnicas del fabricante suelen indicar este valor, en condiciones normales de presión y temperatura, así como otras recomendaciones de uso. En caso de duda, se deberá contactar con el servicio técnico del proveedor.

Figura 1

Curva de diámetro crítico versus VOD



Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

2.1.1.7 Sensibilidad. Es una medida de la facilidad de iniciación que tiene un explosivo para ser iniciado correctamente. En la práctica se definen dos niveles de sensibilidad:

- Sensible al detonador (Nº 8 de potencia).
- Sensible al booster / cartucho cebo.

Las condiciones existentes de presión y temperatura afectan directamente a esta propiedad. De este modo, una temperatura demasiado baja reduce la sensibilidad del explosivo y puede llegar a dejarlo totalmente inerte. Igualmente, cualquier explosivo puede quedar inutilizado si es sometido a una presión demasiado alta.

Cualquier explosivo puede llegar a detonar de manera accidental si es sometido a temperaturas demasiado elevadas. Esto puede ser problemático en ciertos yacimientos metálicos con barrenos calientes. Las hojas técnicas de cada producto especifican las condiciones normales de uso de presión y de temperatura. En caso de duda, en una aplicación atípica concreta, es necesario consultar con el servicio técnico del proveedor.

En el diseño y carga de voladuras en banco la sensibilidad del explosivo es una característica a tener en cuenta ya que puede degenerar en cortes y fallas en la voladura. Por ello, antes de someter a un explosivo a condiciones exigentes (temperaturas muy bajas o taladros de gran profundidad, por ejemplo), se debe estar completamente seguro de que la energía de iniciación que va a recibir es la adecuada.

Los explosivos sensibilizados con burbujas de gas (hidrogeles y emulsiones) son más propensos a sufrir el fenómeno de desensibilización por presión y puede ser causado por varios factores:

- **Desensibilización por choque o muerte por presión dinámica:**

Se refiere a la onda de choque generada por la detonación previa de un taladro adyacente. Esta puede llegar a comprimir la carga de explosivo en mayor o menor grado hasta inutilizarla por completo.

- **Desensibilización por gases:**

Los gases de la detonación previa de un taladro adyacente pueden colarse entre las grietas del terreno fracturado hasta alcanzar la carga explosiva y someterla a una presión demasiado elevada, reduciendo en mayor o menor medida su sensibilidad.

- **Muerte por presión estática:**

La presión hidrostática, de la propia columna de explosivo y del agua existente en el taladro, puede someter al explosivo situado en el fondo a presiones demasiado elevadas que lleguen a dificultar o impedir su iniciación. Esto es un factor para tener en cuenta en taladros de una cierta longitud, por ello, las emulsiones, tanto encartuchadas como a granel, tienen formulaciones especiales, sensibilizadas con microesferas de vidrio que pueden aumentar más de 30 veces su resistencia a este fenómeno.

Los tres casos anteriores se pueden mitigar mediante el empleo de un iniciador de mayor potencia, por ejemplo, iniciando con booster de TNT en lugar de detonador.

- **Detonación por simpatía:**

En terrenos muy fracturados o con errores importantes de perforación, la onda de choque de un taladro adyacente puede detonar la carga. Esto podría llegar a ocurrir con ciertos explosivos muy sensibles, como dinamitas con alto porcentaje de NG (nitroglicerina / nitroglicol). Es un fenómeno más habitual en la zona del arranque en labores de avance en galería. Ver Figura 2.

- **Efecto canal:**

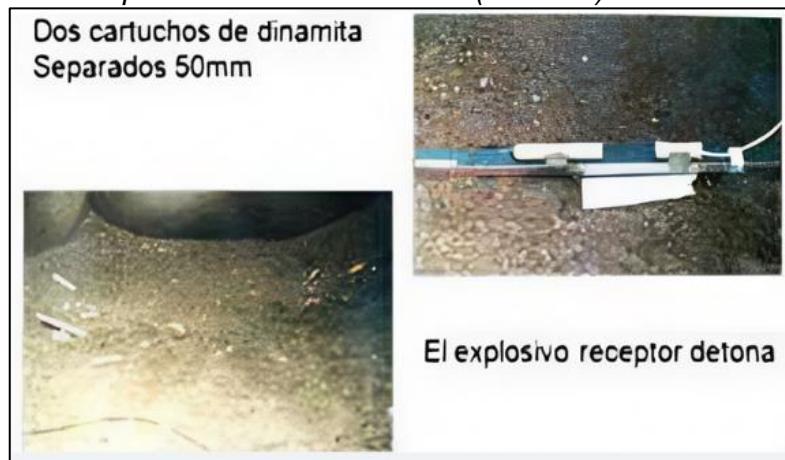
Es una situación especial donde los gases de detonación que viajan entre el cartucho y las paredes del taladro a gran velocidad llegan a comprimir en exceso el explosivo aún sin detonar. Ver Figura 3.

Es más común en voladuras de avance en galería cuando existen diferencias importantes entre los diámetros de cartucho y de taladro. Dinamitas, emulsiones e hidrogeles son todos propensos a este fenómeno.

Una sensibilidad alta del explosivo puede degenerar en situaciones de alto riesgo. Un explosivo tipo dinamita, sensibilizado con NG, es menos propenso a fallar por falta de sensibilidad durante la voladura. Sin embargo, las condiciones geológicas del terreno son un factor difícilmente controlable y son la fuente más frecuente de fallas.

Figura 2

Ensayo al aire de un explosivo altamente sensible (dinamita)



Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

Estas fallas pueden ser puntuales en una voladura, sin llegar a originar por ello una falla llamativa de la misma, pasando por tanto inadvertidos durante la inspección. Véase Figura 3. En este caso, la pila de material disparado podrá contener inesperados cartuchos sin detonar. Cuando estos cartuchos son de dinamita, el riesgo al que nos exponemos es muy alto debido a su contenido en NG.

Esta situación entraña un riesgo muy elevado para los operadores de los equipos de acarreo al ser éste un explosivo sensibilizado con NG que puede detonar

Figura 3

Ensayo al aire de un explosivo de sensibilidad reducida (gel)



Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

Si el cartucho lograse pasar del equipo de acarreo sin detonar, el siguiente punto de posible detonación accidental sería la chancadora primaria. Por el contrario, los

explosivos tipo emulsión tienen una sensibilidad muy reducida al impacto, siendo muy seguros en su manipulación y garantizando una mayor seguridad en caso de taladros fallados.

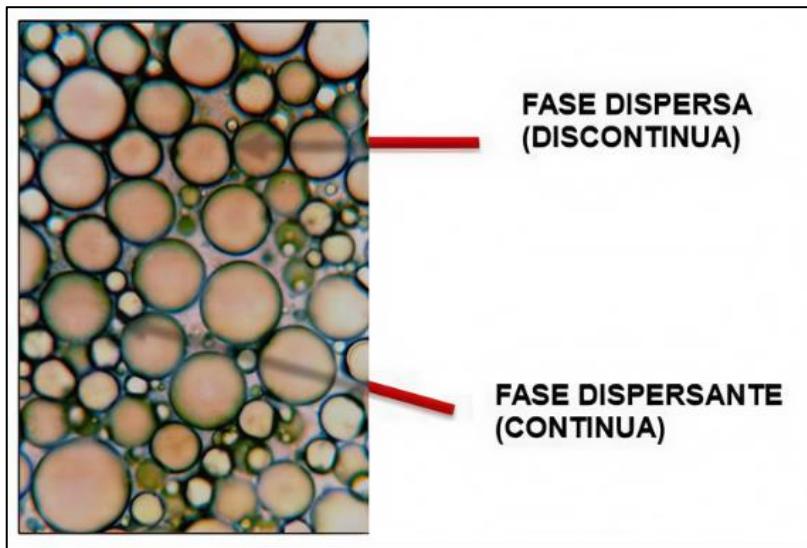
2.1.2 Explosivos y accesorios utilizados

En el mercado peruano existen diferentes tipos de explosivos para su uso en aplicaciones de minería subterránea, en tal sentido los explosivos utilizados en mina San Cristóbal principalmente son emulsiones encartuchadas.

2.1.2.1 Emulsiones encartuchadas. Una emulsión explosiva es una emulsión tipo agua en aceite, donde la fase dispersa es una solución acuosa de nitrato amónico y la fase continua es una mezcla oleosa de aceites y ceras (una proporción elevada de éstas confieren una reología más dura y consistente). Las fases se encuentran estabilizadas por un agente emulsionante y la mezcla es resistente al agua de por sí.

Figura 4

Fases de la emulsión encartuchada



Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

Al igual que los hidrogeles, su formulación no contiene sustancias explosivas. Se dispone de una amplia variedad de formulaciones para adaptarse a prácticamente a cualquier necesidad de uso. De esta manera, aumentando el contenido de aluminio se mejora el calor de explosión, existiendo en la actualidad formulaciones que superan en RBS a la mayoría de las dinamitas.

Su densidad varía entre 1,20 g/cm³ y 1,30 g/cm³ y tienen una velocidad de detonación elevada. Se pueden usar como cartucho cebo de explosivos tipo ANFO y sobre todo como carga de fondo para rocas de cualquier dureza en su versión más energética o como carga de columna de taladros con agua en formulaciones con contenidos más reducidos de Al.

Suelen estar sensibilizadas con burbujas de gas por lo que son propensas a sufrir problemas de muerte por presión bajo ciertas condiciones. Existen formulaciones sensibilizadas con microesferas de vidrio que permiten su carga en taladros de gran longitud.

La mayoría de las formulaciones de emulsiones y geles encartuchados son sensibles a los detonadores. Sin embargo, con el objeto de asegurar una iniciación de calidad óptima, se recomienda iniciarlos con un cebo de mayor potencia como puede ser por ejemplo un cartucho de dinamita o un multiplicador de TNT. Esto es de especial relevancia en taladros que pasan de una cierta profundidad (15 metros).

2.1.2.2 Emulsiones bombeable gasificable. Es un sistema diseñado para realizar el carguío de la emulsión gasificada en túneles y en trabajos de desarrollo horizontal en minería subterránea; la tecnología consiste en; la emulsión matriz, producto no explosivo y los aditivos que son fijados en el interior de los taladros mediante un sistema de bombas del Módulo UBT las cuales son controladas por el PLC (Programador Lógico Programable), donde se llevará a cabo el proceso de gasificación química que lo convertirá en un producto explosivo.

Véase esquema de la Figura 5.

La programación es monitoreada y ajustada por el personal técnico en obra en función de las condiciones del terreno y temperatura de la emulsión matriz.

La Matriz es una emulsión a granel del tipo agua en aceite, fabricada mediante un proceso, que le asegure mantener sus características técnicas en las diversas etapas de bombeo a que va a ser sometida. Sus características principales son.

Tabla 3*Características de la emulsión matriz*

Densidad	1.35 – 1.40 g/cm ³
Resistencia al agua	Excelente
Viscosidad	45000 – 55000 cP
Vida útil	3 meses

Fuente: Elaboración propia

La Emulsión Matriz son mezclas de dos fases líquidas del tipo agua en aceite, las que normalmente no se mezclan y necesitan de un emulsificante apropiado y un energético mezclado para que las dos fases puedan unirse y estar juntas sin desligarse. La fase continua, básicamente constituida por una mezcla de hidrocarburos y la fase dispersa, que son microgotas de una solución acuosa de sales oxidantes (agua y nitrato de amonio, nitrato de sodio o nitrato de calcio disuelto)

Al ser un producto no explosivo se transporta, almacena y aplica sin mayor riesgo. Por ser un producto inerte de alta estabilidad se puede almacenar en silos a temperaturas entre -10°C y 40 °C.

La Emulsión Gasificada es un producto obtenido mediante la gasificación química de la emulsión matriz, con la que alcanza su condición de agente de voladura para taladros de diámetro pequeño especialmente diseñado para túneles, galerías de desarrollo horizontal y verticales en minería subterránea y canteras.

Su elaboración se inicia en el momento del carguío de la emulsión matriz al taladro, mezclándose uniformemente con los aditivos en el tiempo que dura su paso del módulo hasta llegar hacer depositada en el taladro donde termina el proceso de gasificación química, para dar lugar a la emulsión gasificada.

La gasificación dura entre 15 a 20 minutos, tiempo en el cual consigue un esponjamiento promedio de un 15%, llenando todos los espacios disponibles del taladro.

La emulsión gasificada tiene una densidad que puede variar de 1,15 a 1,05 g/cm³, ajustable a las condiciones del terreno.

El diámetro crítico de la emulsión gasificada es de 22 mm, pero es recomendable usarlo en taladros de diámetro mayor a 45 mm.

Sus principales características de la emulsión bombeable gasificada son.

Tabla 4

Características de la emulsión bombeable gasificada

Densidad	1.05 – 1.15 g/cm ³
VOD	3600 – 4000 m/s
Energía	857.8 cal/gr
Presión	79.6 KBar
Volumen de gases	949.5 L/kg
Potencia relativa peso	94.9 %
Potencia relativa volumen	133.8 %
Balance de oxígeno	-6
Vida útil (Shell life)	7

Fuente: Elaboración propia

Los aditivos de gasificación constan de dos soluciones independientes:

- L – 9: Solución acuosa de nitrito de sodio, es la que provee de las burbujas de N₂, el porcentaje de dosificación depende de la densidad final que se quiera obtener. Su densidad es de 1,06 g/cm³.
- N – 17: Solución de ácido acético al 50%, regula la velocidad de formación de las burbujas de N₂, el porcentaje de dosificación depende de la temperatura de la matriz. Su densidad es 1,06 g/cm³.

De acuerdo con la temperatura que registre la matriz el operador del equipo UBT debe ingresar al PLC el porcentaje necesario del aditivo, de acuerdo con la Tabla 5, siguiente:

Tabla 5

% ácido acético versus temperatura

Temperatura °C	N – 17 %
35	0.28
30	0.41
25	0.53
20	0.65
15	0.83
10	1.11
5	1.46
0	1.67

Fuente: Elaboración propia

Sus principales sistemas y componentes del sistema para emulsiones bombeables gasificadas son:

- Módulo UBT Unidad de bombeo para túneles: Consiste en un módulo de carguío montado en un vehículo, que está conformado por cinco grupos de sistemas, mecanismos y receptores interconectados que al ser programados cumplen con la dosificación optima de la emulsión matriz y los aditivos al taladro
- Receptores: Consta de un tanque de emulsión matriz, con diferentes capacidades (2,000 kg.); asimismo consta de 2 tanques de aditivos, con capacidad cada uno de 60 litros y un tanque de agua con capacidad de 80 litros que tiene como función de lubricador (anillo lubricador y limpieza).
- Sistema de bombas: Consta de Bomba de cavidad progresiva; una bomba de pistón doble, 2 bombas dosificadoras de diafragma.
- Sistema de Poder consta de
 - Una fuente de poder
 - Protectores diferenciales
 - Luces piloto
 - Pulsador de parada de emergencia
 - Y conector de alimentación de energía.
- Gabinete de control consta de:
 - Panel de control táctil.
 - Controlador PLC.
 - Módulos de señales y comunicación del panel y la impresora.
 - Selectores y pulsadores
 - Impresora para impresión de los reportes de operación y de fallas en la operación.
- Sistema de sensores.
 - De presión (psi), para sistema de bombeo de matriz y alarma.

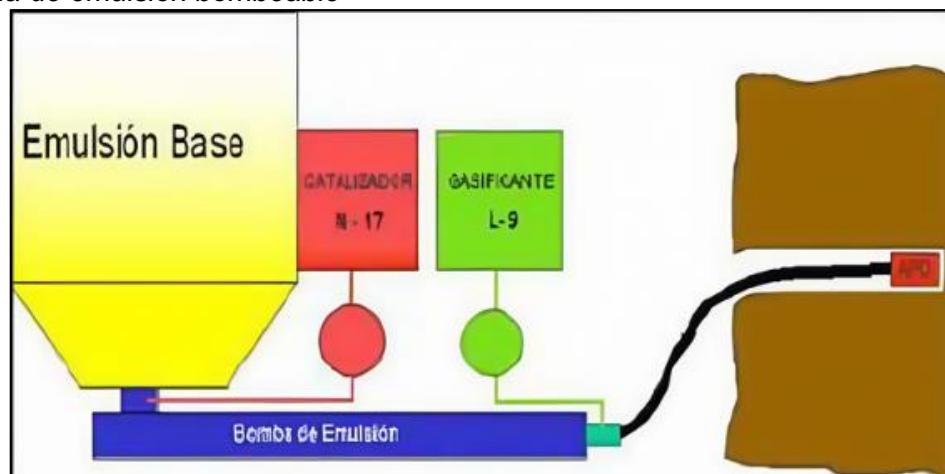
- De temperatura (C), para sistema de bombeo de matriz y alarma.
- De velocidad de bombeo (rpm), para sistema de bombeo de matriz.
- De flujo (ml/min.), para sistema de dosificación de aditivos.

Para el funcionamiento del sistema: Antes de operar el equipo se debe hacer una verificación visual del estado en que se encuentra el equipo y el stock de la matriz, aditivos y del agua.

- Activado el equipo: Se verifica el encendido del gabinete de fuerza, panel de control y bombas dosificadoras de los aditivos y el agua.
- En la pantalla de operación de bombeo se ingresa los datos del disparo y de perforación (kg a cargar y tipo de taladro).
- Iniciar el bombeo presionando el pulsador de encendido.
- Una vez vaciada la cantidad de carga programada al taladro, automáticamente para y la manguera debe posicionarse en el siguiente taladro para reiniciar el bombeo del producto.
- Faltando pocos taladros para finalizar el carguío del frente, en el panel de control se selecciona la opción del tipo de carga carga/limpieza.
- El equipo con la ayuda del agua de limpieza se empuja el producto hasta dejar vacía la manguera.

Figura 5

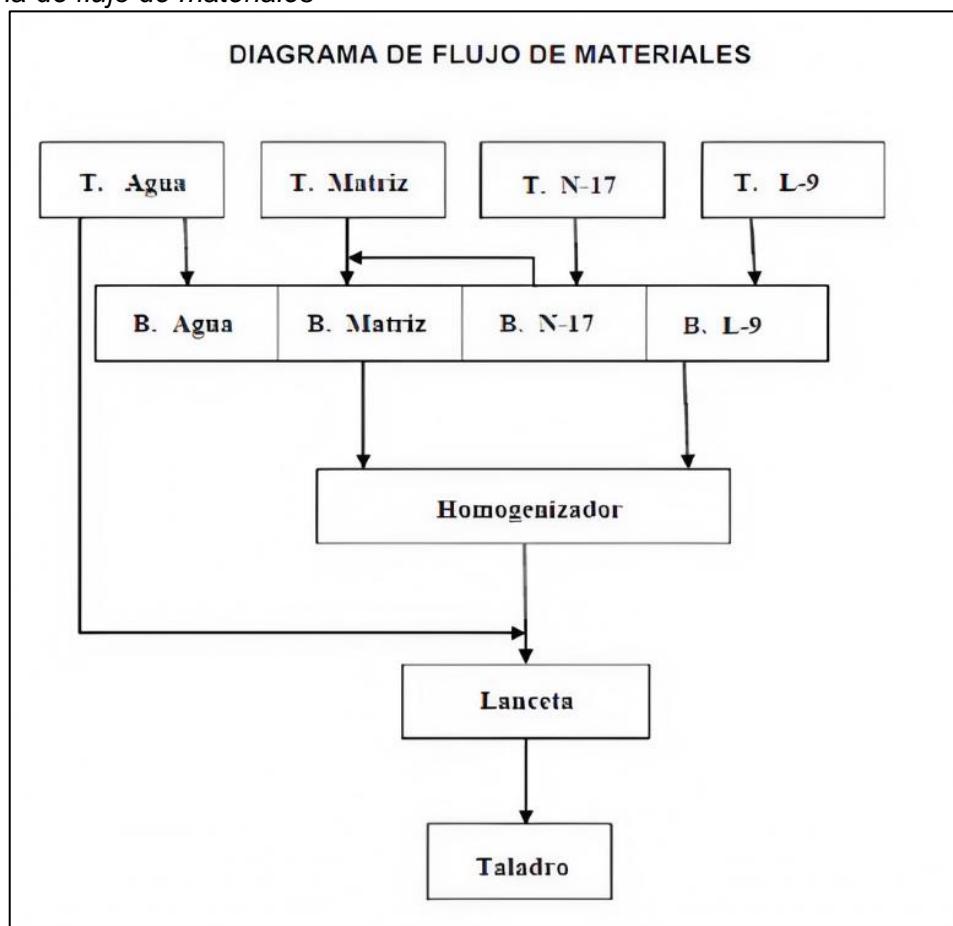
Esquema de emulsión bombeable



Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

Figura 6

Diagrama de flujo de materiales



Fuente: Elaboración propia

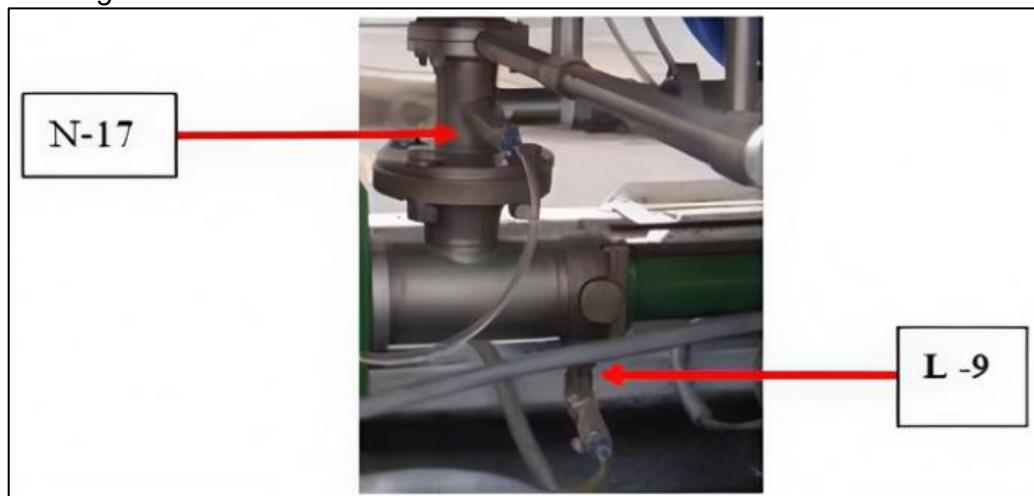
2.1.2.2.1 Proceso de gasificación. El objetivo es transformar la emulsión matriz en un producto explosivo, lo que se logra sensibilizando la matriz con burbujas de N₂, producto de la reacción del nitrito de sodio y el nitrato de amonio.

La mezcla de los aditivos con la matriz se realiza de la siguiente manera:

- El aditivo N-17 (ácido acético) se añade a la matriz, entre el paso del tanque de la matriz a la bomba de cavidad progresiva y el aditivo L-9 en la entrada de la bomba de cavidad progresiva.
- El proceso de gasificación se efectúa mediante la mezcla íntima de los productos en el homogenizador, donde se inician las reacciones químicas para la producción de burbujas de nitrógeno.
- Posteriormente se inicia las reacciones químicas y la producción de las burbujas de nitrógeno.

Figura 7

Proceso de gasificación de emulsión



Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

2.1.2.2.2 Catálisis. El ácido acético sirve de catalizador de acuerdo con el mayor o menor porcentaje que se dosifique, aumentará o disminuirá la velocidad de reacción.

Efecto de la temperatura: Aumenta o disminuye la cinética del proceso de gasificación, con el aumento de temperatura de la matriz y viceversa. En la tabla 6 se muestra la velocidad de gasificado a una temperatura de 20° C la densidad inicial de la matriz es de 1.37 g/cm

Tabla 6

Velocidad de gasificación a 20 °C

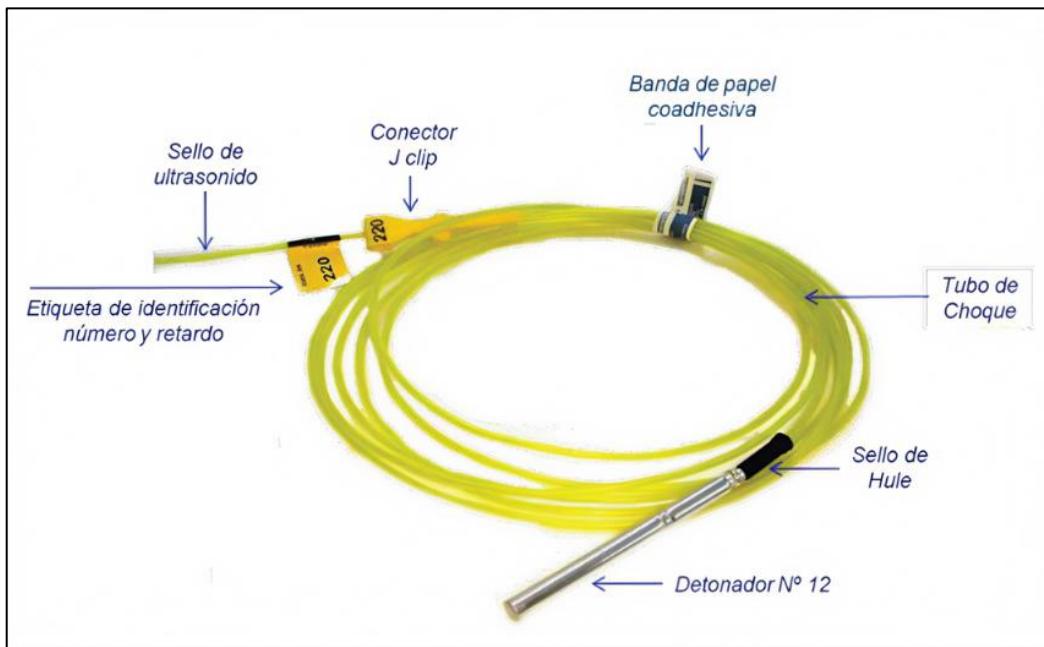
L - 9 %	N - 17 %	Densidad a 15 minutos	Densidad final
0.5	0.5	1.17	1.14
0.6	0.5	1.14	1.10
0.7	0.5	1.10	1.04
0.6	0.6	1.10	1.08
0.5	0.6	1.16	1.15
0.5	0.7	1.15	1.14

Fuente: Elaboración propia

2.1.2.3 Detonadores no eléctricos. Para solventar el principal problema del detonador eléctrico, en 1976 se desarrolla el sistema no eléctrico NONEL. En este sistema no existe ningún elemento eléctrico, por lo que es totalmente inerte a cualquier fenómeno electromagnético.

Figura 8

Esquema de un detonador no eléctrico



Fuente: ENAEX

El detonador no eléctrico contiene un elemento de retardo, una carga primaria y una carga base, igual que el detonador eléctrico. Sin embargo, el elemento de retardo se inicia en este caso gracias a una onda de choque de baja intensidad que viaja a través de lo que se conoce como tubo de choque o de transmisión. Este tubo de polietileno, muy fino pero muy resistente a los esfuerzos normales de tracción y de abrasión durante la carga, contiene un leve revestimiento interior de mezcla explosiva (octógeno – aluminio) que le permite transmitir una onda de detonación de baja intensidad a una velocidad de unos 2,100 m/s. La intensidad de la onda es tan baja que el ruido que genera es tolerable asimismo el tubo no se destruye ni produce daños a su alrededor durante el uso. Este tubo de choque normalmente es iniciado a través de una línea de cordón detonante o como también mediante un explosor especial. Véase figura 8.

Es un sistema fiable y muy seguro en su manejo. Su gran desventaja es la imposibilidad de verificar el circuito antes de realizar el disparo. La precisión de tiempos es similar a la de los detonadores eléctricos, muestran una dispersión en general aceptable, pero insuficiente para las aplicaciones que requieren una precisión exacta. Internamente

está cubierto por una sustancia reactiva que al ser activado conduce una onda de choque a una presión y temperatura suficiente para iniciar al detonador Fulminante Nº 12.

2.1.2.4 Detonador electrónico. Representa el último desarrollo en materia de sistemas de iniciación. El detonador se compone de un elemento electrónico que se comunica con las unidades de programación y de disparo mediante dos hilos de cobre, un condensador eléctrico, una cerilla pirotécnica, una carga primaria y una carga base. Todos los componentes se encuentran también encapsulados y sellados en un casquillo de aluminio. Los extremos de los hilos de conexión van insertados en una pinza especial que se cierra fácilmente en la línea de disparo, tal como se muestra en la Figura 9. En este sistema, un elemento electrónico gestiona los tiempos de retardo, verifica el circuito y ejecuta el disparo a voluntad del disparador. Las ventajas de este tipo de detonadores son muchas:

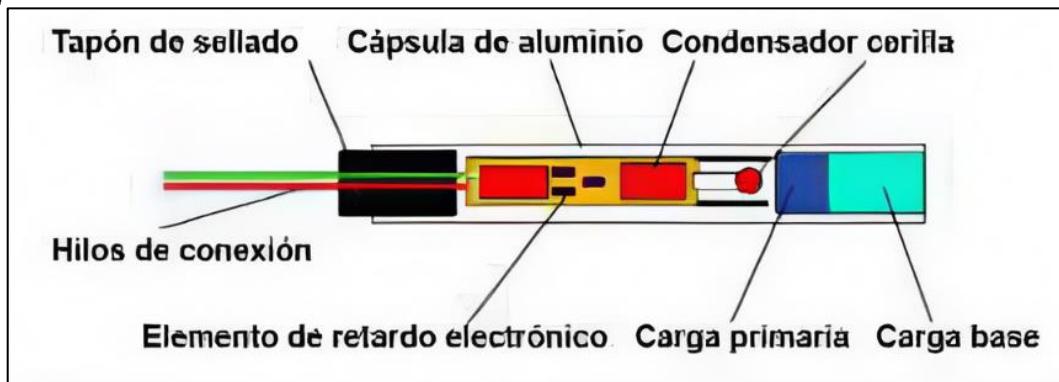
- Seguridad antes del disparo: Se procede a la verificación total del sistema.
- Seguridad de manipulación: sólo se puede disparar con un explosor compatible con los detonadores empleados. No se pueden iniciar mediante ningún otro medio eléctrico, como explosores convencionales o baterías, ni se puede producir su encendido accidental debido a corrientes extrañas en el terreno o emisoras de radiofrecuencia, etc.
- Precisión.
- Flexibilidad total en el empleo de tiempos y programación.

Estas dos últimas ventajas son claves en procesos de reducción de vibraciones y optimización de la fragmentación, ya que las vibraciones terrestres producidas pueden ser previstas y modificadas porque no hay una superposición de ondas y se puede diseñar mejor la secuenciación de la voladura, además la precisión del sistema implica una mejor cooperación entre taladros.

La mayor desventaja de este tipo de detonadores es su mayor costo en comparación con otros sistemas de iniciación.

Figura 9

Esquema de un detonador electrónico



Fuente: ENAEX

2.1.2.5 Cordón detonante. Se trata de una línea flexible compuesta de un núcleo de pentrita (PETN) recubierto de diferentes capas textiles y plásticas aislantes de protección. En función del gramaje de pentrita por metro se emplea para diferentes tareas:

- 3 g/m - 6 g/m: Línea maestra de iniciación de detonadores no eléctricos.
- 10 g/m - 40 g/m: Continuidad en condiciones difíciles de carga. Iniciación en superficie de barrenos.
- 70 g/m - 100 g/m: Voladuras de contorno.

Figura 10

Cordón Detonante



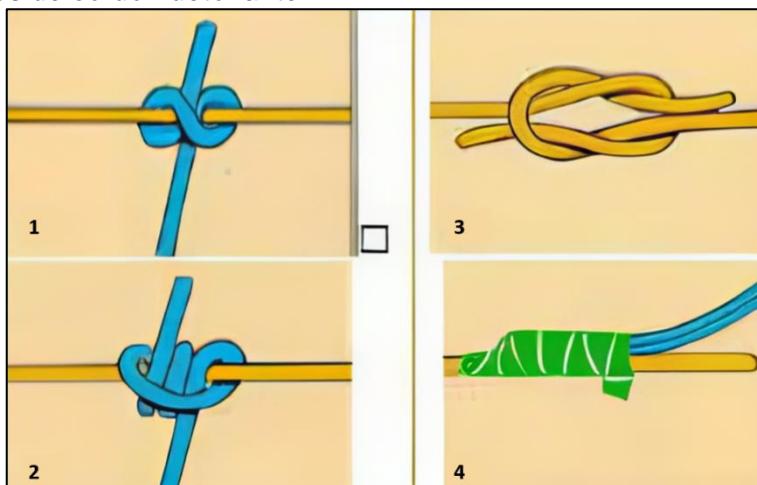
Fuente: ENAEX

A continuación, recomendaciones prácticas para un buen amarre del cordón detonante:

- Cuando sea necesario cortar el cordón detonante, se debe emplear un cuchillo o navaja de hoja lisa y bien afilada al aire libre, sin ejercer ningún esfuerzo sobre el cordón.
- También se puede emplear una navaja de hoja de acero inoxidable. Una vez realizado el corte, los extremos del cordón se deben sellar con cinta aislante para impedir que el agua que haya dentro del barreno o en el terreno humedezca la pentrita del interior.
- Al momento de hacer conexiones entre cordón y detonadores o entre líneas de cordón, se deben seguir las recomendaciones de uso del fabricante, estas proponen diversas formas de conexión, todas ellas fiables.

Figura 11

Possibles uniones de cordón detonante



Fuente: ENAEX

- Las conexiones más simples y fiables entre líneas de cordón detonante se realizan encintándolas bien, una junto a la otra de manera paralela, asegurando que estas se solapan al menos 20 cm entre sí.
- Siempre se debe tener en cuenta la direccionalidad de la detonación al encintar las líneas.
- Se debe asegurar que las líneas de cordón estén bien extendidas y no se formen lazos o se crucen para evitar fallas por cortes.

- Cuando se usa cordón detonante dentro del taladro, es práctica habitual anudar el cordón de un carrete que se termina a mitad de carga con el cordón del carrete que se comienza a usar. Un nudo simple, tipo 8 y bien apretado, es una manera fiable (Figura 11) y sencilla para anudar el carrete que se termina.
- Los detonadores, generalmente, se encintan a las líneas de cordón en paralelo. En este caso nunca se deberá encintar en el extremo mismo del cordón ya que podría estar húmedo y con poca sensibilidad, habría que dejar que el cordón cuelgue por detrás del detonador unos 15 cm. El extremo sobrante se curva en 180° y se encinta al detonador.
- Las uniones entre detonadores y líneas de cordón más fiables son las que se hacen de manera axial ya que el detonador transmite mejor y a mucha mayor distancia su energía de choque en esa dirección. Para esto, se encinta el detonador al extremo del cordón, asegurando que la cápsula del detonador está bien alineada con el extremo del cordón. Este tipo de unión requiere un poco más de tiempo en su preparación, pero es la manera más segura de unión. Es necesario tener siempre en cuenta la direccionalidad de la detonación.

2.1.2.6 Booster multiplicadores. Los multiplicadores (también conocidos como boosters) se utilizan para iniciar explosivos de baja sensibilidad, como pueden ser Anfo, hidrogeles o emulsiones, si se emplean encartuchados o a granel. Los multiplicadores pueden ser de diferentes composiciones, como por ejemplo TNT, Pentolita, etc. Son explosivos de alta densidad, potencia, velocidad y presión de detonación, siempre sensibles al detonador.

Son cilindros sellados de plástico que contienen el explosivo en su interior. Tienen un agujero central en su eje longitudinal que permite el paso de los cables del detonador y/o de una línea de cordón detonante. Además, disponen de uno o dos orificios para insertar en ellos los detonadores.

Debido a su densidad y sus propiedades explosivas son el medio de iniciación más fiable. Véase figura 12.

Figura 12

Booster de TNT



Fuente: ENAEX

2.1.2.7 Mecha de seguridad. La Mecha de Seguridad es un accesorio de voladura y un componente del sistema tradicional de iniciación. Se caracteriza por ser flexible y posee un núcleo central de pólvora, el cual transmite el fuego hasta el fulminante, a una velocidad uniforme.

Figura 13

Mecha de seguridad



Fuente: ENAEX

Figura 14

Especificaciones técnicas – emulsiones encartuchadas

	EMULNOR® 500	EMULNOR® 1000	EMULNOR® 3000	EMULNOR® 5000
Densidad relativa (g/cm³)	0,90 ± 0,15	1,13 ± 0,1	1,14 ± 0,1	1,16 ± 0,1
Velocidad de detonación (m/s)	4 400 ± 300	5 800 ± 300	5 700 ± 300	5 500 ± 300
Presión de detonación (kbar)	44	95	93	88
Energía (kcal/kg)	628	785	920	1010
Volumen normal de gases (l/kg)	952	920	880	870
Potencia relativa en peso (%) (***)	70	87	102	112
Potencia relativa en volumen (%) (***)	77	120	142	159
Sensibilidad al fulminante	Nº 8	Nº 8	Nº 8	Nº 8
Resistencia al agua	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Categoría de humos	Primera	Primera	Primera	Primera

* Velocidad de detonación en tubo de 1 ½ pulgadas de diámetro
** Velocidad de detonación como cartucho de 1 pulgada de diámetro.
*** Potencias relativas referidas al ANFO con potencia convencional de 100.

Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

Figura 15

Especificaciones técnicas – detonadores no eléctricos

DEL FULMINANTE DE RETARDO	FANEL®	DE LA MANGUERA FANEL	FANEL®
Diámetro (mm)	7,3	Material	Termoplástico flexible y de gran resistencia mecánica
Longitud (mm)	60 / 68 / 88 / 92	Diametro (mm)	3,3 ± 0,2
Prueba de esopo,	Min. 11	Longitudes (m)	Variable
Diámetro de perforación (mm)		Color periodo corto	Rojo ó Naranja
Volumen trauzi (cm³)	Min. 34	periodo largo	Amarillo
Resistencia al impacto 2kg / 1m	No detona	Velocidad de onda (m/s)	2 000 ± 200
DEL LA ETIQUETA	FANEL®	DEL CONECTADOR PLÁSTICO TIPO "J"	FANEL®
Material	Plástico	Material	Plástico
Color de letra	Negro	Color periodo corto	Rojo
Color de fondo	En función del tiempo de retardo	periodo largo	Azul
ESCALA DE TIEMPOS NOMINALES DE RETARDO:			
Serie Estándar			
Periodo corto	Periodo corto	Periodo largo	Periodo largo
Nº serie	TDR (ms)	Nº serie	TDR (ms)
0	0	11	300
1	25	12	350
2	50	13	400
3	75	14	450
4	100	15	500
5	125	16	600
6	150	17	700
7	175	18	800
8	200	19	900
9	225	20	1 000
10	250		

Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

Figura 16

Especificaciones técnicas – cordón detonante

	3P	3 PE	5P	5 PE	8P	8 PE	10 P	10 PE
Peso de carga (g/m)	Min. 4	Min. 4	Min. 5	Min. 6	Min. 8	Min. 8	Min. 10	Min. 10
Resistencia a la tracción (kg)*	Min. 60	Min. 70	Min. 60	Min. 70	Min. 60	Min. 70	Min. 60	Min. 70
Velocidad de detonación (m/s)	Min. 6800	Min. 6800	Min. 7000					
*Fuerza de rotura evaluado en equipo de tracción a una velocidad de 65mm/min.								
Cordón detonante-Pentacord® Especial 80 P								
Color del cordón detonante 80 P	Blanco							
Peso carga (g/m)	80							
Sensibilidad al fulminante	N° 6							
Velocidad de detonación (m/s)	Min. 6 800							

Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

2.1.3 Factores que afectan el rendimiento de los explosivos:

Los factores que afectan al rendimiento son el grado de acoplamiento, la carga lineal, la impedancia característica y el diámetro de carga.

2.1.3.1 Grado de acoplamiento. El trabajo potencial del explosivo es función directa del calor total de explosión. Sin embargo, la forma en que se emplea esta energía depende de cómo se carga el explosivo en el taladro.

La utilización máxima de esta energía se produce cuando el explosivo llena por completo el volumen del taladro perforado. Esto se da en la carga de explosivos a granel. De no ser así, la cámara de aire entre explosivo y las paredes del taladro reduce sensiblemente la presión de detonación efectiva.

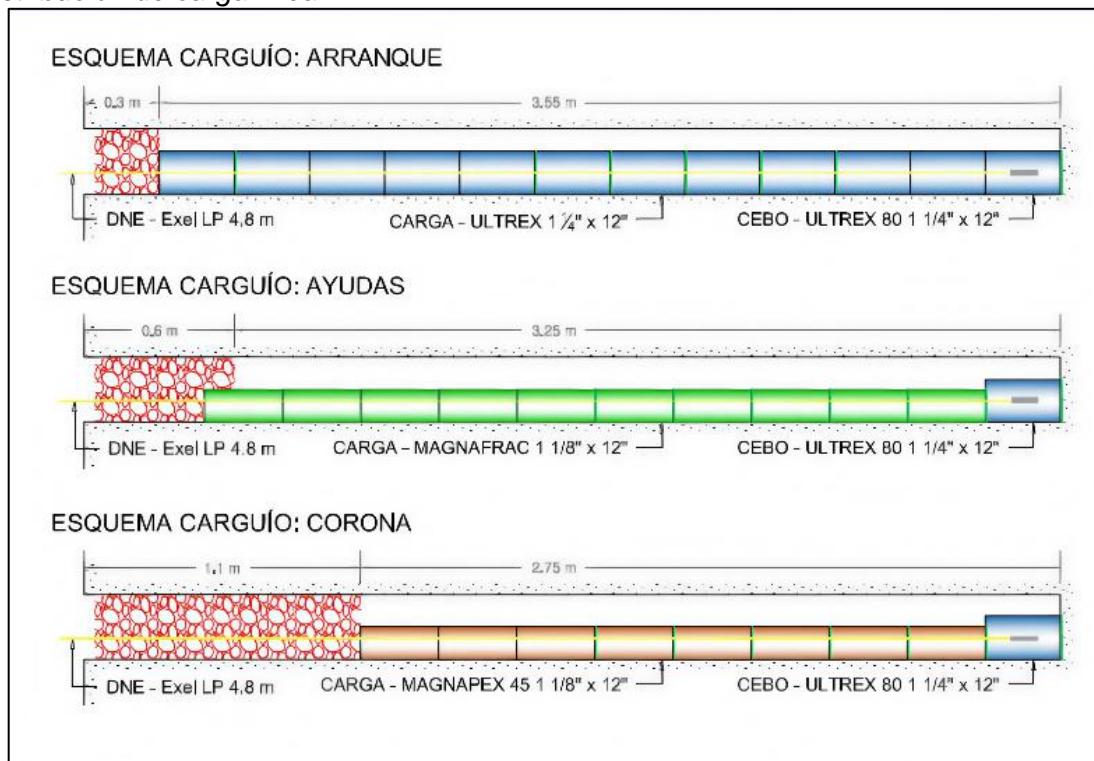
Este parámetro se puede expresar como el porcentaje de la sección transversal del taladro que queda cargada.

En el caso de usar emulsión encartuchada, habitualmente usamos los atacadores de madera para confinar los cartuchos, de manera tal, que haya contacto entre cartuchos y se reduzca el espacio entre los cartuchos propiamente y la pared del taladro, sin embargo, para los taladros de la corona, (carga desacoplada), se preparan “cañas”, el cual consiste en unir cartuchos, pero, separados entre sí aproximadamente 30 cm.

2.1.3.2 Carga lineal. Se refiere a la carga de explosivo por metro lineal de taladro. Es una medida de concentración de energía en el taladro. Depende de la densidad del explosivo, la profundidad del taladro (en explosivos compresibles, sensibilizados con gas), el diámetro de la carga, la calidad del macizo rocoso y la presencia de agua en los taladros. Véase figura 17.

Figura 17

Distribución de carga lineal



Fuente: Departamento de P&V San Cristóbal

2.1.3.3 Impedancia. Es el producto de la velocidad de detonación por la densidad del explosivo.

Explosivos que tienen una impedancia característica superior a la impedancia de la roca transfieren más energía. La impedancia de la roca es el producto de su densidad por su velocidad sísmica (V_p).

2.1.3.4 Diámetro de carga. La velocidad de detonación del explosivo se incrementa con el diámetro de la carga hasta un valor óptimo. También afecta, al grado de acoplamiento y a la carga lineal.

2.2 Marco conceptual

Densidad:

Es la relación entre la masa del explosivo y su volumen, generalmente expresada en g/cm³ o kg/m³. Afecta el rendimiento y la energía liberada en la voladura, determinando la efectividad en la fragmentación del material.

Detonación:

Es una reacción química rápida que libera una gran cantidad de energía en forma de gas y calor, generando una onda de choque a través del material explosivo. Este proceso es utilizado para romper o fragmentar materiales sólidos.

Emulsiones explosivas:

Son mezclas homogéneas de oxidantes y combustibles en fase dispersa, estabilizadas por un emulsificador. Se utilizan en minería por su alta energía y estabilidad antes de la detonación.

Energía:

La energía explosiva es calculada usando técnicas basadas en las leyes de la termodinámica, siguiendo estrictamente principios químicos y matemáticos. La energía de los explosivos se puede expresar en Kcal/kg. o MJ/kg.

Explosivo:

Es un producto químico que presenta un potencial elevado de energía, que tiene una reacción instantánea con gran violencia, debido a que acciona un fulminante o está dado por otro estímulo externo.

Potencia:

Es desde el punto de vista industrial una de las propiedades más importantes de un explosivo, define la cantidad de energía liberada para fracturar las rocas.

Presión de detonación:

Es la fuerza explosiva ejercida en la onda de choque generada por una detonación dentro de un explosivo. Se mide en Pascales (Pa) y está relacionada con la velocidad de detonación y la densidad del explosivo.

Resistencia al agua:

Es la capacidad de un material para evitar la penetración de agua en su estructura.

Esto previene daños por humedad, corrosión o degradación del material.

Sensibilidad:

Se refiere a la facilidad con que un explosivo puede ser detonado por factores externos como impacto, fricción o calor. Es crucial para la seguridad, ya que explosivos más sensibles requieren mayor cuidado en su manejo y almacenamiento.

Velocidad de detonación:

Es la rapidez con la que se propaga la onda de detonación a través de un explosivo. Se mide en metros por segundo (m/s) y es un factor clave en la eficiencia de la voladura, ya que influye en la fragmentación de la roca y la energía liberada. Una VOD adecuada asegura que el explosivo genere una fractura eficiente, minimizando la energía desperdiciada.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Unidad de estudio

3.1.1 Ubicación y accesibilidad

La Mina San Cristóbal, perteneciente a la U.E.A. Yauli, está ubicada en la parte suroeste del Distrito de Yauli, Provincia de Yauli, Departamento de Junín, en el Perú. Se encuentra en el flanco este de la Cordillera Occidental de los Andes centrales del Perú; a 110 km, en línea recta, de la ciudad de Lima.

Altitudes promedio: Entre los 4150.00 - 4,700.00 m.s.n.m.

Límites:

- Por el norte, con la Compañía Minera Volcán.
- Por el sureste, con la Unidad de Producción de Andaychagua.
- Por el este, con la Comunidad Campesina de Huayhuay.
- Por el sur, con la laguna de Páncar.
- Por el oeste, con la laguna de Pomacocha.

Coordenadas geográficas:

- Longitud Oeste: 76° 05'
- Latitud Sur: 11° 43'

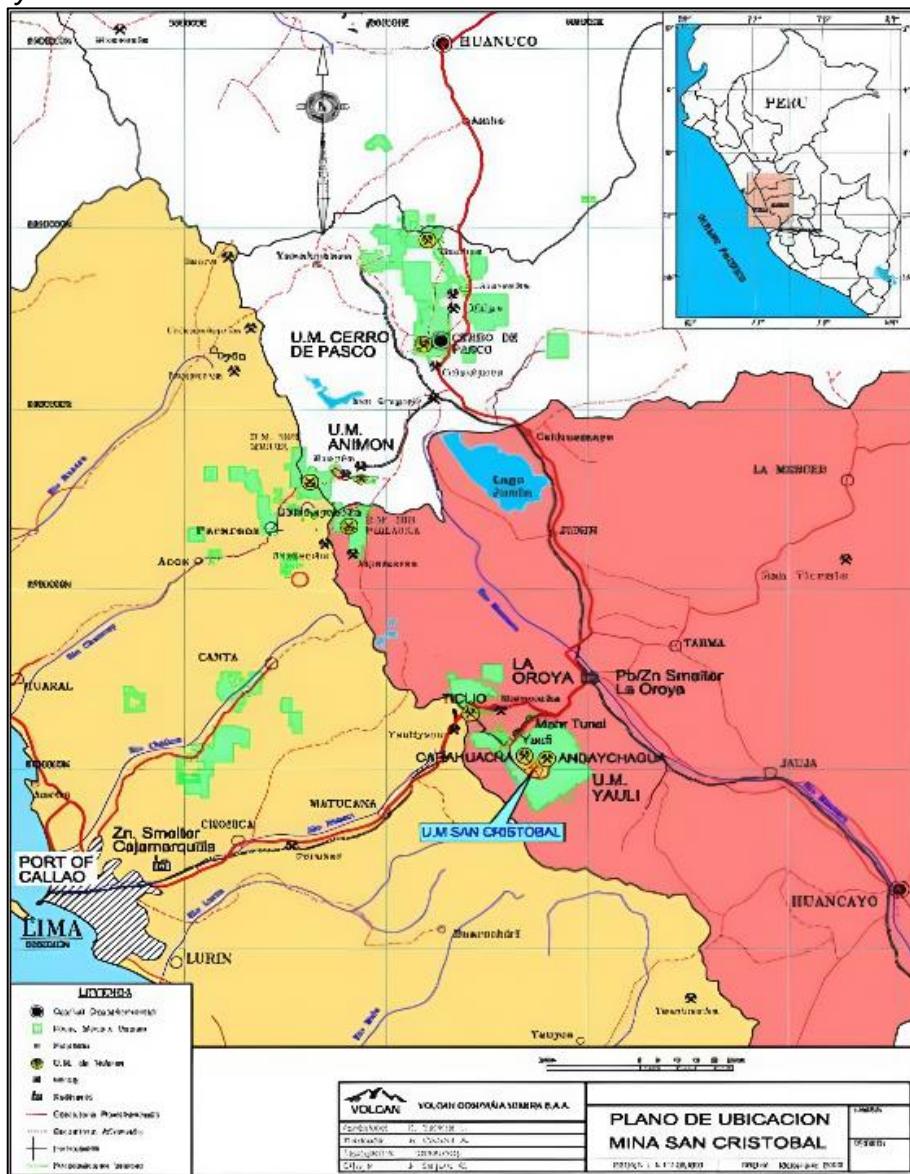
Es fácilmente accesible, utilizando la carretera central, de la cual, cerca de la localidad de Pachachaca, parte un ramal de 20 kilómetros que conduce a San Cristóbal; además, el ferrocarril central tiene una estación en Yauli a 12 kilómetros del área.

El acceso desde la ciudad de Lima a la Mina San Cristóbal se realiza a través de la ruta principal siguiendo la Carretera Central: “Lima - La Oroya”, “La Oroya – Mahr Túnel – Yauli - Mina Carahuacra - Mina San Cristóbal”.

El tiempo promedio de viaje en la ruta indicada varía aproximadamente entre 4 a 6 horas dependiendo mucho de las condiciones climáticas y el tráfico en la ruta indicada.

Figura 18

Ubicación y accesibilidad de la mina San Cristóbal



Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.2 Geología general

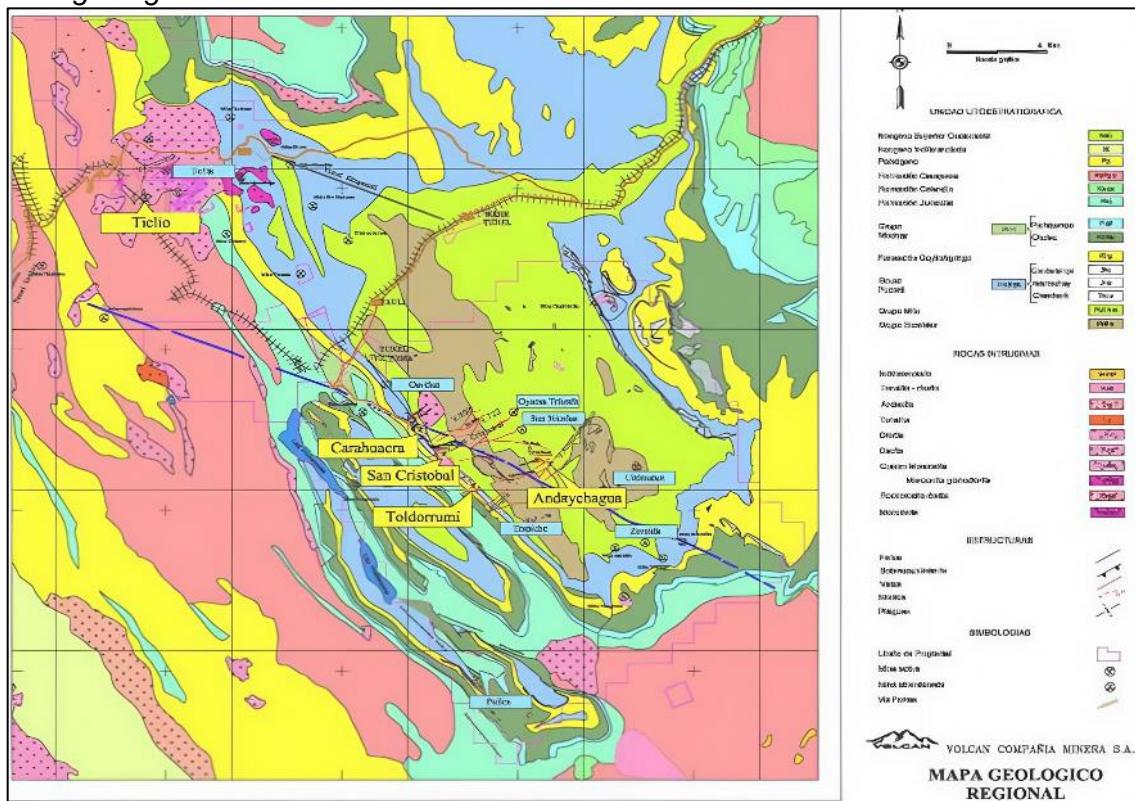
3.1.2.1 Geología regional. El distrito minero de San Cristóbal está localizado en la parte suroeste de una amplia estructura regional, de naturaleza domática que abarca íntegramente los distritos de San Cristóbal y Morococha conocida como el complejo Domal de Yauli.

El Paleozoico tiene dos pisos, el Inferior formado por el grupo Excésior y el Superior por el grupo Mitu; el Excésior está aflorando a lo largo del anticlinal de Chumpe en la parte

oeste del domo y en el anticlinal de Ultimátum hacia el este; el Mitu aflora en la mayor parte del domo.

Figura 19

Plano geológico de mina San Cristóbal



Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.2.2 Geología local.

3.1.2.2.1 Secuencia litológica.

- Silúrico – Devónico - grupo Excélsior

El grupo Excélsior está conformado por rocas muy antiguas que afloran en el área e integran al núcleo del anticlinal Chumpe, está formado por filitas, con intercalaciones de cuarcitas, vulcanitas verdes y bancos calcáreos marmolizados con fósiles.

- Pérmico - grupo Mitu

Encima de las rocas del grupo Excélsior, existen una sucesión volcánica, formada por rocas andesíticas y dacíticas diseminados, brechas, conglomerados y tuvos.

- Triásico Superior Liásico - grupo Pucará

Este grupo es una agrupación de facies calcáreas, se ubica en la discordancia encima del grupo Mitu, este grupo se divide en tres formaciones.

- Formación Chambará (Triásico Superior)

Está compuesta por calizas, dolomitas, calizas dolomíticas, separadas por capas calcáreo-arcillosas y tufo de pocos centímetros, las rocas calcáreas presentan un color gris claro a negro, con mayor porcentaje de materia orgánica.

- Formación Aramachay (Liásico: Hetangiano-Sinemuriano)

Está compuesta por pizarras limosas, seguidamente de areniscas de grano fino, calizas y de Chert en capas.

- Formación Condorsinga (Liásico Toarciano)

Se compone de oolíticas o bioclásticas en su mayoría, Chert abundante en la mitad inferior de la formación; intercalaciones tufáceas de color gris claro, de grano fino a medio, son comunes.

- Grupo Goyllarisquizga (Cretácico Inferior)

Sobre el grupo Pucará yace en discordancia paralela el grupo Goyllarisquizga, el cual se depositó en dos fases sucesivas.

La primera compuesta por depósitos de granulometría fina a muy fina, de facies llanura aluvial con pelitas rojas y escasas intercalaciones de areniscas de facies de desbordamiento, depositadas en un ámbito climático semiárido mostrado en la fuerte oxidación de las pelitas.

En San Cristóbal, su potencia alcanza 100 metros, el grupo Goyllarisquizga ha sido atribuido al Cretácico Inferior-Valanginiano-Aptiano.

- Grupo Machay (Cretácico Medio)

- Formación Chúlec:

Esta formación es totalmente carbonatada, litológicamente está conformada por una alternancia de calizas y margas de facies de plataforma externa; es muy fosilífera y constituye la primera formación cretácica de los Andes Centrales correctamente datada, toda la serie en su conjunto está intensamente

bioturbada, en potencia varía desde 250 m justo al SO de Morococha a 350 m en Carahuacra.

- Formación Pariatambo:

Esta formación es fácil de localizar en el paisaje por su coloración negra característica, escasa resistencia a la erosión y litología monótona está constituida por una alternancia margocaliza de pequeños bancos claros y oscuros generalmente muy bituminosos, señalados por un olor fétido muy pronunciado.

- Formación Jumasha:

Concordantemente sobre la formación Pariatambo, se encuentra la formación Jumasha. Litológicamente es la más homogénea de las formaciones cretácicas expuestas en el domo de Yauli.

3.1.2.3 Geología estructural.

3.1.2.3.1 Plegamiento. La mina Carahuacra se encuentra en el flanco occidental de la estructura regional dominante del domo de Yauli que se extiende longitudinalmente en aproximadamente 35 kilómetros, desde San Cristóbal hasta Morococha, y transversalmente 10 kilómetros; el rumbo promedio de esta estructura es N 40° O.

3.1.2.3.2 Fracturamiento. El fracturamiento en el área de la mina Carahuacra, parece ser el resultado de las fuerzas compresivas e intrusivas que dieron lugar a la formación del domo de Yauli.

3.1.2.4 Geología económica. Después de la última etapa del plegamiento Quechua y la formación de las fracturas de tensión, vino el período de mineralización; soluciones residuales mineralizantes originadas probablemente de los stocks de monzonita cuarcífera invadieron el área dando lugar a la formación de vetas, mantos y cuerpos; sin embargo, es necesario aclarar el origen de los mantos y cuerpos, fueron rellenados o reemplazadas indistintamente por soluciones hidrotermales, a través de canales alimentadores (feeders).

3.1.2.4.1 Vetas. Las vetas o filones fueron formados primordialmente por relleno de fracturas, son mineralizadas las que se desarrollaron a lo largo de fracturas de tensión, se encuentran ubicados en todo el distrito minero de la unidad, en su gran mayoría se desarrolló en los volcánicos del grupo Mitu.

3.1.2.4.2 Mantos. Los mantos se ubican en el flanco oeste del anticlinal, en la localización de las calizas Pucará.

3.1.2.4.3 Cuerpos. Similar a los mantos se ubican localizados en el flanco oeste del anticlinal, en la localización de las calizas Pucará.

3.1.3 Métodos de minado

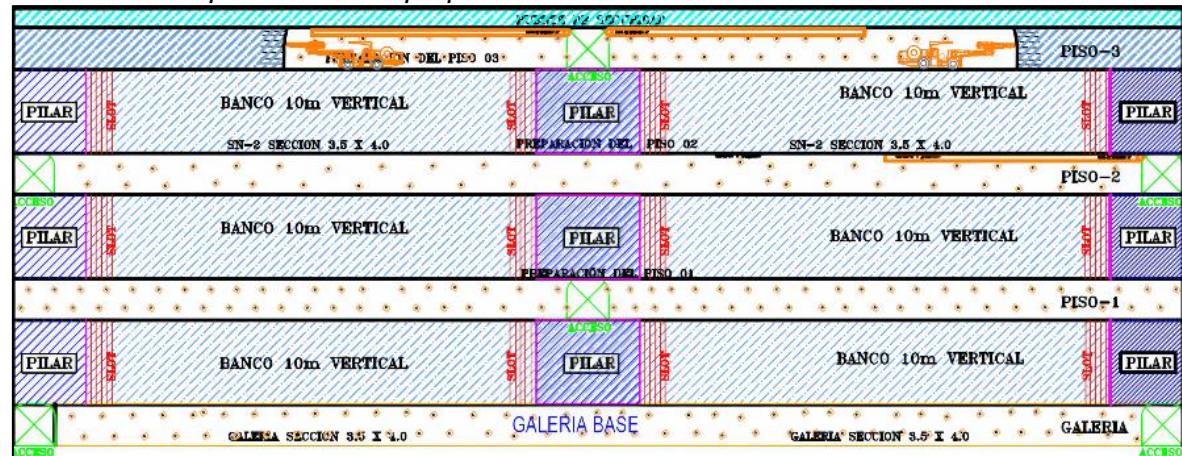
3.1.3.1 Bench and fill. Es un método de minado conocido también como banqueo por niveles, se realiza con bancos de 10 metros, medidos del techo del nivel inferior al piso del nivel superior, en la perforación se utiliza equipos simba S7D, y para la voladura se emplea el explosivo Emulnor de 3000 y Emulnor de 1000.

El ciclo de minado bench and fill se desarrolla por medio de 6 trabajos los cuales son mencionados a continuación:

3.1.3.1.1 Perforación en preparación de subnivel. La perforación de frentes de avance se realiza con equipos jumbo Boomer S1D. En la siguiente Figura, se muestra la actividad de la perforación de preparación del subnivel, mina San Cristóbal.

Figura 20

Actividad de la perforación de preparación del subnivel

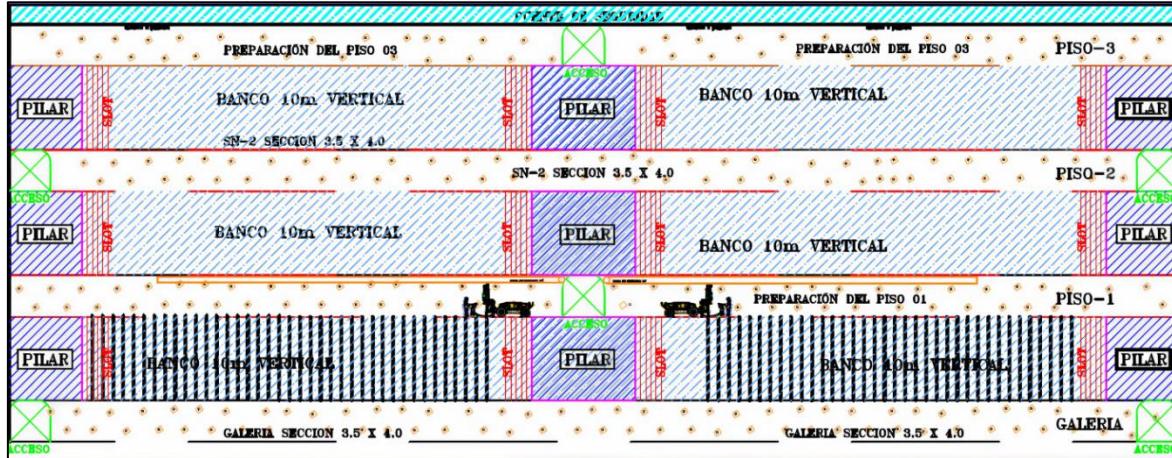


Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.3.1.2 Perforación de los taladros largos de subnivel a subnivel. La perforación de los taladros largos de los tajeos se realiza con equipos jumbos simbas S7D. En la siguiente figura, se muestra la actividad de la perforación de taladros largos tajeos, mina San Cristóbal.

Figura 21

Actividad de la perforación de taladros largos tajeos

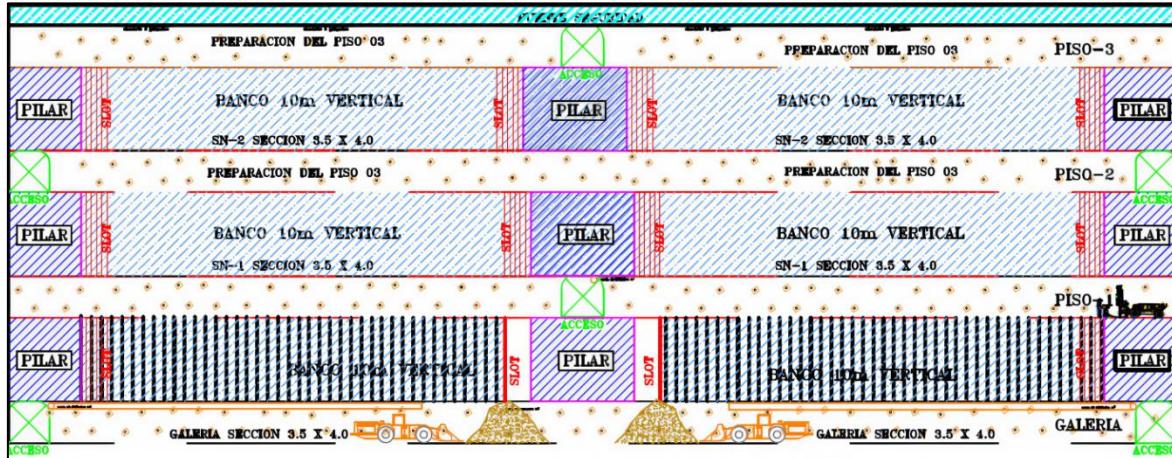


Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.3.1.3 Voladura del slot o cara libre del tajo de producción. Para crear la cara libre del tajo se realiza el diseño de slot, una vez realizada la perforación de los taladros largos, se procede a realizar el carguío de los explosivos Emulnor 3000 y Emulnor 1000. En la siguiente figura, se muestra la actividad de la voladura del slot o cara libre, mina San Cristóbal.

Figura 22

Actividad de la voladura del slot o cara libre



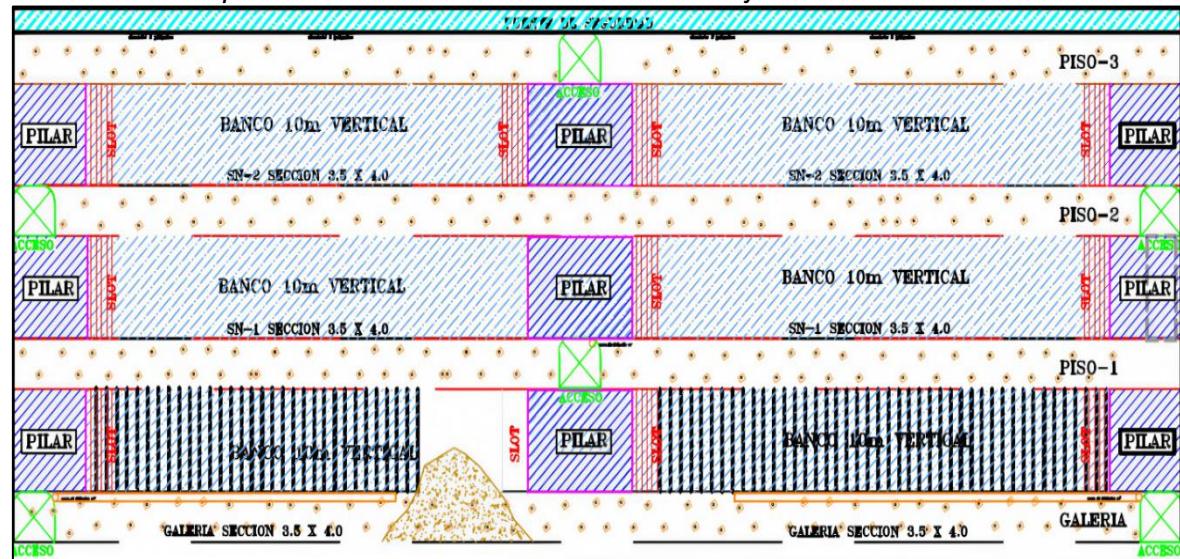
Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.3.1.4 Voladura de las primeras secciones del lado oeste del tajo. Una vez creada la cara libre del tajo se realiza el disparo de las primeras secciones del lado oeste del tajo con los explosivos Emulnor 3000 y Emulnor 1000.

En la siguiente figura, se muestra la voladura de las primeras secciones del lado oeste del tajo, mina San Cristóbal.

Figura 23

Voladura de las primeras secciones del lado oeste del tajo



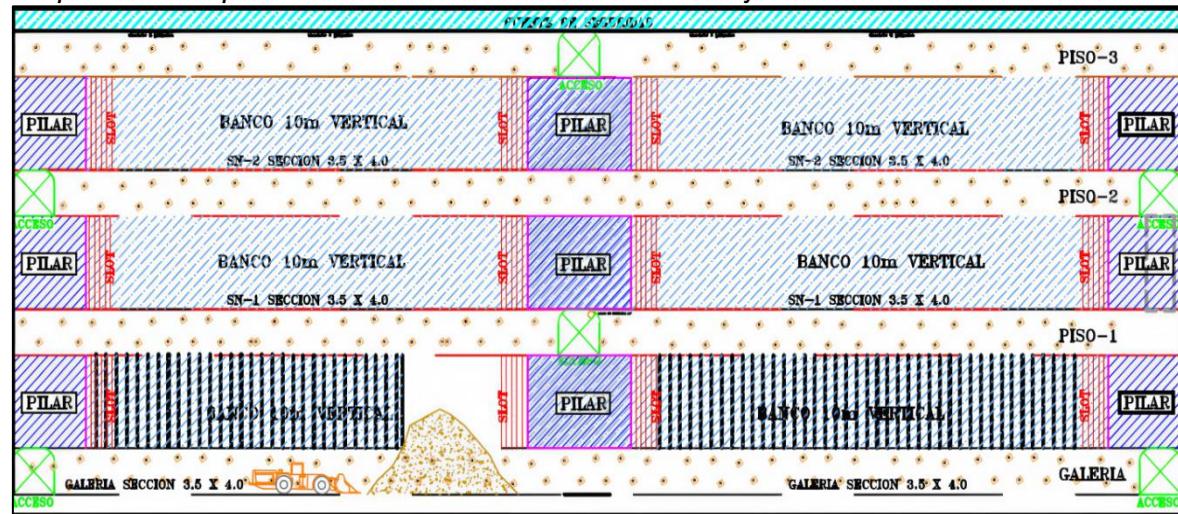
Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.3.1.5 Limpieza de las primeras secciones del lado oeste del tajo. Una vez realizado el disparo de las primeras secciones del lado oeste del tajo con los explosivos Emulnor 3000 y Emulnor 1000, se cuenta con carga acumulada, se procede a los trabajos de limpieza con equipos 5 yd³ en el carguío y con equipos 15 m³ volvo para el transporte de mineral a superficie.

En la siguiente figura, se muestra la limpieza de las primeras secciones del lado oeste del tajo, mina San Cristóbal.

Figura 24

Limpieza de las primeras secciones del lado oeste del tajo



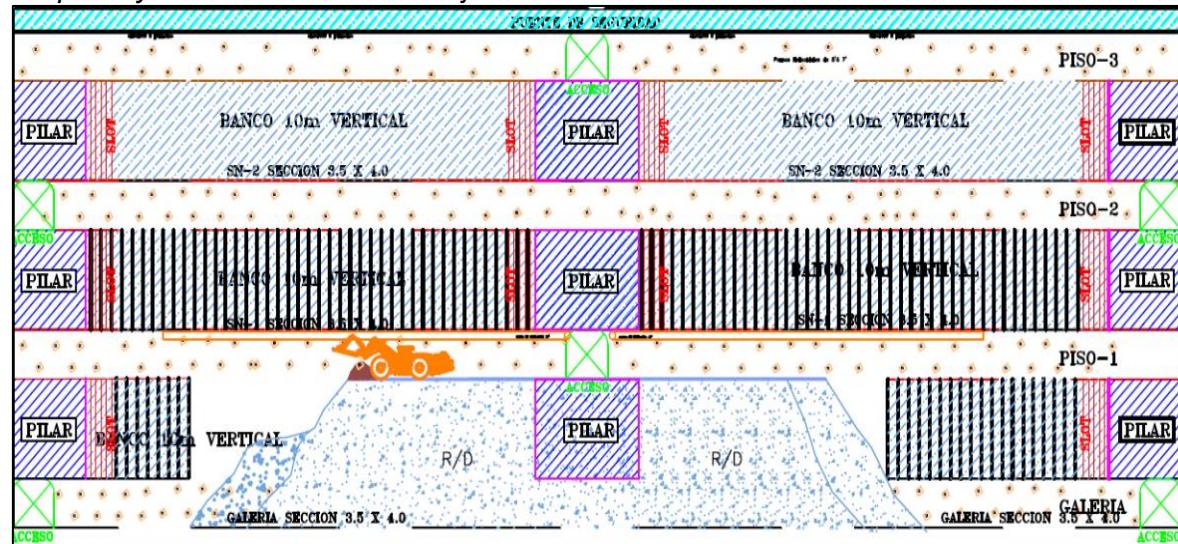
Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.3.1.6 Limpieza y relleno detrítico a los tajeos. Una vez realizada la limpieza con equipos 5yd³ en el carguío y con equipos 15 m³ Volvo para el transporte de mineral a superficie, se procede a llenar de material estéril a los tajeos vacíos producto de la extracción de mineral.

En la siguiente figura, se muestra la limpieza y relleno detrítico a los tajeos, mina San Cristóbal.

Figura 25

Limpieza y relleno detrítico a los tajeos



Fuente: Mina San Cristóbal

3.1.3.2 Operación minera en zona de vetas. Tipo de labores mineras

3.1.3.2.1 Galerías. Estas obras tienen un componente especial de 8' x 8' y se ejecutan bordeando la veta, dado que el lecho de roca es grande y la veta presenta las circunstancias esenciales para no tener un gasto importante de ayuda, en cualquier caso, en el caso de que el territorio sea extremadamente agrietado e inestable, los despliegues se ejecutan idealmente en la caja del suelo alineada con la veta a una buena distancia de 15 metros (llamada by pass) y posteriormente se entra en la veta a través de escalas o ventanas opuestas a ella.

La limpieza de estos frentes se termina con herramientas neumáticas de excavación y pala de 1,5 yd³.

3.1.3.2.2 Chimeneas. Son operaciones verticales de 8' X 8' que imparten visualizaciones de niveles superiores e inferiores con una cota de hasta 50 metros, actúan como funciones de doble negociación y administración (ventilación, establecimiento de líneas, calles, etc.).

3.1.3.2.3 Subniveles. Trabajos de preparación que se realizan de manera uniforme y a través de la veta, que se crea a partir de una pila que pasa sobre un andamio a un nivel específico, para iniciar un pozo y comenzar la estrategia de doble deal para cortar y llenar hacia arriba.

3.1.3.2.4 Tajos. Labor de explotación la que se realiza una vez culminada el subnivel con taladros en realce, la chimenea corta al tajo en dos lados y/o alas (este – oeste).

3.2 Metodología de investigación

3.2.1 Alcance

El alcance de las pruebas es el desarrollo de carguños con emulsión bombeable a granel Emultex PDBG en los frentes de desarrollo con secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m, bajo una metodología diseñada para el uso de este producto.

3.2.2 Metodología de pruebas

La metodología para el desarrollo de pruebas y una posterior implementación de “Carguío de emulsión bombeable Emultex PDBG en frentes” se rige bajo los siguientes pasos:

Línea Base.

- Recopilación de data actual de la operación minera en campo.
- Definición de indicadores claves de rendimiento (KPI's).

Implementación de mejoras.

- Implementación de diseños de carguío con emulsión bombeable Emultex PDBG.

Pruebas en campo.

- Definición de zonas a realizar pruebas de carguío con emulsión bombeable
- Carguío de emulsión bombeable Emultex PDBG en campo
- Recopilación de data en campo pre y post voladura (KPI's, Mediciones con equipo Microtrap e Instantel)

Propuesta de valor.

- Entrega de informe de pruebas y propuesta de valor.
- Cuantificación de los beneficios y ahorros potenciales obtenidos en las pruebas.

Implementación en la operación y mejora continua.

- Implementación de capacitaciones y acompañamiento al personal de la mina.
- Seguimiento a los KPI's implementados y generación de mejoras.

Estas Pruebas constan de dos etapas:

- **Etapa N°1:**

Se realizarán los disparos reemplazando la columna de carga de emulsión encartuchada por la mezcla explosiva Emultex PDBG en el frente, con los diseños de perforación actuales.

- **Etapa N°2:**

Carguío con la mezcla explosiva Emultex PDBG en el frente con los diseños optimizados propuestos, buscando realizar el máximo de carguíos por turno.

3.3 Resultados de pruebas de carguío de Emultex PDBG – Etapa N^a1

3.3.1 Voladuras realizadas con emulsión bombeable Emultex PDBG

Durante el desarrollo de pruebas de Carguío de emulsión bombeable Emultex PDBG en frentes se realizó un total de 49 voladuras en frente, las cuales fueron realizadas en secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m; según el requerimiento y coordinación del área de P&V. De las cuales 5 voladuras fueron descartadas, por lo cual solo se considerarán para esta investigación un total de 44 voladuras.

Tabla 7

Número de voladuras con emulsión bombeable Emultex PDBG por zona y nivel

Número de disparos por zona			
Zona	Nivel	Labor	N ^a de disparos
Baja	780	RP 314 E	7
		RP 314 W	3
		RP 315	1
		CA 04	1
		SN 80_1	2
		CA 03_314	2
		ACC 81 OW	3
		CA 144	1
		BP 870	1
		CA 13_314	2
Intermedia	820	CA 02	1
		ACC 170	4
		RP SP10	5
		XC 617	4
Alta	1020	CA 04	1
		CA 11	3
		XC 1420	4
		RP 658_2	3
		CA 01_616	1
		Total	49

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Voladuras en frentes realizadas con Emultex PDBG

Fecha	Número de voladura	Tipo	Sección teórica (AxH)	Avance según ENAEX (m)	Avance según mina (m)	Avance según AESA (m)	Eficiencia de avance (%)	Sobre-rotura (%)	Factor de potencia (kg/TM)
10-Feb	1	Cámara	4.5 x 4.5	3.50	3.35	3.35	89	13.8	1.19
11-Feb	2	Cámara	4.5 x 4.5	3.70	3.60	3.60	97	6.8	0.93
11-Feb	3	Crucero	4.5 x 4.5	3.90	3.80	3.80	95	9.1	0.94
12-Feb	4	Rampa	4.5 x 4.5	3.50	3.50	3.50	83	6.8	0.99
12-Feb	5	Crucero	4.5 x 4.5	3.80	3.70	3.70	97	17.4	0.98
13-Feb	6	Crucero	4.5 x 4.5	3.40	3.40	3.40	89	11.4	1.07
14-Feb	7	Cámara	4.0 x 4.0	2.50	2.50	2.50	83	2.5	1.12
14-Feb	8	Rampa	4.5 x 4.5	3.20	3.20	3.20	86	4.5	1.09
15-Feb	9	Cámara	4.0 x 4.0	3.60	3.60	3.50	88	18.1	1.19
18-Feb	10	Rampa	4.5 x 4.5	3.00	2.40	2.40	62	9.0	1.46
21-Feb	11	Acceso	3.8 x 4.0	3.40	3.40	3.40	92	27.3	1.20
21-Feb	12	Rampa	4.0 x 4.0	3.20	3.20	3.20	84	35.1	1.33
23-Feb	13	Crucero	4.5 x 4.5	3.20	3.00	3.00	79	6.8	1.16
24-Feb	14	Acceso	3.8 x 4.0	3.73	3.73	3.73	98	2.5	1.15
24-Feb	15	Crucero	4.5 x 4.5	3.60	3.53	3.53	93	4.4	1.06
24-Feb	16	Rampa	4.0 x 4.0	3.70	3.63	3.63	96	18.3	1.15
25-Feb	17	Cámara	4.0 x 4.0	3.00	2.90	2.90	76	18.3	1.60
25-Feb	18	Acceso	3.8 x 4.0	3.60	3.58	3.58	94	18.4	1.34
25-Feb	19	Crucero	4.5 x 4.5	3.75	3.75	3.75	100	10.4	1.10
25-Feb	20	Rampa	4.0 x 4.0	3.80	3.80	3.80	97	15.5	1.27
26-Feb	21	Acceso	3.8 x 4.0	3.90	3.85	3.85	99	16.1	1.13
26-Feb	22	Rampa	4.0 x 4.0	3.90	3.87	3.87	99	10.3	1.08
27-Feb	23	Crucero	4.5 x 4.5	3.90	3.87	3.87	99	10.2	1.13
27-Feb	24	Rampa	4.0 x 4.0	3.80	3.70	3.70	97	20.9	1.12
28-Feb	25	Rampa	4.5 x 4.5	4.40	4.26	4.26	95	10.2	1.20
28-Feb	26	Rampa	4.5 x 4.5	3.90	3.72	3.72	95	6.8	1.17
1-Mar	27	Rampa	4.5 x 4.5	4.40	4.30	4.30	96	4.5	1.13
1-Mar	28	Rampa	4.5 x 4.5	3.60	3.50	3.50	92	13.8	1.22
2-Mar	29	Rampa	4.5 x 4.5	3.77	3.77	3.77	88	28.4	1.23
2-Mar	30	Rampa	4.5 x 4.5	4.20	4.20	4.20	95	23.5	1.10
3-Mar	31	Cámara	4.0 x 4.0	4.37	4.37	4.37	99	26.3	1.23
3-Mar	32	Rampa	4.5 x 4.5	3.80	3.80	3.80	88	8.9	1.14
4-Mar	33	Rampa	4.5 x 4.5	4.30	4.30	4.30	100	23.3	0.95
4-Mar	34	Subnivel	3.8 x 4.0	3.60	3.60	3.60	95	7.8	1.11
4-Mar	35	Cámara	4.0 x 4.0	3.80	3.80	3.80	100	12.8	1.06
4-Mar	36	Cámara	4.0 x 4.0	4.34	4.30	4.30	98	7.6	1.05
5-Mar	37	Acceso	4.5 x 4.5	3.85	3.90	3.90	100	-4.4	0.92
5-Mar	38	Subnivel	3.8 x 4.0	3.72	3.75	3.75	99	16.0	1.03
5-Mar	39	Cámara	5.0 x 5.0	4.27	4.20	4.20	98	-4.0	0.86
6-Mar	40	Rampa	4.5 x 4.5	3.71	3.71	3.71	98	6.8	0.97
6-Mar	41	Cámara	4.0 x 4.0	4.00	4.00	4.00	93	-2.5	1.07
7-Mar	42	Cámara	5.0 x 5.0	3.80	3.80	3.80	86	4.0	0.89
7-Mar	43	Acceso	4.5 x 4.5	3.85	3.80	3.80	100	9.1	1.00
8-Mar	44	Crucero	4.5 x 4.5	3.50	3.50	3.50	90	6.7	1.14
9-Mar	45	Acceso	4.0 x 4.0	3.90	3.90	3.90	100	10.2	1.06
10-Mar	46	By Pass	5.0 x 5.0	4.24	4.24	4.24	99	14.5	1.11
10-Mar	47	Rampa	4.5 x 4.5	4.00	4.00	4.00	93	4.5	1.17
11-Mar	48	Rampa	4.5 x 4.5	3.90	3.90	3.90	91	9.1	1.05
11-Mar	49	Cámara	4.0 x 4.0	1.80	1.80	1.80	41	10.3	2.75

Fuente: Elaboración propia

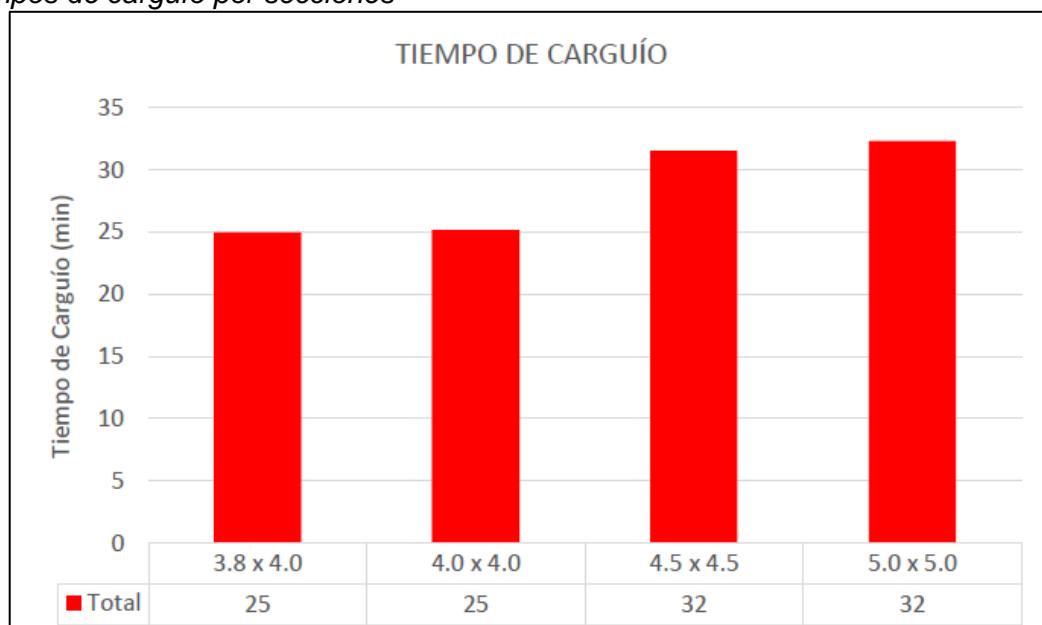
3.3.2 Resultados pre-voladura

Para el análisis de resultados pre-voladura solo se tomaron en cuenta las 46 voladuras primarias realizadas en frentes de desarrollo.

3.3.2.1 Tiempo de carguío. Durante el desarrollo de pruebas, se tuvo los siguientes tiempos de carguío para los diferentes tipos de sección que en comparación con los tiempos de carguío levantados durante la línea base (carguío con emulsión encartuchada) son menores:

Figura 26

Tiempos de carguío por secciones



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 26 el tiempo de carguío con emulsión bombeable Emultex PDBG para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m es de 25, 25, 32 y 32 minutos respectivamente.

3.3.3 Resultados post-voladura

Para el análisis de resultados post voladura, solo se tomaron en cuenta las voladuras primarias realizadas en frentes de desarrollo.

3.3.3.1 Eficiencia del disparo. La medición del rendimiento por disparo realizado (%) consideró los siguientes factores:

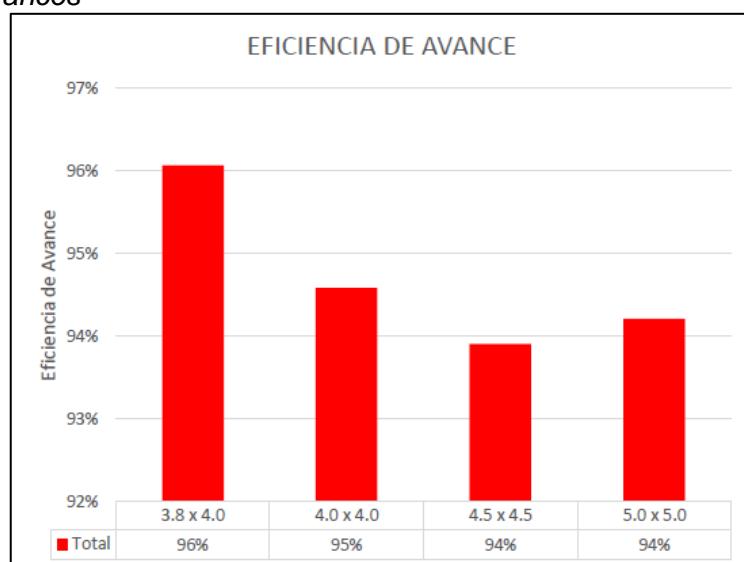
- Longitud de perforación efectiva

- Avance real por disparo

La eficiencia de los disparos realizados con la mezcla explosiva Emultex PDBG fue de 96% para frentes de sección de 3.8 m x 4.0 m, 95% para frentes de sección de 4.0 m x 4.0 m, 94% para frentes de sección de 4.5 m x 4.5 m y 94% para secciones de 5.0 m x 5.0 m.

Figura 27

Eficiencia de avances



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2 Factor de carga equivalente en EMULNOR 3000. El factor de carga equivalente en Emulnor 3000 obtenido de las 44 voladuras validadas en frentes según el tipo de sección se aprecia en el siguiente gráfico:

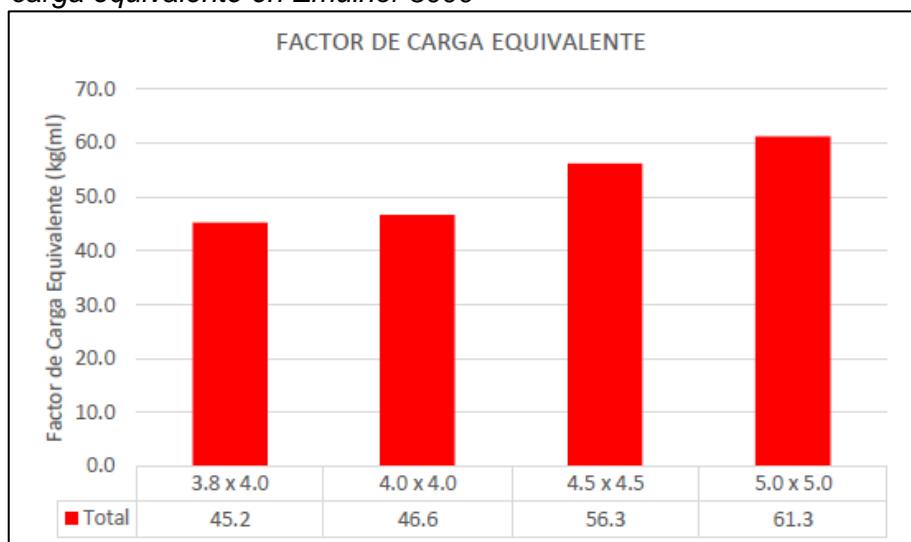
Durante el desarrollo de pruebas de carguío con emulsión bombeable Emultex PDBG se obtuvo un factor de carga equivalente de 45.2 kg/ml, 46.6 kg/ml, 56.3 kg/ml y 61.3 para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m respectivamente.

- Avance efectivo de topografía de AESA
- Mediciones en campo por parte de ENAEX
- Línea base histórica de San Cristóbal

Lo cual nos permite tener un consumo real de los explosivos utilizados y el avance efectivo que este consumo proporciona operacionalmente

Figura 28

Factor de carga equivalente en Emulnor 3000



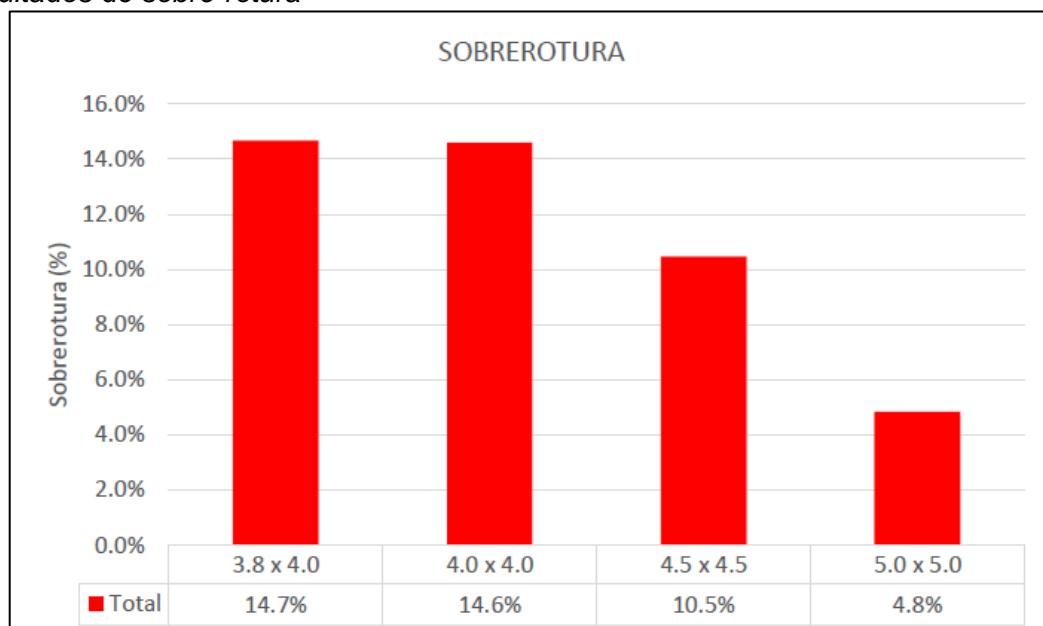
Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 Sobre rotura. El resultado de sobre rotura obtenido de las 44 voladuras validas en frentes según el tipo de sección se aprecia en el siguiente gráfico:

Durante el desarrollo de pruebas de carguío con emulsión bombeable Emultex PDBG se obtuvo un porcentaje de sobre rotura de 14.7 %, 14.6%, 10.5% y 4.8 % para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m respectivamente.

Figura 29

Resultados de sobre-rotura



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4 Análisis de fragmentación. Para realizar el análisis de fragmentación se tomaron fotografías post voladura, las cuales posterior a un análisis granulométrico da como resultado los siguientes valores.

Tabla 9

Fragmentación obtenida con Emultex PDBG

Labor	Nivel	Material	Fecha	Fase	P80 (pulgadas)
CA 11	1420	Estéril	10-Feb	Desarrollo	6.77
XC 1420	1420	Estéril	11-Feb	Desarrollo	6.20
ACC 170	1020	Estéril	25-Feb	Desarrollo	6.25
ACC 81 OW	780	Estéril	5 -Mar	Desarrollo	5.25
					Promedio 6.11

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Instrumentación

Durante el periodo de pruebas del producto Emultex PDBG, se realizaron las mediciones del VOD y análisis de vibraciones con la ayuda del equipo Microtrap e Instantel para las mediciones respectivas.

3.3.4.1 Medición de VOD. Se realizaron 02 mediciones para verificar que dicho factor este ubicado entre el rango de VOD especificado en la ficha técnica del producto.

- Medición 01: Se registro el día 2-Mar en la labor RP 315 del nivel 780, en donde se observa un VOD promedio de 3915 m/s.

Figura 30

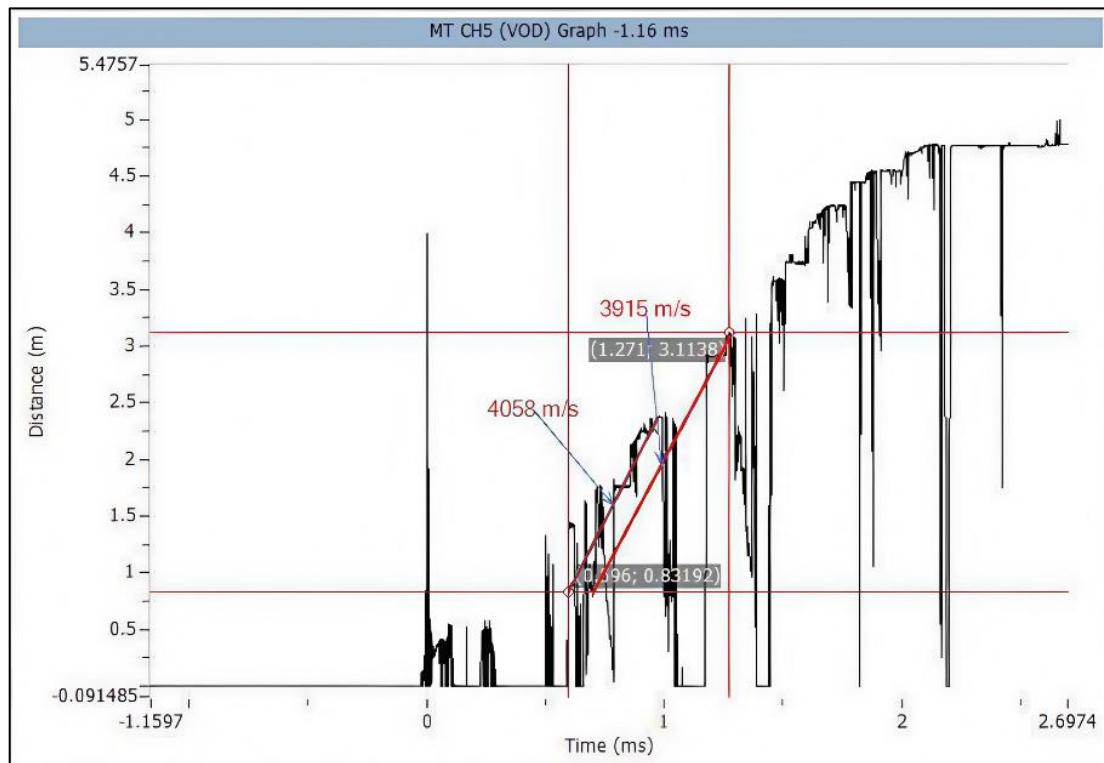
Medición de VOD en el frente



Fuente: ENAEX

Figura 31

Medición de VOD del día 2-Mar

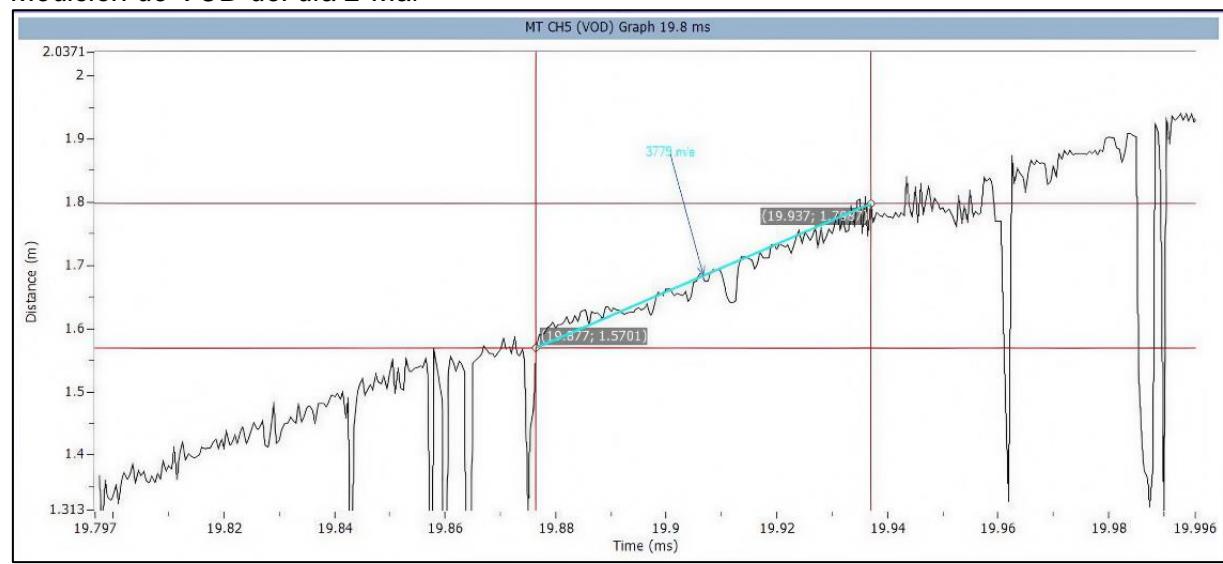


Fuente: ENAEX

- Medición 02: Se registro el día 3-Mar en la labor CA 04 del nivel 780, en donde se observa un VOD promedio de 3779 m/s.

Figura 32

Medición de VOD del día 2-Mar



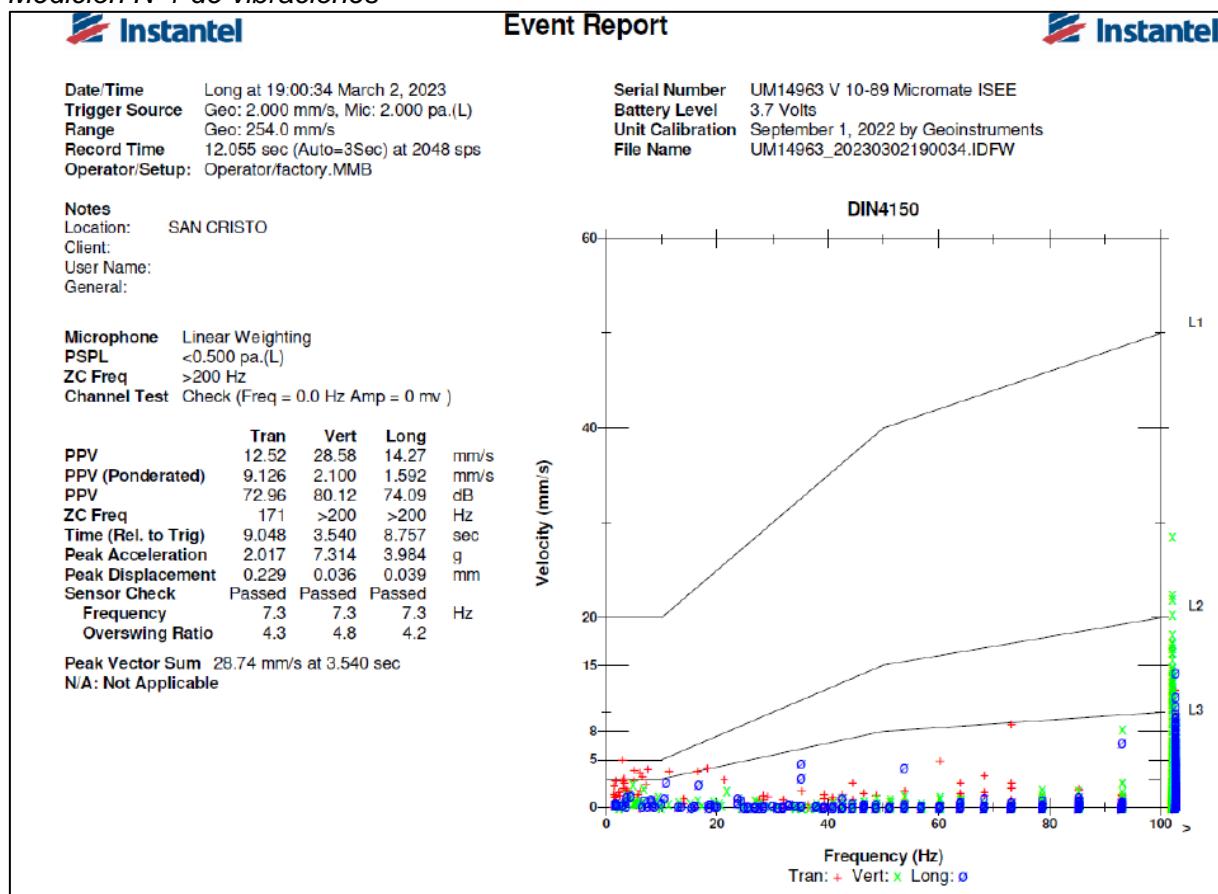
Fuente: ENAEX

3.3.4.2 Medición de vibraciones. Se realizaron 02 mediciones para verificar el daño al macizo rocoso generado por las vibraciones al momento de la voladura.

- Medición 01: Se realizó el día 2-Mar cerca de la RP 315 del nivel 780 (aproximadamente a unos 20 metros). En el cual observamos un resultado de 25.92 mm/s en 4.733 s.

Figura 33

Medición N°1 de vibraciones

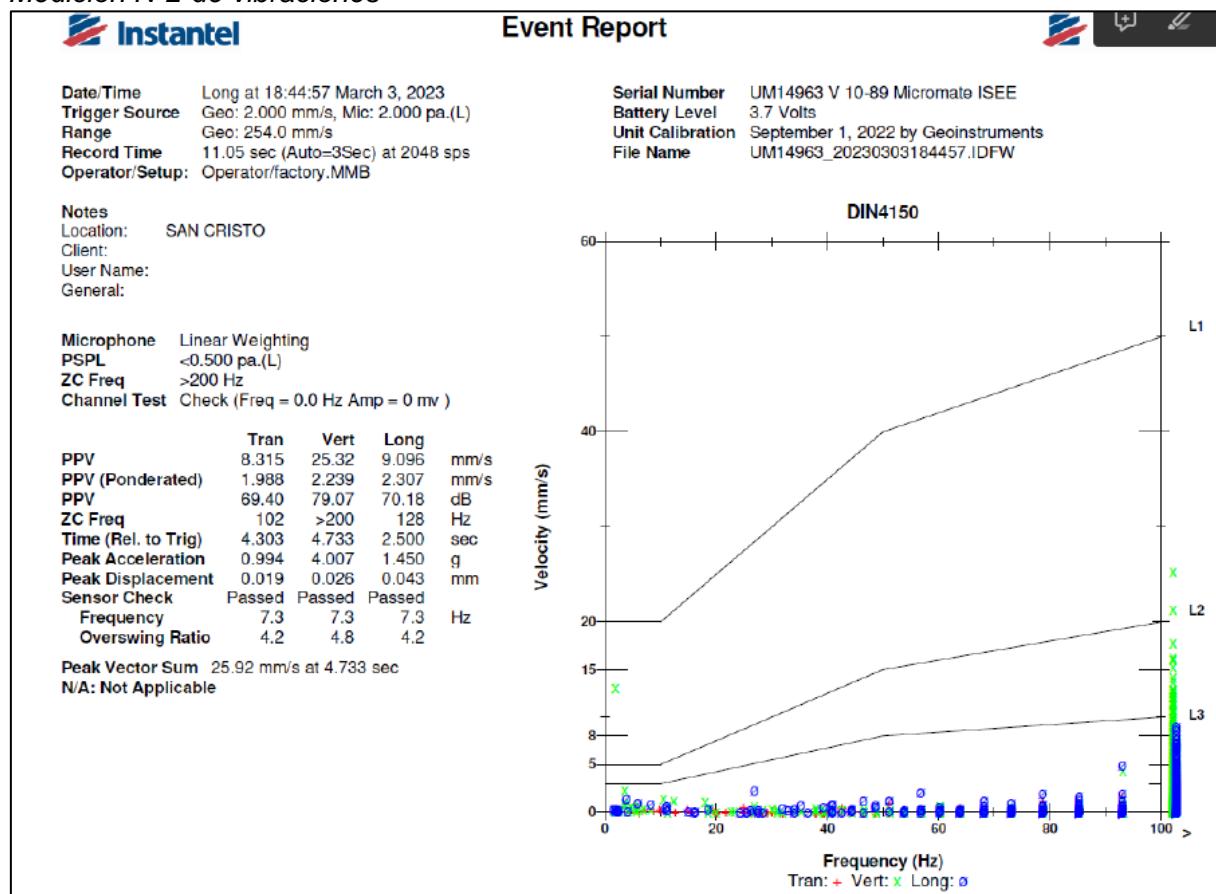


Fuente: ENAEX

- Medición 02: Se realizó el día 3-Mar cerca de la CA 04 del nivel 780 (aproximadamente a unos 25 metros). En el cual observamos un resultado de 25.92 mm/s en 4.733 s.

Figura 34

Medición N^o2 de vibraciones



Fuente: ENAEX

3.4 Resultados de pruebas de carguío de Emultex PDBG – Etapa N^o2

3.4.1 Voladuras realizadas con emulsión bombeable Emultex PDBG

Durante el desarrollo de pruebas de carguío de emulsión bombeable Emultex PDBG en frentes se realizó un total de 52 voladuras en frente, las cuales fueron realizadas en secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m (*); según el requerimiento y coordinación del área de P&V. De las cuales 5 voladuras fueron descartadas debido a no encontrarse dentro de los estándares mínimos de perforación requeridos para esta tecnología, por lo cual solo se considerarán para este informe un total de 47 voladuras.

Tabla 10

Voladuras en frentes realizadas con Emultex PDBG

Fecha	Número de voladura	Tipo	Sección teórica (AxH)	Eficiencia de avance (%)	Factor de carga equív. X metro (kg/m)	Sobre-rotura (%)
6-May	1	Cámara	5.0 x 5.0	91	76.65	0.0
7-May	2	Cámara	4.0 x 4.0	86	51.98	5.0
8-May	3	Subnivel	3.8 x 4.0	97	49.74	13.0
9-May	4	Cámara	4.0 x 4.0	98	41.41	5.0
9-May	5	Rampa	4.5 x 4.5	86	61.81	11.0
12-May	6	Cámara	4.5 x 4.5	95	45.52	5.0
12-May	7	Acceso	3.8 x 4.0	85	49.98	8.0
13-May	8	Subnivel	3.8 x 4.0	40	75.27	24.0
14-May	9	Rampa	4.5 x 4.5	100	51.28	9.0
14-May	10	Subnivel	3.8 x 4.0	95	43.55	16.0
15-May	11	Rampa	4.5 x 4.5	96	45.23	8.0
15-May	12	Cámara	4.0 x 4.0	94	40.17	13.0
16-May	13	Cámara	4.5 x 4.5	96	45.71	4.0
17-May	14	Cámara	4.5 x 4.5	101	44.62	0.0
17-May	15	Rampa	4.5 x 4.5	100	49.42	21.0
18-May	16	Subnivel	3.8 x 4.0	91	37.77	2.0
19-May	17	Subnivel	3.8 x 4.0	92	42.01	11.0
19-May	18	Cámara	4.0 x 4.0	93	41.68	0.0
20-May	19	Rampa	4.5 x 4.5	94	55.77	7.0
20-May	20	Subnivel	3.8 x 4.0	83	51.25	11.0
21-May	21	Cámara	4.0 x 4.0	99	42.29	10.0
21-May	22	Subnivel	3.8 x 4.0	99	40.67	21.0
22-May	23	Rampa	4.5 x 4.5	99	60.62	4.0
22-May	24	Rampa	4.5 x 4.5	73	66.62	4.0
23-May	25	Cámara	4.0 x 4.0	93	40.89	10.0
23-May	26	Subnivel	3.8 x 4.0	99	44.66	8.0
23-May	27	Subnivel	3.8 x 4.0	100	33.52	5.0
24-May	28	Subnivel	3.8 x 4.0	94	32.26	8.0
24-May	29	Subnivel	3.8 x 4.0	98	40.59	8.0
26-May	30	Subnivel	3.8 x 4.0	92	41.89	0.0
27-May	32	Subnivel	3.8 x 4.0	98	31.48	5.0
27-May	33	Cámara	4.0 x 4.0	100	40.22	0.0
27-May	34	Subnivel	3.8 x 4.0	98	33.65	3.0
28-May	35	Rampa	4.5 x 4.5	95	43.87	11.0
28-May	36	Subnivel	3.8 x 4.0	92	36.54	2.0
28-May	37	Subnivel	3.8 x 4.0	91	31.47	5.0
30-May	38	Subnivel	3.8 x 4.0	98	34.19	8.0
30-May	39	Cámara	4.5 x 4.5	59	90.24	0.0
31-May	40	Cámara	4.0 x 4.0	98	39.38	2.0
31-May	41	Rampa	4.5 x 4.5	23	183.52	2.0
1-Jun	42	Subnivel	3.8 x 4.0	97	34.43	2.0
1-Jun	43	Acceso	4.0 x 4.0	92	46.91	2.0
1-Jun	44	Subnivel	3.8 x 4.0	103	33.53	0.0
2-Jun	45	Acceso	4.0 x 4.0	98	37.91	2.0
2-Jun	46	Subnivel	3.8 x 4.0	92	36.23	3.0
3-Jun	47	Rampa	4.5 x 4.5	93	45.16	7.0
4-Jun	48	Rampa	4.5 x 4.5	97	49.93	7.0
7-Jun	49	Rampa	4.5 x 4.5	94	59.37	4.0
9-Jun	50	Rampa	4.5 x 4.5	98	59.71	7.0
9-Jun	51	Rampa	4.5 x 4.5	99	62.36	11.0
10-Jun	52	Subnivel	3.8 x 4.0	99	36.95	0.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11*Número de voladuras con emulsión bombeable Emultex PDBG por zona y nivel*

Número de disparos por zona			
Zona	Nivel	Labor	Nº de disparos
Baja	820	RP 315 (+)	3
		SN 82 OE	9
		SN 79 OW	1
	870	ACC 79 OE	2
		CA 19 314E	2
		CA 2 79 3W	2
		CA 81 1 5E	1
	920	CA 81 2 5E	2
		RP 314 1E (-)	1
		RP 314 E (-)	2
		RP 314 2 (-)	8
		SN 79 3W	4
		SN 81 6E	1
		SN 81 6W	4
Intermedia	1020	CA 22 SP5	1
		CA 01 68 2W	1
	1370	RP 616 4E	1
		CA 2 SP6	1
		ACC SP6	1
		SN 78 2E	2
		RP SP5 1 (+)	1
	1420	CA 1 2 A	1
		CA 1 CX 1420	1
		Total	52

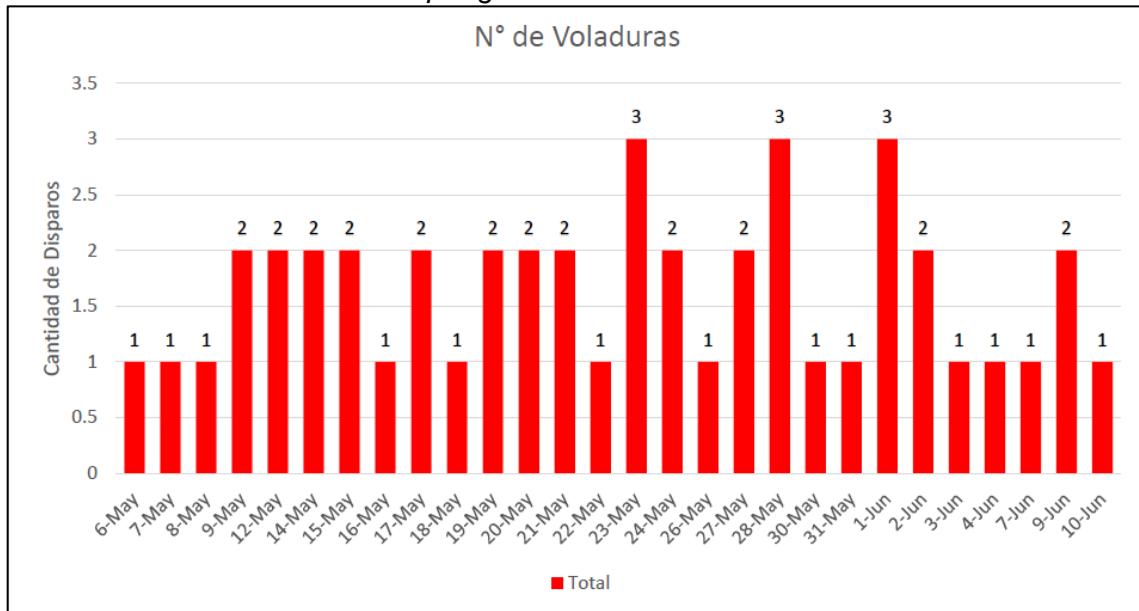
Fuente: Elaboración propia

Además, se llevó el registro del número de frentes cargados en una sola guardia por el equipo UBT-003 Izusu. Dentro del cuello de botella del número de frentes se tuvieron cinco circunstancias, las cuales no permitieron cargar un mayor número de frentes.

- Ciclado de labores
- Entrega tarde de frentes
- Distancia entre los frentes
- Problemas de equipo de Sostenimiento y Perforación
- Condiciones Subestándares

Figura 35

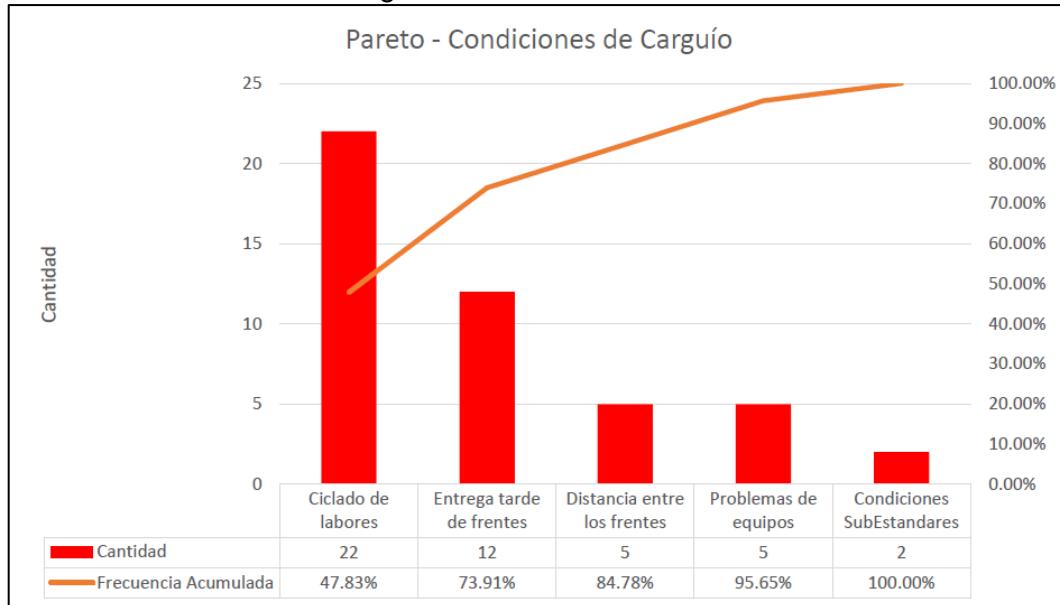
Número de Voladuras realizadas por guardia



Fuente: Elaboración propia

Figura 36

Pareto de las condiciones de carguío



Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Calibración del equipo (pruebas de gasificación)

Antes de iniciar el carguío con el equipo UBT-003 Izusu, se deben calibrar las bombas dosificadoras de aditivos, los cuales son el Nitrito de Amonio (L-4) y el Ácido Acético (N-17), los cuales, al mezclarse con la emulsión matriz, generan el explosivo

bombeable Emultex PDBG. Dichos aditivos necesitan ser adheridos en la mezcla con un cierto porcentaje (%) para que generen dentro de la mezcla las burbujas necesarias para dicho explosivo.

El objetivo final de la gasificación era llegar a una densidad del explosivo entre 1.15 y 1.18 gr/cc., por lo cual se llevaron a cabo diferentes pruebas de gasificación, en la cual se modificaría el porcentaje de aditivos.

Tabla 12

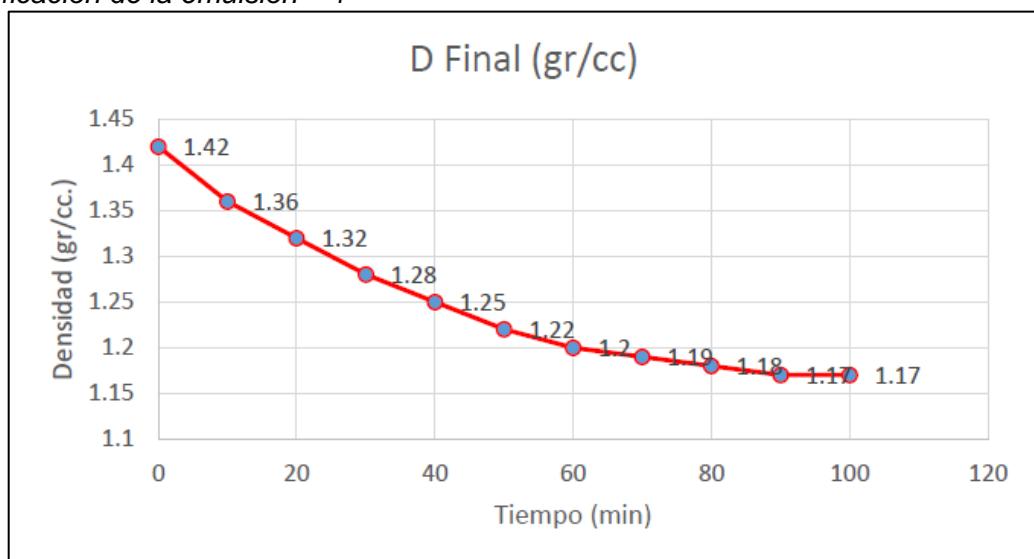
Tiempo de gasificación de la emulsión – 1

Horario	1:00 PM – 4:00 PM
L – 4	0.60 %
N – 17	0.70 %
T (min)	D Final (gr/cc)
0	1.42
10	1.36
20	1.32
30	1.28
40	1.25
50	1.22
60	1.20
70	1.19
80	1.18
90	1.17
100	1.17

Fuente: Elaboración propia

Figura 37

Gasificación de la emulsión – 1

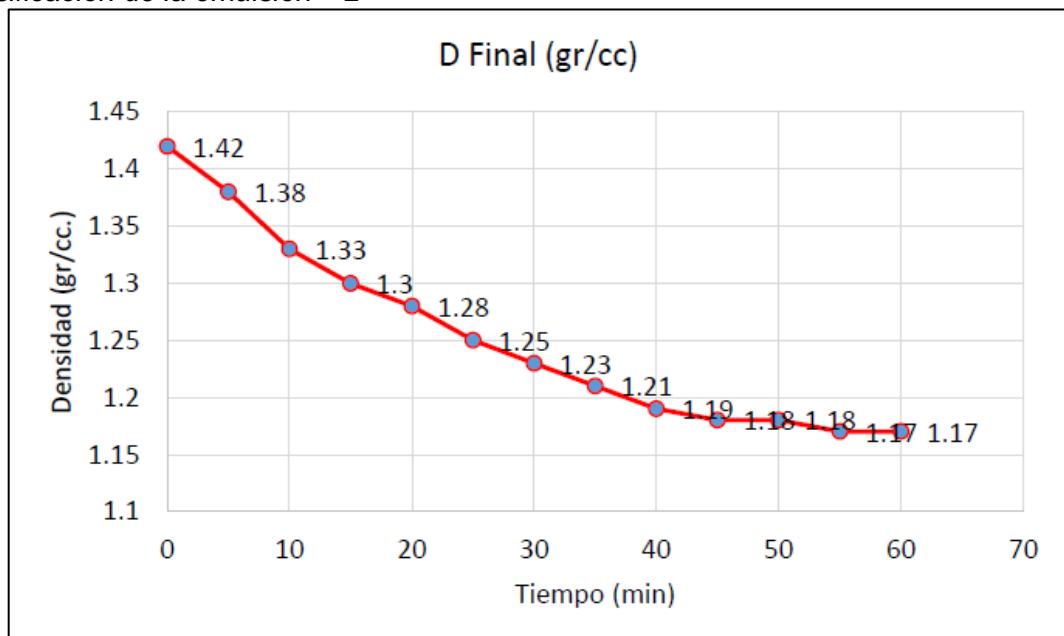


Fuente: Elaboración propia

Tabla 13*Tiempo de gasificación de la emulsión – 2*

Horario	4:00 PM – 5:00 PM
L – 4	0.60 %
N – 17	0.75 %
T (min)	D Final (gr/cc)
0	1.42
5	1.38
10	1.33
15	1.30
20	1.28
25	1.25
30	1.23
35	1.21
40	1.19
45	1.18
50	1.18
55	1.17
60	1.17

Fuente: Elaboración propia

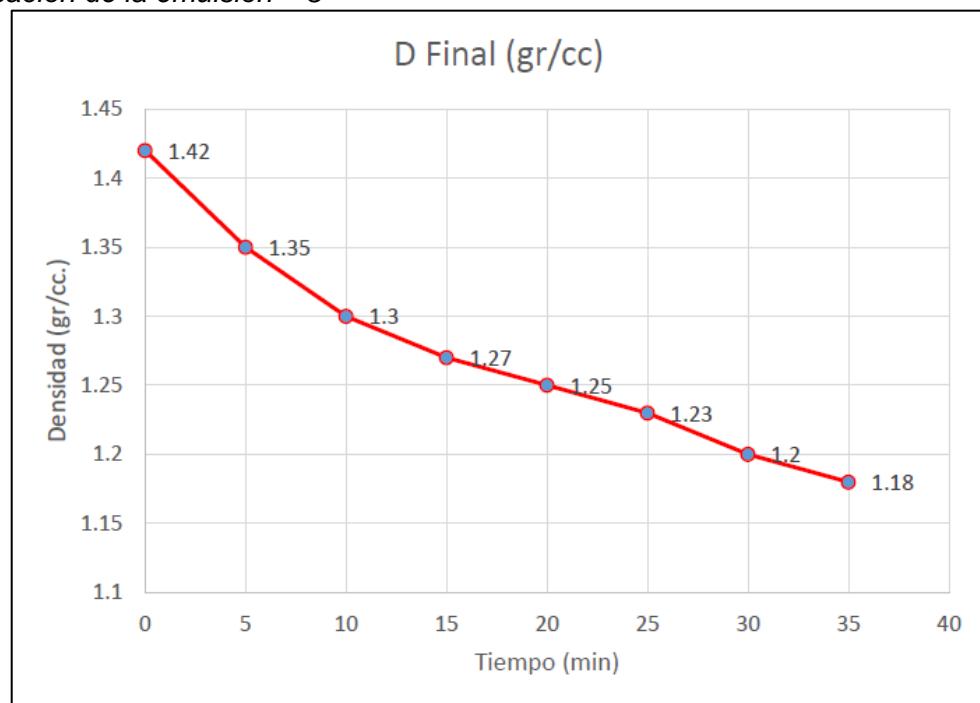
Figura 38*Gasificación de la emulsión – 2*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14*Tiempo de gasificación de la emulsión – 3*

Horario	5:00 PM – 5:45 PM
L – 4	0.60 %
N – 17	0.80 %
T (min)	D Final (gr/cc)
0	1.42
5	1.35
10	1.30
15	1.27
20	1.25
25	1.23
30	1.20
35	1.18

Fuente: Elaboración propia

Figura 39*Gasificación de la emulsión – 3*

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Resultados pre-voladura

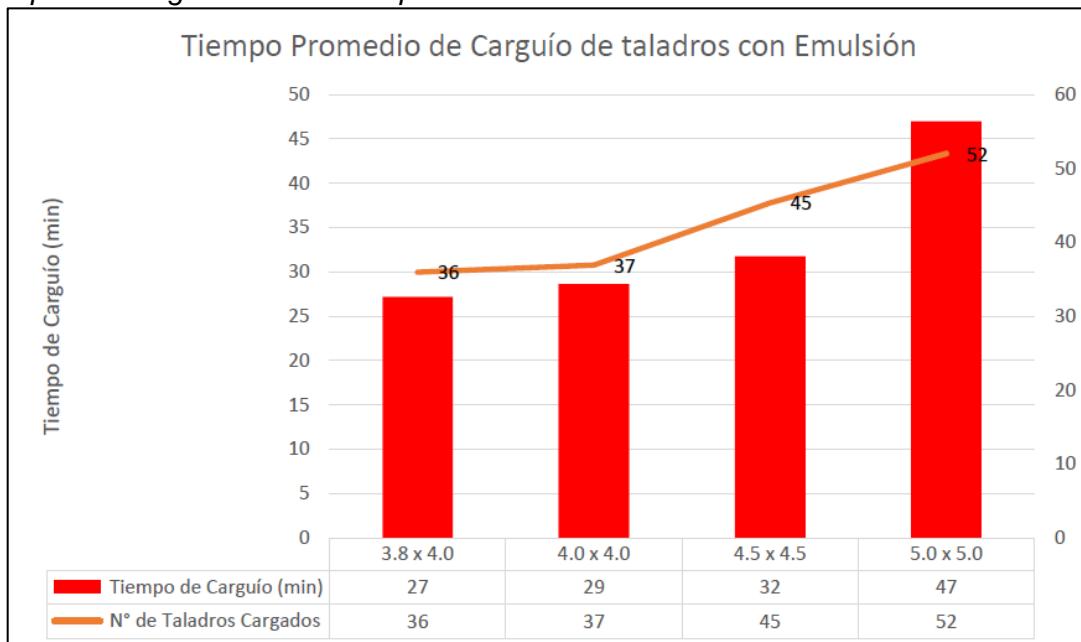
Para el análisis de resultados pre-voladura solo se tomaron en cuenta las 47 voladuras primarias realizadas en frentes de desarrollo.

3.4.3.1 Tiempo de carguío de emulsión bombeable. Durante el desarrollo de pruebas, se tuvo los siguientes tiempos de carguío de la emulsión bombeable en los

taladros, en la cual solo se mide el tiempo de inyección de dicha emulsión dentro del taladro, para los diferentes tipos de sección, los cuales son los siguientes.

Figura 40

Tiempos de caguío de emulsión por secciones



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 40 el tiempo de caguío con emulsión bombeable Emultex PDBG para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m es de 27, 29, 32 y 47 minutos respectivamente, para un promedio de 36, 37, 45 y 52 taladros cargados respectivamente.

3.4.4 Resultados post-voladura

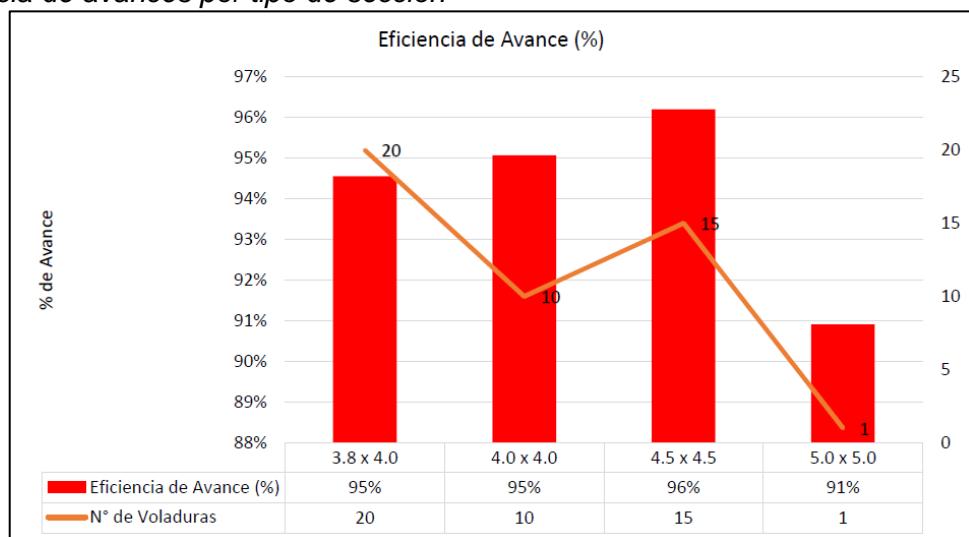
Para el análisis de resultados post voladura, solo se tomaron en cuenta las voladuras primarias realizadas en frentes de desarrollo.

3.4.4.1 Eficiencia del disparo. La medición del rendimiento por disparo realizado (%) consideró los siguientes factores:

- Longitud de barra (pies)
- Longitud de perforación efectiva
- Avance real por disparo

Figura 41

Eficiencia de avances por tipo de sección



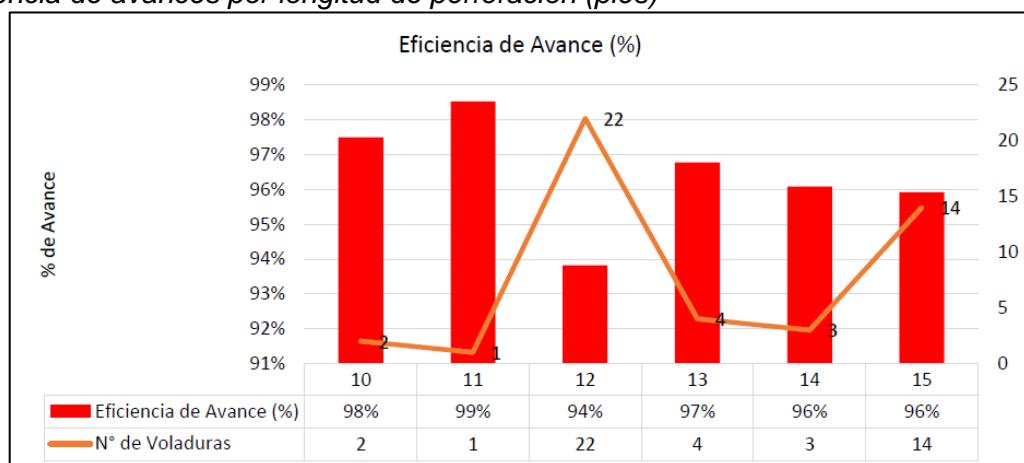
Fuente: Elaboración propia

La eficiencia de los disparos realizados con la mezcla explosiva Emultex PDBG fue de 95% para frentes de sección de 3.8 m x 4.0 m, 95% para frentes de sección de 4.0 m x 4.0 m, 96% para frentes de sección de 4.5 m x 4.5 m y 91% para secciones de 5.0 m x 5.0 m.

También se analizó el avance del disparo (%) por la longitud de perforación (pies).

Figura 42

Eficiencia de avances por longitud de perforación (pies)



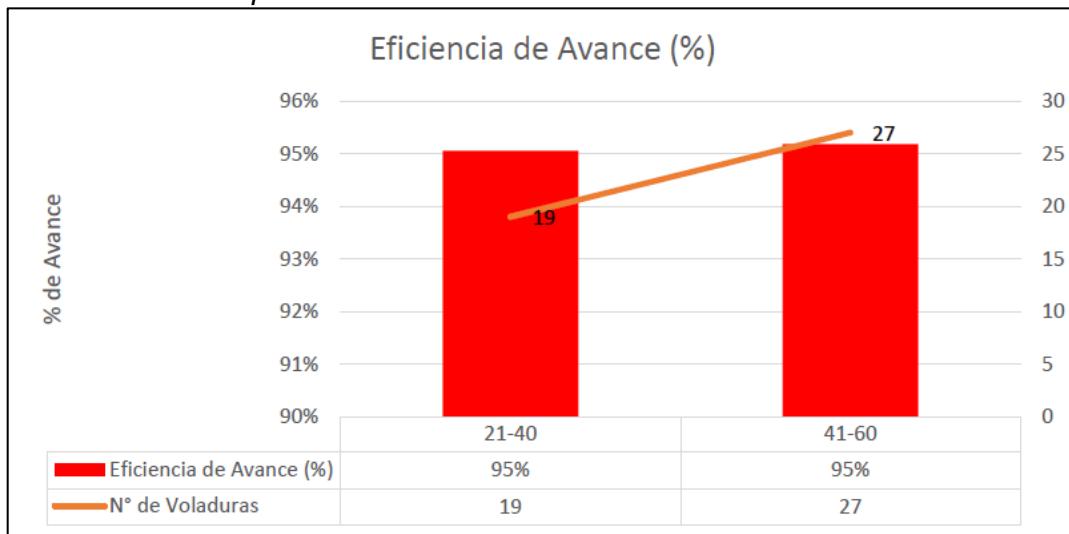
Fuente: Elaboración propia

La eficiencia de los disparos realizados con la mezcla explosiva Emultex PDBG fue de 98% para perforaciones de 10 pies, 99% para 11 pies, 94% para 12 pies y 97% para 13 pies, 96% para 14 pies y 96% para 15 pies.

En cuanto al RMR (Rock Mass Rating) se dividió en 2 rangos: 21 – 40 para subniveles (mineral) y en 41 – 60 para rampas, accesos y cámaras (desmonte).

Figura 43

Eficiencia de avances por RMR

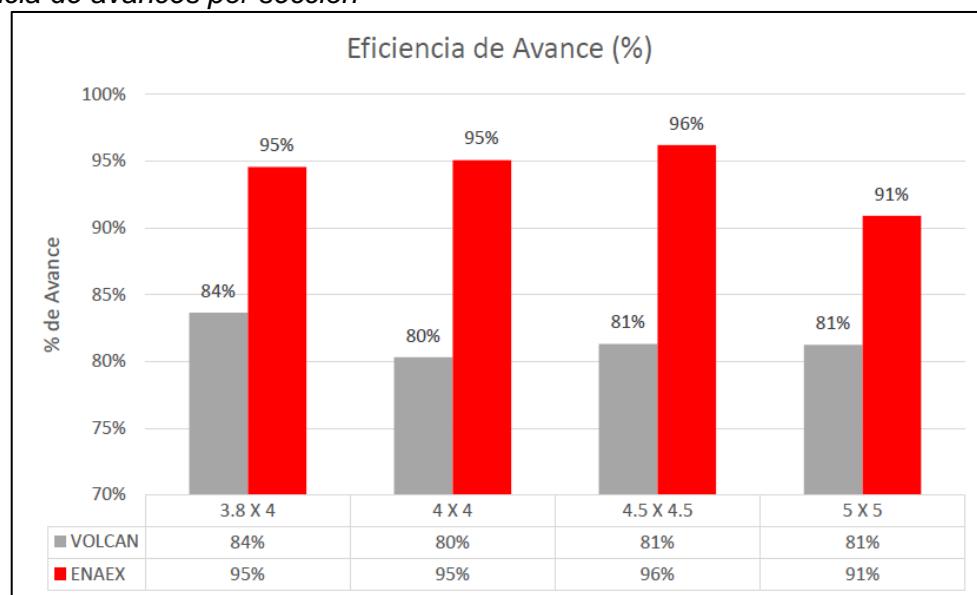


Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo se comparó los avances (%) obtenidos (por tipo de sección) con la emulsión bombeable con los avances de San Cristóbal (realizados con encartuchados), obtenidos de su línea base del mes de enero del 2023. En la cual se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 44

Eficiencia de avances por sección

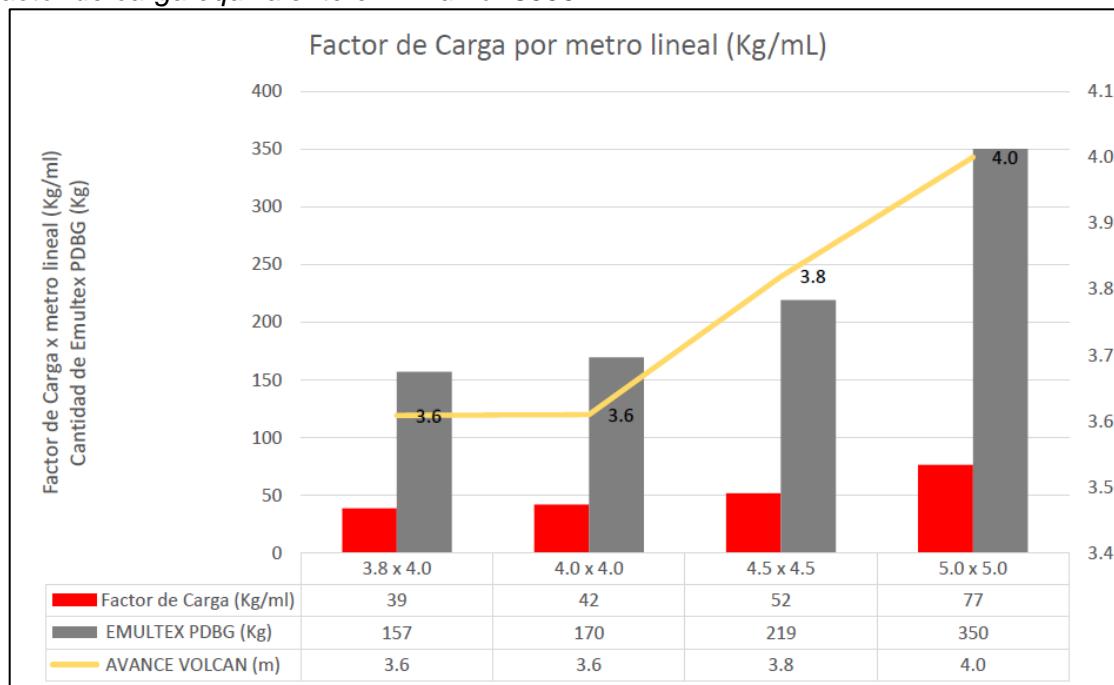


Fuente: Elaboración propia

3.4.4.2 Factor de carga equivalente en EMULNOR 3000. El factor de carga equivalente en Emulnor 3000 obtenido de las 47 voladuras validadas en frentes según el tipo de sección, además del promedio de kilos de Emulsión, y promedio de avance efectivo, lo cual se aprecia en el siguiente gráfico.

Figura 45

Factor de carga equivalente en Emulnor 3000



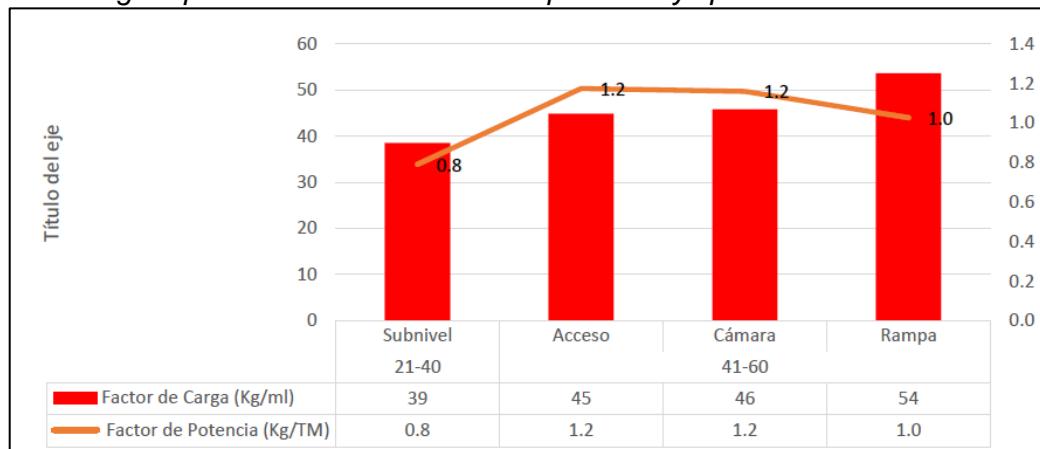
Fuente: Elaboración propia

Durante el desarrollo de pruebas de carguío con emulsión bombeable Emultex PDBG se obtuvo un factor de carga equivalente de 40 kg/ml, 43 kg/ml, 50 kg/ml y 77 para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m respectivamente.

También se analizó el factor de carga (kg/ml) por tipo de roca (RMR) y el tipo de labor (Subnivel, Acceso, Cámara y Rampa).

Figura 46

Factor de carga equivalente en Emulnor 3000 por RMR y tipo de labor



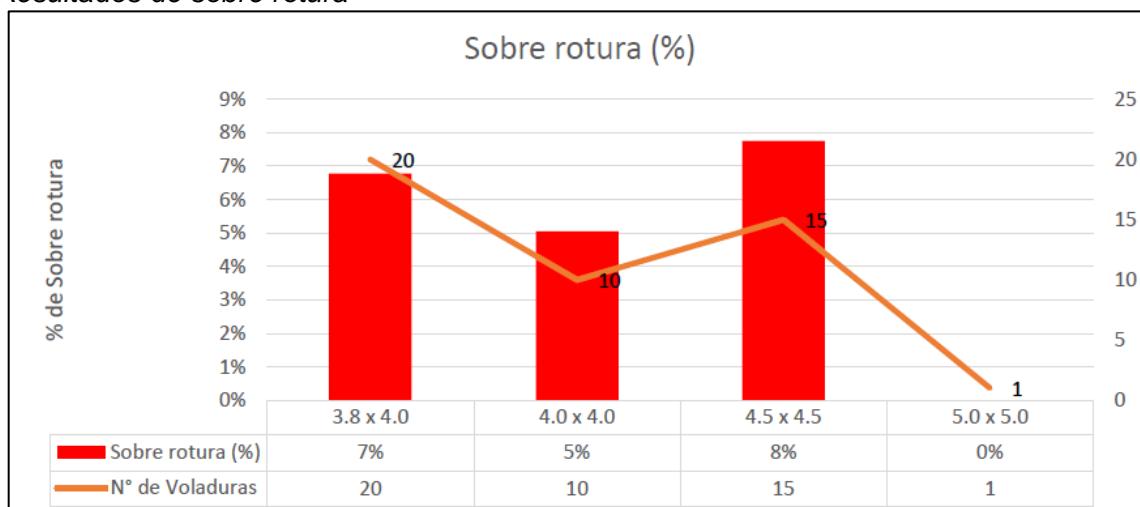
Fuente: Elaboración propia

3.4.4.3 Sobre-rotura. Para el control de sobre rotura, se tuvo un rango de kilos para los taladros de la corona y hastiales, tanto en subniveles (RMR 21-40) como para rampas, accesos y cámaras (RMR 41-60). El cual, para el primero variaba entre 2.0 kg – 2.5 kg, mientras que para las demás labores se cargó entre 2.5 – 2.8 kg. Estos kilos eran independientes de la longitud de perforación, ya que la mezcla explosiva era cargada simplemente de forma lineal, sin llenar en su totalidad el taladro y se utilizó la densidad óptima para todo el frente (1.15 – 1.19 gr/cc.)

El resultado de sobre rotura obtenido de las 47 voladuras validadas en frentes según el tipo de sección se aprecia en el siguiente gráfico.

Figura 47

Resultados de sobre rotura



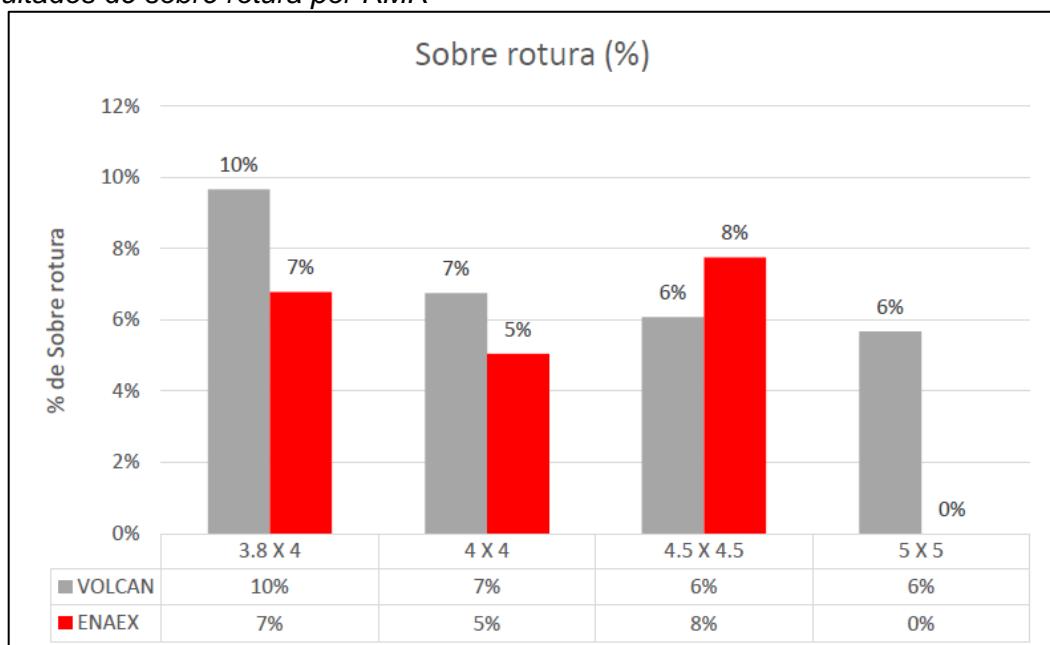
Fuente: Elaboración propia

Durante el desarrollo de pruebas de carguío con emulsión bombeable Emultex PDBG se obtuvo un porcentaje de sobre rotura de 7 %, 5%, 8% y 0% para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m respectivamente.

Del mismo modo se comparó la sobre rotura (%) obtenida (por tipo de sección) con la emulsión bombeable con la sobre rotura de San Cristóbal (realizados con encartuchados), obtenidos de su línea base del mes de enero del 2023. En la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 48

Resultados de sobre rotura por RMR



Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Instrumentación

Durante el periodo de pruebas del producto Emultex PDBG, se realizaron las mediciones del VOD y análisis de vibraciones con la ayuda del equipo Microtrap e Instantel para las mediciones respectivas.

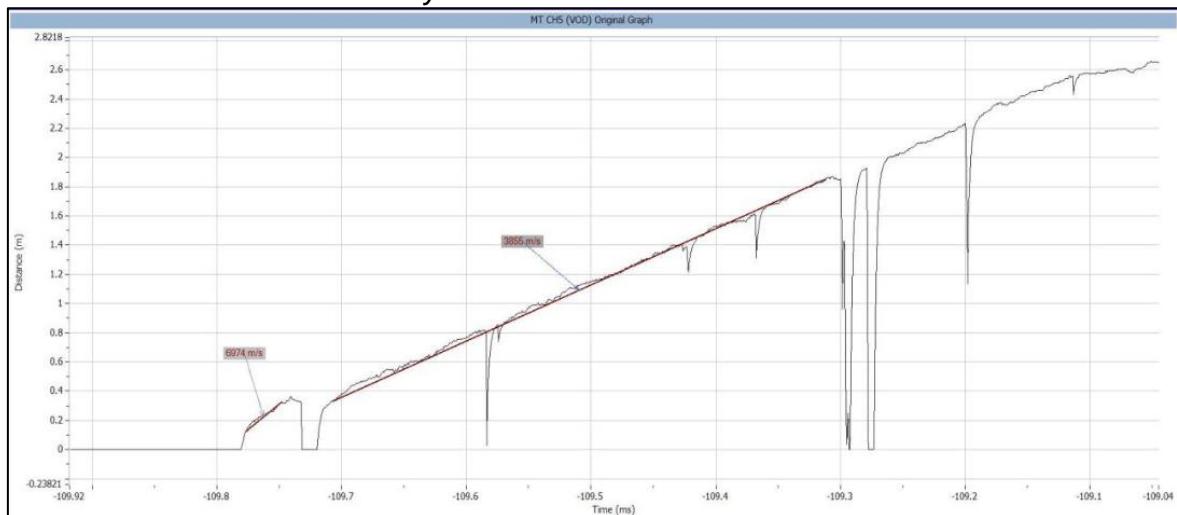
La cantidad de mediciones estaba sujeta a la posibilidad de reingreso del personal a las labores para el recojo de los respectivos equipos.

3.4.5.1 Medición de VOD. Se realizaron 05 mediciones para verificar que el VOD del producto este ubicado entre el rango especificado en la ficha técnica ($4054 \pm 5\% \text{ m/s}$).

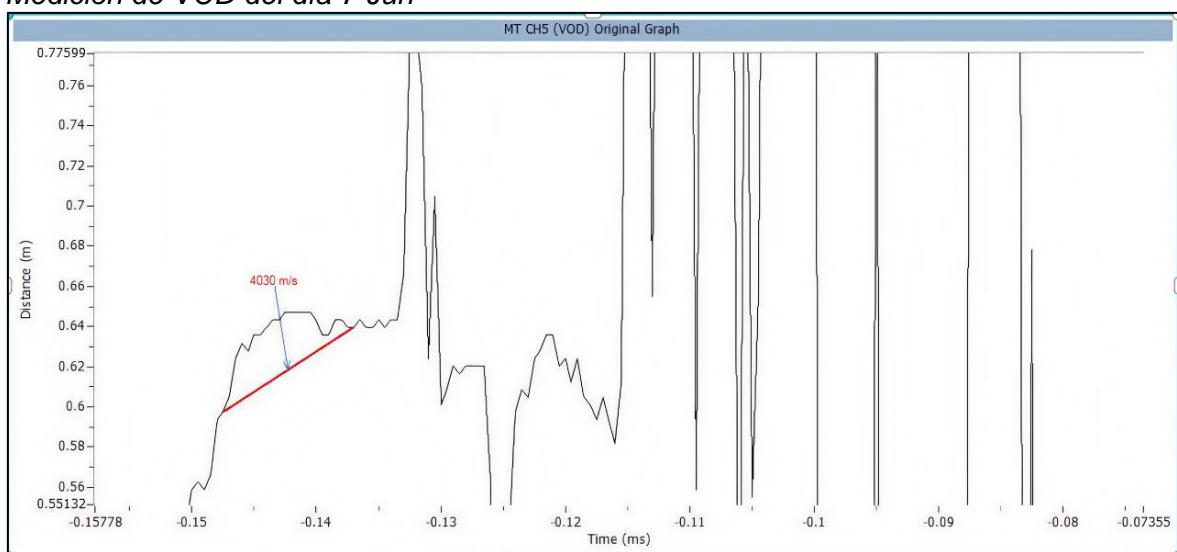
Tabla 15*Labores de medición de VOD*

Fecha	Labor	VOD (m/s)
21-May	SN 82 OE	3855
4-Jun	RP 314 W (-)	4284
7-Jun	RP 314 W (-)	4030
9-Jun	RP 314 W (-)	4321
10-Jun	SN 79 3 W	3850

Fuente: Elaboración propia

Figura 49*Medición de VOD del día 21-May*

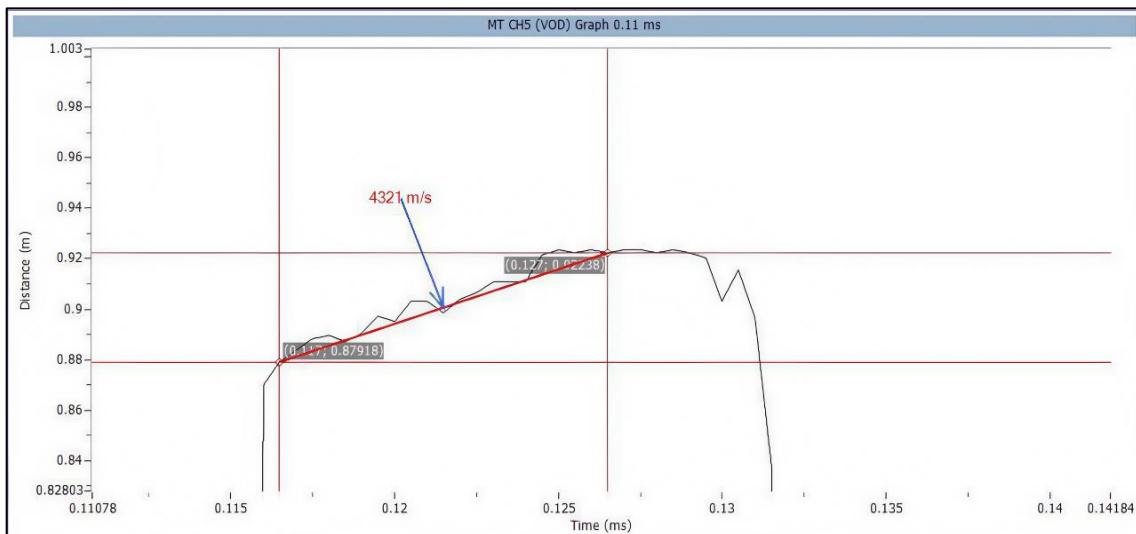
Fuente: ENAEX

Figura 50*Medición de VOD del día 7-Jun*

Fuente: ENAEX

Figura 51

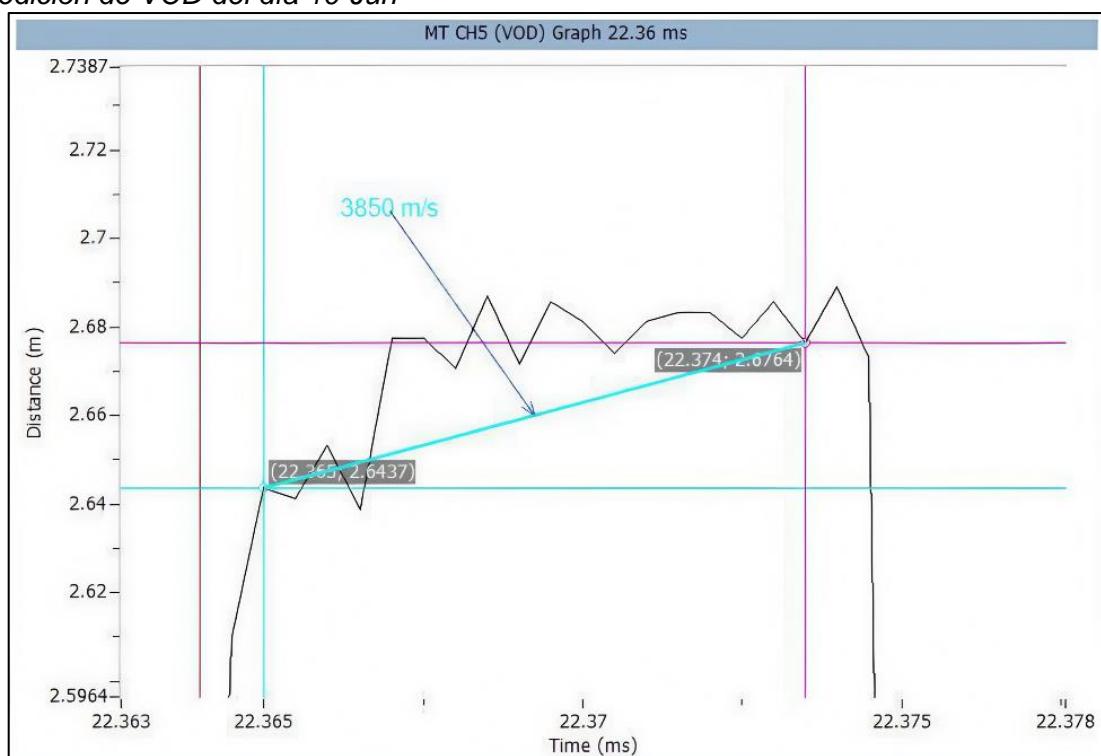
Medición de VOD del día 9-Jun



Fuente: ENAEX

Figura 52

Medición de VOD del día 10-Jun



Fuente: ENAEX

3.4.5.2 Medición de vibraciones, Se realizaron 03 mediciones para verificar el daño al macizo rocoso generado por las vibraciones al momento de la voladura.

Tabla 16

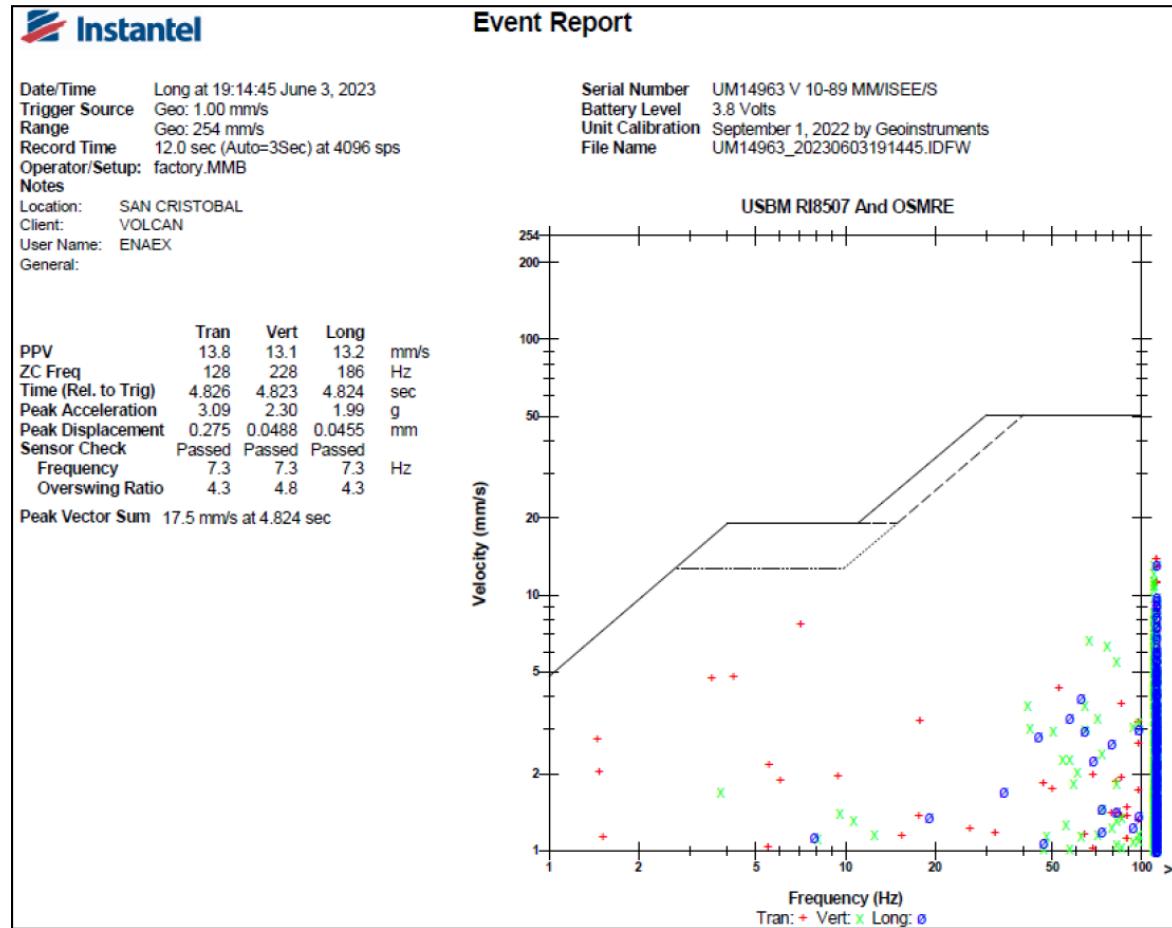
Labores de medición de vibraciones

Fecha	Labor	VOD (m/s)
3-Jun	SN 82 OE	3855
7-Jun	RP 314 W (-)	4284
9-Jun	RP 314 W (-)	4030

Fuente: Elaboración propia

Figura 53

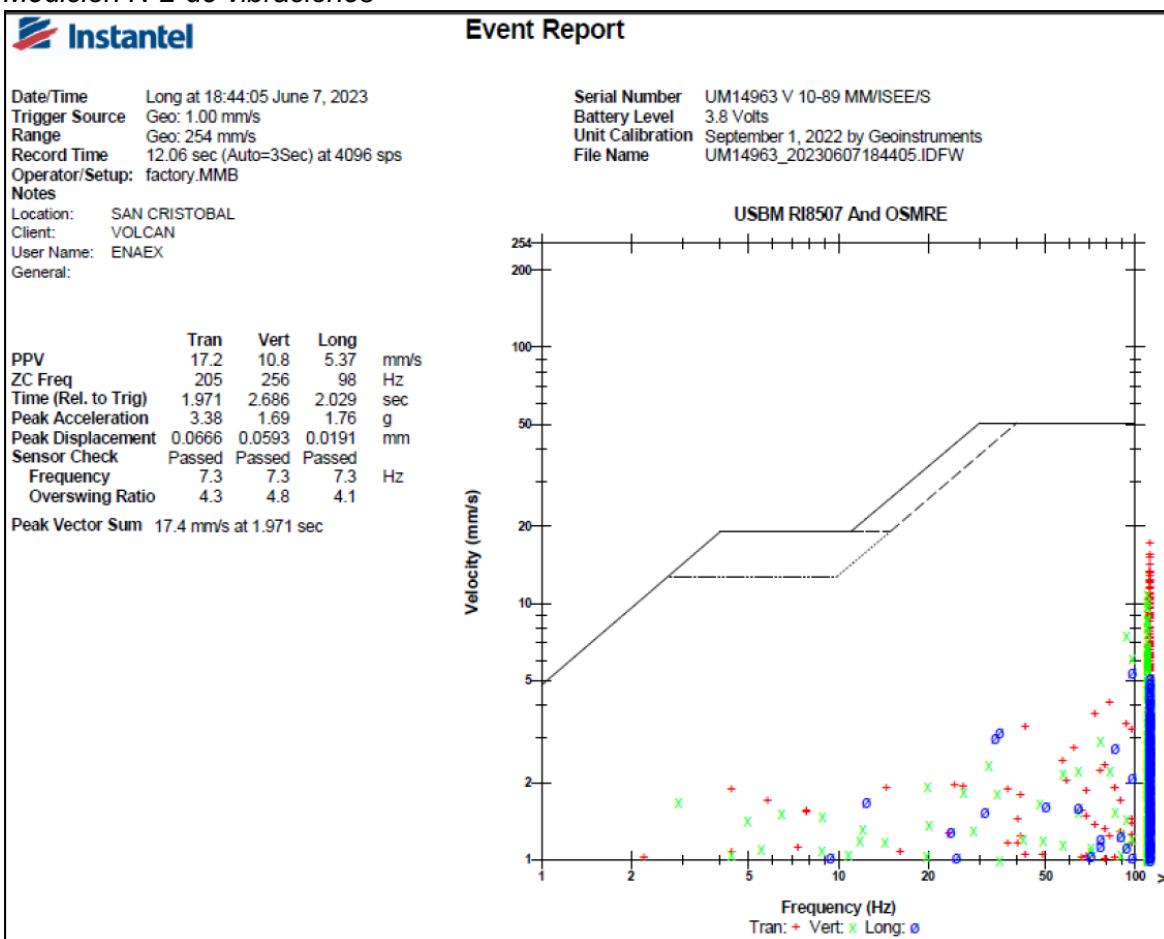
Medición N^a1 de vibraciones



Fuente: ENAEX

Figura 54

Medición N^o2 de vibraciones



Fuente: ENAEX

Figura 55

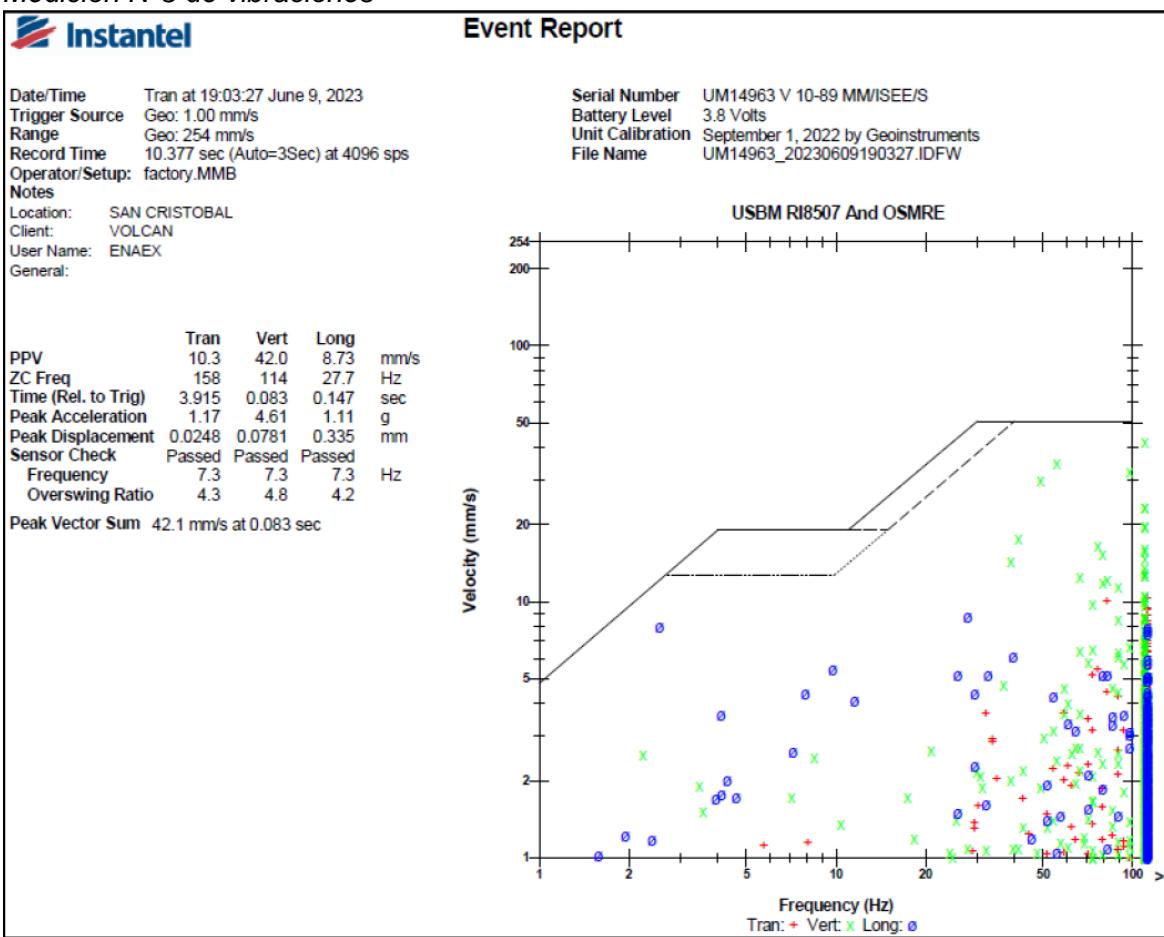
Equipo de Medición VOD y Vibraciones



Fuente: ENAEX

Figura 56

Medición N^o3 de vibraciones



Fuente: ENAEX

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de productividad

4.1.1 Mecanización

El proceso unitario presenta un porcentaje de mecanización ya que aun es necesario la presencia de personal de piso en los frentes de minado. Dada la implementación de emulsión bombeable, el porcentaje de mecanización de la mina se incrementa de 71 % a 83 %.

Tabla 17

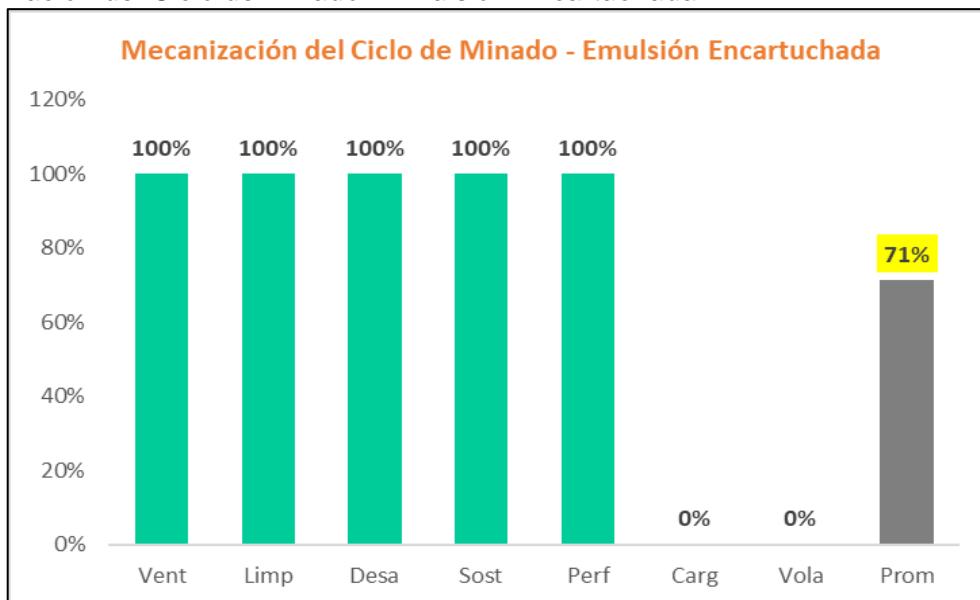
Mecanización del ciclo de minado

	ACTIVIDAD	EE	EBG
1	Ventilación	100%	100%
2	Limpieza	100%	100%
3	Desate	100%	100%
4	Sostenimiento	100%	100%
5	Perforación	100%	100%
6	Carguío	0%	80%
7	Voladura	0%	0%
MECANIZACIÓN		71%	83%

Fuente: Elaboración propia

Figura 57

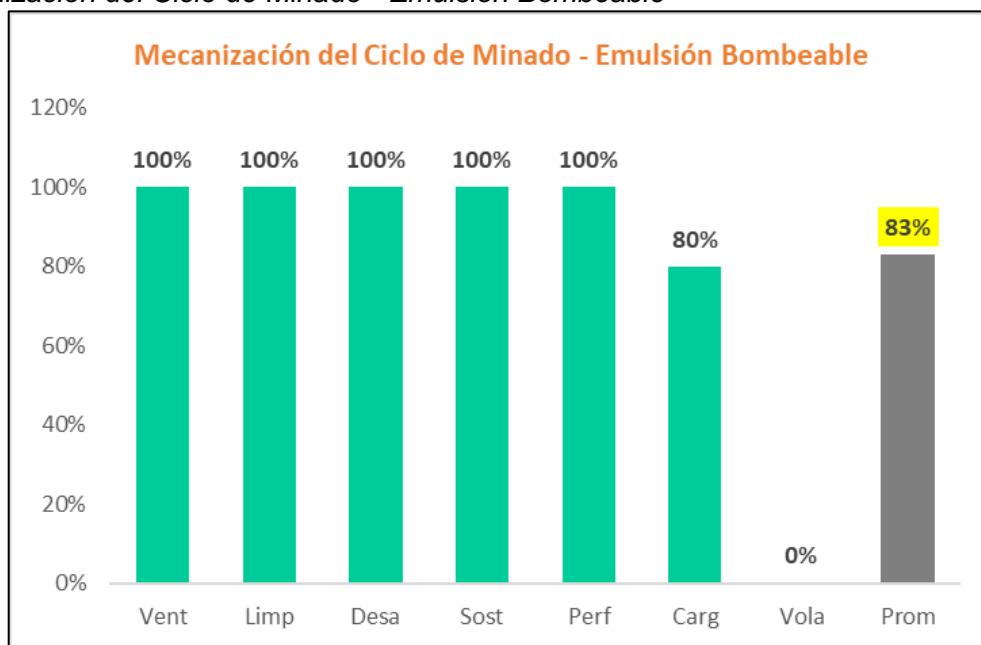
Mecanización del Ciclo de Minado - Emulsión Encartuchada



Fuente: Elaboración propia

Figura 58

Mecanización del Ciclo de Minado - Emulsión Bombeable



Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Perforación

El cambio de agente explosivo nos permite cambiar las mallas de perforación, reduciendo la cantidad de taladros perforados, por lo que se aprecian mejoras en la performance de la perforación, mostradas a continuación.

Tabla 18

Parámetros de perforación – Emulsión Encartuchada

	RP	XC	BP	CA	AC	SN
Taladros Perforados (und)	50	50	50	43	43	41
T. cargados (und)	45	45	45	38	38	37
T. rimados (und)	5	5	5	5	5	4
T. alivio (und)	-	-	-	-	-	-
Diámetro de perforación (mm)	48	48	48	48	48	51
T. producción (mm)	48	48	48	48	48	51
T. rimados (mm)	102	102	102	102	102	102
Tiempo de perforación 13 pies 01 brazo (hrs)	2.90	2.90	2.90	2.59	2.59	2.43
Tiempo de perforación 13 pies 02 brazo (hrs)	1.62	1.62	1.62	1.46	1.46	1.38
t. instalación(min)	10	10	10	10	10	10
t. pintado (min)	10	10	10	10	10	10
t. perf/tal (min)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
t. perf/rim (min)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Tiempo de perforación 15 pies 01 brazo (hrs)	3.21	3.21	3.21	2.86	2.86	2.68
Tiempo de perforación 15 pies 02 brazo (hrs)	1.77	1.77	1.77	1.60	1.60	1.51
t. instalación(min)	10	10	10	10	10	10
t. pintado (min)	10	10	10	10	10	10
t. perf/tal (min)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
t. perf/rim (min)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19*Parámetros de perforación – Emulsión Bombeable*

	RP	XC	BP	CA	AC	SN
Taladros Perforados (und)	45	45	45	39	40	39
T. cargados (und)	40	40	40	34	35	34
T. rimados (und)	5	5	5	5	5	5
T. alivio (und)	-	-	-	-	-	-
Diámetro de perforación (mm)	48	48	48	48	48	51
T. producción (mm)	48	48	48	48	48	51
T. rimados (mm)	102	102	102	102	102	102
Tiempo de perforación 13 pies 01 brazo (hrs)	2.68	2.68	2.68	2.24	2.28	2.24
Tiempo de perforación 13 pies 02 brazo (hrs)	1.50	1.50	1.50	1.20	1.23	1.20
t. instalación(min)	10	10	10	10	10	10
t. pintado (min)	10	10	10	10	10	10
t. perf/tal (min)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
t. perf/rim (min)	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Tiempo de perforación 15 pies 01 brazo (hrs)	2.96	2.96	2.96	2.66	2.71	2.66
Tiempo de perforación 15 pies 02 brazo (hrs)	1.65	1.65	1.65	1.50	1.52	1.50
t. instalación(min)	10	10	10	10	10	10
t. pintado (min)	10	10	10	10	10	10
t. perf/tal (min)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
t. perf/rim (min)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20*Resultados de perforación – 13 pies*

T. Labor	RP	XC	BP	CA	AC	SN	PROM
Nº Taladros_EE	50	50	50	43	43	41	46
Nº Taladros_EBG	45	45	45	39	40	39	42
Tiempo perf_EE	1.62	1.62	1.62	1.46	1.46	1.38	1.53
Tiempo perf_EBG	1.50	1.50	1.50	1.20	1.23	1.20	1.36

Fuente: Elaboración propia

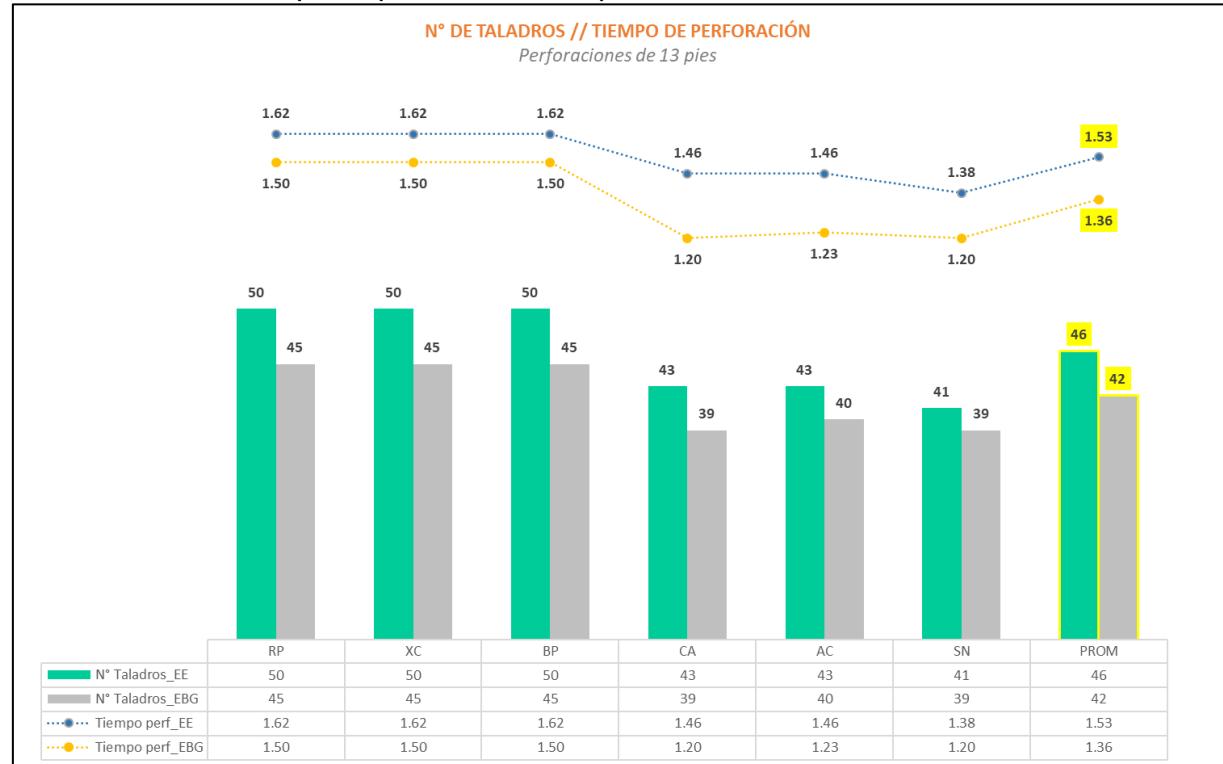
Tabla 21*Resultados de perforación – 15 pies*

T. Labor	RP	XC	BP	CA	AC	SN	PROM
Nº Taladros_EE	50	50	50	43	43	41	46
Nº Taladros_EBG	45	45	45	39	40	39	42
Tiempo perf_EE	1.77	1.77	1.77	1.60	1.60	1.51	1.67
Tiempo perf_EBG	1.65	1.65	1.65	1.50	1.52	1.50	1.58

Fuente: Elaboración propia

Figura 59

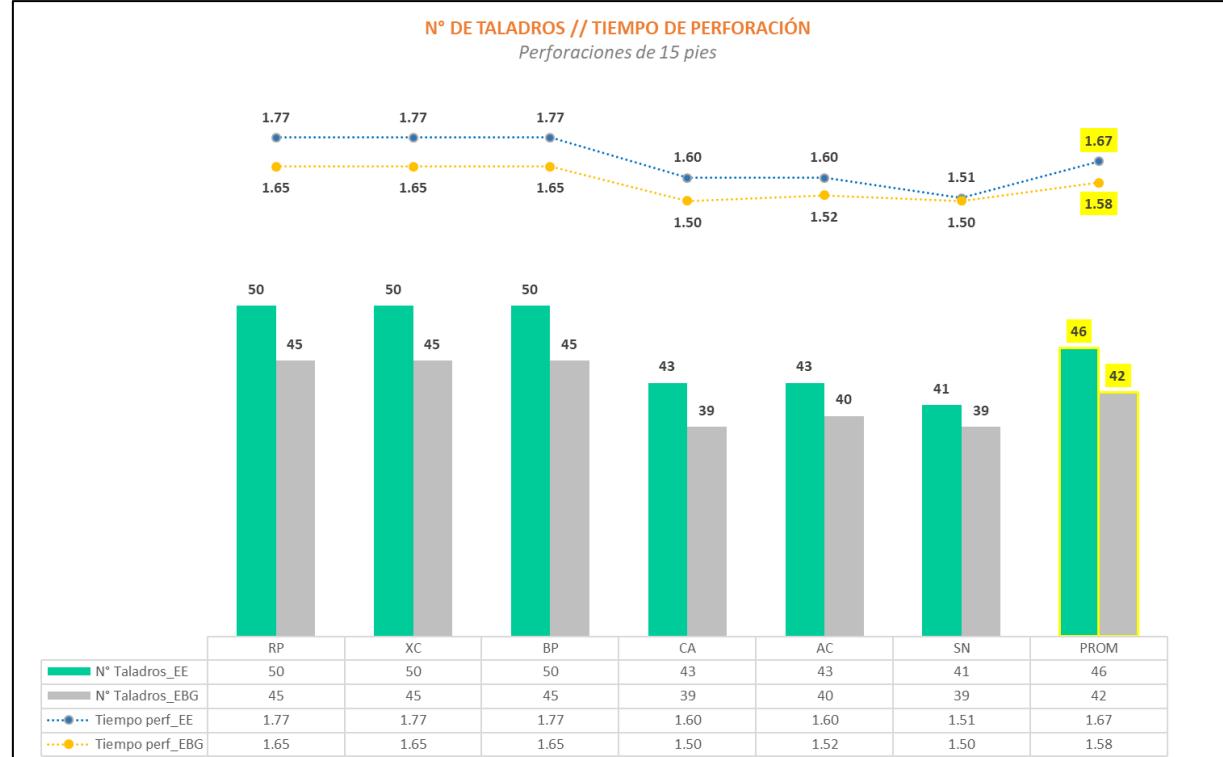
Nº de taladros vs tiempo de perforación – 13 pies



Fuente: Elaboración propia

Figura 60

Nº de taladros vs tiempo de perforación – 15 pies



Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Voladura

Respecto a los indicadores de voladura, al ser un explosivo especializado, no generara mayor consumo de explosivo. Pero dada su alto grado de mecanización nos permitirá reducir tiempos de carguío, reduciendo así el tiempo de exposición del personal al peligro.

Tabla 22

Parámetros de voladura – Emulsión Encartuchada

	RP	XC	BP	CA	AC	SN
Taladros Perforados (und)	50	50	50	43	43	41
T. cargados (und)	45	45	45	38	38	37
T. rimados (und)	5	5	5	5	5	4
T. alivio (und)	-	-	-	-	-	-
Cantidad de explosivos perf. 13 pies (kg)	150.2	150.2	150.2	129.0	129.0	107.2
EE 3000 1 1/2x12" (kg)	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0	0.0
EE 3000 1 1/4x12" (kg)	52.7	52.7	52.7	33.0	33.0	86.2
EE 1000 1 1/4x12" (kg)	22.5	22.5	22.5	21	21	21
Cantidad de explosivos perf. 15 pies (kg)	183.4	183.4	183.4	154.3	154.3	122.9
EE 3000 1 1/2x12" (kg)	89.1	89.1	89.1	89.1	89.1	0.0
EE 3000 1 1/4x12" (kg)	68.1	68.1	68.1	37.2	37.2	98.4
EE 1000 1 1/4x12" (kg)	26.25	26.25	26.25	28	28	24.5
Acoplamiento (%)	87%	87%	87%	87%	87%	72%
Diámetro de cartucho	41.7	41.7	41.7	41.7	41.7	36.5
Diámetro de taladro	48	48	48	48	48	51
Tiempo carguío total perf. 13 pies (hrs)	1.08	1.08	1.08	0.97	0.97	0.95
t. preparación explosivos (min)	15	15	15	15	15	15
t. carguío/tal (seg)	45	45	45	45	45	45
t. maniobra/tal (seg)	15	15	15	15	15	15
t. amarre (min)	5	5	5	5	5	5
Tiempo carguío total perf. 15 pies (hrs)	1.21	1.21	1.21	1.07	1.07	1.05
t. preparación explosivos (min)	15	15	15	15	15	15
t. carguío/tal (seg)	55	55	55	55	55	55
t. maniobra/tal (seg)	15	15	15	15	15	15
t. amarre (min)	5	5	5	5	5	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23*Parámetros de voladura – Emulsión Bombeable*

	RP	XC	BP	CA	AC	SN
Taladros Perforados (und)	45	45	45	39	40	39
T. cargados (und)	40	40	40	34	35	34
T. rimados (und)	5	5	5	5	5	5
T. alivio (und)	-	-	-	-	-	-
Cantidad de explosivos perf. 13 pies (kg)	228.5	240.6	0.0	207.5	217.3	161.0
EE 3000 1 1/2x12" (kg)	-	-	-	-	-	-
EE 3000 1 1/4x12" (kg)	-	-	-	-	-	-
EE 1000 1 1/4x12" (kg)	228.5	240.6	0.0	207.5	217.3	161.0
Cantidad de explosivos perf. 15 pies (kg)	248.4	229.9	247.0	240.4	207.7	163.9
EE 3000 1 1/2x12" (kg)	-	-	-	-	-	-
EE 3000 1 1/4x12" (kg)	-	-	-	-	-	-
EE 1000 1 1/4x12" (kg)	248.4	229.9	247.0	240.4	207.7	163.9
Acoplamiento (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Diámetro de cartucho	48	48	48	48	48	51
Diámetro de taladro	48	48	48	48	48	51
Tiempo carguío total perf. 13 pies (hrs)	0.61	0.61	0.61	0.54	0.56	0.54
t. preparación explosivos (min)	5	5	5	5	5	5
t. carguío/tal (seg)	18	18	18	18	18	18
t. maniobra/tal (seg)	22	22	22	22	22	22
t. amarre (min)	5	5	5	5	5	5
Tiempo carguío total perf. 15 pies (hrs)	0.66	0.63	0.63	0.58	0.59	0.58
t. preparación explosivos (min)	5	5	5	5	5	5
t. carguío/tal (seg)	22	22	22	22	22	22
t. maniobra/tal (seg)	22	20	20	22	22	22
t. amarre (min)	5	5	5	5	5	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24*Resultados de voladura – 13 pies*

T. Labor	RP	XC	BP	CA	AC	SN	PROM
Explosivos_EE	150.2	150.2	150.2	129.0	129.0	107.2	135.9
Explosivos_EBG	228.5	240.6	0.0	207.5	217.3	161.0	175.8
Tiempo carguío_EE	1.08	1.08	1.08	0.97	0.97	0.95	1.02
Tiempo carguío_EBG	0.61	0.61	0.61	0.54	0.56	0.54	0.58

Fuente: Elaboración propia

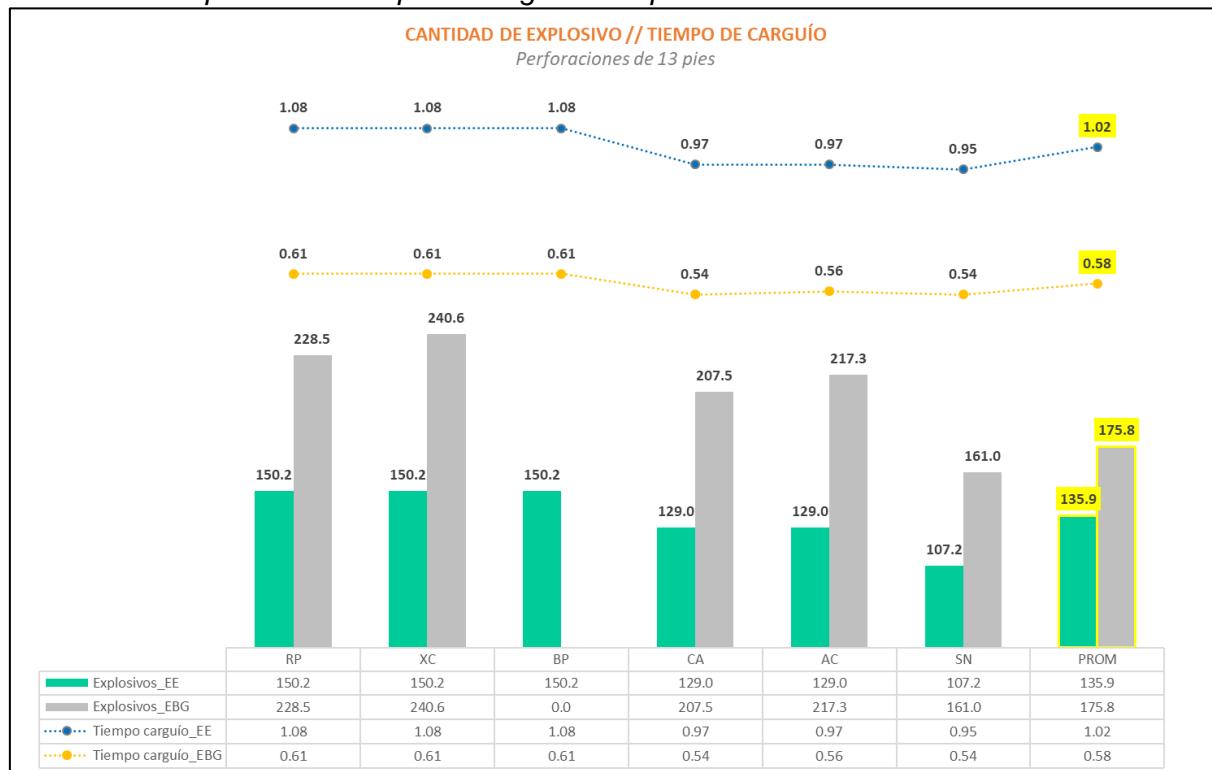
Tabla 25*Resultados de voladura – 15 pies*

T. Labor	RP	XC	BP	CA	AC	SN	PROM
Explosivos_EE	183.4	183.4	183.4	154.3	154.3	122.9	163.6
Explosivos_EBG	248.4	229.9	247.0	240.4	207.7	163.9	222.9
Tiempo carguío_EE	1.21	1.21	1.21	1.07	1.07	1.05	1.14
Tiempo carguío_EBG	0.66	0.63	0.63	0.58	0.59	0.58	0.61

Fuente: Elaboración propia

Figura 61

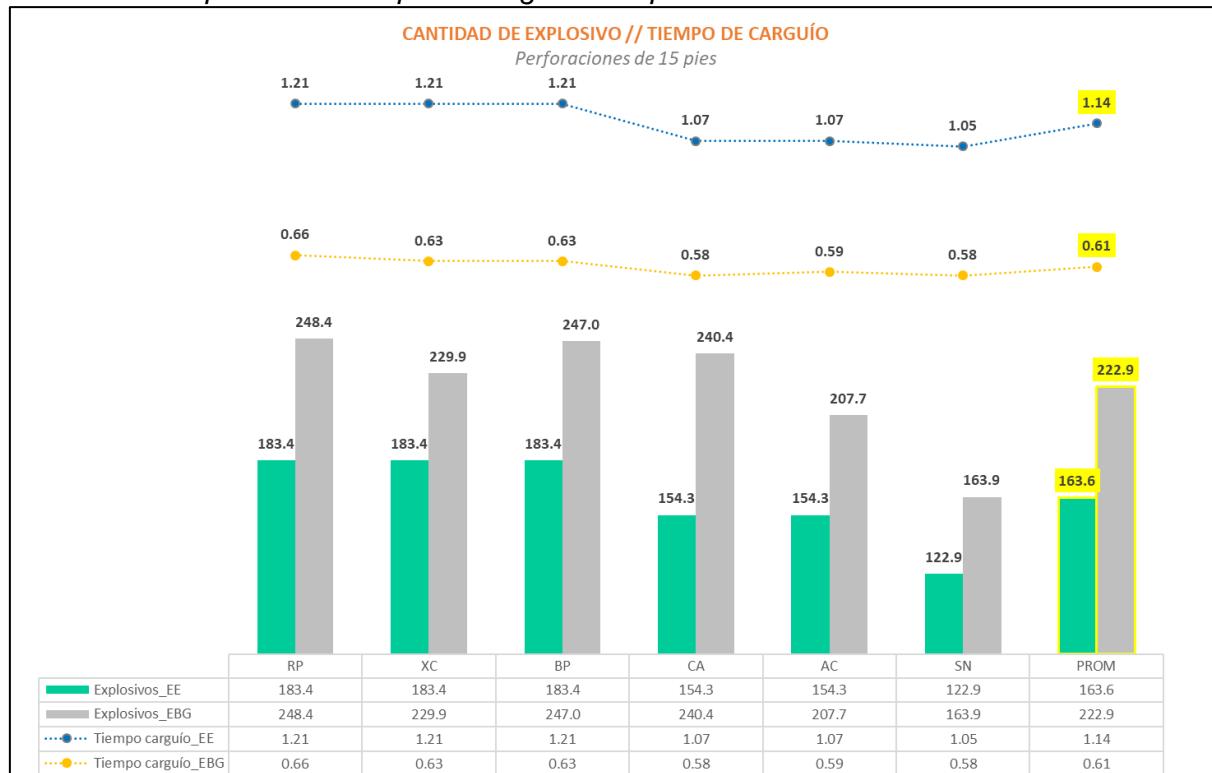
Cantidad de explosivo vs tiempo de carguío – 13 pies



Fuente: Elaboración propia

Figura 62

Cantidad de explosivo vs tiempo de carguío – 15 pies



Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Avance y Sobre-rotura

Se evaluará en un gráfico global los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el capítulo 3.3 y 3.4, para poder visualizar la eficacia y eficiencia de avance y sobre-rotura del uso de emulsión bombeable y poder comparar con los KPIs de línea base.

Tabla 26

Resultados de voladura – etapa N^a 1 de Emulsión Bombeable

Labor	L. Perforación	L. Avance	E. Avance	S. Excavación
AC 170	3.80	3.64	95.74%	20.50%
CA 11xRP 616_4E	3.85	3.52	91.48%	12.89%
CA 4 POLVORÍN	3.80	2.87	75.44%	0.00%
RP 658_2(-)	3.93	3.03	77.12%	6.77%
XC 1420	3.88	3.69	95.20%	12.31%
XC 617	3.79	3.43	90.44%	7.92%
RP SP10 (+)	3.84	3.63	94.45%	22.50%
RP 314 E(-)	4.32	4.02	93.09%	15.87%
RP 314 W(-)	3.85	3.61	93.70%	11.21%
CA 4 x RP 780	4.40	4.37	99.32%	26.31%
CA 3 x 314 E(-)	3.90	3.80	97.44%	12.75%
CA 2 x BP 870	4.40	4.30	97.73%	7.62%
SN 80_1E	3.85	3.68	95.50%	11.88%
AC_81_0W	3.87	3.87	100.00%	9.64%
CA_13_314	4.35	4.00	92.02%	5.00%
CA_144_3	4.30	4.00	93.02%	12.88%
RP 315(+)	4.40	4.20	95.45%	23.46%
RP_314 E(-)	4.30	4.00	93.02%	4.49%
BP_870	4.30	4.24	98.60%	14.48%
RP_314 W(-)	4.30	3.90	90.70%	11.41%
XC_617	3.90	3.50	89.74%	6.67%
CA_3_RP_314	4.40	1.80	40.91%	15.50%
PROMEDIO	4.01	3.68	91.78%	14.04%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27

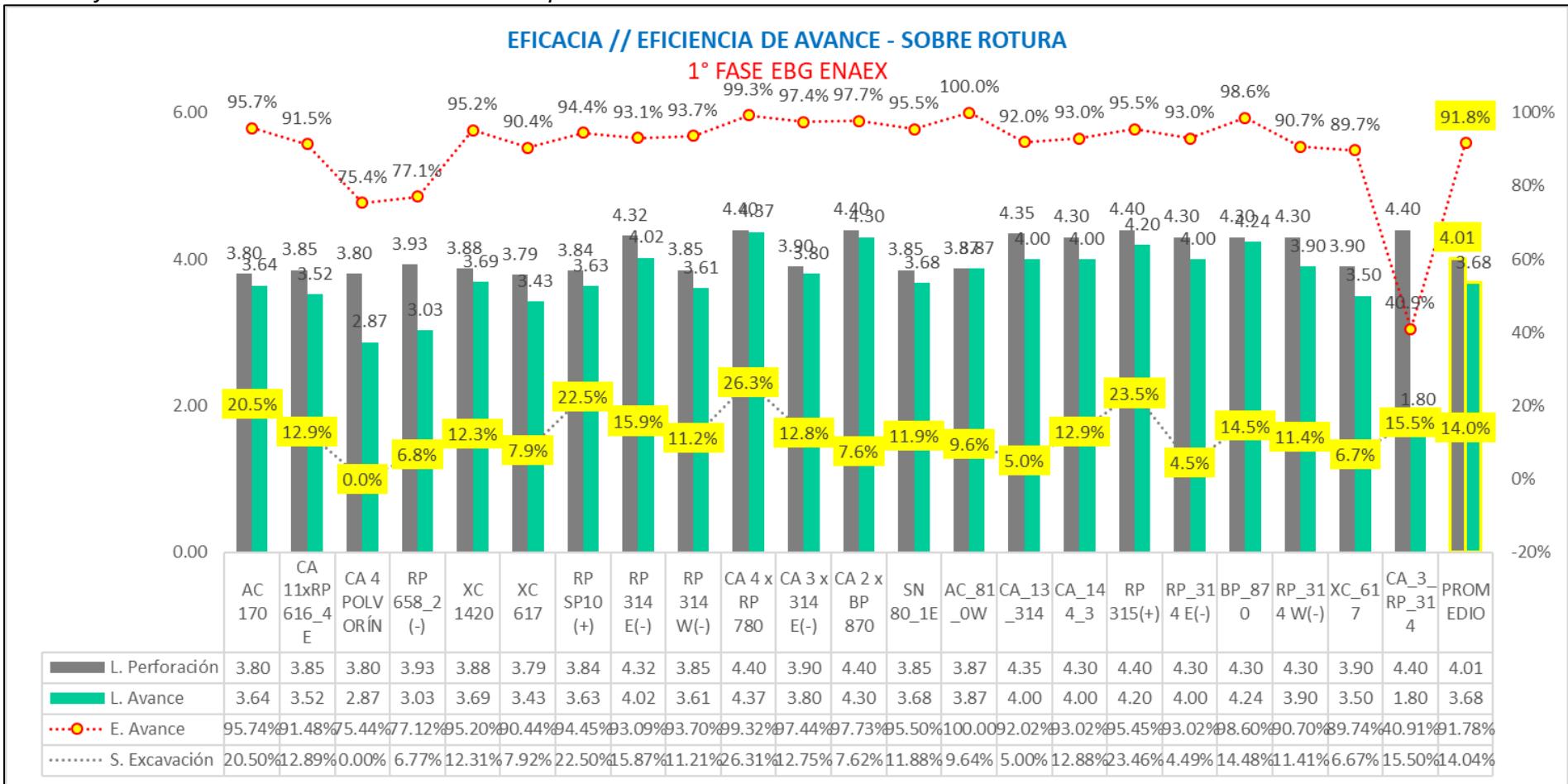
Resultados de voladura – etapa N^a 2 de Emulsión Bombeable

Labor	L. Perforación	L. Avance	E. Avance	S. Excavación
RP_314 E(-)	3.60	3.51	97.50%	6.77%
RP_314 W(-)	4.10	3.77	92.23%	9.51%
CA_22_SP5_1	4.40	4.00	90.91%	0.00%
CA_01_1420	3.60	3.10	86.11%	5.06%
RP_616_4E	3.70	3.20	86.49%	11.31%
AC_SP6	3.70	3.15	85.14%	7.76%
CA_02_SP6	3.70	3.50	94.59%	4.81%
RP_315 (+)	4.40	4.33	98.41%	6.92%
CA_81_2_5E	3.70	3.47	93.78%	12.88%
CA_02_81_5E	3.85	3.75	97.42%	4.44%
PROMEDIO	3.99	3.72	93.22%	8.18%

Fuente: Elaboración propia

Figura 63

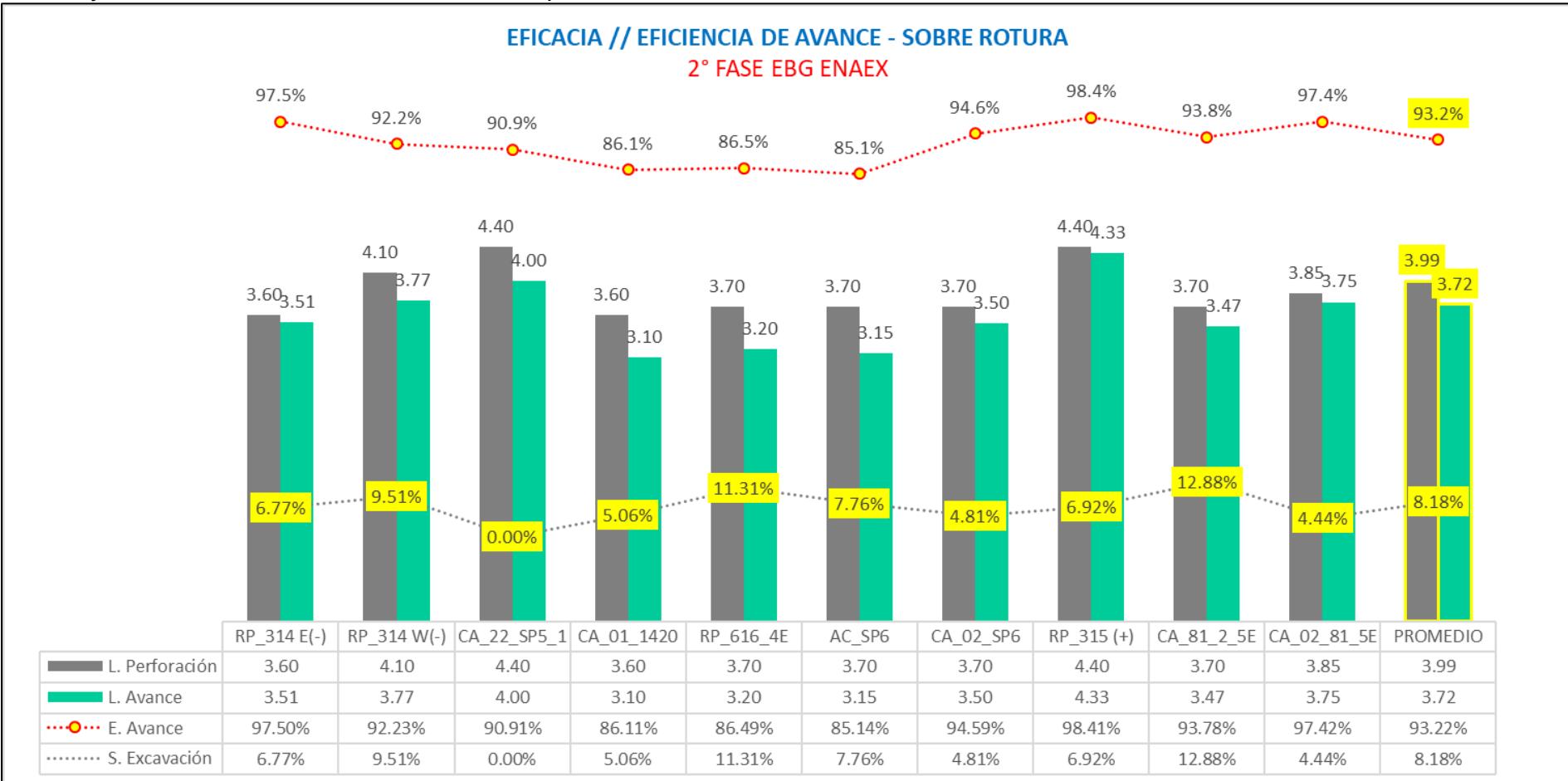
Eficacia y eficiencia de avance - sobre rotura – Etapa N^a 1



Fuente: Elaboración propia

Figura 64

Eficacia y eficiencia de avance - sobre rotura – Etapa N^a 2



Fuente: Elaboración propia

Tabla 28*Parámetros de avance y sobre-rotura – Emulsión Encartuchada*

	RP	XC	BP	CA	AC	SN
Eficacia de Avance (m/disp)						
Perforaciones de 13 ft (m/disp)	3.34	3.40	3.56	3.37	3.47	3.34
Perforaciones de 15 ft (m/disp)	3.82	3.70		3.95	3.93	3.60
Cantidad de Explosivo (kg)						
Perforaciones de 13 ft (m/disp)	150.2	150.2	150.2	129.0	129.0	107.2
Perforaciones de 15 ft (m/disp)	183.4	183.4	183.4	154.3	154.3	122.9
Factor de Avance (kg/m)						
Perforaciones de 13 ft (kg/m)	45.0	44.2	42.2	38.3	37.2	32.1
Perforaciones de 15 ft (kg/m)	48.0	49.6		39.1	39.3	34.1
Factor de Potencia (kg/tn)						
Perforaciones de 13 ft (kg/tn)						0.70
Perforaciones de 15 ft (kg/tn)						0.74
Sobre Excavación (%)						
Perforaciones de 13 ft (%)	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%
Perforaciones de 15 ft (%)	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29*Parámetros de avance y sobre-rotura – Emulsión Bombeable*

	RP	XC	BP	CA	AC	SN
Eficacia de Avance (m/disp)						
Perforaciones de 13 ft (m/disp)	3.50	3.53	0.00	3.54	3.79	3.60
Perforaciones de 15 ft (m/disp)	4.01	3.80	4.24	3.80	4.09	4.14
Cantidad de Explosivo (kg)						
Perforaciones de 13 ft (m/disp)	228.5	240.6	0.0	207.5	217.3	161.0
Perforaciones de 15 ft (m/disp)	258.9	229.9	247.0	240.4	207.7	163.9
Factor de Avance (kg/m)						
Perforaciones de 13 ft (kg/m)	65.4	68.1		58.6	57.3	44.7
Perforaciones de 15 ft (kg/m)	64.5	60.5	58.3	63.3	50.8	39.6
Factor de Potencia (kg/tn)						
Perforaciones de 13 ft (kg/tn)						0.97
Perforaciones de 15 ft (kg/tn)						0.86
Sobre Excavación (%)						
Perforaciones de 13 ft (%)	17.0%	10.1%	0.0%	11.8%	14.2%	8.8%
Perforaciones de 15 ft (%)	12.2%	9.1%	14.5%	12.3%	7.8%	5.8%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30*Resultados de avance y sobre-rotura – 13 pies*

T. Labor	RP	XC	BP	CA	AC	SN	PROM
F. Avance_EE	45.0	44.2	42.2	38.3	37.2	32.1	39.8
F. Avance_EBG	65.4	68.1		58.6	57.3	44.7	58.8
S. Excavación_EE	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%
S. Excavación_EBG	17.0%	10.1%		11.8%	14.2%	8.8%	8.5%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31

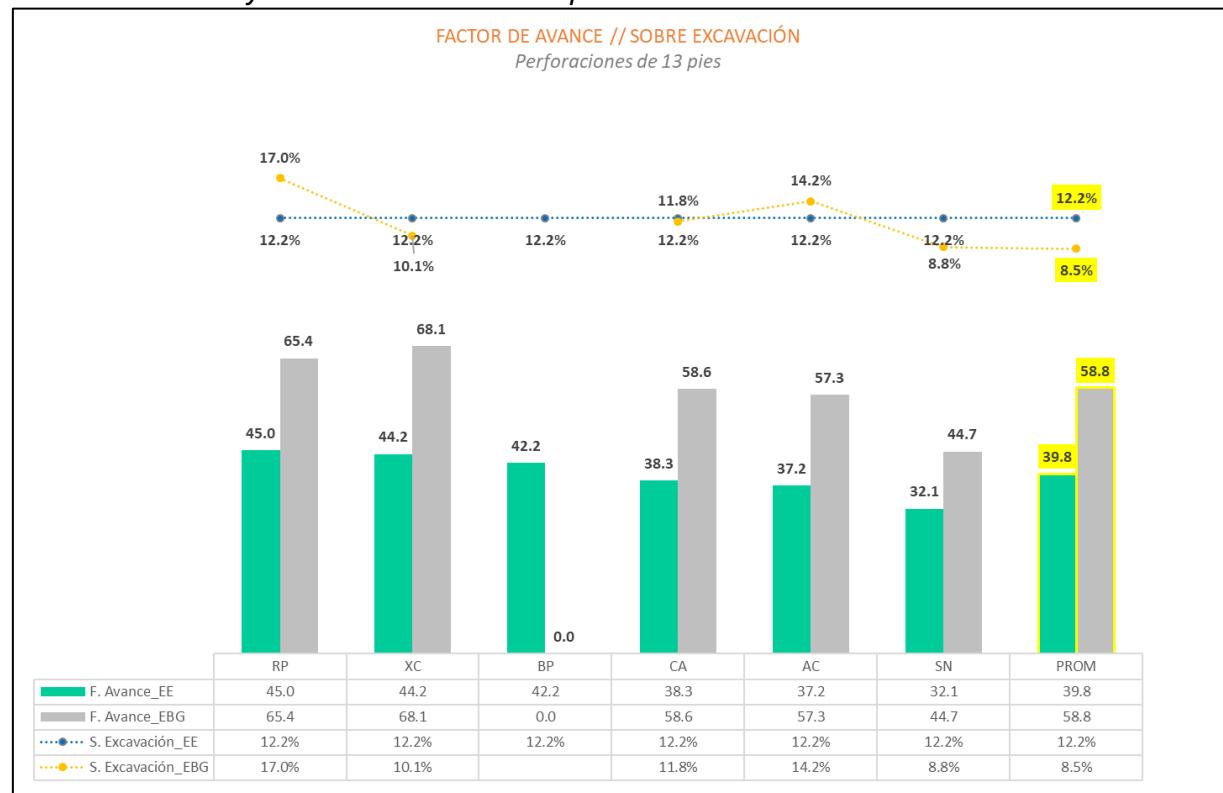
Resultados de avance y sobre-rotura – 15 pies

T. Labor	RP	XC	BP	CA	AC	SN	PROM
F. Avance_EE	48.0	49.6		39.1	39.3	34.1	42.0
F. Avance_EBG	64.5	60.5	58.3	63.3	50.8	39.6	56.2
S. Excavación_EE	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%
S. Excavación_EBG	12.2%	9.1%	14.5%	12.3%	7.8%	5.8%	10.5%

Fuente: Elaboración propia

Figura 65

Factor de avance y sobre excavación – 13 pies



Fuente: Elaboración propia

Figura 66

Factor de avance y sobre excavación – 15 pies



Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de costos

4.2.1 Consumo de aceros

Para esta sección se tomará en consideración la incidencia promedio mensual de desarrollo de túneles como base y un avance promedio mensual de 1576 metros. Así obtendremos el avance por tipo de labor.

Se calculará la cuantificación económica de cada ítem para determinar el ahorro mensual por implementación de emulsión bombeable.

Tabla 32

Incidencia de desarrollo de labores

T. Labor	RP	XC	BP	CA	AC	SN	Total
Incidencia	22 %	4 %	4 %	21 %	16 %	33 %	100 %
Avance mensual	347 m	63 m	63 m	331 m	252 m	520 m	1576 m

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33*Ahorro de costos por consumo de aceros*

Avance mensual (m)	Longitud	RP		XC		BP	
	1576 m	347 m		63 m		63 m	
	Incidencia	22%		4%		4%	
		EE	EBG	EE	EBG	EE	EBG
Eficacia de avance por disparo	m/disparo.	3.34	3.50	3.40	3.53	3.56	3.53
Variación	m/disparo.		0.16		0.13		-0.03
Número de taladros	tal/frente	50	45	50	45	50	45
Variación	tal/frente		5		5		5
Metros perforados	mp/frente	214.5	195.0	214.5	195.0	214.5	195.0
Variación	mp/frente		19.5		19.5		19.5
Costo de explosivos por metro	\$/m	15.1	13.1	14.8	13.0	14.2	13.0
Variación	\$/m		2.0		1.9		1.2
Cuantificación económica	\$/mes	5,233	4,544	935	817	893	820
Variación	\$/mes	688.4		117.1		73.1	
Avance mensual (m)	Longitud	CA		AC		SN	
	1576 m	331 m		252 m		520 m	
	Incidencia	21 %		16 %		33 %	
		EE	EBG	EE	EBG	EE	EBG
Eficacia de avance por disparo	m/disparo.	3.37	3.54	3.47	3.79	3.34	3.60
Variación	m/disparo.		0.17		0.32		0.26
Número de taladros	tal/frente	43	39	43	40	41	39
Variación	tal/frente		4		3		2
Metros perforados	mp/frente	187.2	171.6	187.2	175.5	187.2	145.2
Variación	mp/frente		15.6		11.7		42.0
Costo de explosivos por metro	\$/m	13.1	11.4	12.7	10.9	13.2	9.5
Variación	\$/m		1.7		1.8		3.7
Cuantificación económica	\$/mes	4,320	3,768	3,197	2,742	6,850	4,929
Variación	\$/mes	552.0		455.3		1,920.6	
						TOTAL	3,806.45

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Consumo de explosivos

Considerando las mismas condiciones e incidencia de labores se calculará el costo adicional por sobreconsumo de explosivos.

Debido a que el nuevo explosivo es mas costoso respecto a la línea base, este nos generara mayores costos, los cuales deberían ser sopesados con los otros procesos de minado.

Tabla 34*Costos adicionales por sobreconsumo de explosivos*

Avance mensual (m)	Longitud	RP		XC		BP	
	1576 m	347 m		63 m		63 m	
	Iciden.	22%		4%		4%	
	EE	EBG	EE	EBG	EE	EE	EBG
Eficacia de avance por disparo	m/disp.	3.34	3.50	3.40	3.53	3.56	3.53
Variación	m/disp.		0.16		0.13		-0.03
Consumo de explosivos	kg/disp.	150.2	228.5	150.2	240.6	150.2	240.6
Variación	kg/disp.		78.35		90.48		90.44
Factor de avance	kg/m	45.0	65.4	44.2	68.1	42.2	68.2
Variación	kg/disp.		20.40		23.93		25.98
Costo de explosivos por metro	\$/m	114.0	174.2	112.1	177.9	107.1	154.9
Variación	\$/m		60		66		48
Cuantificación económica	\$/mes	39,524	60,405	7,069	11,212	6,752	9,765
Variación	\$/mes		-20,880.7		-4,142.8		-3,013.2
	Longitud	CA		AC		SN	
Avance mensual (m)	1576 m	331 m		252 m		520 m	
	Iciden.	21 %		16 %		33 %	
	EE	EBG	EE	EBG	EE	EE	EBG
Eficacia de avance por disparo	m/disp.	3.37	3.54	3.47	3.79	3.34	3.60
Variación	m/disp.		0.17		0.32		0.26
Consumo de explosivos	kg/disp.	129.0	207.5	129.0	217.3	107.2	161.0
Variación	kg/disp.		78.48		88.33		53.84
Factor de avance	kg/m	38.3	58.6	37.2	57.3	32.1	44.7
Variación	kg/disp.		20.30		20.12		12.64
Costo de explosivos por metro	\$/m	97.7	158.8	94.8	152.9	85.3	133.3
Variación	\$/m		61		58		48
Cuantificación económica	\$/mes	32,321	52,571	23,916	38,554	44,381	69,319
Variación	\$/mes		-20,249.6		-14,637.5		-24,937.7
TOTAL						-87,861.4	

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Incremento económico por avance adicional

Debido a que usando la emulsión bombeable se consigue mayor eficiencia de avance, mensualmente se consigue la extracción de mineral y desmonte, lo que nos otorga mayor beneficio económico.

Para este calculo se considerará la incidencia mencionada anteriormente, así poder determinar la cantidad de mineral que se podría extraer y darle valor económico.

Tabla 35*Incremento de valor económico por avance adicional*

	Longitud	RP		XC		BP	
Avance mensual (m)	1576 m	347 m		63 m		63 m	
	Inciden.	22%		4%		4%	
		EE	EBG	EE	EBG	EE	EBG
Eficacia de avance	m/disp.	3.34	3.50	3.40	3.53	3.56	3.53
Variación	m/disp.		0.16		0.13		-0.03
Nº de disparos	cantidad	104	99	19	18	18	18
Variación	cantidad		-5		-1		0
Avance Proyectado	m	347	363	63	66	63	63
Variación	m		16.2		2.5		-0.5
	Longitud	CA		AC		SN	
Avance mensual (m)	1576 m	331 m		252 m		520 m	
	Inciden.	21 %		16 %		33 %	
		EE	EBG	EE	EBG	EE	EBG
Eficacia de avance	m/disp.	3.37	3.54	3.47	3.79	3.34	3.60
Variación	m/disp.		0.17		0.32		0.26
Nº de disparos	cantidad	98	93	73	66	156	144
Variación	cantidad		-5		-6		-11
Avance Proyectado	m	331	348	252	276	520	561
Variación	m		16.9		23.5		40.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36*Resumen de incremento económico por avance adicional*

	Longitud	RP	XC	BP	CA	AC	SN
Avance mensual (m)	1576 m	347 m	63 m	63 m	331 m	252 m	520 m
	Inciden.	22 %	4 %	4 %	21 %	16 %	33 %
Mineral	m						40.5
Aporte de min (tn)		50 tn/m					2,024.3
Cuantificación económica		120 USD/tn					242,911.6
Desmonte	m	16.2	2.5	-0.5	16.9	23.5	
Liberación de reservas (tn)	50 tn/m	811.2	124.0	-26.6	842.9	1,174.8	
Cuantificación económica	-	-	-	-	-	-	
						TOTAL	242,911.6

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Sostenimiento

Se calculará los costos de sostenimiento con shotcrete y pernos, en esta sección se vera reflejado un ahorro debido a una reducción de sobre-rotura, por lo que tendremos menor área a sostener.

Tabla 37*Consideraciones por variación de área a sostener*

DESMONTE				MINERAL						
SECCIÓN		SOBRE EXCAVACIÓN		SECCIÓN		SOBRE EXCAVACIÓN				
Plan	Real EE	Real EBG	EE	EBG	Plan	Real EE	Real EBG			
Ancho	4.500	4.766	4.760	12.2%	11.9%	4.500	4.766	4.760	12.2%	8.9%
Ancho	4.500	4.766	4.760			4.500	4.766	4.760		
PERÍMETRO			ÁREA EXCEDENTE		PERÍMETRO			ÁREA EXCEDENTE		
Plan	Real EE	Real EBG	EE	EBG	Plan	Real EE	Real EBG	EE	EBG	
Ancho	4.500	4.766	4.760	0.73	0.72	4.500	4.766	4.760	0.63	0.47
Ancho	4.500	4.766	4.760			4.500	4.766	4.760		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38*Ahorro de costos por sostenimiento*

		DESMONTE		MINERAL		TOTAL
		EE	EBG	EE	EBG	
Avance lineal	m	1,057	1,057	520	520	1,577
Sobre excavación	%	12.20%	11.90%	12.20%	8.90%	
Variación por sobre excavación	%		-0.3%		-3.3%	
Área excedente por sobre excavación	m ² /m	0.73	0.72	0.63	0.47	
Variación respecto al área excedente	m ² /m		-0.02		-0.17	
Área total a sostener por sobre excavación	m ²	775.7	758.2	330.1	242.6	
Variación respecto al área total a sostener	m ²		-17.5		-87.6	
Costo de shotcrete	USD/m ²	20.4	20.4	20.4	20.4	
Costo total de shotcrete	\$/mes	15,847.7	15,490.2	6,744.9	4,956.0	
Variación respecto al costo de shotcrete	\$/mes		357.5		1,788.9	2,146.3
Consumo de pernos	und/m ²	0.67	0.67	0.67	0.67	
Consumo total de pernos	und	1,164	1,137	495	364	
Variación respecto al consumo de pernos	und		-26		-131	
Costo de perno	\$/perno	29.0	29.0	29.0	29.0	
Costo total de pernos	\$	33,743.2	32,982.1	14,361.4	10,552.5	
Variación respecto al costo de pernos	\$		761.1		3,808.9	4,570.0

Fuente: Elaboración propia

4.2.5 Extracción y transporte

Al haber menor porcentaje de sobre-rotura, se generan menores excedentes de tonelaje lo que reduce el costo de extracción y transporte adicionales. Adicional a ello se reducen costos de tratamiento adicionales.

Tabla 39*Consideraciones por variación de sobreexcavación*

Sobre excavación tolerante	%	10%
Sccop 6 yd3 rendimiento dsm (200 m)	tn/hr	49.31
Sccop 6 yd3 rendimiento min (200 m)	tn/hr	61.11
Sccop 6 yd3 costo por hora	\$/hr	98.45
Volquete 35 tn costo por tonelada/kilómetro	\$/[tn*km]	0.45
Volquete 35 tn distancia (dsm)	km	3.50
Volquete 35 tn distancia (min)	km	7.00
Volquete 35 tn costo por tonelada (dsm)	\$/tn	1.58
Volquete 35 tn costo por tonelada (min)	\$/tn	3.15
Planta CC costo de tratamiento mineral	\$/tn	7.5
Desmontera costo por tonelada	\$/tn	1.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40*Ahorro de costos por extracción y transporte*

		DESMONTE		MINERAL		TOTAL
		EE	EBG	EE	EBG	
Avance lineal	m	1,057	1,057	520	520	1,577
Sobre excavación promedio	%	12.2%	11.9%	12.2%	8.9%	
Sobre excavación por encima del tolerante	%	2.2%	1.9%	2.2%	0.0%	
Variación por sobre excavación	%		1.0%		3.0%	
Tonelaje excedente por metro	tn/m		0.61		1.38	
Tonelaje excedente total	tn/m		649.6		720.0	1,369.6
LIMPIEZA SCOOP 6 yd3 (200)						
Tiempo de limpieza	hr		13.2		11.8	25.0
Costo total	\$		1,296.9		1,160.0	2,456.9
TRANSPORTE - VOLQUETE 35 tn						
Costo total	\$		1,023.1		2,268.0	3,291.1
DESMONTERA						
Costo total	\$		649.6			649.6
TRATAMIENTO						
Costo total	\$			5,400.1		5,400.1

Fuente: Elaboración propia

De los costos calculados anteriormente se mostrará en la Tabla 41 el resumen así como el total en dólares por mes que genera la implementación de emulsión bombeable en la operación.

Tabla 41*Ahorros totales por mes*

DATOS TÉCNICOS	EE	EBG	Var.	
Mecanización de la actividad	0%	80%	80%	
Mecanización del ciclo de minado	71%	83%	11%	
Tiempo de exposición del personal				
Perforación	100%	89%	-11%	
Carguío	100%	57%	-43%	
Número de taladros por frente	46	42	-4	
Tiempo de perforación por frente	1.53	1.36	-0.17	
Tiempo de carguío por frente	1.02	0.58	-0.44	
Cantidad de explosivos por frente	135.9	175.8	39.9	
Eficacia de avance promedio	3.38	3.60	0.22	
Sobre rotura promedio	12.2%	8.5%	-3.7%	
Factor de avance	39.8	58.8	19.0	
CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA				
Costo de aceros por frente	\$/frente	47.2	41.5	-5.7
Costo de aceros por metro	\$/m	13.8	11.6	-2.3
Ahorro en el consumo aceros	\$/mes		3,806.4	
Costo de explosivos por frente	\$/frente	347.8	572.0	224.2
Costo de explosivos por metro	\$/m	101.8	159.4	57.6
Incremento en el consumo explosivos	\$/mes		-87,861.4	
Avance adicional proyectado en subniveles (mineral)	m/mes	520.1	560.6	40.5
Aporte de mineral proyectado (50 tn/m)	tn/mes		2,024.3	
Incremento económico por avance adicional (VPT = 120 \$/TN)	\$/mes		242,911.6	
Variación del área a sostener por disminución de la S.R. (dsm)	m ²	775.7	758.2	-17.5
Variación del área a sostener por disminución de la S.R. (min)	m ²	330.1	242.6	-87.6
Ahorro en el consumo de shotcrete	\$/mes		2,146.3	
Ahorro en el consumo de pernos	\$/mes		4,570.0	
Disminución en el tonelaje excedente	tn/mes		1,369.6	
Ahorro en horas scoop	\$/mes		2,456.9	
Ahorro en horas volquete	\$/mes		3291.1	
Ahorro en costo de desmontera	\$/mes		649.6	
Ahorro en costo de tratamiento - planta	\$/mes		5400.1	
AHORROS TOTALES POR MES			177,370.6	

Fuente: Elaboración propia

4.3 Validación de hipótesis

Para esta sección empezaremos estableciendo la hipótesis nula y alternativa

- Hipótesis Nula (H0) La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea, no permitirá generar impactos positivos en la productividad de la operación.
- Hipótesis Alternativa (HA): La implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea, permitirá generar impactos positivos en la productividad de la operación.

Se utilizará la información mostrada en las tablas 20, 21, 24 y 25, donde tenemos los tiempos de perforación y carguío en taladros de 13 y 15 pies. Seleccionamos un grado de significancia de 5 %. En la siguiente tabla se mostrará un resumen de los datos requeridos, así como su media y desviación estándar.

Tabla 42

Resumen de datos de tiempos de perforación y carguío

	RP	XC	BP	CA	AC	SN	MEDIA	DESV. ESTANDAR
13 PIES								
Tiempo perf_EE	1.62	1.62	1.62	1.46	1.46	1.38	1.527	0.106
Tiempo perf_EBG	1.5	1.5	1.5	1.2	1.23	1.2	1.355	0.159
15 PIES								
Tiempo perf_EE	1.77	1.77	1.77	1.6	1.6	1.51	1.670	0.114
Tiempo perf_EBG	1.65	1.65	1.65	1.5	1.52	1.5	1.578	0.079
Tiempo carguío_EE	1.21	1.21	1.21	1.07	1.07	1.05	1.137	0.081
Tiempo carguío_EBG	0.66	0.63	0.63	0.58	0.59	0.58	0.612	0.033

Fuente: Elaboración propia

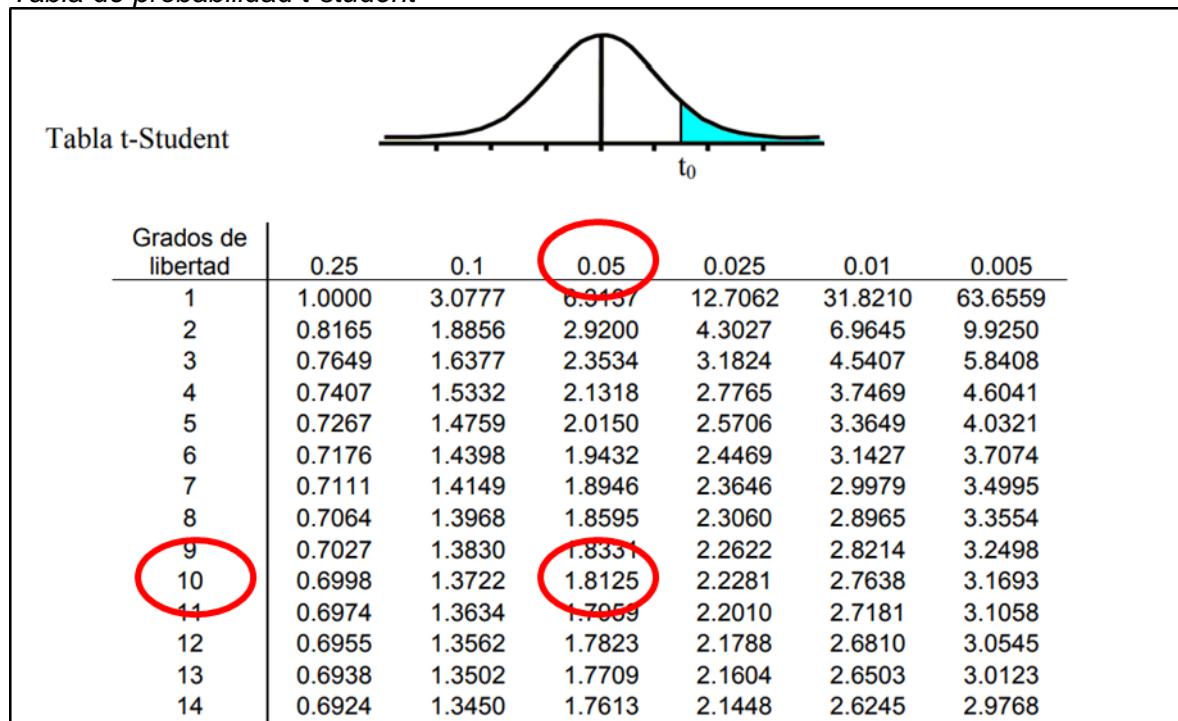
Tenemos:

- Cantidad de datos con EE (n1 = 6)
- Cantidad de datos con EBG (n2 = 6)
- Grados de libertad: $df = n1 + n2 - 2 = 6 + 6 - 2 = 10$

Para este caso según la tabla de probabilidad t-student el t crítico para 10 grados de libertad es de 1.813, si el t calculado es mayor al t critico se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Figura 67

Tabla de probabilidad t-student



Fuente: UBA

Prueba t para muestras independientes: Calcula el valor t usando la fórmula de la prueba t para dos muestras:

$$t1 = \frac{(M1 - M2)}{\sqrt{\frac{SD1^2}{n1} + \frac{SD2^2}{n2}}} = \frac{1.527 - 1.355}{\sqrt{\frac{0.106^2}{6} + \frac{0.159^2}{6}}} = 2.205 > 1.813$$

$$t2 = \frac{(M1 - M2)}{\sqrt{\frac{SD1^2}{n1} + \frac{SD2^2}{n2}}} = \frac{1.022 - 0.578}{\sqrt{\frac{0.064^2}{6} + \frac{0.035^2}{6}}} = 14.909 \gg 1.813$$

$$t3 = \frac{(M1 - M2)}{\sqrt{\frac{SD1^2}{n1} + \frac{SD2^2}{n2}}} = \frac{1.670 - 1.578}{\sqrt{\frac{0.114^2}{6} + \frac{0.079^2}{6}}} = 1.815 > 1.813$$

$$t4 = \frac{(M1 - M2)}{\sqrt{\frac{SD1^2}{n1} + \frac{SD2^2}{n2}}} = \frac{1.137 - 0.612}{\sqrt{\frac{0.081^2}{6} + \frac{0.033^2}{6}}} = 14.703 \gg 1.813$$

Podemos concluir que para todos los casos el t calculado es mayor al t crítico, por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa, la implementación de emulsión bombeable PDBG en desarrollo de túneles en minería subterránea, permitirá generar impactos positivos en la productividad de la operación.

Conclusiones

De la investigación podemos concluir de manera general que la implementación de emulsión bombeable Emultex PDBG genera impactos positivos en la productividad, así como reducción de costos operativos para la operación.

Se obtuvo los siguientes indicadores claves de rendimiento (KPI's) resultados para esta primera etapa de prueba:

- Se obtuvo un tiempo de carguío en secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m de 25, 25, 32 y 32 minutos respectivamente.
- Se obtuvo una eficiencia de avance del 96% para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 95% para secciones de 4.0 m x 4.0 m, 94% para secciones de 4.5 m x 4.5 m y 94% para secciones de 5.0 m x 5.0 m.
- Se obtuvo un factor de carga equivalente de 45.2 kg/ml, 46.6 kg/ml, 56.3 kg/ml y 61.3 kg/ml para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m.
- Se obtuvo una sobre rotura de 14.7%, 14.6%, 10.5% y 4.8% en secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m respectivamente.
- Respecto a la fragmentación del material post voladura realizado con emulsión bombeable, se obtuvo un P80 de 6.11 pulgadas.

Se obtuvo los siguientes indicadores claves de rendimiento (KPI's) resultados para la segunda etapa de prueba:

- Se obtuvo un tiempo de carguío en secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m de 27, 29, 32 y 47 minutos respectivamente.
- Se obtuvo una eficiencia de avance del 95% para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 95% para secciones de 4.0 m x 4.0 m, 96% para secciones de 4.5 m x 4.5 m y 91% para secciones de 5.0 m x 5.0 m.
- Se obtuvo un factor de carga equivalente de 39 kg/ml, 42 kg/ml, 52 kg/ml y 77 kg/ml para secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m.

- Se obtuvo una sobre rotura de 7%, 5%, 8% y 0% en secciones de 3.8 m x 4.0 m, 4.0 m x 4.0 m, 4.5 m x 4.5 m y 5.0 m x 5.0 m respectivamente.

Se demostró que la aplicación de carguío con emulsión bombeable Emultex PDBG en frentes mejora la gestión de seguridad en los siguientes puntos:

- Reducción de exposición del personal a gases post voladura debido a una menor concentración de gases generados por la emulsión Emultex PDBG en comparación con la emulsión encartuchada.
- Eliminación del manipuleo de explosivos, ya que la emulsión bombeable Emultex PDBG se transforma en explosivo en boca de taladro, antes de ello, es transportada como una emulsión matriz no sensibilizada (agente oxidante).
- Eliminación de remanentes en el frente de voladura, debido a que el Equipo fabrica el explosivo requerido exacto por frente.

Del análisis de productividad se obtuvo mejoras en:

- El número de taladros de 13 y 15 pies por malla de perforación se reduce en 4, disminuyendo el tiempo de perforación en 0.17 y 0.09 horas.
- La cantidad de explosivo por disparo aumenta en 39.9 kg y 59.3 kg, pero el tiempo de carguío disminuye en 0.4 y 0.5 horas, para avances de 13 y 15 pies respectivamente.
- Para taladros de 13 pies, el factor de avance aumenta de 39.8 a 58.8 kg/m y la sobre-rotura disminuye de 12.2 a 8.5 %. Para taladros de 15 pies, el factor de avance aumenta de 42.0 a 56.2 kg/m y la sobre-rotura disminuye de 12.2 a 10.5 %.

Del análisis de costos podemos concluir:

- Debido al menor requerimiento de taladros por disparo se obtiene una reducción de costos por consumo de aceros de 3,806.4 \$/mes.
- Debido al mayor avance por disparo se obtiene un incremento económico por valor de mineral adicional, de 242,911.6 \$/mes.
- Al haber menor sobre-rotura el costo de sostenimiento permite ahorros mensuales de 2,146.3 \$/mes en shotcrete y 4,570.0 \$/mes en pernos.

- Se obtiene ahorros en costos de limpieza scoop de 2,456.9 \$/mes, transporte con volquetes de 3,291.1 \$/mes, costo de desmontera de 649.6 \$/mes y costo de tratamiento-planta de 5400.1 \$/mes.
- Se obtiene un ahorro de costos mensual de 177,370.6 dólares

Recomendaciones

Se recomienda capacitar correctamente, en materia del nuevo agente explosivo implementado, al personal operativo y supervisión para realizar las actividades de manera eficiente y segura.

Se recomienda evaluar los frentes antes de realizar el carguío de la emulsión gasificada, para taladros que presenten agua se deberá implementar mangas de carguío para evitar el posible lavado del taladro por parte de dicha condición.

Se recomienda utilizar cordón detonante de alto gramaje para voladura de contorno, y de esta manera poder reducir la sobre-rotura obtenida.

Se recomienda evaluar puntos estratégicos para traspase de agente explosivo para evitar traslados largos y tiempos muertos en el proceso de reabastecimiento de emulsión matriz a los equipos cargadores.

Referencias bibliográficas

- Alcaina, J. (2018), *Uso de emulsión en el desarrollo horizontal del proyecto mina Chuquicamata subterránea.*
- Berrospi, F. (2022), *Ciclo de Deming en fabricación de emulsión bombeable gasificada y avances lineales – mina Andaychagua – Cia. Minera Volcan – 2021.*
- Bieniawski (1979), The Geomechanics Classification in Rock Engineering Application
- Cahuata, M. (2022), *Optimización de la voladura con el uso de la emulsión bombeable en minería subterránea y tonelería.*
- Calvo, A. (2019), *Evaluación de estabilidad fisicoquímica de dos tipos de explosivos en emulsión fabricados por Indumil Colombia.*
- Chiapetta, R. F. (2017), *Blasting Practices in Mining.*
- Clemente, R. (2020), *Ahorro y potenciales beneficios por el uso de nuevas tecnologías en el campo de la voladura en la mina Animon – Cia minera Chungar*
- ENAEX, (2010), *Manual de Tronadura*, Chile, 3ra Edición.
- EXSA S.A. (2012), *Manual Práctico de Voladura.*
- Flores, E. (2020), *Análisis técnico económico de la aplicación de emulsión bombeable en minería subterránea.*
- Hidalgo T. et al (2012), *Métodos de tronadura..*
- Jiménez, J. et al (2019), *Controlled Blasting Techniques: A Review of Amortized Blasting.*
- Muñoz, M. (2020), *Emulsión gasificada bombeable y su impacto en la productividad - Mina Huarón- Pan American Silver S.A. – 2019.*
- NME Nueva Minería y Energía (2019), *Bombeo de emulsiones para labores de desarrollo subterráneo.*
- Puma, A. (2020), *Mejora de proceso de emulsión gasificable en unidad minera.*
- Ruiz, G. (2021), *Tronaduras de producción con emulsión bombeable en macrobloques MB-S01/N01 de mina Chuquicamata subterránea.*

Solano, J. (2022), *Reducción de costos en voladura al utilizar los explosivos Emulnor y Emulnor con famecorte en una mina subterránea del marañón, La Libertad 2022*

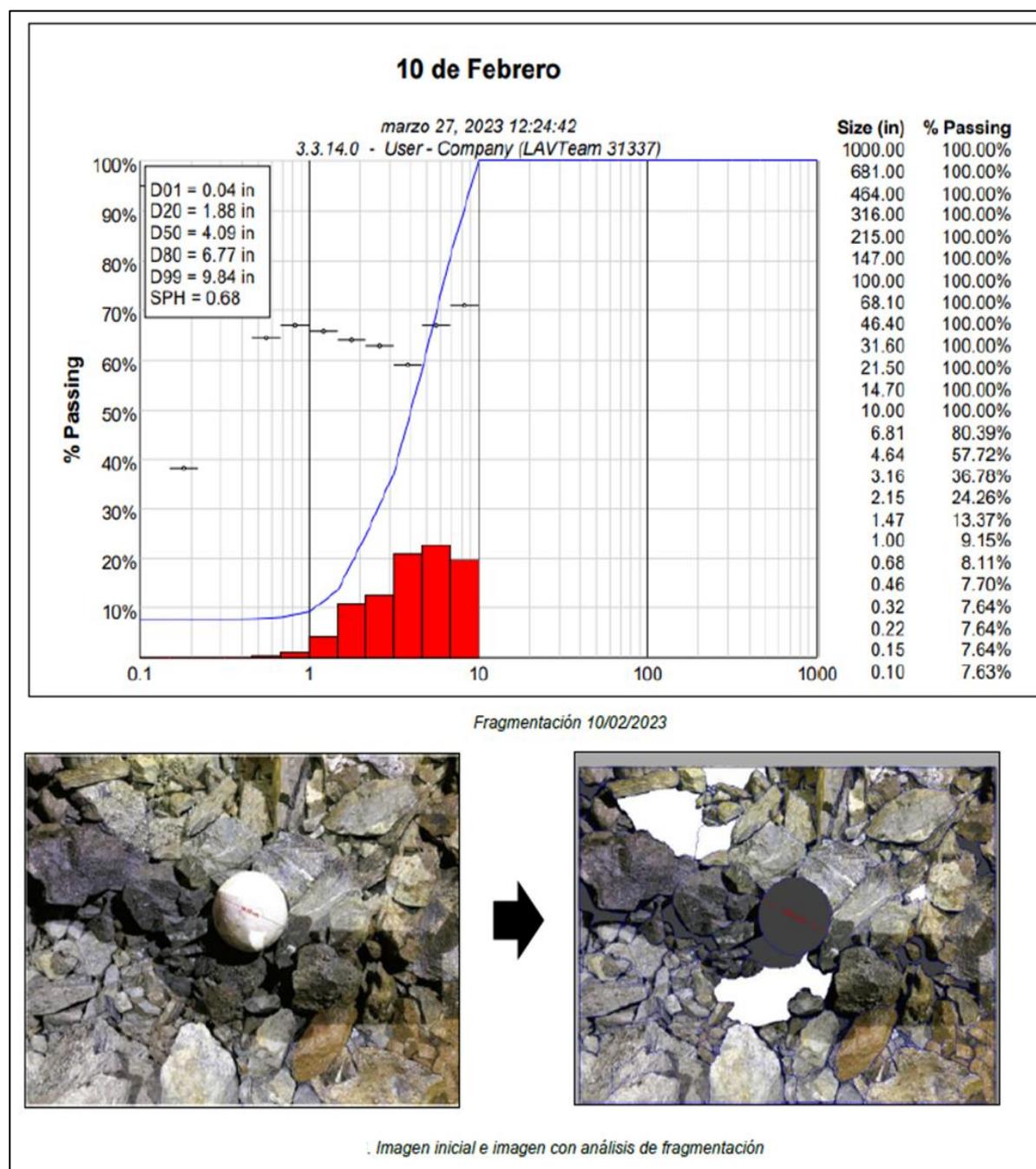
Soto, J. (2022), *Optimización de la voladura en la profundización de la rampa, aplicando emulsión bombeable, mina Andaychagua- Minera Volcan- Junín.*

Valer, I. (2022), *Propuesta de reemplazo de explosivo ANFO por emulsión para mejorar la voladura en la mina Parcoy CMH 2022*

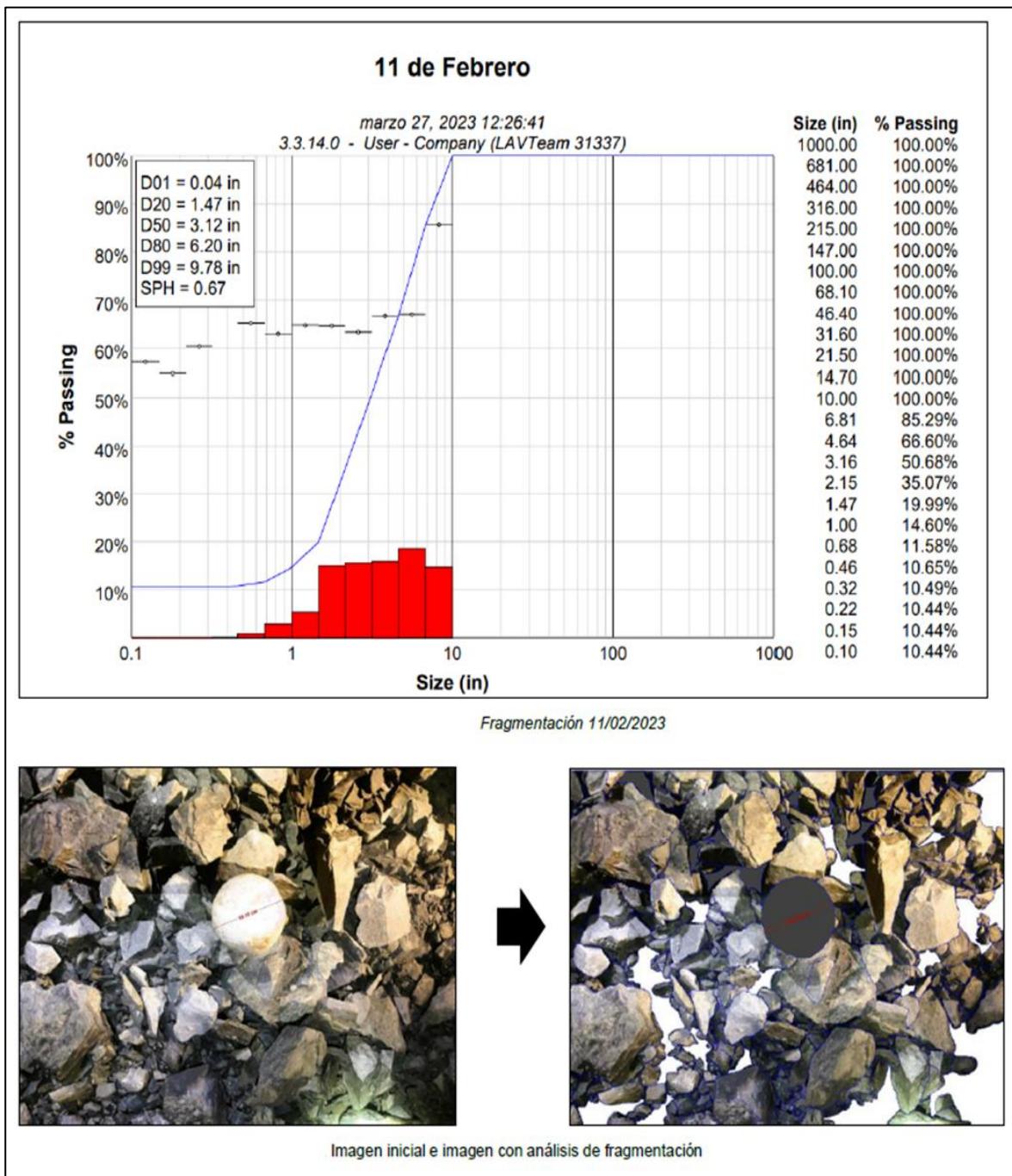
Anexos

	Pág.
Anexo 1: Análisis de fragmentación 10-Feb.....	1
Anexo 2: Análisis de fragmentación 11-Feb.....	2
Anexo 3: Análisis de fragmentación 25-Feb.....	3
Anexo 4: Análisis de fragmentación 5-Mar.....	4
Anexo 5: Malla de voladura propuesta sección 3.8 m x 4.0 m.....	5
Anexo 6: Malla de voladura propuesta sección 4.0 m x 4.0 m.....	6
Anexo 7: Malla de voladura propuesta sección 4.5 m x 4.5 m.....	7

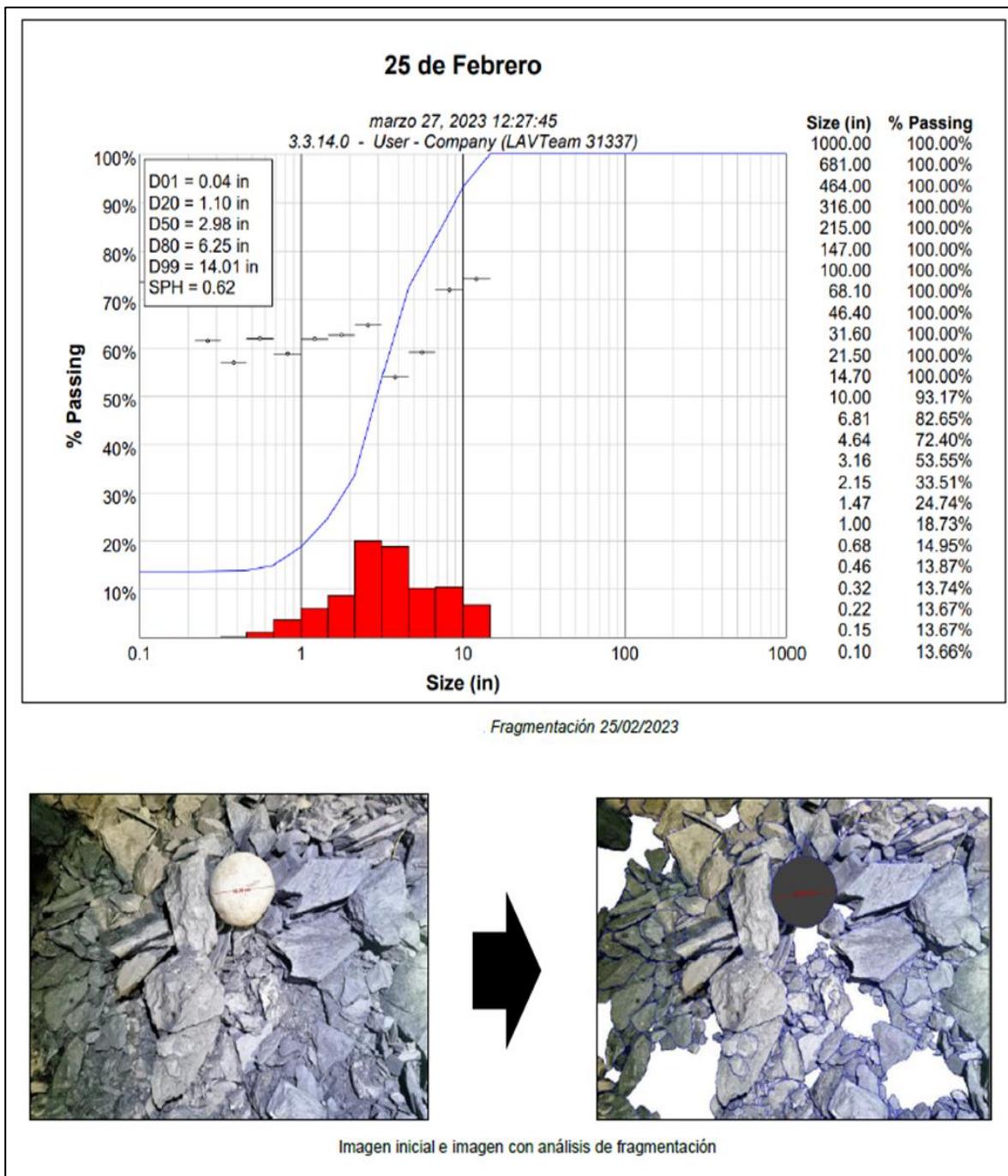
Anexo 1: Análisis de fragmentación 10-Feb



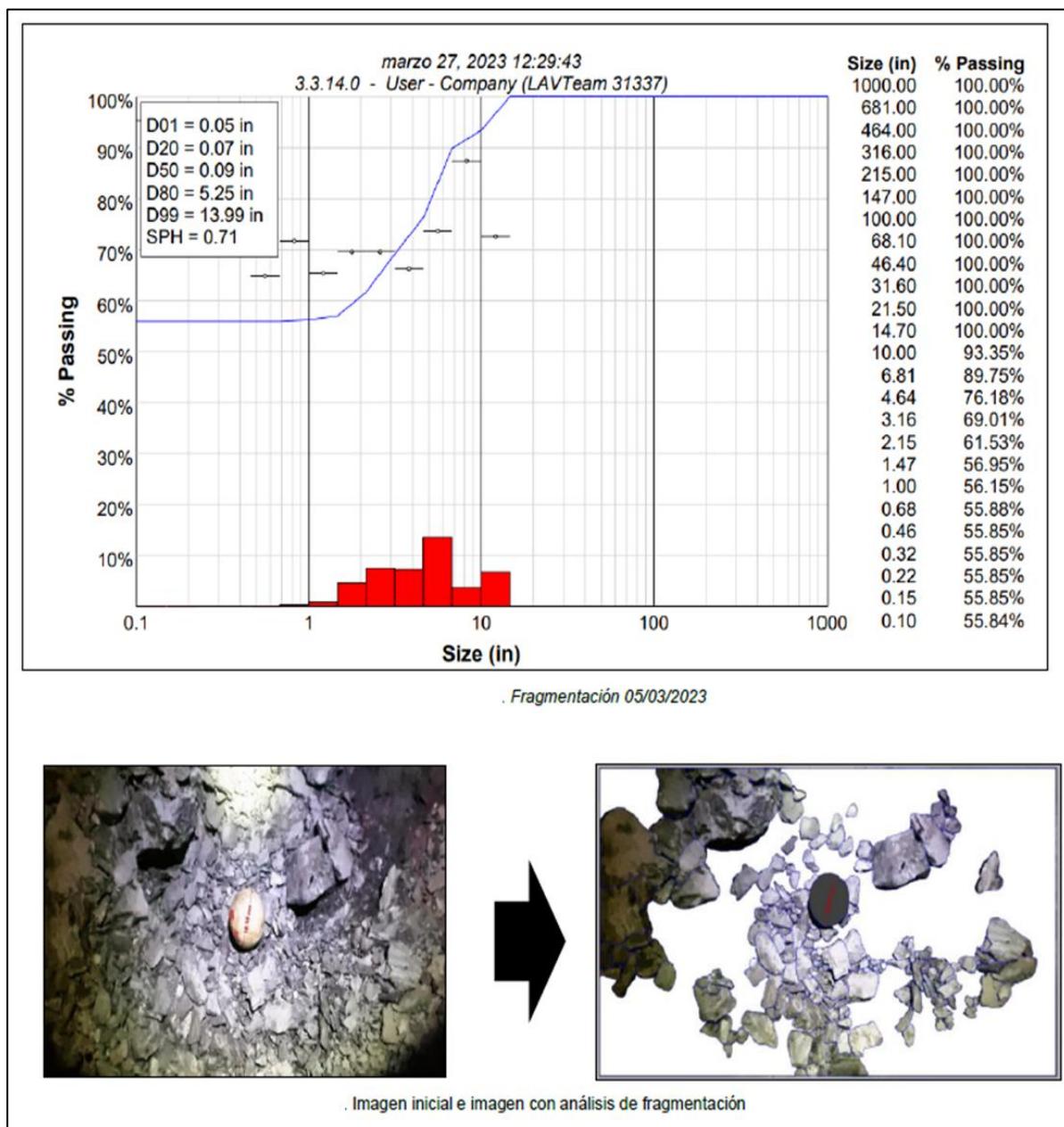
Anexo 2: Análisis de fragmentación 11-Feb



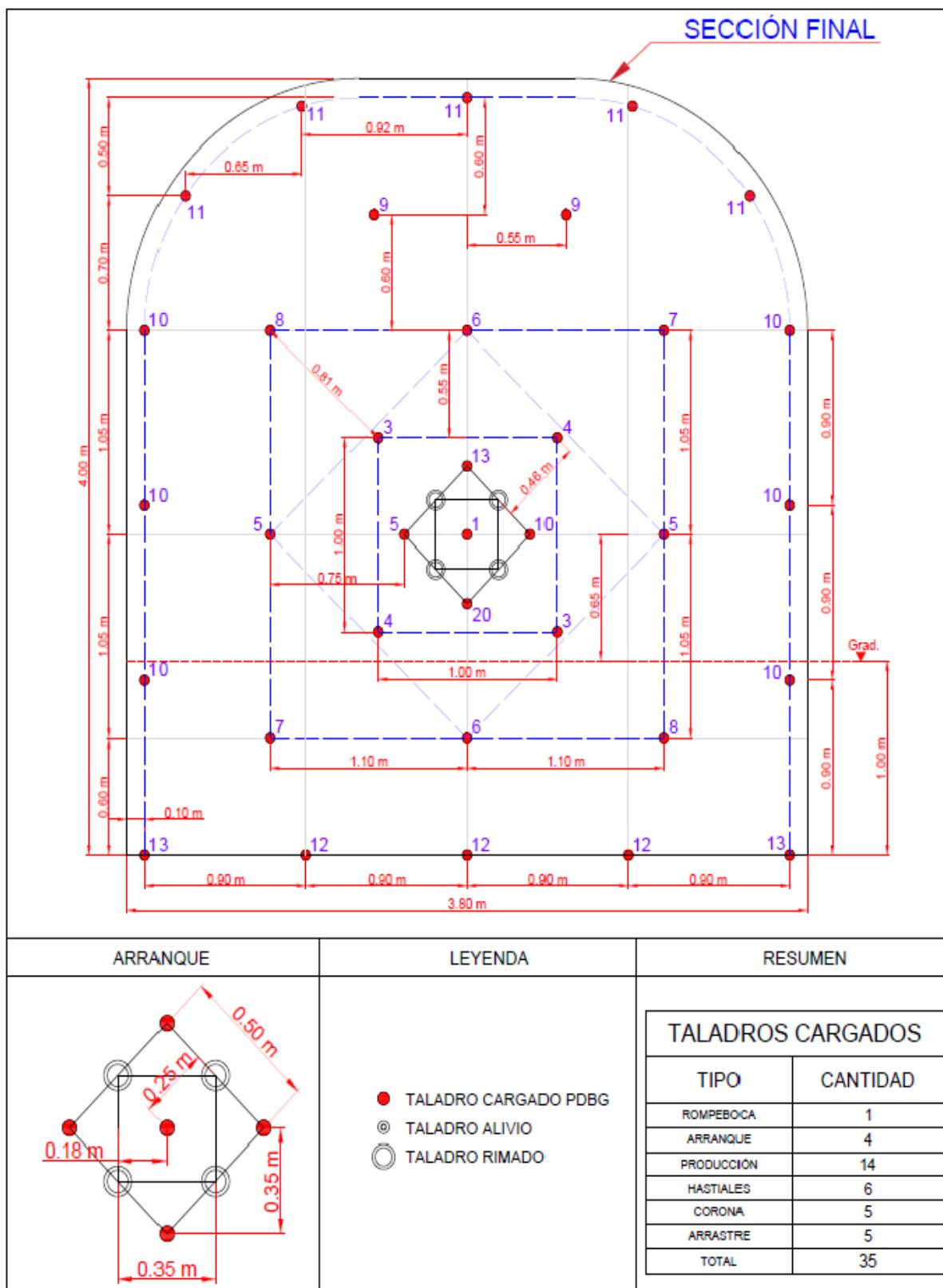
Anexo 3: Análisis de fragmentación 25-Feb



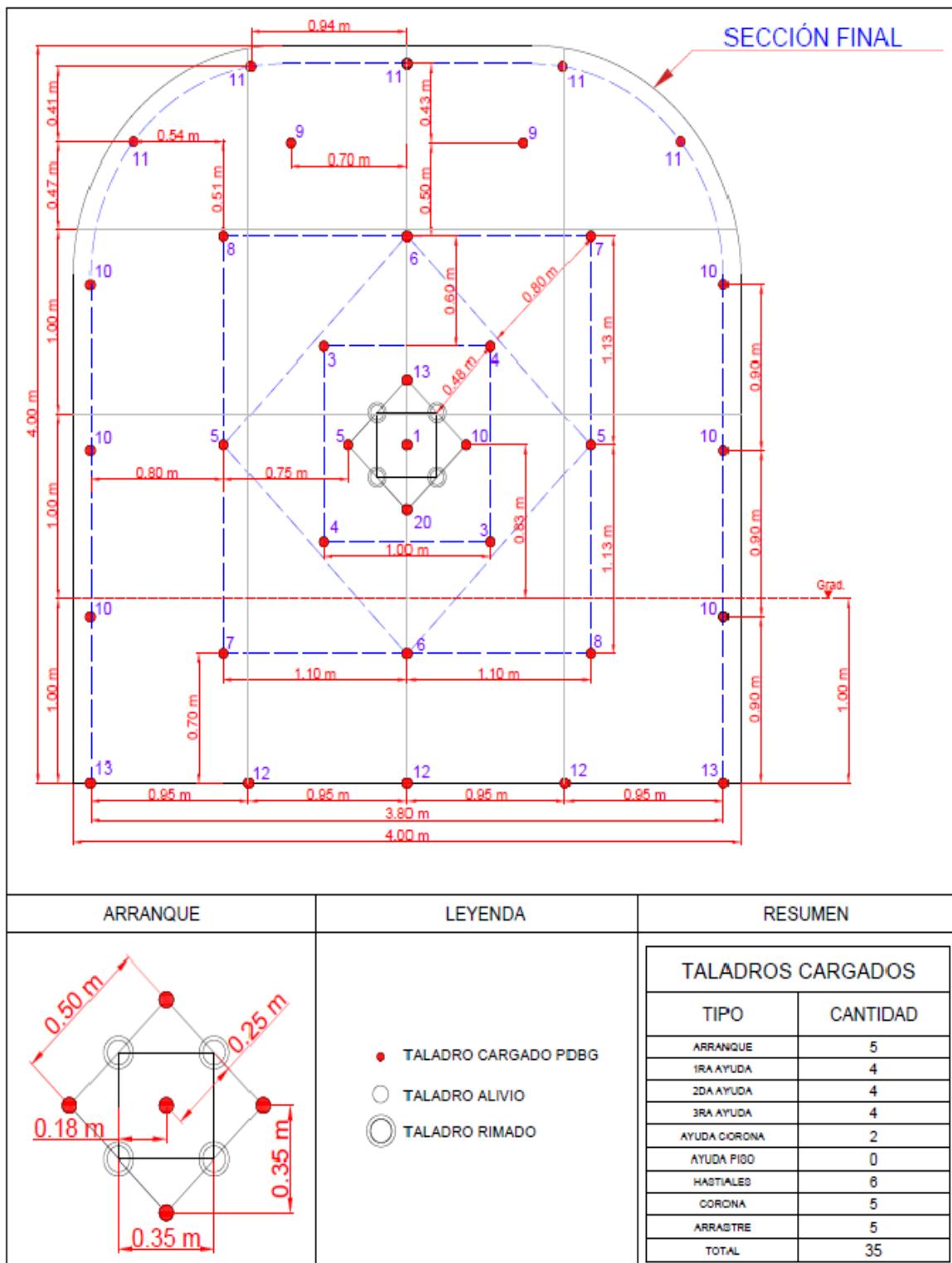
Anexo 4: Análisis de fragmentación 5-Mar



Anexo 5: Malla de voladura propuesta sección 3.8 m x 4.0 m



Anexo 6: Malla de voladura propuesta sección 4.0 m x 4.0 m



Anexo 7: Malla de voladura propuesta sección 4.5 m x 4.5 m

