

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN VOLADURA DE PRODUCCIÓN
UTILIZANDO EXPLOSIVO FORTIS EXTRA 60-40, EN EL TAJO
FERROBAMBA MMG, LAS BAMBAS – APURÍMAC**

PRESENTADO POR:

Br. ABRAHAM LLANCAY SANCHEZ

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO DE MINAS**

ASESOR:

Mgt. RAIMUNDO MOLINA DELGADO

CUSCO – PERÚ

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
VICE RECTORADO DE INVESTIGACIÓN

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe asesor del informe técnico titulado: **“OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN VOLADURA DE PRODUCCIÓN UTILIZANDO EXPLOSIVO FORTIS EXTRA 60-40, EN EL TAJO FERROBAMBA MMG, LAS BAMBAS – APURÍMAC”**

Presentado por **Abraham Llancay Sanchez**, con DNI **41952655** y código universitario Nro. **020537** para optar al Título Profesional de: **INGENIERO DE MINAS**. Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 (Tres) veces, mediante el software antiplagio Turnitin, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de: **10 % (diez por ciento)**.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 7, inc. 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con una X
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	-----
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	-----

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software antiplagio.

Cusco, 20 de diciembre de 2024.

FIRMA

POST FIRMA: Ing. Raimundo Molina Delgado
DNI Nro.: 23912083

ORCID ID: 0000-0003-0291-2700

Se adjunta:

1. Reporte Generado por el sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:417194196 ✓

Abraham Llancay Sanchez

OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN VOLADURA DE PRODUCCIÓN UTILIZANDO EXPLOSIVO FORTIS EXTRA 60-40 EN EL TAJO

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:417194196

Fecha de entrega

18 dic 2024, 8:52 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

19 dic 2024, 2:35 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN VOLADURA DE PRODUCCIÓN UTILIZANDO EXPLOSIVO FORTIS EX....docx

Tamaño de archivo

15.4 MB

135 Páginas

18,771 Palabras

101,973 Caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 20 palabras)
- ▶ Trabajos entregados

Exclusiones

- ▶ N.º de fuentes excluidas

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A mis progenitores por su respaldo constante y sacrificio inquebrantable en la consecución de mis metas. A mis hermanos les agradezco su apoyo incondicional, siendo mi fuente de esperanza e inspiración moral. Asimismo, mi reconocimiento a mi esposa quien ha estado a mi lado brindándome un apoyo incesante, a mis hijos con mucho amor.

Abraham Llanccay Sanchez

Agradecimientos

Al Todopoderoso, quien siempre me acompañó, orientándome hacia sendas virtuosas y proporcionándome oportunidades para enfrentar con valentía este grandioso desafío llamado vida. Expreso mi gratitud a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, así como a mis profesores y compañeros, por impartir sabiduría que contribuye a un desarrollo profesional sólido y competitivo. Además, agradezco a la de la Unidad Minera LAS BAMBAS, a la empresa ORICA MINING SERVICES PERU S.A por su invaluable contribución, colaboración y apoyo en este proyecto.

Llancay Sanchez, Abraham

Presentación

De acuerdo con las disposiciones establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, presento a consideración de los distinguidos miembros del jurado el presente trabajo de Tesis titulado. “OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN VOLADURA DE PRODUCCIÓN UTILIZANDO EXPLOSIVO FORTIS EXTRA 60-40 EN EL TAJO FERROBAMBA MMG LAS BAMBAS – APURÍMAC”. Este proyecto, desarrollado como investigación propia, será sometido a su evaluación, corrección y, de ser aprobado, me facultará para obtener el Título Profesional de Ingeniero de Minas.

Índice general

Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Presentación	IV
Índice general.....	V
Índice de tablas	IX
Índice de figuras.....	X
Introducción	XIII
Resumen	XIV
Abstract	XV
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Situación problemática	1
1.2 Formulación del Problema.....	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos.....	3
1.3 Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Justificación de la investigación	4
1.5 Delimitación de la investigación	5
1.5.1 Delimitación espacial	5
1.5.2 Delimitación temporal	5
1.5.3 Alcance	5
1.6 Hipótesis de la investigación	6
1.6.1 Hipótesis general	6
1.6.2 Hipótesis específicas.....	6
1.7 Variables e indicadores	7
1.7.1 Operacionalización de variables	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	8

2.1	Antecedentes del problema.....	8
2.1.1	Antecedentes internacionales	8
2.1.2	Antecedentes nacionales.....	8
2.2	Ámbito de estudio.....	10
2.2.1	Generalidades	10
2.2.2	Reseña histórica.....	12
2.2.3	Método de exploración	13
2.2.4	Operaciones mineras.....	14
2.3	Bases teóricas	22
2.3.1	Explosivos	22
2.3.2	Agentes de voladura	23
2.3.3	Clasificación de respuesta basadas en la cinética química	33
2.3.4	Plan de manejo Ambiental.....	35
2.4	Marco conceptual	39
2.4.1	Anfo	39
2.4.2	Agentes de voladura	39
2.4.3	Costo ambiental	39
2.4.4	Contaminación Ambiental.....	39
2.4.5	Detonador	40
2.4.6	Explosivo	40
2.4.7	Energía de gas.....	40
2.4.8	Emulsión.....	41
2.4.9	Encendido	41
2.4.10	Explosivo deflagrante	41
2.4.11	Gases tóxicos	41
2.4.12	Fragmentación	41
2.4.13	Línea base	42
2.4.14	Impacto ambiental	42
2.4.15	Minas a tajo abierto	42
2.4.16	Oxidación.....	42
2.4.17	Rangos de velocidad de detonación.....	42
2.4.18	Voladura.....	43
2.4.19	Voladura controlada.....	43

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	44
3.1 Ámbito de estudio.....	44
3.2 Tipo de investigación.....	44
3.3 Nivel de investigación	44
3.4 Población y muestra.....	45
3.4.1 Población	45
3.4.2 Muestra	45
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de información	45
3.5.1 Técnicas de recolección de información	45
3.5.2 Instrumentos de recolección de información.....	46
3.5.3 Procesamiento y presentación de datos	46
CAPÍTULO IV. COSTOS POR LA VOLADURAS POR PRODUCCIÓN	48
4.1 Investigación Técnico operativa	48
4.2 Fórmulas para determinar la cantidad de explosivo	76
4.2.1 Volumen de mineral (m ³).....	76
4.2.2 Peso del mineral (Tn)	76
4.2.3 Explosivo kg/tal.....	76
4.2.4 Factor de potencia (kg/tn).....	77
4.2.5 Factor de carga (kg/m ³)	78
4.2.6 Análisis ambiental	81
4.2.7 Medición de los gases post voladura	82
4.3 Material de la investigación.....	83
4.3.1 Entradas	83
4.3.2 Salidas.....	83
4.3.3 Instrumentos de la investigación	84
4.3.4 Diseño de materiales.....	85
CAPÍTULO V. ANALISIS DE RESULTADOS	86
5.1 Evaluación técnico operativa.....	86
5.1.1 Densidades “fortis Extra 100”, “fortis Extra 70/30” y fortis Extra “60-40” (Emulsión Gasificada)	86
5.1.2 Factor de carga.....	88
5.1.3 Velocidad de detonación.....	89
5.1.4 Fragmentación	91

5.2	Evaluación económica.....	96
5.3	Evaluación ambiental	98
5.4	Discusión de resultados	101
CONCLUSIONES		103
RECOMENDACIONES		104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		105
ANEXOS.....		109
	Anexo1. Registro fotográfico.....	109

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de variables</i>	7
Tabla 2 <i>Rutas de acceso a la minera Las Bambas</i>	12
Tabla 3 <i>Características específica de la Emulsión Gasificante</i>	33
Tabla 4 <i>Composición de Fortis Extra 100</i>	50
Tabla 5 <i>Control de densidades de explosivos gasificados (Fortis extra 100)</i>	51
Tabla 6 <i>Control de densidades de explosivos gasificados (fortis extra 70/30)</i>	52
Tabla 7 <i>Componentes Fortis Extra 60-40</i>	54
Tabla 8 <i>Control de densidades de explosivos gasificados (Fortis extra 60/40)</i>	56
Tabla 9 <i>Propiedades Geomecánicas del macizo rocoso de las Bambas</i>	61
Tabla 10 <i>Densidad de diferentes mezclas explosivas</i>	62
Tabla 11 <i>Diagrama de costo “explosivo” por taladro del proyecto</i>	75
Tabla 12 <i>Costos unitarios de explosivos</i>	75
Tabla 13 <i>Costos unitarios de accesorios</i>	76
Tabla 14 <i>Costo total de accesorios y explosivos por taladro</i>	78
Tabla 15 <i>Costo de accesorios por taladro</i>	79
Tabla 16 <i>Costos por taladros de los proyectos de voladura</i>	80
Tabla 17 <i>Total por proyecto de voladura</i>	80
Tabla 18 <i>Factor de Carga</i>	88
Tabla 19 <i>Factor de Potencia de los Explosivos</i>	88
Tabla 20 <i>TM Roto de mineral por Explosivo F.E 60-40</i>	97
Tabla 21 <i>Análisis de costos según el tipo de Explosivo</i>	97

Índice de figuras

Figura 1 <i>Ubicación de minera Las Bambas</i>	11
Figura 2 <i>Tajo Ferrobamba</i>	13
Figura 3 <i>Equipo Hidráulico de Perforación primaria</i>	15
Figura 4 <i>Plano de ubicación de los equipos</i>	16
Figura 5 <i>Carguío de taladros con camión fabrica</i>	19
Figura 6 <i>Carguío bombeable de taladros</i>	20
Figura 7 <i>Carguío y Acarreo en UM Las Bambas</i>	21
Figura 8 <i>Tipos de Explosivos</i>	23
Figura 9 <i>Agentes de voladura</i>	24
Figura 10 <i>VOD vs diámetro de carga</i>	26
Figura 11 <i>Balance del oxígeno</i>	28
Figura 12 <i>Aumento en el nivel de energía al agregar aluminio</i>	29
Figura 13 <i>Emulsión Explosiva y componentes</i>	31
Figura 14 <i>ANFO Pesado</i>	32
Figura 15 <i>Anexo A de estándar de medio ambiente</i>	36
Figura 16 <i>Anexo B de estándar de medio ambiente</i>	37
Figura 17 <i>Toma de muestra explosiva (Densidad = masa/volumen) en vaso volumétrico</i>	49
Figura 18 <i>Curva de densidad – Gasificación – “Fortis Extra 100”</i>	51
Figura 19 <i>Curva de densidad – Gasificación – “Fortis Extra 70/30”</i>	53
Figura 20 <i>Componentes Fortis Extra 60-40: Nitrito de Sodio, Emulsión base y ANFO</i> ...	54
Figura 21 <i>Densidad promedio en barrenos</i>	55
Figura 22 <i>Curva de densidad – Gasificación – “Fortis Extra 60/40”</i>	57
Figura 23 <i>Instalación de cable resistido, junto al booster y líneas descendentes</i>	58
Figura 24 <i>Frente de carguío con el equipo “Porta Metrics” (tajo Ferrobamba)</i>	59
Figura 25 <i>Frente de carguío con el equipo “Porta Metrics” (tajo Ferrobamba)</i>	60

Figura 26 <i>Pentex</i>	62
Figura 27 <i>Especificaciones técnicas PENTEX</i>	63
Figura 28 <i>Exel Ms</i>	64
Figura 29 <i>Detonador I.Kon</i>	65
Figura 30 <i>Tajo Ferrobamba disparo I, Fortis Extra 100</i>	66
Figura 31 <i>Tajo Ferrobamba Disparo II, Fortis Extra 70-30</i>	67
Figura 32 <i>Tajo Ferrobamba Disparo III, Fortis Extra 60-40</i>	67
Figura 33 <i>Fortis Extra 100. Plano proyecto 3735_201-202-205</i>	70
Figura 34 <i>Fortis Extra 70-30. Plano proyecto 3720-202</i>	70
Figura 35 <i>Fortis Extra 60-40. Plano proyecto 3720_101-103-104</i>	71
Figura 36 <i>Diseño de carga para taladros en la zona de Jahuaypaylla Alta 3735_201-202-205</i>	71
Figura 37 <i>Diseño de carga Jahuapaylla Alta proyecto Fase</i>	72
Figura 38 <i>Diseño de carga Jahuapaylla Alta 3720-202</i>	72
Figura 39 <i>Diseño de carga Jahuapaylla Alta 3720_101-103-104-105</i>	73
Figura 40 <i>Diseño de carga Jahuapaylla Alta 3720_101-103-104-105, Desmonte</i>	73
Figura 41 <i>Levantamiento de taladros en la zona de Jahuaypaylla Alta 3735_201-202-205</i>	74
Figura 42 <i>Levantamiento de taladros en la zona Jahuaypaylla Alta 3720_202</i>	74
Figura 43 <i>Levantamiento de taladros en la zona Jahuapaylla 4050-026</i>	74
Figura 44 <i>MSA ALTAIR 5x</i>	82
Figura 45 <i>Densidades del “Fortis Advantage 100” (Emulsión Matriz)</i>	86
Figura 46 <i>Cuadro de Gasificación “Fortis Extra 100”</i>	86
Figura 47 <i>Cuadro de Gasificación “Fortis Extra 100”</i>	87
Figura 48 <i>Cuadro de Gasificación “Fortis Extra 60/40”</i>	88
Figura 49 <i>Factor de potencia de los explosivos</i>	89
Figura 50 <i>Medición de VOD. (Fortis Extra 100) Proyecto 3735_201-202-205</i>	90

Figura 51 <i>Medición de VOD. (Fortis Extra 70/30) “Jahuaypalla Alta”- Proyecto 3720_202</i>	90
Figura 52 <i>Medición del VOD. (Fortis Extra 60/40) “Jahuapaylla Alta” – Proy.: 3720_101-103-104.....</i>	91
Figura 53 <i>F.E 100, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) “Tajo Ferrobamba”</i>	92
Figura 54 <i>F.E 70-30, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) “Tajo Ferrobamba”</i>	93
Figura 55 <i>Ubicación del proyecto con 441 taladros cargados, Proy. 3720_101-103-104-105</i>	93
Figura 56 <i>F.E 60-40, Secuencia de disparo “Tajo Ferrobamba” Proy. 3720_101-103-104-105</i>	94
Figura 57 <i>Esponjamiento y fragmentación del material volado</i>	94
Figura 58 <i>Pala N° 4 Frente a mineral volado, Proy. 3720-101-103-104-105</i>	95
Figura 59 <i>F.E 60-40, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) “Tajo Ferrobamba”</i>	95
Figura 60 <i>F.E 60-40, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) “Tajo Ferrobamba”</i>	95
Figura 61 <i>Análisis de costos según el tipo de Explosivo</i>	98
Figura 62 <i>Emisión de gases producidas post voladuras “Tajo Ferrobamba”</i>	99
Figura 63 <i>Monitoreo de Gases Nitrosos del proy. 3720_101-103-104 “Tajo Ferrobamba”</i>	100
Figura 64 <i>Monitoreo de Gases Nitrosos “Tajo Ferrobamba”</i>	100

Introducción

Para llevar a cabo el análisis de optimizaciones de los costos de la voladura de producción en la unidad minera LAS BAMBAS, se hace necesario comparar los resultados obtenidos mediante el uso de diversas mezclas explosivas en diferentes parámetros operativos, ya sea en mallas de mineral o desmonte. Este análisis implica una evaluación profunda de las variables asociadas a la operación unitaria de voladura, reconociendo que el éxito de este procedimiento está directamente vinculado a la correcta gestión de dichas variables. La fragmentación de la roca por voladura se reconoce como un indicador crucial para evaluar los resultados de estas explosiones.

En minera LAS BAMBAS actualmente se emplea el explosivo Fortis Extra 70/30 en el tajo Ferrobamba, la problemática persistente de una fragmentación deficiente del material y, como consecuencia, las necesidades de recurrir a voladuras secundarias demandan de una solución. El uso de un explosivo basado en la emulsión gasificable Fortis Extra 60/40 se presenta como una alternativa viable debido a su elevado poder energético y su versatilidad para adaptarse a diferentes densidades de carga, según lo requiera la operación.

En este contexto, la presente tesis se organiza en cinco capítulos; El primer capítulo aborda el diseño de la investigación, incluyendo el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación, la justificación, la hipótesis, así como las variables e indicadores pertinentes. El segundo capítulo se centra en el marco teórico, contextual y conceptual. En el tercer capítulo, se describen el diseño metodológico. El cuarto capítulo se dedica a describir los resultados optimización de la voladura mediante el uso del explosivo gasificable Fortis Extra 60/40, además se realizará una discusión con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en los taladros del tajo Ferrobamba.

Resumen

La presente investigación aplicada en la operación minera "Las Bambas", tuvo como objetivo "evaluar la magnitud de la reducción de los costos en la voladura de producción mediante la implementación del explosivo Fortis Extra 60-40 basado en Emulsión Gasificada". Para ello se planificó las cargas explosivas según la dureza del macizo rocoso y las condiciones ambientales, se empleó agentes de voladura a granel y explosivos como el ANFO y el ANFO Pesado, este último basado en emulsión matriz. Los resultados señalan que la implementación de las mezclas explosivas de emulsión gasificada "Fortis Extra 60/40 y Fortis Extra 100" de ORICA MINING SERVICES PERÚ S.A. en los proyectos de voladura del Tajo Ferrobamba condujo a una optimización de la fragmentación en la zona de mineral. El P80 mensual se mantuvo en el rango de [2.09" - 6.18"], teniendo como un rango promedio de 2.88" con un porcentaje de 52.00% , logrando un 38.20% de Finos, logrando así mayor eficiencia en las operaciones unitarias subsiguientes, además el explosivo Fortis Extra 60-40 en el tajo Ferrobamba, generó un ahorro mensual de 16.28% que corresponde a 936,857.07 EUR con respecto al Fortis Extra 100, y con un ahorro del 5.26% que corresponde a un 267,673.45 EUR con respecto al Fortis Extra 70-30, optimizando así el rendimiento económico. Concluyendo que la densidad final del explosivo Fortis Extra 60-40 teniendo como densidad final de 1.3 g/cc la que define como un actor importante dentro de los parámetros para roca dura así como también la VOD 5149.8 m/s, siendo eficaz y maximizando los resultados en la voladura de producción

Palabras clave: Sistema de voladura, Emulsión Gasificable, densidad de explosivo.

Abstract

The objective of this research applied at “Las Bambas” mining operation was to “evaluate the magnitude of cost reduction in production blasting through the implementation of Fortis Extra 60-40 explosive based on Gasified Emulsion”. To this end, explosive charges were planned according to the hardness of the rock massif and environmental conditions, using bulk blasting agents and explosives such as ANFO and ANFO Heavy, the latter based on matrix emulsion. The results indicate that the implementation of ORICA MINING SERVICES PERU S.A.'s “Fortis Extra 60/40 and Fortis Extra 100” gasified emulsion explosive mixtures in the blasting projects of the Ferrobamba Pit led to an optimization of fragmentation in the ore zone. The monthly P80 was maintained in the range of [2.09“ - 6.18”], having an average range of 2.88" with a percentage of 52.00%, achieving a 38.20% of fines, thus achieving greater efficiency in subsequent unit operations, also the explosive Fortis Extra 60-40 in the Ferrobamba pit, generated a monthly savings of 16. In addition, the Fortis Extra 60-40 explosive in the Ferrobamba pit generated a monthly saving of 16.28% corresponding to 936,857.07 U\$\$\$ with respect to Fortis Extra 100, and a saving of 5.26% corresponding to 267,673.45 U\$\$\$ with respect to Fortis Extra 70-30, thus optimizing the economic performance. Concluding that the final density of the explosive Fortis Extra 60-40 having as final density of 1.3 g/cc which defines as an important actor within the parameters for hard rock as well as the VOD 5149.8 m/s, being effective and maximizing the results in the production blasting

Key words: Blasting system, Gasifying Emulsion, explosive density.

CAPÍTULO I.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

En la industria minera a tajo abierto, la voladura de rocas es crucial para la extracción eficiente de materiales. Este proceso implica perforación y detonación controlada de explosivos para fragmentar las rocas. Sin embargo, a nivel mundial, el desafío clave radica en lograr una fragmentación precisa que optimice la eficiencia operativa y reduzca impactos ambientales y económicos. La falta de una fragmentación adecuada puede causar ineficiencias en etapas posteriores del proceso minero, como el carguío, transporte y procesamiento. Además, las voladuras inadecuadas pueden generar emisión de gases y partículas perjudiciales, afectando la salud de los trabajadores y el entorno.

En la fase de minado a tajo abierto, la voladura es una de las técnicas esenciales para extraer eficientemente rocas, especialmente en áreas donde los métodos mecánicos no son rentables. Consiste en realizar la voladura del macizo rocoso, colocando explosivos estratégicamente. Al detonar, los explosivos liberan la energía necesaria para fragmentar las rocas, facilitando su extracción posterior. En la industria minera, la voladura de alta calidad es crucial para lograr una fragmentación eficiente. El alto costo de los explosivos genera mayores costos de producción afectando la rentabilidad, MMG Las Bambas busca economizar los costos de producción sin afectar su productividad.

MMG Las Bambas, una empresa destacada en la gran minería, ha implementado políticas centradas en la adopción de tecnologías adecuadas para la voladura de rocas y el control ambiental. A pesar de esto, enfrentan desafíos significativos en la actualidad. Existe una subutilización de la energía química del explosivo, lo que resulta en una fragmentación subóptima y en la emisión de niveles de gases nitrosos por encima de los límites permitidos.

Este problema afecta directamente la eficiencia en las operaciones de carguío, acarreo y chancado, generando un incremento en los costos de minería. En el caso específico de MMG Las Bambas, se ha realizado un análisis exhaustivo de los procedimientos operativos relacionados con la obtención de material fragmentado mediante voladura. En el tajo Ferrobamba, la perforación se lleva a cabo utilizando diámetros de 12x1/4 pulgadas, con bancos de 15 metros de altura y mallas de 6x7 metros. A pesar de estos esfuerzos, se identifican deficiencias en parámetros clave como el Factor de Voladura, la elección de la Emulsión matriz, los tiempos de detonación y la Relación de Impedancia. Estas deficiencias conducen a una fragmentación no óptima y al aumento de la presencia de gases nitrosos en las mezclas explosivas, lo cual incrementa los costos por metro lineal de carga. La relación entre estos parámetros y la competitividad continua en la industria de los explosivos se convierte en un desafío crucial a abordar.

La fragmentación de la roca se ha convertido en un aspecto crítico del ciclo minado en la actualidad, dada la considerable alza en los costos de la energía eléctrica y el aumento en los precios de materias primas como el petróleo, nitrato de amonio, emulsión y nitrito de sodio. La tarea precisa de la detonación de rocas consiste en emplear explosivos adecuados según la naturaleza de la roca, así como en preparar la roca, ya sea mineral o estéril, para su tratamiento posterior, de la manera más rentable para el conjunto de operaciones de la empresa.

Además, el encarecimiento de los costos en la industria minera y la disminución de los precios de los minerales metálicos nos obligan a optimizar el uso de nuestros recursos. Acceder al mineral requiere la extracción de grandes volúmenes de desmonte, material estéril o mineral de baja ley, para lo cual se destinan habitualmente considerables recursos, especialmente en términos de palas y camiones.

En minera las Bambas, se propone realizar pruebas para identificar las ventajas que se pueden obtener al utilizar emulsiones gasificadas Fortis Extra 60/40 durante las fases de carga y disparo en las operaciones mineras con el objetivo de maximizar la voladura y así poder obtener una buena fragmentación y minimizar costos en la voladura.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida se reduce los costos de la voladura de producción con la utilización de un nuevo explosivo basado en Emulsión Gasificada Fortis Extra 60-40, con control ambiental adecuado en el tajo Ferrobamba en MMG - Las Bambas?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué factores del macizo rocoso influyen en el proceso de la voladura de producción en los bancos utilizando un nuevo explosivo basado en emulsión gasificada Fortis extra 60-40 en el Tajo Ferrobamba en MMG Las Bambas?
- ¿Cuál es el grado de fragmentación de la roca y la emanación de gases nitrosos en la voladura de producción usando un nuevo explosivo basado en emulsión gasificada Fortis extra 60-40 en el Tajo Ferrobamba?
- ¿Cuáles son los costos operativos de voladura utilizando la emulsión gasificada Fortis extra 60-40 como reemplazo de la mezcla explosiva matriz de en el Tajo Ferrobamba?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la magnitud de la reducción de los costos en la voladura de producción mediante la implementación del explosivo Fortis Extra 60-40 basado en

Emulsión Gasificada, en el contexto del tajo Ferrobamba de MMG Las Bambas, considerando un adecuado control ambiental.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los factores del macizo rocoso que influyen en el proceso de voladura de producción en los bancos del tajo Ferrobamba, al utilizar el explosivo Fortis Extra 60-40 basado en emulsión gasificada en MMG Las Bambas.
- Evaluar el grado de fragmentación de la roca y la liberación de gases nitrosos durante la voladura de producción, al aplicar el explosivo Fortis Extra 60-40 basado en emulsión gasificada en el tajo Ferrobamba de MMG Las Bambas.
- Determinar los costos operativos asociados con la implementación del explosivo Fortis Extra 60-40 basado en emulsión gasificada en reemplazo de la mezcla explosiva matriz en la voladura de producción en el tajo Ferrobamba de MMG Las Bambas.

1.4 Justificación de la investigación

Esta investigación de optimización de la voladura de rocas en minería a tajo abierto, con énfasis en el caso de MMG Las Bambas, aborda un desafío crítico en la industria minera global. La fragmentación afecta precisamente la eficiencia, seguridad y sostenibilidad. Al identificar y resolver deficiencias en parámetros clave como Factor de Voladura Emulsión matriz y tiempos de detonación, esta investigación busca incrementar las utilidades y mejorar las prácticas operativas. Los resultados contribuirán al avance de la minería responsable competitiva, reduciendo costos e impactos ambientales.

1.5 Delimitación de la investigación

1.5.1 Delimitación espacial

La presente investigación fue realizada dentro de la contrata ORICA, que forma parte de la Unidad Minera Las BAMBAS S.A.A. Esta minera se ubica en el Distrito de Challhuahuacho, Provincia de Cotabambas y departamento de Apurímac. Se encuentra a una altitud que varía entre los 3.800 y 4.600 m.s.n.m., y está a aproximadamente 75 km al suroeste de la ciudad de Cusco.

1.5.2 Delimitación temporal

El periodo de la investigación consideró información del año 2023 para el análisis documental, además se realizó el trabajo de campo puntualmente durante el mes de mayo del mismo año.

1.5.3 Alcance

El alcance de esta investigación abarca un análisis exhaustivo de los procesos de voladura en la minería a tajo abierto, con un enfoque particular en los procedimientos implementados en MMG Las Bambas. El análisis incluyó la evaluación de parámetros técnicos como los diámetros de perforación, la composición y características de los explosivos utilizados, los tiempos precisos de detonación, y su impacto directo en la fragmentación de la roca. Este enfoque integral busca optimizar tanto los aspectos técnicos como los ambientales, promoviendo prácticas más seguras, sostenibles y rentables dentro de la industria minera peruana.

1.6 Hipótesis de la investigación

1.6.1 Hipótesis general

La utilización del explosivo Fortis Extra 60-40 basado en Emulsión Gasificada en la voladura de producción en el tajo Ferrobamba de MMG Las Bambas resultará en una disminución significativa de los costos operativos en comparación con la mezcla explosiva matriz, manteniendo un control ambiental adecuado.

1.6.2 Hipótesis específicas

- Los factores del macizo rocoso en el tajo Ferrobamba de MMG Las Bambas influirá en la eficacia de la voladura de producción al aplicar el explosivo Fortis Extra 60-40 basado en emulsión gasificada.
- El uso del explosivo Fortis Extra 60-40 basado en emulsión gasificada en la voladura de producción en el tajo Ferrobamba dará como resultado una mejora en el grado de fragmentación de la roca, una reducción de emisiones de gases nitrosos y menor proyección del Fly rock.
- La implementación del explosivo Fortis Extra 60-40 basado en emulsión gasificada para la voladura de producción mejorara los costos operativos en comparación con la mezcla explosiva matriz, con una gestión ambiental adecuada.

1.7 Variables e indicadores

1.7.1 Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

VARIABLE	FACTORES	INDICADORES	UNIDADES	
INDEPENDIENTES	Características geomecánicas del macizo rocoso	Resistencia de la roca intacta	Kg/m ³	
		Índice de la resistencia geológica	GSI	
		Parámetros geotécnicos del macizo rocoso	RMR	
	Explosivo Fortis extra 60-40.	Calidad de la Emulsión	Gradiente de densidades	g/cm ³
			Coeficiente de comprensibilidad de emulsión	%
			Factor potencia del explosivo	KG/TN
		Factor voladura	T/M ³	
DEPENDIENTE	Parámetros de Producción.	Volumen cubico de mineral	M ³	
		Porcentaje de fragmentación	%	
	Voladura de producción	Costos	Costo por metro lineal	\$
			Costo por taladro.	\$
			Costo por tonelada volada	\$
		Parámetro de seguridad y cuidado medio ambiental.	Concentración de gases nitrosos generados	ppm
DEPENDIENTE	Optimización de costos	Reducción de costos porcentual	%	
		Reducción de costos monetaria	U\$\$	

Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

2.1.1 Antecedentes internacionales

Vilugrón (2020) “*Diseño de Tronaduras y su Impacto en el Costo Mina de Mina el Dorado, Ovalle*”, tiene por objetivo evaluar el impacto económico que presentan distintos tipos de diseños de tronaduras (Diagramas de disparo y barrenaduras) en el costo mina de la Mina El Dorado, e identificar el tipo de roca y su geomecánica. Concluyendo en los casos estudiados se logró cumplir los objetivos planteados en este trabajo, obteniendo una granulometría de 413 milímetros utilizando Emulsión/Anfo 60/ 40 como carga de fondo y Heavy Anfo 1.0 como carga de columna para perforaciones de 3”, siendo esta la óptima desde un punto de vista técnico obteniendo un costo por tronadura de 2163,47 USD y un costo mina de 1,55 USD/ton de material. La combinación Emulsión/Anfo 100/0 como carga de fondo y Anfo diluido 50 como carga de columna para perforaciones de 5” es la más rentable económicamente con un costo por tronadura de 801,34 USD y un costo mina de 0,57 USD/ton de material pero genera una granulometría de 1,856 metros haciendo necesaria una reducción secundaria.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Alcocer & Salas (2020) “*Propuesta del Uso de Emulsión Gasificada en el Carguío de Taladros para Reducir los Costos en Voladura en una Mina a Tajo Abierto con Depósitos Tipo Skarn, Arequipa 2020*”, que tiene como objetivo establecer una propuesta para implementar el uso de emulsión gasificada en el carguío de taladros en una mina a tajo abierto con yacimiento tipo Skarn para reducir los costos de voladura. Concluyendo que el sistema actual de carguío de taladros que es utilizado es una mezcla explosiva de Fortis Mex

60, con una altura de taco final de 5 m, 5.5 m y 6 m. El costo de la mezcla explosiva varía según tipo de taco de 5 m, el costo del explosivo (\$/Tal), es de \$ 204.73, con Taco de 5.5 m, el costo del explosivo (\$/Tal) es de \$ 187.67 y con Taco de 6 m el costos del explosivo (\$/Tal) es de \$ 170.61; no pudiendo reducir los costos. Para realizar las pruebas, se utilizaron diferentes tipos de emulsión gasificadas como: Fortis Mex 60, Fortis Advantage 60 1.1gr/cc, Fortis Advantage 70 1.1gr/cc, Fortis Advantage 70 1.05gr/cc, Fortis Advantage 100 1.1gr/cc, Fortis Advantage 100 1.05gr/cc, Fortis Advantage 100 1.0gr/cc. Las cuales se compararon con el carguío de taladros actual en voladura; obteniendo como resultado que los costos de estos varían según la altura de taco y por la reducción en el uso de emulsión debido a la gasificación mostrando positivamente la reducción de costos.

Escriba (2018) *“Utilización de Emulsión Gasificable en Voladura para Optimizar Factores Ambientales, Técnicos y Económicos en Minería a Tajo Abierto”*, que tiene como objetivo mejorar la fragmentación del material actual usando la emulsión G en el carguío de los taladros de producción. Reducir la presencia de gases nitrosos post-voladura, asimismo la no utilización de ANFO en la mezcla explosiva; mejorando los estándares de seguridad y medioambiente. Concluyendo que el factor de carga utilizando emulsión G se redujo un 2.3 %, esto debido al mayor esponjamiento que se obtiene y que reduce la cantidad de explosivo necesario para el carguío del taladro. Económicamente se demostró un ahorro de \$ 17.8 por taladro y \$ 0.0042 por tonelada volada con el reemplazo de ANFO Pesado 73 gasificado por la emulsión G, esto debido principalmente a la eliminación del costo de fabricación del ANFO y el menor precio por tonelada que ofrece la emulsión G comparada a la emulsión estándar que se usa para fabricar el ANFO pesado 73 gasificado.

2.2 Ámbito de estudio

2.2.1 Generalidades

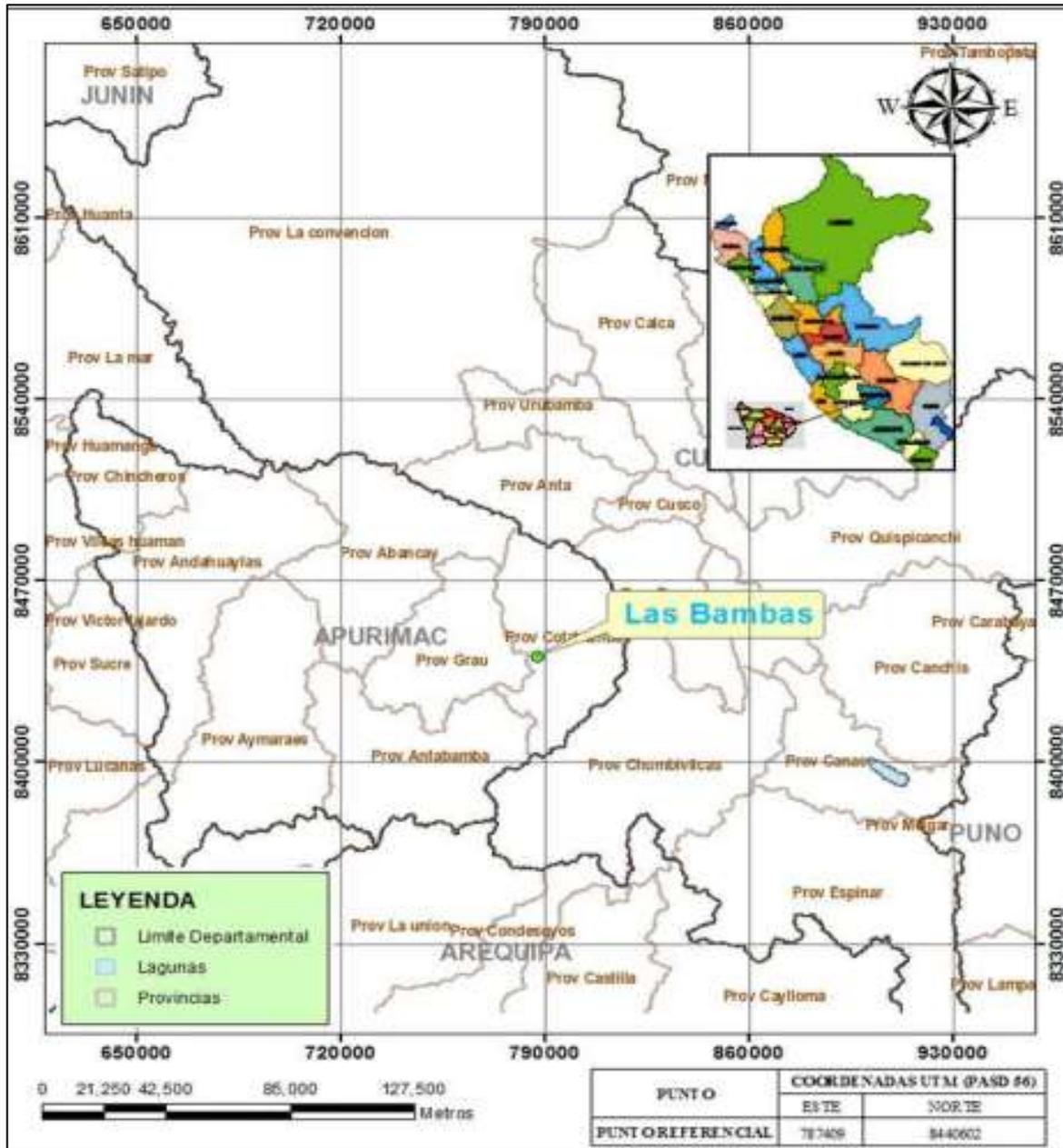
Las Bambas se ubican en la zona que abarca las provincias de Cotabambas y Grau, en la Región Apurímac. Este yacimiento cuenta con Reservas Minerales de 6,9 millones de toneladas de cobre y Recursos Minerales de 10,5 millones de toneladas de cobre. Se proyecta que, durante sus primeros cinco años, La Bambas genere una producción de más de 2 millones de toneladas de cobre en concentrado (MMG Las Bambas, 2023).

2.2.1.1 Ubicación

La Unidad Minera Las Bambas está situada en la Región Apurímac, abarcando los distritos de Tambobamba, Challhuahuacho y Coyllurqui en la provincia de Cotabambas, así como en la provincia de Grau, específicamente en el distrito de Progreso. Esta mina se encuentra a una altitud que varía entre los 4.600 y 4.800 metros sobre el nivel del mar, aproximadamente a una distancia de 75 km en línea recta y por ruta a 222.7 km al suroeste de la ciudad de Cusco (MMG Las Bambas, 2023).

Figura 1

Ubicación de minera Las Bambas



Nota: Extraído de INGEMMET

2.2.1.2 Acceso

Se puede viajar desde Lima hasta Cusco por vía aérea, y desde Cusco al campamento minero se tiene la opción de utilizar transporte aéreo mediante helicóptero o por vía terrestre. Hay dos rutas disponibles para llegar desde Cusco hasta el campamento minero.

Tabla 2*Rutas de acceso a la minera Las Bambas*

Ruta	Distancia Km	Tiempo Hrs	Tipo de acceso
Cusco-Capacmarca-Chalhuahuacho	222	7	Trocha
Cusco-Anta-Chalhuahuacho	259,5	8	Carretera asfaltada

Nota: Elaboración propia

2.2.2 Reseña histórica

En el Concurso Público Internacional PRI-80-03, celebrado el 31 de agosto de 2004, Xstrata Perú SA fue adjudicada con la buena pro. Posteriormente, el 1 de octubre de 2004, se firmó el contrato de opción minera para la transferencia de las concesiones mineras del proyecto Las Bambas. Xstrata Perú SA ganó la adjudicación con una oferta total de US\$121 millones, de los cuales US\$30 millones son pagos diferidos hasta la suscripción del contrato de transferencia y US\$91 millones fueron cancelados en la firma del contrato. El 50% del monto cancelado (US\$45.5 millones) se destina al desarrollo de obras y proyectos sociales en las provincias de Grau y Cotabambas (MMG Las Bambas, 2023).

El proyecto Las Bambas comenzó su fase de exploración en marzo de 2005, con una duración inicial de hasta cuatro años, durante los cuales Xstrata llevó a cabo exploraciones en la zona de concesión. Al finalizar este período, tenía la opción de solicitar una prórroga de cinco años más mediante un pago de 2,5 millones de dólares y un aporte social del mismo monto. El programa de exploración iniciado en 2006 buscaba perforar 237,500 metros de profundidad en siete áreas designadas.

En 2009 se completó el estudio de factibilidad, y en 2012 se aprobó el Estudio de Impacto Ambiental (EIA). La apertura de la mina comenzó en 2013, coincidiendo con la adquisición de Las Bambas por Glencore en el contexto de la compra de Xstrata. En 2014,

el consorcio liderado por MMG adquirió Las Bambas, iniciando el reacondicionamiento físico y obteniendo la aprobación de la segunda modificación del EIA. Para el año 2015, la apertura de Las Bambas alcanzó un 95%, y a principios de 2016 se iniciaron las operaciones mineras.

Figura 2

Tajo Ferrobamba



Nota: fotografía propia

2.2.3 Método de exploración

La extracción de minerales en "Las Bambas" se realiza a través del método de tajo abierto, también conocido como "open pit", utilizando equipos de gran envergadura para llevar a cabo los procesos operativos que se detallarán más adelante. Los bancos presentan dimensiones de 15 metros de altura y un diámetro de taladros de 12 ¼ pulgadas. Actualmente, se dispone de 9 perforadoras primarias 7 perforadoras eléctricas, 2 perforadoras diésel y 4 perforadoras Rock Drills llevar a cabo la perforación del precorte.

2.2.4 Operaciones mineras

El procedimiento operativo de extracción en "Las Bambas" se divide fundamentalmente en cuatro fases, que constituyen la base de todas las actividades de minería. Estas etapas son: Perforación, Voladura, Carguío y Acarreo. En la Unidad Operativa, la explotación se centra actualmente en el "Tajo Ferrobamba".

El proceso comienza con la perforación de taladros en la zona designada para la extracción, seguido de la carga de explosivos a granel, como ANFO o mezclas de ANFO con emulsión gasificada (Fortis Extra), también conocido como ANFO Pesado. Posteriormente, se lleva a cabo la detonación o voladura. Las palas o excavadoras se encargan de cargar el material fragmentado en camiones de gran capacidad durante la fase de Carguío (Pecho, 1981).

2.2.4.1 Perforación

La perforación representa la fase inicial en la preparación de una detonación. Su objetivo es crear cavidades cilíndricas en la roca destinadas a contener el explosivo y sus componentes iniciadores, conocidos como taladros, agujeros o "blast holes". Este proceso se fundamenta en principios mecánicos de percusión y rotación, donde los efectos de golpe y fricción generan el astillamiento y trituración de la roca en un área con un diámetro equivalente al de la broca, alcanzando una profundidad determinada por la longitud del barreno utilizado. La eficacia en la perforación radica en lograr la máxima penetración al menor costo posible (Pecho, 1981).

Figura 3

Equipo Hidráulico de Perforación primaria



Nota: fotografía propia

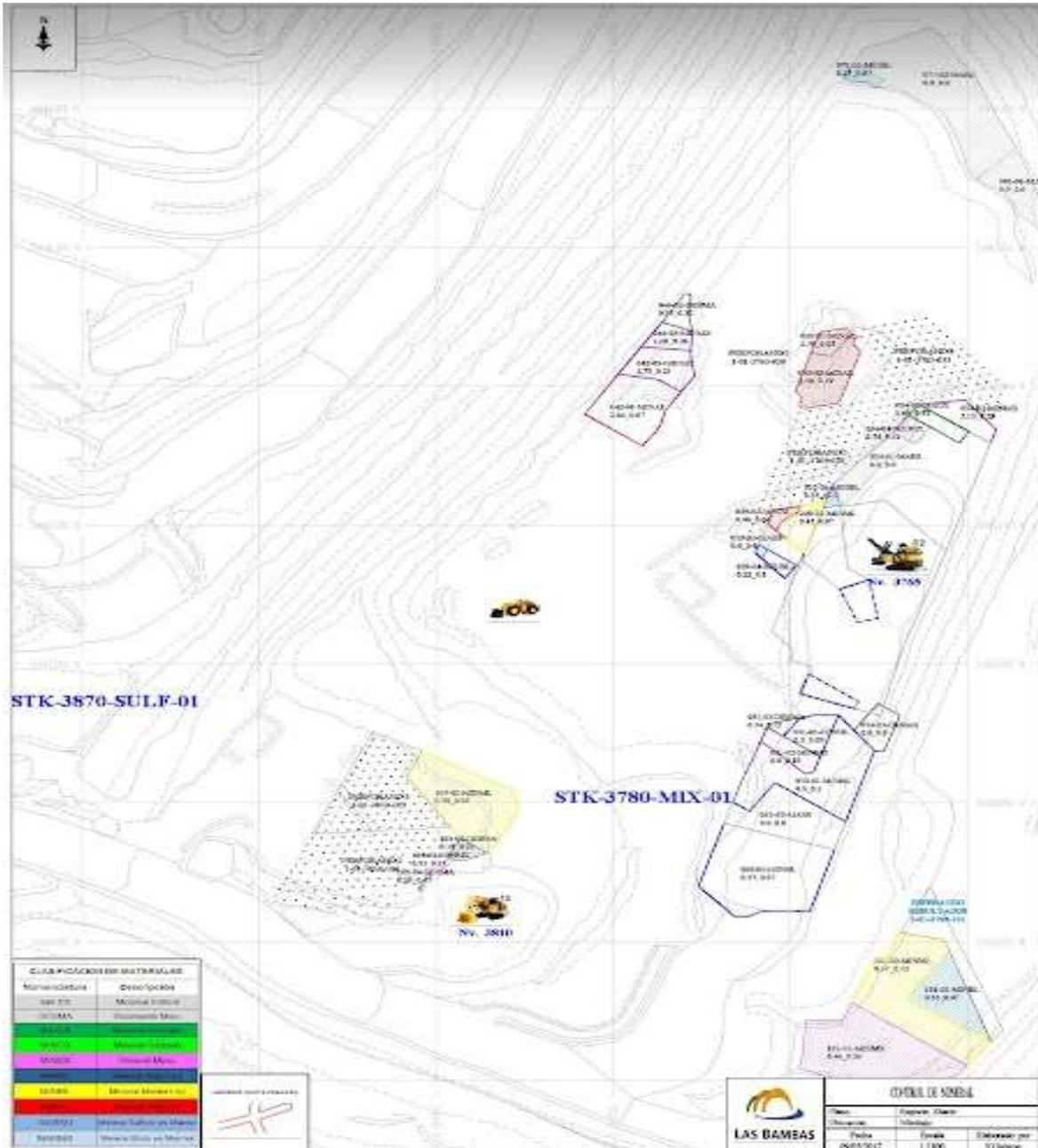
2.2.4.1.1 Equipos de perforación

Los equipos de perforación se encuentran posicionados en distintas secciones del "Tajo Ferrobamba" de acuerdo con el plan minero elaborado por el equipo de Planeamiento de la Unidad Operativa "Las Bambas". Estas perforadoras están equipadas con un sistema de comunicación que está conectado al servidor, permitiéndoles perforar las mallas predefinidas monitoreadas para su ubicación, conforme a los diseños realizados en las oficinas administrativas. Estas perforadoras, dotadas de un sistema de alta precisión, sistema de ubicación de manera satelital y tienen la capacidad de realizar perforaciones en los taladros de acuerdo con las coordenadas del diseño, con una desviación de ± 15 cm.

Malla de perforación y variedades de taladros.

Figura 4

Plano de ubicación de los equipos



Nota: Asistencia técnica Orica.

El equipo de Diseño de Perforación y Voladura (M.M.G.) es responsable de la elaboración de las mallas de perforación, utilizando parámetros geológicos y geotectónicos para identificar el tipo de material. Además, asignan el burden, espaciamiento, sobre perforación y tipo de carga específicos para cada malla y sus respectivos taladros. Todos los

detalles del diseño se registran para permitir la evaluación continua y la implementación de mejoras en la zona.

En "Las Bambas", se emplean tres tipos distintos de diseño de taladros, cada uno con funciones específicas de acuerdo con las necesidades y fases de la mina. Estos se denominan Precorte, Procedimiento y Producción, y a continuación se detallan sus funciones principales:

a) Precorte

La primera hilera de taladros adyacente a la pared final (según el diseño) del talud perforadas con las Rock Drills, los taladros de Precorte tiene como finalidad salvaguardar dicha pared al reducir las vibraciones mediante la absorción de la onda de choque.

- Diámetro de perforación: 5 pulgadas
- Espaciado: Entre 1.5 y 2.0 metros.
- Longitud de perforación: 16 metros.
- Inclinación: Varía entre 65° y 80°.

b) Procedimiento

Operan como amortiguadores para reducir vibraciones y la onda de choque cercana a la pared. Se compone de un conjunto de taladros dispuestos en dos filas: la fila adyacente y la primera fila de producción. Cada taladro tiene un diseño y carga específicos.

c) Producción

Se trata de taladros diseñados para maximizar la producción durante la voladura, con la finalidad de fragmentar el material de manera óptima. Están directamente vinculados a la eficiencia de los equipos de carga.

- Diámetro de perforación: 12¼ pulgadas

- Malla de perforación: Siguen un patrón triangular equilátero con dimensiones de 6.5 metros a 12 metros.
- Longitud de perforación: 15 metros.
- Sobre perforación: Varía entre 1.5 metros y 2.0 metros.

2.2.4.2 Voladura

De acuerdo con los principios de la mecánica de rotura, la voladura se configura como un proceso tridimensional. En este proceso, las presiones generadas por explosivos contenidos en taladros perforados en la roca dan lugar a una región de alta concentración de energía que provoca dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.

El término "fragmentación" alude al tamaño de los fragmentos producidos, su distribución y los porcentajes relativos a cada tamaño. Por otro lado, el concepto de "desplazamiento" hace referencia al movimiento de la masa de roca triturada.

La obtención de una fragmentación adecuada es esencial para facilitar la remoción y transporte del material volado, y está directamente vinculada con el propósito específico para el cual se utilizará dicho material. Este propósito determinará la calidad óptima de la fragmentación. En el caso de la explotación de minerales, se busca preferentemente una fragmentación fina, que facilite los procesos subsiguientes de conminución en las plantas metalúrgicas. Por otro lado, en la explotación de rocas, en ocasiones se requiere una fragmentación en bloques más grandes, como los utilizados en la construcción de rompeolas.

Figura 5

Carguío de taladros con camión fabrica



Nota: fotografía propia

El desplazamiento y la forma de acumulación del material se planifican de manera conveniente para el proceso de carga o transporte, teniendo en cuenta el tipo y las dimensiones de las palas y vehículos disponibles.

En el "Tajo Ferrobamba", la voladura implica el carguío mecanizado mediante camiones fábrica o "Móvil Manufactured Unit" (M.M.U.) de taladros con explosivos, que incluyen emulsión gasificada "Fortis Extra" y ANFO pesado gasificado, de acuerdo con el diseño de la columna explosiva para mineral y desmonte proporcionado por el área de Planeamiento de "Las Bambas". La sección de Asistencia Técnica de ORICA MINING SERVICES PERÚ S.A. en "Las Bambas" elabora un informe diario de los procesos de voladura, detallando los eventos ocurridos durante las voladuras del día, como la generación

de humos y gases, tiros cortados, demoras operativas y otros incidentes imprevistos. Además, en cada voladura se realizan registros y mediciones detalladas.

- Grabación visual de la detonación.
- Capturas fotográficas del proyecto antes y después de la detonación.
- Evaluación de la fragmentación.
- Registro de la velocidad de detonación en uno de los taladros del proyecto.

Figura 6

Carguío bombeable de taladros



Nota: fotografía propia

2.2.4.3 Carguío

Constituye la fase tres del procedimiento de extracción en el "Tajo Ferrobamba". Esta etapa se centra especialmente en la carga de material, ya sea mineral o desmonte, utilizando palas y cargadores frontales para transferirlos a los vehículos de transporte.

En "Las Bambas", se emplea el sistema de gestión de flotas Dispatch, el cual posibilita la maximización de la producción y la eficiencia de los equipos encargados de la carga y el transporte.

Figura 7

Carguío y Acarreo en UM Las Bambas



Nota: Memorial Las Bambas 2018

2.2.4.4 Acarreo

Esta operación se enfoca en el desplazamiento del material, que incluye tanto mineral como desmonte, hacia diversos destinos en la mina, tales como el chancador primario y los botaderos de desmonte.

El material fragmentado en las distintas áreas del "Tajo Ferrobamba" es extraído mediante el cargador frontal (L-2350) y las palas (CAT 7495 "Eléctrica", P&H 4100 XPCAC-90 "Eléctrica", CAT 6060 FS "Hidráulica"). Posteriormente, se transporta hacia los

diferentes puntos de destino utilizando camiones "KOMATSU" 930E con capacidad de 300 toneladas y camiones "CAT 797F" con capacidad de 400 toneladas

2.3 Bases teóricas

2.3.1 Explosivos

Sanchidrián & Muñiz (2000) señalan que los explosivos consisten en compuestos o combinaciones de elementos en estados sólido, líquido o gaseoso. A través de una reacción química exotérmica que ocurre en fracciones de segundo (microsegundos), liberan toda su energía en forma de gases, sonido y calor de manera violenta. Este proceso conduce a la transformación de las sustancias explosivas en otras más estables, generalmente en forma de gases y vapor de agua.

Como resultado de la reacción, se generan predominantemente gases a alta presión, los cuales, al expandirse debido a las elevadas temperaturas producidas, realizan trabajo mecánico. En el ámbito de la industria minera, la detonación de explosivos se considera un método altamente eficiente para la excavación en rocas duras. La clasificación de explosivos químicos se realiza en función de sus diversas características y aplicaciones específicas.

2.3.1.1 Elementos fundamentales de los explosivos

2.3.1.1.1 Combustible

El combustible genera calor mediante una reacción con el oxígeno. Son combustibles comunes los que abarcan el petróleo y el polvo de aluminio (Sanchidrián & Muñiz, 2000).

2.3.1.1.2 Oxidante

Es una sustancia química que proporciona oxígeno para el proceso de reacción. El nitrato de amonio es de lejos el oxidante más frecuentemente utilizado (Sanchidrián & Muñiz, 2000).

2.3.1.1.3 Sensibilizador

Un agente sensibilizador crea vacíos que funcionan como "puntos calientes" donde se inicia la reacción durante la detonación. Estos sensibilizadores suelen ser aire o gas en forma de diminutas burbujas, a veces encapsuladas en microesferas de vidrio (Sanchidrián & Muñiz, 2000).

Figura 8

Tipos de Explosivos



Nota: extraído de Cersa (2021)

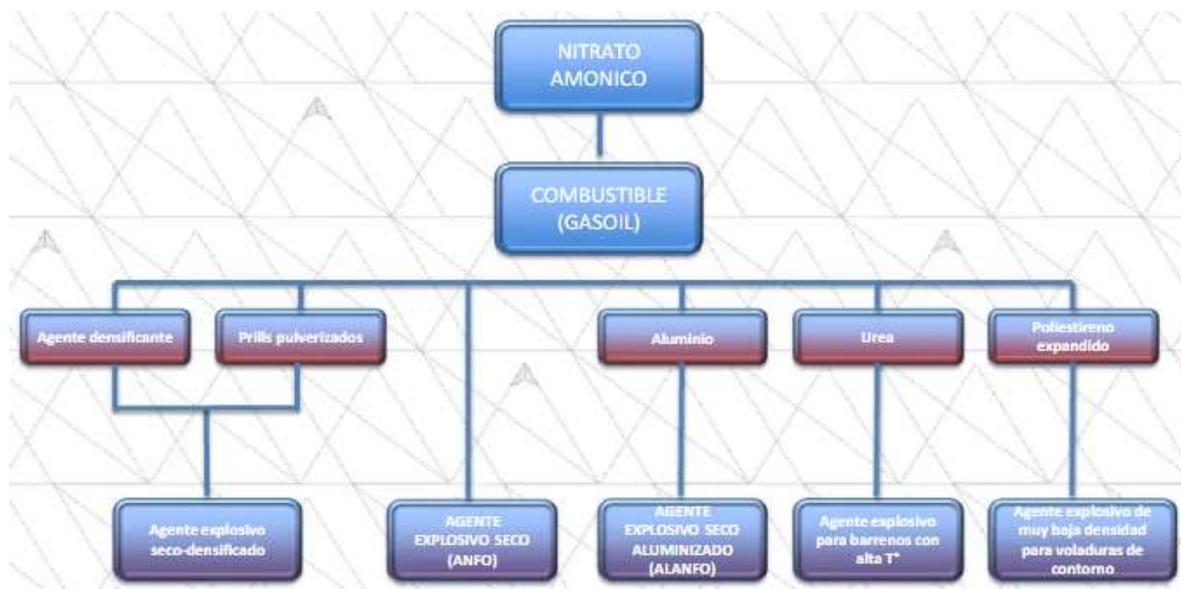
2.3.2 Agentes de voladura

Los compuestos de voladura son combinaciones explosivas que contienen un oxidante y un combustible como componentes. Estos agentes no muestran sensibilidad al fulminante N°8, por lo que requieren un cebo reforzado o un iniciador (Booster) para desencadenar su detonación. Aunque ninguno de sus componentes posee propiedades explosivas cuando se encuentran por separado, pueden volverse lo suficientemente sensibles

como para convertirse en explosivos potentes capaces de realizar trabajos útiles, específicamente en términos de arranque y fragmentación de la roca. Esta sensibilización permite que los agentes de voladura sean ampliamente empleados en la minería a cielo abierto, gracias a su considerable capacidad de rompimiento y a su costo relativamente bajo.

Figura 9

Agentes de voladura

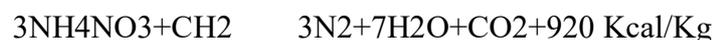


Nota: extraído de Bohorque (2016)

2.3.2.1 Anfo

Con el objetivo de mejorar la seguridad al reducir la presencia de nitroglicerina o nitroglicol en los explosivos, surgieron los explosivos del tipo ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil). Estos explosivos están compuestos aproximadamente por un 94% de nitrato de amonio, que actúa como oxidante, y alrededor del 6% de Fuel Oil, que cumple la función de combustible.

El porcentaje de combustible desempeña un papel crucial en las diversas propiedades del ANFO. La reacción de descomposición del sistema, equilibrado en términos de oxígeno, se puede expresar mediante:



Dado su aspecto granular y la solubilidad del nitrato de amonio, estos explosivos son susceptibles al agua, lo que los hace inapropiados para su uso en perforaciones que involucren este elemento. Sin embargo, esta textura granular presenta una ventaja significativa al facilitar la carga mecánica del explosivo. El ANFO constituye una mezcla equilibrada de nitrato de amonio poroso y combustible diésel N°2. El nitrato de amonio, una sal inorgánica compuesta por iones de nitrato y amonio se obtiene mediante la neutralización de ácido nítrico con amoniaco, seguido de la evaporación del agua.

En cuanto a sus aplicaciones, el nitrato de amonio se emplea como fertilizante de liberación prolongada debido a su alto contenido de nitrógeno. Las plantas aprovechan el nitrato, mientras que los microorganismos en el suelo oxidan el amonio. Además, se utiliza como componente explosivo al combinarse con petróleo, formando la mezcla ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil). En esta mezcla, el nitrato de amonio actúa como oxidante, proporcionando el oxígeno necesario para la reacción de detonación.

Las características del ANFO incluyen una densidad promedio de 0.80 a 0.78 gr/cm³; los gránulos deben absorber al menos un 6% de Fuel Oil en peso, siendo las calidades superiores aquellas con absorciones consistentes superiores al 11.5%. Propiedades clave incluyen una porosidad del 10 al 15%, concentración de nitrato de amonio en solución del 95.8 al 96.20%, el uso de un agente antiaglomerante (Lilamin AC 83P) como recubrimiento interno y externo del 0.18 al 0.20%, fragilidad mínima de 450 a 530 gr/fuerza, humedad del 0.08 al 0.18%, entre otros. El ANFO presenta una energía efectiva relativa de 2.30 MJ/kg a una densidad de 0.80 gr/cm³, considerando factores que influyen en su rendimiento

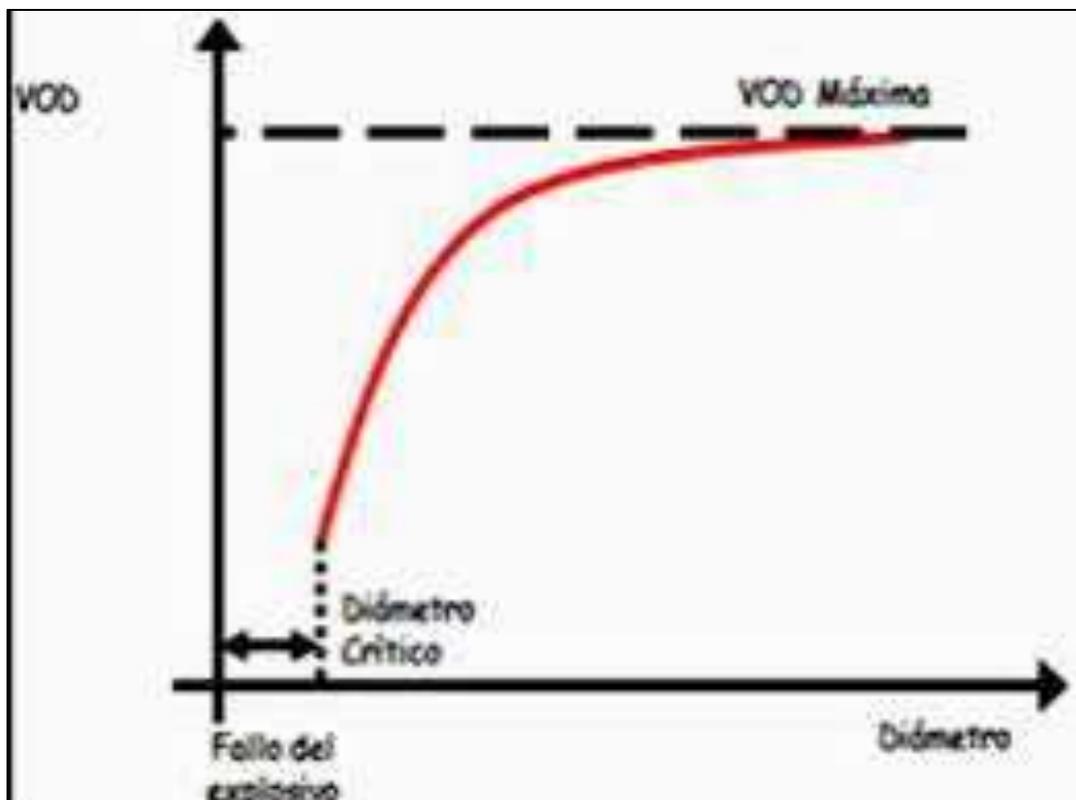
Aspectos como el diámetro del barreno, el tipo de roca y las características de la reacción del explosivo, junto con cálculos que incorporan una presión de corte de 100 MPa, son consideraciones fundamentales en la planificación de perforaciones.

El ANFO, reconocido por su eficiencia y economía según Konya (1998), constituye un agente de voladura de alta energía gaseosa. Esta mezcla consiste en un 94% de nitrato de amonio y un 6% de combustible diésel N°2. Su principal desventaja radica en su falta de resistencia al agua y su carácter higroscópico frente a la humedad ambiental, lo que hace necesario almacenarlo en lugares adecuados.

Una propiedad destacada del ANFO es su densidad. A medida que esta aumenta, se observa un incremento en su velocidad y una reducción en su sensibilidad, alcanzando la insensibilidad alrededor de 1.20 gr/cm^3 , que indica su densidad crítica. El diámetro de la columna explosiva tiene un impacto significativo en la velocidad de detonación, su VOD $3800 - 4400 \text{ m/s}$, aumentando desde su diámetro crítico hasta alcanzar una velocidad constante más allá de los 12".

Figura 10

VOD vs diámetro de carga

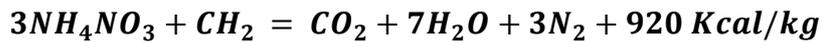


Nota: extraído de MITECO (s/f)

La presencia de diésel en el ANFO es un componente crucial, como se muestra en la Figura n, que representa la influencia del porcentaje de diésel en el rendimiento energético del ANFO. La máxima eficiencia energética se logra cuando el nitrato de amonio (NA) y el diésel están en equilibrio con un "balance de oxígeno cero". Si la proporción de diésel se desvía de la óptima, la energía disminuye, la detonación se ve afectada y se genera una mayor cantidad de gases tóxicos. Es imperativo que cualquier explosivo produzca los siguientes resultados:



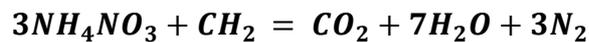
La ecuación que sigue expresa la relación ideal entre los componentes del ANFO.



N: 14—O:15.99----H:1-----C:12.01

Se calcularán los pesos moleculares siguientes:

Ingredientes/Explosivo = Producto



$$254.16 \text{ gr/mol} = 254.16 \text{ gr/mol}$$

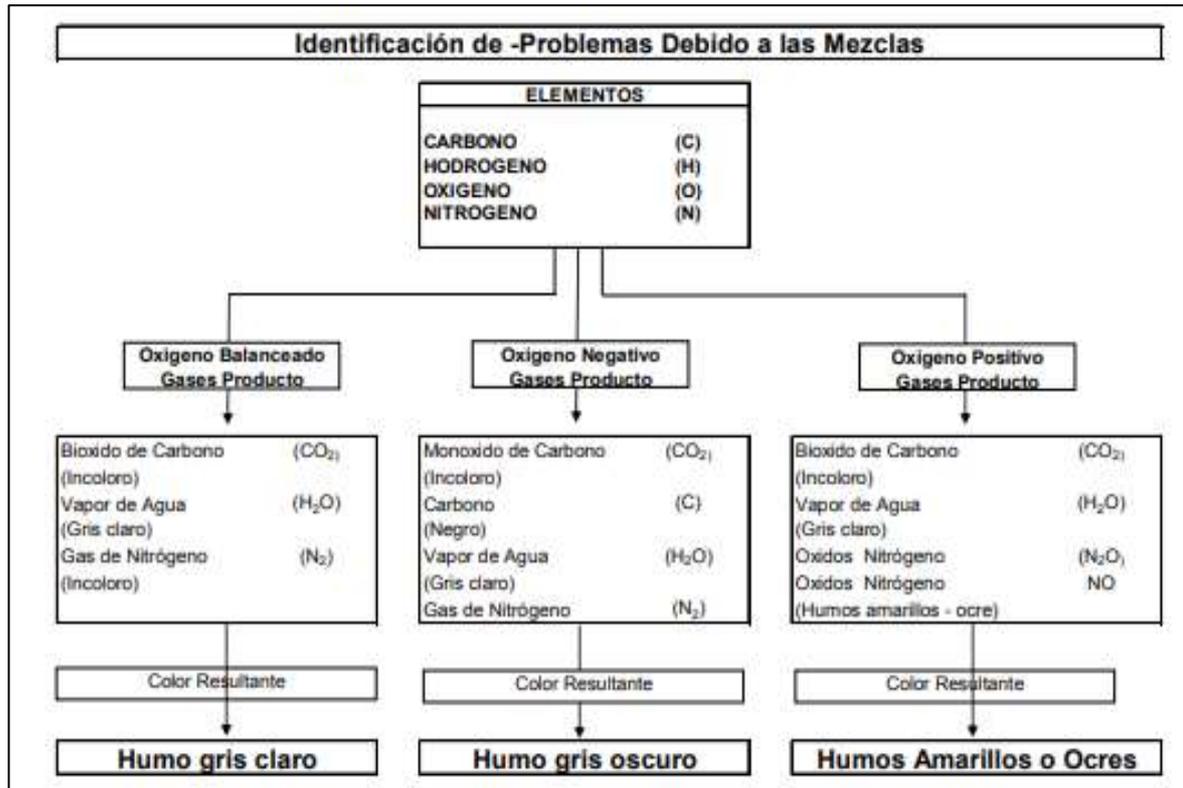
En ese caso, será necesario:

$$3\text{NH}_4\text{NO}_3 = \frac{240.13 \frac{\text{gr}}{\text{mol}} \times 100\%}{254.16 \frac{\text{gr}}{\text{mol}}} = 94\%$$

$$\text{CH}_2 = 6\%$$

Figura 11

Balace del oxigeno

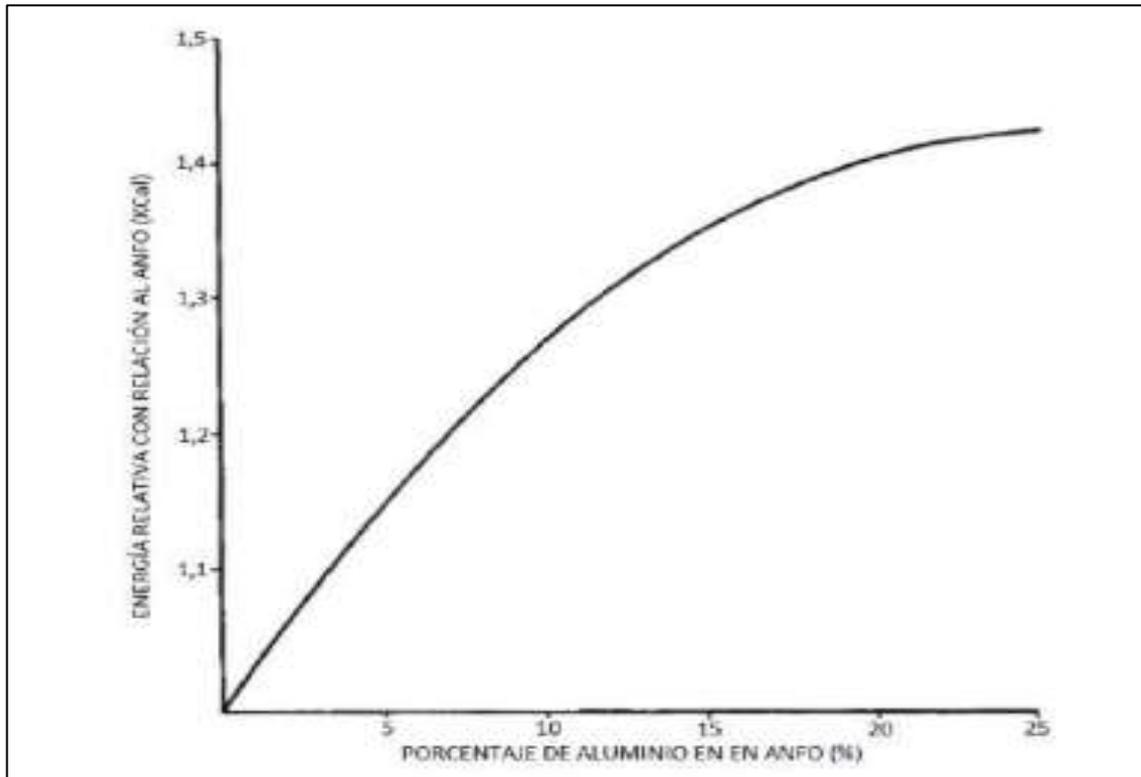


Nota: extraído de UNMSM (2010)

Para López et al. (2003) debido a que el ANFO exhibe propiedades como velocidad de detonación, capacidad de ruptura, energía y densidad relativamente bajas, se mezcla con pequeñas cantidades de polvo de ALUMINIO para potenciar el explosivo. Los porcentajes de ALUMINIO varían entre 5, 10, 15, 20 y hasta un máximo del 25% en peso. Más allá de este punto, la energía disminuye debido a la formación de trióxido de dialuminio sólido, que absorbe parte de la energía disponible. Se logra así una combinación conocida como ANFO ALUMINIZADO, empleado en cargas de fondo para obtener una mayor potencia explosiva en el pozo. El aluminio actúa como un combustible altamente energético que intensifica la liberación de energía en forma de temperatura y presión de detonación. La Figura n°2.3 ilustra la relación entre la energía desarrollada y el porcentaje de ALUMINIO añadido a la mezcla de ANFO.

Figura 12

Aumento en el nivel de energía al agregar aluminio



Nota: extraído de López et al. (2003)

2.3.2.1.1 Emulsión de Nitrato de Amonio

La descripción de Emulsión de Nitrato de Amonio es un componente en emulsión usado en minería para mezclas con ANFOS. Produciendo un producto explosivo en el sitio. Esta es una emulsión no explosiva fabricada a partir de una solución oxidante y combustible.

La Emulsión de Nitrato de Amonio tiene un balance de oxígeno negativo y apariencia de un fluido viscoso de color amarillo opaco, similar a una grasa liviana o un aceite pesado.

2.3.2.1.2 Aplicación

Emulsión de Nitrato de Amonio es también fabricado por ORICA con el producto llamado Fortis Advantage ANE con un alto estándar de calidad y es entregado a las minas por medio de camiones estanques o iso tanques adecuados sujetos al camión.

Emulsión de Nitrato de Amonio (Fortis Advantage ANE) puede solo ser usado para fabricar series de productos explosivos autorizados, este producto antes de mesclar en cualquier sitio específico, son requeridas las licencias otorgadas por las autoridades regulatorias.

Emulsión de nitrato de amonio no es un producto explosivo, las propiedades relativas a las características explosivas no aplican.

Densidad de la Emulsión de Nitrato de Amonio 1.29g/cm³

Fortis Advantage ANE es recomendado para fabricar todos los rangos de productos ANFO/emulsión, series Fortis y Fortan Advantage. Fortis y Fortan Advantage pueden ser mezclados con ANFO y Diesel en una proporción apropiada asegurando su optimo desempeño.

2.3.2.2 Emulsión explosiva

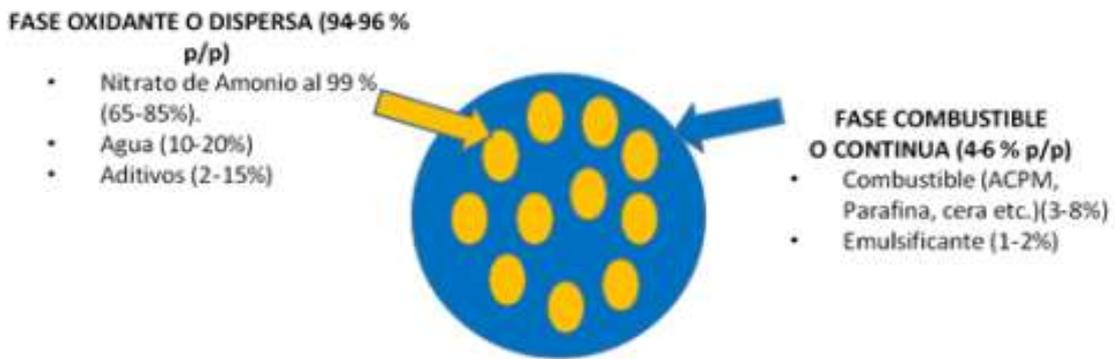
Según López et al. (2003) las emulsiones explosivas consisten en mezclas estables de un líquido inmiscible disperso en otro, conocido como "Agua en aceite". La fase aceitosa está compuesta por un combustible líquido que no se mezcla con el agua, generalmente diésel n°2, mientras que la fase acuosa contiene sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua. Estas emulsiones conservan sus propiedades incluso en contacto con el agua.

A diferencia de otras composiciones explosivas, no contienen un componente explosivo intrínseco y necesitan ser sensibilizadas mediante un mecanismo físico, como la generación de burbujas de gas. Estas burbujas, al ser comprimidas adiabáticamente, actúan como puntos calientes o "HOT SPOTS", facilitando tanto la iniciación como la propagación de la detonación. Los agentes sensibilizadores pueden incluir microesferas de vidrio, Nitrito de Sodio, ANFO, entre otros. Para detonar, estas emulsiones requieren ser iniciadas con un cebador de alta presión de detonación, como un booster o una emulsión sensibilizada

encartuchada. La elaboración de emulsiones presenta un desafío significativo en la fase aceitosa, ya que, debido a la necesidad de mantener un equilibrio adecuado de oxígeno en la composición final, el 6 % en peso de la emulsión, correspondiente al aceite, debe contener las microgotas restantes que constituyen el 94% (López et al., 2003).

Figura 13

Emulsión Explosiva y componentes



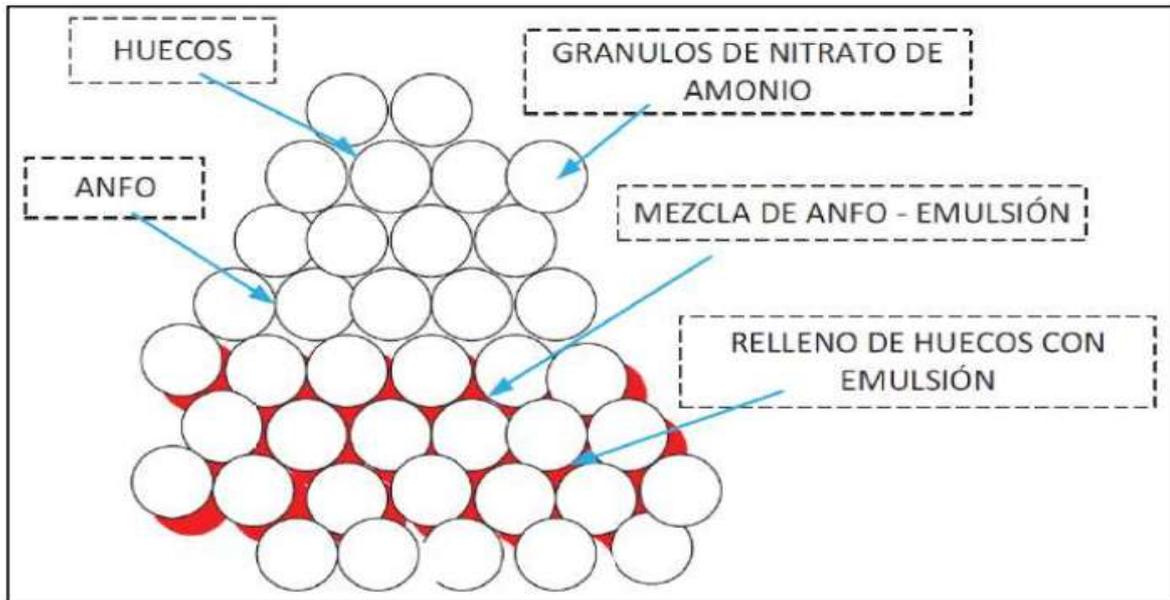
Nota: extraído de López et al. (2003)

2.3.2.3 ANFO pesado

El ANFO pesado consiste en una combinación de perlas de nitrato de amonio, diésel y suspensión. Una ventaja de las mezclas de ANFO pesado es su facilidad de elaboración y carga en el barreno. Es posible ajustar la proporción entre la suspensión y el ANFO para obtener un explosivo con mayor energía o uno resistente al agua. El costo del ANFO pesado aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de suspensión. En comparación con los productos encartuchados, una ventaja significativa es que el barreno se carga completamente, sin dejar espacios vacíos entre el barreno y la carga. Sin embargo, una desventaja es que, al ocupar todo el volumen del barreno, si hay presencia de agua, esta se desplaza hacia arriba, lo que implica la necesidad de utilizar esta mezcla en todo el barreno. Por otro lado, los productos encartuchados permiten cargar el cartucho más allá del nivel del agua debido al espacio entre este y el barreno, y luego se puede utilizar ANFO a granel de menor costo (ORICA, 2023).

Figura 14

ANFO Pesado



Nota: extraído de Área técnica de Orica

2.3.2.4 Emulsión explosiva gasificada

Según la VVAA (1990) este innovador producto está diseñado para llevar a cabo operaciones de voladura en minería a cielo abierto. Se trata de un agente elaborado a partir de emulsión que se transporta a las minas como un producto inerte no detonable. Antes de la carga en los taladros, se sensibiliza mediante una solución gasificante, generando una mezcla explosiva con menor densidad y mayor velocidad de detonación en comparación con los ANFOS pesados. Destaca por su alta resistencia al agua.

Este producto presenta notables ventajas técnicas y económicas con respecto al tradicional ANFO pesado. Su utilización garantiza la seguridad, ya que es un producto no explosivo antes de ingresar a los taladros. Entre sus beneficios clave se incluye un aumento en la velocidad de detonación, pasando de 4,800 m/s a 5,300 m/s en comparación con el rango de 3,700 m/s a 4,400 m/s alcanzado por el ANFO pesado. También se observa una reducción en el costo unitario de perforación y voladura. Adicionalmente, al no contener

nitrate de amonio (NA) ni petrleo, se evita incurrir en el significativo costo financiero asociado con el mantenimiento de inventarios de estos productos en la mina.

Tabla 3

Características específica de la Emulsión Gasificante

Emulsion G	Unidad	valor
Densidad antes de gasificar	gr/cm ³	1.37± 2.99 %
Densidades posibles luego de gasificar	gr/cm ³	0.79-1.22
Viscosidad de la emulsion	cp	13000
Velocidad de detonacion	m/s	4550 -6000
Presion de detonacion	Mpa	4750- 9100
Energia	KJ / Kg	2553
Volumen normal de gases	l/Kg	1022
Potencia relativa en peso (comparada con anfo)	%	65
Potencia relativa en volumen (comparada con anfo)	%	121
Resistencia al agua		optimo
Diametro critico	mm	76
Tiempo de espera en taladros	dias	7

Nota: extraído de Jimeno (2013)

2.3.3 Clasificación de respuesta basadas en la cinética química

Todos los explosivos industriales están principalmente compuestos por una mezcla de sustancias, combustible y comburente, que da lugar a reacciones químicas de oxidación caracterizadas por su rapidez. Los impulsos de energía aplicados a las moléculas de los explosivos generan fuerzas de atracción entre los átomos, los cuales se disocian para luego volver a agruparse en formas estables. La considerable energía liberada se manifiesta como una reacción exotérmica, expresada en ondas de presión y altas temperaturas. Estas condiciones provocan sucesivas disociaciones de las moléculas adyacentes, y la reacción se propaga desde todas las partículas. La velocidad con la que se manifiesta esta propagación

puede o no estabilizarse hasta alcanzar valores específicos. Por lo tanto, las reacciones de oxidación se clasifican en tres tipos: combustión, deflagración y detonación, según la velocidad con la que ocurren (Pernia et al., 1987).

2.3.3.1 Combustión

La combustión es un proceso químico de oxidación que libera una gran cantidad de energía. Su velocidad de reacción es inferior a 1 m/s y su manifestación es visible en forma de llama (Sanchidrián & Muñiz, 2000).

2.3.3.2 Deflagración

Una deflagración es una rápida combustión con llama que se propaga a baja velocidad, sin llegar a causar una explosión. A menudo, se confunde erróneamente con explosiones, utilizándose como sinónimo en ocasiones. Aunque la reacción que provoca una deflagración es idéntica a la de la combustión, su cinética se desarrolla a una velocidad superior a la combustión, pero inferior a la velocidad con la que se propagaría el sonido en el propio explosivo. Por ende, se trata de una reacción subsónica. La onda de presión generada en una deflagración alcanza aproximadamente 103 atmósferas. Un ejemplo de esto es la pólvora, que reacciona mediante una combustión rápida de una sustancia que contiene su propio oxígeno (López et al., 2003).

2.3.3.3 Detonación

La detonación es un proceso de combustión supersónico que se distingue por generar una onda de choque. En el frente de esta onda se crean elevados gradientes de presión y temperatura debido a que la reacción química ocurre de manera instantánea. La velocidad de reacción típicamente oscila entre 1,500 y 9,000 m/s, y la onda de presión generada alcanzaría aproximadamente 105 atmósferas. Es importante destacar que la dirección del movimiento de las moléculas gaseosas, resultado de las primeras reacciones, parece ser

determinante para la ocurrencia de uno u otro proceso (deflagración o detonación). En el caso de la detonación, las moléculas se moverían preferentemente en la misma dirección de la propagación, intensificándola, mientras que en la deflagración lo harían en dirección opuesta, disminuyéndola. Cada tipo de explosivo tiene una composición específica y definida, lo que implica que sus características son distintas. En consecuencia, para cada aplicación se puede seleccionar el explosivo más adecuado (López et al., 2003).

2.3.4 Plan de manejo Ambiental

El Plan de Manejo Ambiental (PMA) de la mina Las Bambas, controlada por MMG (2021), es un conjunto de actividades y medidas que buscan prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos ambientales que se generen por el desarrollo de la actividad minera.

Figura 15

Anexo A de estándar de medio ambiente

ESTÁNDAR DE MEDIO AMBIENTE		
WE MINE FOR PROGRESS MMG		
ANEXO A: AUTORIDADES DEL DOCUMENTO		
	Ratificación	Aprobación (Propietario)
Plan de Gestión de la Calidad del Aire, el Ruido y la Vibración		
Persona técnicamente competente designada por el Aprobador	✓	
Gerente de Excelencia en SHEC del Grupo	✓	
Gerente General del sitio		✓
Curva de Costos Marginales de Reducción (MACC)		
Persona técnicamente competente designada por el Aprobador	✓	
Gerente de Excelencia en SHEC del Grupo	✓	
Gerente General de Excelencia Operacional		✓
Plan de Gestión de Tierras y Biodiversidad		
Persona técnicamente competente designada por el Aprobador	✓	
Gerente de Excelencia en SHEC del Grupo	✓	
Gerente General del sitio		✓
Plan de Compensaciones de Biodiversidad		
Persona técnicamente competente designada por el Aprobador	✓	
Gerente de Excelencia en SHEC del Grupo	✓	
Gerente General del sitio	✓	
Director de Operaciones		✓
Plan de Gestión de Residuos Minerales		
Persona técnicamente competente designada por el Aprobador	✓	
Gerente de Excelencia en SHEC del Grupo	✓	
Gerente General del sitio		✓
Plan de Gestión de Residuos No Minerales		
Persona técnicamente competente designada por el Aprobador	✓	
Gerente de Excelencia en SHEC del Grupo	✓	
Gerente General del sitio		✓
Plan de Gestión del agua		
Persona técnicamente competente designada por el Aprobador	✓	
Gerente de Excelencia en SHEC del Grupo	✓	
Gerente General del sitio		✓

Nota: extraído de MMG (2021)

Figura 16

Anexo B de estándar de medio ambiente

ESTÁNDAR DE MMG

ESTÁNDAR DE MEDIO AMBIENTE



ANEXO B: ENTREGABLES DEL CICLO DE VIDA DE LOS ACTIVOS

Entregable	Exploración	Factibilidad	Construcción	Operación	Cierre
Registros de datos medioambientales en ERIK	✓	✓	✓	✓	✓
Calidad del aire, ruido y vibración					
Plan de Gestión de la calidad del aire, el ruido y la vibración	✓ Basado en los riesgos	✓	✓	✓	✓
Calidad del aire ambiental y de fondo, el ruido y la vibración; condiciones meteorológicas y otras fuentes de emisiones		✓	✓	✓	✓
Emisiones a la atmósfera, de ruido y vibraciones dentro del inventario de los límites del sitio de MMG		✓	✓	✓	
Receptores sensibles registrados	✓ Basado en los riesgos	✓	✓	✓	✓
Emisiones de energía y GEI					
Datos de la energía y GHG y procedimiento de las actividades	✓ Recopilación de datos	✓	✓	✓	

Nota: extraído de MMG (2021)

En relación a las acciones de gestión medioambiental y las precauciones que se deben tomar durante la ejecución del proyecto.

2.3.4.1.1 Propósito

Define los requisitos para MMG Limited y sus subsidiarias (MMG) en relación con la gestión de riesgos ambientales sustanciales, incluida el agua, residuos minerales y no minerales, tierra y biodiversidad, aire, ruidos y vibración, energía y gas de efectos invernaderos (GEI)

2.3.4.1.2 Aplicación

El presente estándar aplica a todo el personal de MMG (2021) y las actividades controladas por MMG. ORICA MINING SERVICES PERU S.A

Orica tiene un papel importante que desempeñar en la protección del medio ambiente y en el abordaje del cambio climático minimizando nuestra huella ambiental y ofreciendo soluciones comercialmente beneficiosas para nuestros clientes que los ayuden a alcanzar sus objetivos de sostenibilidad.

Guiados por nuestra Estrategia de Sostenibilidad, colaboramos con nuestros clientes y otras partes interesadas para encontrar soluciones a los mayores desafíos de nuestra industria y avanzar juntos hacia un futuro con menos emisiones de carbono. Nos centramos en movilizar los materiales, metales y minerales necesarios para ayudar a la economía mundial a crecer y hacer la transición hacia emisiones netas cero, impulsando la tecnología y la innovación en toda la cadena de valor de la minería y acelerando nuestra descarbonización. Un pilar fundamental de nuestra estrategia es nuestra ambición declarada de lograr emisiones netas cero para 2050.

ORICA toma las siguientes medidas para minimizar el impacto ambiental de la voladura de rocas.

- Proteger el material almacenado en montículos contra la erosión
- Instalar señales que indiquen los límites de velocidad
- Controlar la emisión de gases de combustión
- Realizar un mantenimiento preventivo de los equipos y maquinarias

Otras precauciones de seguridad que se pueden tomar durante las voladuras son:

Evitar realizar voladuras en condiciones de viento

2.4 Marco conceptual

2.4.1 Anfo

Agente explosivo que contiene nitrato de amonio y otros elementos para potenciar sus propiedades explosivas. Es altamente sensible a la humedad, por lo que se recomienda su uso en barrenos secos y en detonaciones al aire libre. Se clasifica como un explosivo de alto nivel y se compone de una mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo. Estas combinaciones son ampliamente empleadas por compañías mineras y de demolición, ya que ofrecen una opción segura, económica y accesible (MITECO, s/f).

2.4.2 Agentes de voladura

Sustancia que actúa de manera similar a un explosivo, pero cuyos componentes individuales no poseen características explosivas por sí mismos. Ejemplos de estos elementos incluyen el nitrato de amonio, el fuel oil o una combinación de oxidantes y combustibles. Estos no inician directamente mediante un detonador, por lo que es esencial colocar un explosivo multiplicador entre la carga y el detonador para su activación

2.4.3 Costo ambiental

Se refieren a los desembolsos esenciales destinados a preservar, conservar, mejorar y rehabilitar el entorno natural. Corresponde al valor económico atribuido a los impactos adversos de una actividad productiva sobre la sociedad (Iturria, 2008).

2.4.4 Contaminación Ambiental

Consecuencia generada por la introducción, de manera directa o indirecta, de contaminantes por parte del ser humano en el entorno. Esta acción, ya sea por la concentración de contaminantes que excede los niveles máximos permitidos o por el tiempo de permanencia, provoca que el medio receptor adquiera propiedades distintas a las

originales, resultando perjudiciales o nocivas para la naturaleza, la salud y la propiedad (Iturria, 2008).

2.4.5 Detonador

Cualquier mecanismo que incluya una carga detonante utilizada para activar un explosivo. Estos dispositivos abarcan fulminantes, ya sean eléctricos o no eléctricos, instantáneos o con retardo, así como conectores de retardo. El término "detonador" excluye el cordón detonante. En general, los detonadores suelen estar compuestos por un pequeño tubo de metal o plástico que contiene explosivos como Azida de plomo, PETN o combinaciones de estos. Están diseñados para iniciar un tren de voladura y pueden ser contruidos para detonar de inmediato o incorporar un elemento de retardo. La cantidad total de explosivos en un detonador, excluyendo las cargas de ignición y retardo, no debe superar los 10 gramos de peso (O`connor, 2023).

2.4.6 Explosivo

Los explosivos son sustancias con baja estabilidad química que tienen la capacidad de transformarse de manera violenta en gases. Esta conversión puede ocurrir mediante combustión o como resultado de un golpe, impacto, fricción u otra acción, siendo denominados explosivos detonantes, como es el caso de la dinamita y los nitratos de amonio. Cuando esta transformación abrupta en gases tiene lugar en un espacio cerrado, como un barreno en una capa de roca, se generan presiones considerablemente altas que provocan la fractura de la roca. La pólvora negra, compuesta por salitre, carbón y azufre, representa la más antigua de las sustancias explosivas (CFR, 2005).

2.4.7 Energía de gas

Los gases resultantes de la detonación química se desprenden con una elevada presión y temperatura, otorgándoles una considerable cantidad de energía (MITECO, s/f).

2.4.8 Emulsión

Sustancia explosiva que incluye cantidades significativas de oxidantes disueltos en diminutas gotas de agua, las cuales están rodeadas por un combustible que no se mezcla con el agua (MITECO, s/f).

2.4.9 Encendido

Acto de dar inicio a la detonación utilizando diversas técnicas. Explosivo detonante. Material que responde a la detonación en lugar de la deflagración al iniciarse y que se utiliza de manera convencional (Sanchidrián & Muñiz, 2000).

2.4.10 Explosivo deflagrante

Material, como en el caso de propulsión, que experimenta deflagración en lugar de detonación al encenderse y se utiliza de forma habitual (O'connor, 2023).

2.4.11 Gases tóxicos

En el ámbito minero, se refiere a gases perjudiciales para el cuerpo debido a su naturaleza tóxica, como el monóxido de carbono (CO), los humos nitrosos con aroma y sabor ácidos, el sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico) (H₂S) con un límite permisible de 8 ppm y un olor similar a huevos podridos, así como el anhídrido sulfuroso (SO₂). En concentraciones superiores al 15% en volumen, el SO₂ puede ser mortal, con un límite permisible de 1,6 ppm (Clavijo, s/f).

2.4.12 Fragmentación

Sustancia que ha experimentado una disminución en su tamaño como resultado de la detonación, estando preparada para ser cargada y transportada. La medida del grado de fragmentación se evalúa en función del tamaño promedio obtenido y su distribución (Pernia et al., 1987).

2.4.13 Línea base

En cuanto a la estrategia utilizada y la solicitud de información sobre ciertos resultados logrados, principalmente en lo que respecta a las condiciones hidrobiológicas y a la calidad y cantidad de las fuentes de agua disponibles (Pernia et al., 1987).

2.4.14 Impacto ambiental

Las consecuencias y la extensión de los impactos ambientales observados actualmente y los que podrían suceder en el futuro en el suelo, el aire, el agua y los recursos de flora y fauna, así como las ramificaciones que estos efectos tendrían en la calidad de vida, la economía y el bienestar social (Iturria, 2008).

2.4.15 Minas a tajo abierto

La explotación de estas minas se realiza en la superficie mediante la aplicación de una secuencia de explosivos. Después de la detonación, que elimina el material mineralizado, se lleva a cabo la carga en camiones o cintas transportadoras mediante cargadores frontales o palas mecánicas. Posteriormente, el material se transporta a la Planta de Chancado para iniciar el proceso de concentración (Ingeoexpert, 2018).

2.4.16 Oxidación

Modificación en el estado de oxidación de un elemento, caracterizado por la pérdida de electrones. También se refiere al proceso en el cual sustancias químicas susceptibles de oxidación, como carbono y azufre presentes en el mineral, son eliminadas debido a la acción del oxígeno u otro agente oxidante (Alvarez, 2024).

2.4.17 Rangos de velocidad de detonación

En el ámbito de los explosivos químicos utilizados en la industria, se encuentran variaciones en la velocidad de detonación que oscilan entre los 2,500 m/s y los 7,000 m/s.

Esta característica reviste una importancia significativa al momento de evaluar la capacidad destructiva del explosivo mediante el desarrollo de energía para un diámetro específico (Pernia et al., 1987).

2.4.18 Voladura

La voladura es el proceso instantáneo de fragmentación en la roca, inducido por la detonación de explosivos colocados en su interior. La voladura primaria ocurre directamente en la masa rocosa para separar y fragmentar parte de ella, ya sea en operaciones mineras a cielo abierto o subterráneas. Por otro lado, la voladura secundaria se realiza en fragmentos de gran tamaño o colpas que ya han sido separados de la masa rocosa, con el objetivo de reducirlos al tamaño adecuado para su carga y transporte a la planta (López et al., 2003).

2.4.19 Voladura controlada

Diseños de patrones y secuencias de voladura creados con el propósito de optimizar un objetivo específico. En esta técnica de voladura, cada perforación se detona de manera progresiva para minimizar las vibraciones y controlar la dirección de la proyección. En el caso de voladuras simultáneas, los hoyos se cargan al mismo tiempo, pero se detonan en sucesivas operaciones en días distintos (López et al., 2003).

CAPÍTULO III.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Ámbito de estudio

La investigación se llevó a cabo dentro de la contrata ORICA, en la Unidad Minera Las BAMBAS S.A.A. Puntualmente, los resultados alcanzados provienen del Tajo Ferrobamba de donde se extrajo la información primaria y secundaria.

3.2 Tipo de investigación

La naturaleza de la investigación realizada es de carácter aplicativo. De acuerdo con Hernández & Mendoza (2018) las investigaciones aplicadas emplean el conocimiento teórico con el propósito de abordar problemas reales, es decir, se fundamentan en conceptos e ideas previamente establecidos para resolver el problema de investigación. En este contexto, el estudio utiliza la teoría asociada a la metodología del uso del explosivo Fortis extra con el objetivo de minimizar los costos en la realización de la voladura de producción en el tajo Ferrobamba.

3.3 Nivel de investigación

En cuanto al nivel de investigación se fundamentó basándose descriptivo-explicativo, en la cual se plantea las propiedades y características de conceptos, fenómenos, variables o hechos de una fenómeno de estudio ocurrido dentro en un contexto determinado (Hernández & Mendoza, 2018). Por ende, la investigación se centró en explicar de qué manera el explosivo Fortis extra 60-40, incide en la optimización de la voladura en el tajo Ferrobamba.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

La población en el caso de la presente investigación fue dada por todos los proyectos de voladura ocurridos en el Tajo Ferrobamba dentro de la Unidad Minera Las Bambas, que sugiere la optimización de la voladura de producción de sus proyectos.

3.4.2 Muestra

En el caso de la muestra se consideró a los proyectos de voladura de producción en Jahuapaylla Alta y Jahuapaylla Baja en el tajo Ferrobamba, ya que estos cumplían con la condiciones adecuadas para evaluar el impacto del explosivo Fortis extra 60-40, como principal interés de esta investigación.

3.4.2.1 Tipo de muestreo

El tipo de muestreo utilizado fue mediante un procedimiento no probabilístico, o conocido como por conveniencia, ya que los datos necesarios se seleccionaron en base a las necesidades de la investigación y por criterio del investigador en el campo.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de información

3.5.1 Técnicas de recolección de información

Las técnicas de recolección de los datos se realizaron de dos formas:

- Fuentes secundarias: es aquella información que se recolecta de fuentes previas que se realizaron en el ámbito de estudio y que están relacionadas a las variables de investigación. En este caso se considera a la documentación del área de planeamiento.
- Fuentes primarias: consiste en información obtenida directamente por el investigador, a través de herramientas adecuadas y siguiendo los métodos

planteados, dentro del ámbito de estudio. Aquí se consideran los datos ejecutados en campo.

3.5.2 Instrumentos de recolección de información

Los instrumentos utilizados para la recolección de los datos son:

- Ficha de análisis documental: donde se registró y ordeno las especificaciones de las emulsiones, y los reportes de la voladura y de la fragmentación.
- Ficha de registro en campo: La recolección de datos también se realizó recolectando información de las pruebas en campo, considerando el tamaño de la población, los recursos con los que se cuente y la oportunidad para la obtención de los datos.

3.5.3 Procesamiento y presentación de datos

Procesamiento:

El procesamiento de los datos obtenidos en esta investigación siguió un enfoque sistemático, descrito a continuación:

- Inicialmente, los datos recopilados mediante observaciones directas, registros de campo, controles operativos de densidad, mediciones de velocidades de detonación (VOD), análisis de fragmentación y costos asociados a la voladura fueron organizados en matrices de datos estructurados.
- Segundo, se realizó al procesamiento de la información, el cual consistió en la clasificación, tabulación y análisis estadístico de los datos. Para ello, se emplearon herramientas informáticas como Microsoft Excel, permitiendo elaborar tablas, gráficos y cálculos de medias, porcentajes y otros valores, facilitando así la interpretación de las variaciones entre los diferentes tipos de

mezclas explosivas evaluadas (Fortis Extra 60/40, Fortis Extra 70/30 y Fortis Extra 100).

- Por último, se priorizó la comparación de los resultados obtenidos en términos de fragmentación (P80, porcentaje de finos), costos operativos (costo por metro lineal, costo por tonelada volada) y parámetros ambientales (concentración de gases nitrosos post voladura). Además, se realizó la evaluación económica, determinando los porcentajes de ahorro mensual y anual.

Presentación de datos:

La presentación de los resultados busco realizarse de manera gráfica y tabular siguiendo el orden del procesamiento, utilizando figuras y tablas conforme a las normas de estilo, cada una fue interpretada adecuadamente. Los datos procesados sirvieron de base para formular las conclusiones y recomendaciones finales del estudio, orientadas a la mejora continua de las operaciones de voladura en MMG Las Bambas, asegurando no solo la optimización de los costos, sino también la mejora de la eficiencia técnica y el control ambiental en las actividades mineras.

CAPÍTULO IV.

COSTOS POR LA VOLADURAS POR PRODUCCIÓN

4.1 Investigación Técnico operativa

Se llevaron a cabo distintos métodos en el tajo de minera las Bambas con el fin de evaluar la excelencia del explosivo Fortis Extra (emulsión gasificable) y de analizar integralmente el procedimiento de detonación en el "Tajo Ferrobamba". Se contrastaron tres indicadores de medición con los datos obtenidos de la referencia inicial:

- Densidad.
- Velocidad de detonación (V.O.D.).
- Fragmentación.

Se evaluó un factor crucial al iniciar la carga de los taladros con explosivos: la densidad. Este aspecto reviste importancia crítica para determinar tanto los costos como la calidad del explosivo. En el transcurso de la detonación, se registró la velocidad de detonación (VOD), considerada como el indicador más preciso para representar la calidad del explosivo en términos de su capacidad para fracturar. Por último, al dispersarse los gases de la explosión, se examinó la fragmentación del material volado.

4.1.1.1 Densidad

Esta característica se estableció mediante la medición de la masa dentro de un volumen conocido. En el caso de un explosivo que no experimenta gasificación, su densidad permanece constante, y es suficiente tomar una muestra durante la descarga en el taladro. Sin embargo, para el ANFO Pesado gasificado (combinación de ANFO y Fortis Extra en forma de "emulsión gasificada"), es esencial medir tanto la densidad inicial como la final (después de 30 minutos de esponjamiento).

En primer lugar, se extrae una muestra directamente desde la manguera de descarga al vaso volumétrico, se procede a limpiar rápidamente cualquier material que quede fuera del recipiente y se registra su peso. Se controla durante treinta minutos, se elimina el material que llena el vaso volumétrico (resultado del proceso de gasificación) y se vuelve a pesar. Se sugiere realizar mediciones de densidad cada 5 minutos para monitorizar de manera precisa el proceso de esponjamiento.

A continuación, se enumeran los instrumentos necesarios para llevar a cabo la medición, los cuales son parte esencial del equipo obligatorio que debe tener cada unidad del camión fabrica "Movil Manufactured Unit": balanza, vaso volumétrico, espátula y trapos.

Figura 17

Toma de muestra explosiva (Densidad = masa/volumen) en vaso volumétrico



Nota: Fotografía propia

El departamento de Asistencia Técnica en la Unidad Operativa "Las Bambas" de "ORICA MINING SERVICES PERÚ S.A." tiene la responsabilidad de validar y supervisar la calidad del explosivo utilizado en el área de extracción conocida como "Tajo Ferrobamba". Con este propósito, se proporciona a todo el personal de ORICA en "Las Bambas" un manual que contiene la curva de densidad de la mezcla explosiva Fortis Extra como referencia.

En "Las Bambas", la concentración de nitrito de sodio es del 10%, el porcentaje de inyección es del 0.30%, y la temperatura de operación oscila entre 20°C y 25°C.

4.1.1.1.1 Fortis Extra 100 Explosivo, voladura tipo E

El sistema Bulk Fortis Extra de mezclas sensibles ha sido específicamente diseñado para aplicaciones de voladura en barrenos húmedos. El rango de productos Fortis Extra comprende a las emulsiones explosivas bulk más energéticas que se encuentran disponibles hoy en día.

Fortis extra ha sido específicamente adaptado para uso en minería a tajo abierto y es adecuado para la mayoría de las situaciones de voladuras más difíciles. Fortis Extra se puede usar cada vez que se encuentren barrenos húmedos. No es adecuado para suelo que contiene sulfuro reactivo. La potencia extra y sensibilidad del sistema Fortis Extra entregara un rendimiento por sobre todos los productos de emulsión bulk.

Tabla 4

Composición de Fortis Extra 100

Producto	Cantidad (%)
Nitrato de Amonio	>60%
Nitrato de Sodio	<25%
Agua	<15%
Combustible diésel	<10%
Componentes no peligrosos	<10%
Aceite mineral	<10%

Nota: extraído de Orica, la cantidad no se precisa por motivo confidencial.

Está diseñado para dar tiempos de retardo más largo y confiabilidad superior en barrenos secos y húmedos. Se puede cargar con distintas energías y densidades para maximizar la fragmentación y el esponjamiento, mejorando la productividad mina a molino.

Es adecuado para barrenos de hasta 50m o 165pies den profundidad, dependiendo del diámetro del barreno, la densidad del producto y de la presencia de agua. Diámetro mínimo de barreno 3pulg.VOD típica es 5.2m/seg, Energía Efectiva Relativa 114RWS.

Tabla 5

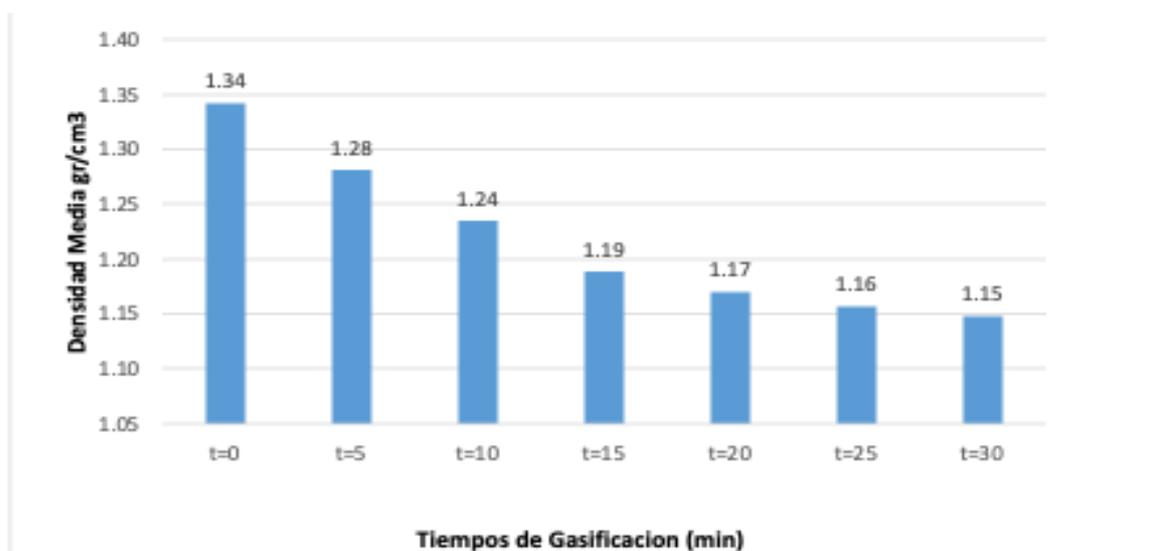
Control de densidades de explosivos gasificados (Fortis extra 100)

Datos del Explosivo Fortis Extra 100					Tiempos de control						
Operador	N° MMU	Banco-proyecto	ID del Taladro	Explosivo	t=0	t=5	t=10	t=15	t=20	t=25	t=30
Octavio Robles	Q-50	3735_201-202-205	3567	FE-100	1.34	1.29	1.25	1.20	1.18	1.16	1.15
Octavio Robles	Q-50	3735_201-202-205	3655	FE-100	1.35	1.29	1.24	1.19	1.17	1.16	1.15
Octavio Robles	Q-50	3735_201-202-205	3827	FE-100	1.34	1.28	1.23	1.19	1.17	1.15	1.16
Percy Zuñiga	Q-39	3735_201-202-205	3522	FE-100	1.33	1.27	1.23	1.18	1.16	1.15	1.14
Percy Zuñiga	Q-39	3735_201-202-205	3647	FE-100	1.35	1.29	1.24	1.19	1.17	1.16	1.15
Percy Zuñiga	Q-39	3735_201-202-205	3781	FE-100	1.34	1.27	1.22	1.18	1.17	1.16	1.14
D/media					1.34	1.28	1.24	1.19	1.17	1.16	1.15

Nota: Elaboración Propia. PERU - MMG Las BAMBAS - TAJO FERROBAMBA

Figura 18

Curva de densidad – Gasificación – “Fortis Extra 100”



Nota: Elaboración Propia

4.1.1.1.2 Fortis Extra 70-30

Fortis Extra bulk 70-30 es un Anfo pesado, explosivo con una mezcla, 70% Fortis Extra 100 más 30% ANFO, de densidad inicial 1.32gr/cm³ contando como VOD 4300 – 5100 m/s aprox. varía con relación al diámetro del taladro y la profundidad, se trata de buscar es mejorar los explosivos y buscar mayor rendimiento y bajar los costos de producción.

En la gráfica previa se representan las densidades registradas al iniciar la carga con los camiones fábrica Q-50 y Q-39. Se observa que las densidades medidas en el terreno son similares a las establecidas en la guía patrón proporcionada por el área de Asistencia Técnica, lo que sugiere una gasificación óptima para lograr una voladura de alta calidad. A mayores densidades, se logra una velocidad de detonación superior y una capacidad de fragmentación mayor. Debido a las variadas densidades presentes, las mezclas elaboradas por los camiones fábrica pueden proporcionar la proporción precisa de explosivo conforme a los requisitos de la formación rocosa. Los diámetros mínimos del barreno 4pulg, una profundidad de barreno no mayor 20m o 65 pies. para barreno húmedos y secos.

Tabla 6

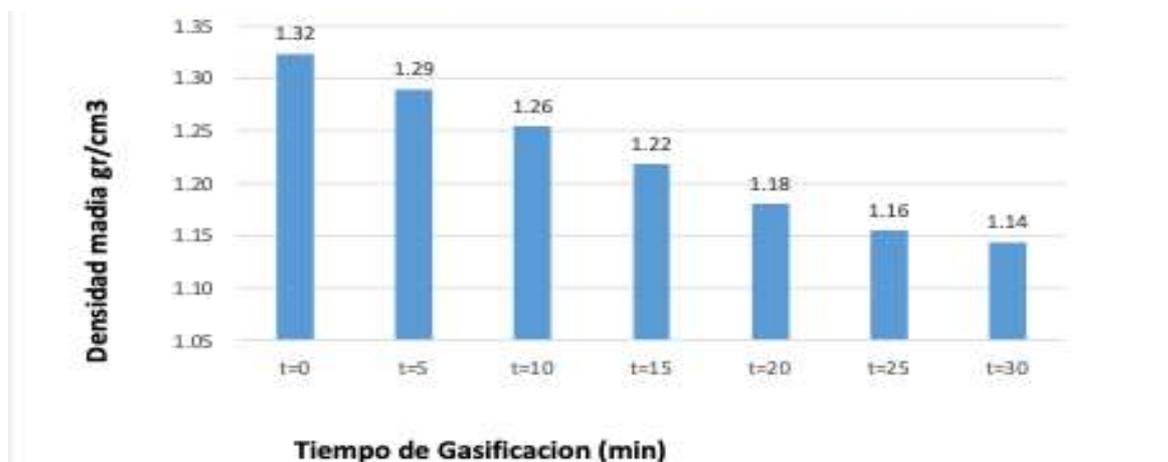
Control de densidades de explosivos gasificados (fortis extra 70/30)

PERU - MMG Las BAMBAS - TAJO FERROBAMBA											
Datos del Explosivo 70-30					Tiempos de control						
Operador	N° MMU	Banco-proyecto	ID del Taladro	Explosivo	t=0	t=5	t=10	t=15	t=20	t=25	t=30
Octavio Robles	Q-50	3720-202	1237	70-30	1.32	1.29	1.25	1.22	1.17	1.15	1.14
Octavio Robles	Q-50	3720-202	1242	70-30	1.33	1.30	1.27	1.23	1.19	1.16	1.14
Octavio Robles	Q-50	3720-202	1226	70-30	1.31	1.29	1.26	1.23	1.20	1.16	1.15
Percy Zuñiga	Q-39	3720-202	1183	70-30	1.33	1.29	1.24	1.20	1.17	1.15	1.14
Percy Zuñiga	Q-39	3720-202	1255	70-30	1.32	1.28	1.24	1.21	1.17	1.16	1.15
Percy Zuñiga	Q-39	3720-202	1168	70-30	1.33	1.29	1.27	1.22	1.18	1.15	1.14
D/media					1.32	1.29	1.26	1.22	1.18	1.16	1.14

Nota Elaboración Propia

Figura 19

Curva de densidad – Gasificación – “Fortis Extra 70/30”



Nota: Elaboración Propia

En la figura previa, se exhiben las densidades registradas al comenzar la carga utilizando el camión fábrica en la locación "cuadra 36". En este lugar, las densidades medidas en el terreno son comparables a las especificadas en la guía patrón suministrada por el área de Asistencia Técnica.

4.1.1.1.3 Fortis Extra 60 – 40

Descripción: El Sistema Bulk Fortis™ Extra de mezclas sensibles ha sido específicamente diseñado para aplicaciones de voladuras en barrenos húmedos. El rango de productos Fortis™ Extra comprende a las emulsiones explosivas bulk más energéticas que se encuentran disponibles hoy en día. La composición exacta de los explosivos está protegida por patentes y es información confidencial por razones de seguridad industrial. Sin embargo se puede proporcionar una descripción general de los componentes típicos que suele estar presentes en este explosivo de emulsión de alta energía. El Fortis extra 60-40 es una mezcla de aceites combustible (diésel o hidrocarburos similares), Nitrito de Amonio (NA) y agua estabilizada mediante una emulsificación. A esto se añade aditivos específicos para su sensibilización.

Tabla 7

Componentes Fortis Extra 60-40

Emulsión matriz	60%
ANFO	40%
Nitrito de Sodio	0.3%

Nota: Elaboración Propia

Figura 20

Componentes Fortis Extra 60-40: Nitrito de Sodio, Emulsión base y ANFO



Nota: Elaboración Propia

Aplicación

Fortis™ Extra ha sido específicamente adaptado para uso en minería a tajo abierto y es adecuado para la mayoría de las situaciones de voladuras más difíciles. Fortis™ Extra se puede usar cada vez que se encuentren barrenos húmedos. No es adecuado para suelo que contiene sulfuro reactivo.

La potencia extra y sensibilidad del sistema Fortis™ Extra 60-40 entregará un rendimiento por sobre todos los otros productos de emulsión bulk. Esta formulado para proporcionar una mayor energía bruta y una mayor velocidad de detonación, lo cual es útil en aplicaciones de minería de alta densidad, estos responden a la necesidad específica de cada tipo de operación.

Figura 21

Densidad promedio en barrenos

Profundidad del Barreno (m)	Densidad Promedio en Barreno (g/cc)			
	1.10	1.15	1.20	1.25
5 (16 pies)				
10 (33 pies)				
15 (50 pies)				
20 (65 pies)				
25 (82 pies)				
30 (100 pies)				
35 (115 pies)				
40 (130 pies)				
45 (150 pies)				
	Para uso en barrenos de 64 mm (2½ pulg.) y superior			
	Para uso en barrenos de 76 mm (3 pulg..) y superior			
	Para uso en barrenos de 160 mm (6¼ pulg.) y superior			
	Consultar con un Representante Técnico de Orica			

Nota: Elaborado por ORICA

Largo de Carga del Barreno

Fortis™ Extra es adecuado para uso en barrenos de hasta 50 metros (165 pies) en profundidad, dependiendo del diámetro del barreno, la densidad del producto y de la presencia de agua. Para mayor información consultar con un Representante Técnico de Orica.

El promedio de densidad de Fortis™ Extra en el barreno puede ser variado para que concuerde con la aplicación de voladura, dentro de los parámetros mostrados más adelante. Seleccionar la profundidad del barreno y densidad de la mezcla, determinar el diámetro mínimo del barreno requerido, a partir de la tabla. Por ejemplo, para obtener una densidad promedio dentro del barreno de 1,15 g/cc en un barreno con una profundidad de 25m (82 pies) se requiere de un diámetro de al menos 76mm (61/4 pul.)

Tabla 8

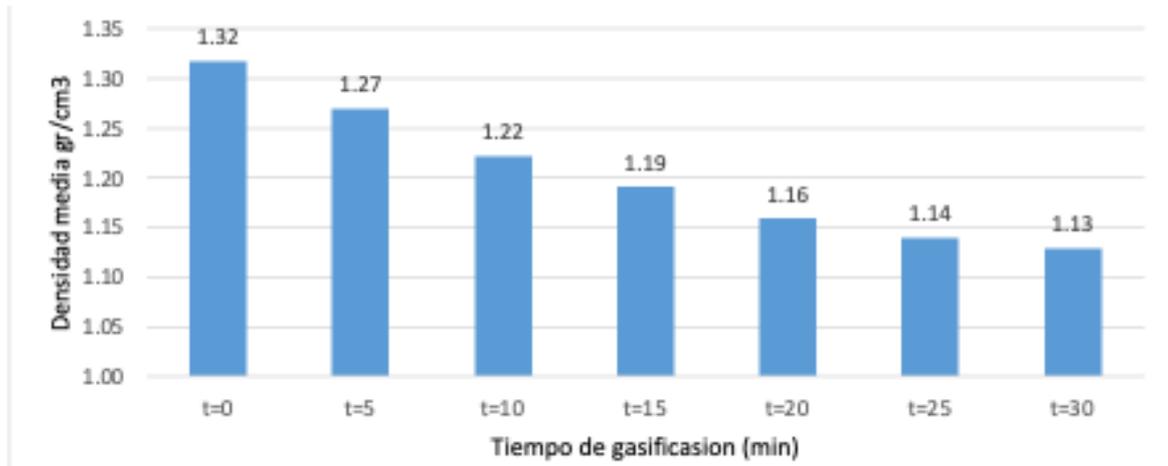
Control de densidades de explosivos gasificados (Fortis extra 60/40)

PERU - MMG Las BAMBAS - TAJO FERROBAMBA												
Datos del Explosivo Fortis Extra 60-40					Tiempos de control							
Operador	N° MMU	Banco-proyecto	ID del Taladro	Explosivo	t=0	t=5	t=10	t=15	t=20	t=25	t=30	
Octavio Robles	Q-50	3720-101	1021	60-40	1.31	1.26	1.21	1.18	1.16	1.13	1.12	
Octavio Robles	Q-50	3720-101	1034	60-40	1.33	1.28	1.23	1.20	1.16	1.14	1.13	
Octavio Robles	Q-50	3720-101	1044	60-40	1.32	1.27	1.22	1.19	1.16	1.14	1.13	
Percy Zuñiga	Q-39	3720-103	1019	60-40	1.32	1.26	1.21	1.18	1.15	1.14	1.13	
Percy Zuñiga	Q-39	3720-104	1623	60-40	1.32	1.28	1.23	1.20	1.16	1.13	1.12	
Percy Zuñiga	Q-39	3720-104	1716	60-40	1.30	1.27	1.23	1.20	1.17	1.16	1.14	
				D/media	1.32	1.27	1.22	1.19	1.16	1.14	1.13	

Nota: Elaboración Propia

Figura 22

Curva de densidad – Gasificación – “Fortis Extra 60/40”



Nota: Elaboración Propia

4.1.1.2 Velocidad de detonación

Para llevar a cabo la evaluación de la velocidad de detonación en el "Tajo Ferrobamba", se empleó el dispositivo "Micro Trap". Este dispositivo posibilita la medición de la velocidad de detonación (VOD) de un taladro en un proyecto de voladura mediante el método de cortocircuito. Este método implica la medición de la disminución de la resistencia del circuito a medida que el frente de detonación consume el cable resistivo. Esto se realiza mediante la instalación de un cable de resistencia continua (cable resistivo) con una resistencia lineal conocida (10.8 ohm/m). Este cable se conecta al booster o iniciador y se extiende a lo largo de la carga explosiva a medida que el frente de detonación de la carga explosiva consume el cable resistivo, la resistencia del cortocircuito disminuirá en proporción a la reducción de la longitud del cable. De esta manera, el dispositivo "Micro Trap" registra la disminución resultante del voltaje en relación con el tiempo. El software transforma los datos registrados en un gráfico que muestra la distancia versus el tiempo. En taladros que contienen agua, a pesar de que se hermetiza el cortocircuito, las mínimas filtraciones de agua pueden afectar la medición y dificultar la obtención de la velocidad de detonación.

Figura 23

Instalación de cable resistido, junto al booster y líneas descendentes



Nota: Elaboración Propia

4.1.1.3 Fragmentación

Para llevar a cabo la medición de este parámetro en la operación minera "MMG Las Bambas" (ORICA MINING SERVICES PERÚ S.A.), se utiliza el sistema de fragmentación portátil conocido como "Porta Metrics". Este sistema innovador, equipado con sensores tridimensionales, permite a un operador acercarse directamente al frente de carguío y evaluar el tamaño de las rocas en el lugar, eliminando la necesidad de regresar a la oficina para obtener información y realizar análisis, lo cual normalmente lleva entre 2 y 4 horas. El proceso con "Porta Metrics" tiene una duración promedio de 5 minutos y, gracias a sus sensores tridimensionales, proporciona información precisa, permitiendo la medición individual de cada roca.

En las imágenes a continuación se presentan los diversos elementos en el "Tajo Ferrobamba" donde se llevó a cabo el análisis y la toma de muestras en cada frente de carguío

mediante el uso del equipo "Porta Metrics". Posteriormente, se procede al procesamiento de las imágenes para lograr una voladura eficiente y segura, con una fragmentación óptima.

4.1.1.3.1 Proceso de optimización de la fragmentación

- Planeamiento de voladura: Para realizar la planificación de la voladura en "Las Bambas", se recopiló la siguiente información:
 - Plano geológico.
 - Plano geomecánico o geotécnico.
 - Propiedades físico-mecánicas del macizo.
 - Cantidad y calidad de la mezcla explosiva.

Figura 24

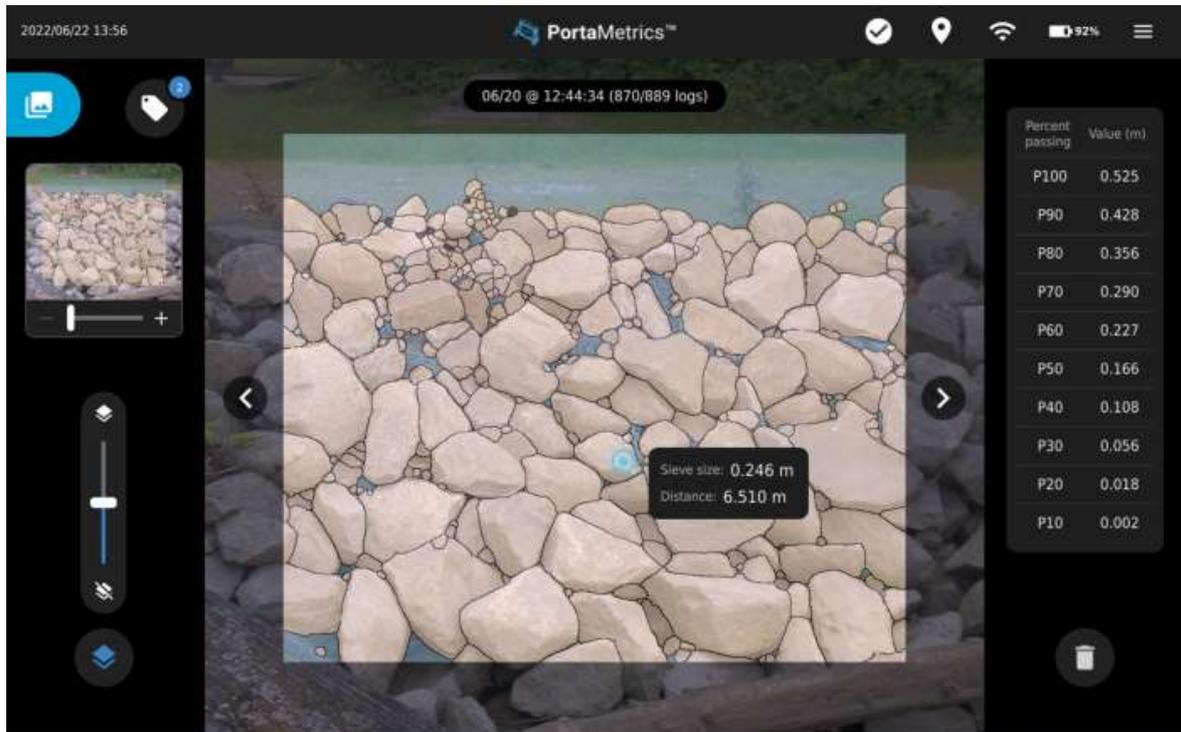
Frente de carguío con el equipo "Porta Metrics" (tajo Ferrobamba)



Nota: Elaboración Propia

Figura 25

Frente de carguío con el equipo “Porta Metrics” (tajo Ferrobamba)



Nota: Elaboración Propia

4.1.1.4 Análisis del macizo rocoso

Se examinaron todas las variables del macizo rocoso, como las propiedades físico-mecánicas, RQD, RMR, contactos, fallas, relleno de los contactos, condiciones de agua subterránea, entre otras. Es fundamental destacar que la perforación y voladura en los distintos elementos del Tajo Ferrobamba se basan en la calidad del macizo rocoso. En otras palabras, más que los parámetros del explosivo son las características geo estructurales del macizo rocoso las que desempeñan el papel más crucial, incluyendo:

- Resistencias a la compresión y tracción simple de la roca.
- Espaciamiento y orientación de las discontinuidades.
- Propiedades elásticas de las rocas.
- Velocidad de propagación de las ondas.
- Densidad del macizo rocoso.

Tabla 9*Propiedades Geomecánicas del macizo rocoso de las Bambas*

Litología	código	UCS (Mpa)			RQD %			Resistencia a la tracción Mpa	Módulo de Young (GPa)		
		Min	Mean	Max	Min	Mean	Max		min	mean	máx.
40 Exoskarn	SK	87.76	131.9	175.96	68.45	82.18	95.91	4	31.55	102.34	173.14
47 Marmol	MBL	124.86	152.85	180.84	71.16	78.59	86.02	4	51.19	73.09	94.99
48 Marmol	MBC	73.74	142.75	211.76	75.58	84.11	92.64	4	82.79		
50 Endoskarn	ENDO	111.91	167.74	223.57	68.23	82.11	95.99	4			
62 Brecha de Contacto	BX	42.59	75.72	109.25	26.51	45.37	64.23	4			
76 Monzonita Biotica	MZB	166.26	197.62	228.98	51.64	67.32	83	6	78.14		
77 Monzonita Hornblendica	MZH	134.2	187.8	241.4	64.86	77.1	89.34	6	85.3		
78 Monzonita Mafica	MZM	121.3	172.42	223.54	69.54	78.73	87.92	6	78.14		
79 Monzonita Quarcifera	MZQ	188.78	215.52	242.26	66	74.72	81.24	5	76.41	85.49	94.56
86 Monzonita Biotica Fina	MBF	177.72	208.89	240.16	59.61	70.94	82.27	6			

Nota: Elaboración Propia

4.1.1.5 Selección del tipo de mezcla explosiva Fortis Extra 60-40

Se eligió la composición explosiva de acuerdo al tipo de roca, considerando la presencia o ausencia de agua en los taladros perforados. En situaciones donde hay presencia de agua, no sería viable utilizar agentes de voladura secos como el ANFO debido a su baja densidad. La práctica ideal sería que, en función del tipo de roca, el camión fábrica formule la mezcla explosiva específica para ese macizo rocoso. Este enfoque se repetiría de manera continua a medida que avanza la operación.

Tabla 10*Densidad de diferentes mezclas explosivas*

Producto	Mínimo (gr/cc)	Máximo (gr/cc)	Promedio (gr/cc)	Variación %
ANFO	0.78	0.82	0.8	2%
H/A2628	0.85	0.91	0.88	3%
H/A 30/70	1.05	1.09	1.07	2%
H/A 40/60	1.17	1.21	1.19	2%
H/A 50/50	1.26	1.3	1.28	2%
H/A 60/40	1.29	1.31	1.3	1%
H/A 70/30	1.31	1.33	1.32	1%
Fortis Extra 100	1.33	1.35	1.34	1%

Nota: Elaboración Propia

4.1.1.5.1 Selección de explosivos y accesorios para iniciar la voladura

Se escogieron los dispositivos necesarios para iniciar y/o retardar la mezcla explosiva mediante métodos adecuados y aprobados. Para la extracción de mineral en el "Tajo Ferrobamba", se emplearon los siguientes productos de ORICA, entre ellos:

Pentex: Conocido también como "BOOSTER", se produce a partir de Pentolita, una mezcla de PETN y TNT. Este explosivo exhibe alta potencia, presión de detonación y velocidad de detonación. Destaca por su elevada resistencia al agua, mayor resistencia al impacto y fricción. Se caracteriza como un explosivo altamente estable, ideal para lograr una iniciación precisa de columnas explosivas. Los orificios del producto facilitan su iniciación mediante el uso de detonadores electrónicos, detonadores no eléctricos o cordones detonantes. Para un primado óptimo, se recomienda utilizar un detonador de fuerza N° 8 como mínimo o cordón detonante de 5 g/m.

Figura 26*Pentex*



Nota: extraído de ORICA (2023)

Figura 27

Especificaciones técnicas PENTEX

Pentex	
Densidad (gr/cm ³)	1.6+/-3%
Velocidad de detonación m/s	7000 +/- 3%
Presión de detonación	19600
Resistencia al agua	Optima
Energía (kcal/kg)	1350
Volumen de gases (L/Kg)	692
Potencia relativa en peso ANFO=100	148
Medido en tubo 1" x 16"	

Nota: Elaboración Propia

Exel™ MS: Los detonadores no eléctricos Exel™ MS constan de cuatro componentes principales:

- Cápsula de Aluminio: Compuesta por una carga primaria, una carga secundaria y un tren de retardo (Fuerza 12).

- Tubo de Choque: Transmite internamente una señal de baja energía a una velocidad de 2 000 m/s para iniciar la carga explosiva en el interior de la cápsula.
- Etiqueta: Muestra el número de serie MS, el tiempo nominal y la longitud del tubo de choque.
- Conector J: Dispositivo que conecta el tubo de choque a la línea principal del cordón detonante.
- Detonador Electrónico i-kon™ II: Son los detonadores más avanzados disponibles en el mercado y son especialmente adecuados para voladuras complejas en operaciones extensas, ya sea en superficie o subterráneas, y en condiciones extremadamente desafiantes. Sus características incluyen:
 - Programabilidad de 0 a 30 000 ms con incrementos de 1 ms.
 - Cada detonador i-kon™ II cuenta con un número de identificación único (ID) que está grabado electrónicamente en su chip.
 - El número de identificación (ID) se encuentra impreso en la etiqueta asegurada al legwire cerca del conector.

Figura 28

Exel Ms



Nota: extraído de ORICA (2023)

Detonador electrónico I-kon: Son los más avanzados disponibles en el mercado y son especialmente adecuados para realizar voladuras complicadas en operaciones extensas, ya sea en la superficie o bajo tierra, incluso en las condiciones más desafiantes.

- Pueden ser programados en un rango de 0 a 30,000 milisegundos con incrementos de 1 milisegundo.
- Cada detonador i-kon™ II posee un número de identificación único (ID) que está registrado electrónicamente en su chip.
- El número de identificación está impreso en la etiqueta que se encuentra asegurada al legwire cerca del conector.

Figura 29

Detonador I.Kon



Nota: extraído de ORICA (2023)

Con este avanzado y preciso sistema de encendido electrónico, se logró regular la energía liberada durante el disparo, mejorando la eficiencia de la fragmentación y reduciendo el daño a las paredes del pozo mediante un control de vibraciones, todo gestionado por un Blaster. Este dispositivo realiza una verificación completa y automática de la funcionalidad

del sistema y la programación del detonador. Tiene la capacidad de manejar 1,600 detonadores (controlando 8 Logger con 200 cada uno). Es único gracias a su llave de activación digital y códigos específicos de armado y disparo.

4.1.1.6 Diseño de voladura electrónica

Con base en todos los estudios llevados a cabo y un seguimiento constante, se ha llegado al diseño de voladura electrónica para los sectores mineralizados del "Tajo Ferrobamba". Como se indicó previamente, en el proceso de extracción mineral en el "Tajo Ferrobamba", se han experimentado diversas configuraciones de diseños de cargas explosivas en los taladros de amortiguación y producción. Estas pruebas han arrojado resultados variados, incluyendo éxitos, resultados intermedios y fallos, los cuales están principalmente vinculados a los Sectores Estructurales y las configuraciones de los factores de carga. A continuación, se presentan datos del disparo realizado en el "Tajo Ferrobamba".

Figura 30

Tajo Ferrobamba disparo I, Fortis Extra 100

Datos de Disparo	
Disparo	FASE 2A 3735_201_202_203
Diámetro (Pulg.)	12 1/4"
Malla	Producción
Burden(m)	6/7.4
Espaciamiento(m)	7/8.5
Cantidad de taladros cargados	141
Taladros con 01 i-kon III	141
Taladros con 02 i-kon III	00
Taladros secundarios	00
i-kon III para precorte	00
i-kon III para tal. criticos	13
caída de i-kon III	00
i-kon III Programados	154
Detonador No Reply	00
Cantidad de Back Up	00
Consumo de i-kon III	154
Tiempo de retardo (ms)	19 ms Entre taladros

Fuente: Asistencia técnica

Figura 31*Tajo Ferrobamba Disparo II, Fortis Extra 70-30*

Datos de Disparo	
Disparo	FASE 2B 3720_202
Diámetro (Pulg.)	12 ¼"
Malla	PRODUCCIÓN
Burden(m)	6
Espaciamiento(m)	7
Cantidad de taladros cargados	127
Taladros con 01 i-kon III	127
Taladros con 02 i-kon III	00
Taladros secundarios	00
i-kon III para precorte	00
i-kon III para tal. criticos	06
caída de i-kon III	00
i-kon III Programados	133
Detonador No Reply	00
Cantidad de Back Up	00
Consumo de i-kon III	133
Tiempo de retardo (ms)	19 ms. Entre taladros

Fuente: Asistencia técnica

Figura 32*Tajo Ferrobamba Disparo III, Fortis Extra 60-40*

Datos de Disparo	
Disparo	FASE 2A 3720_101-103-104-105
Diámetro (Pulg.)	12 ¼"
Malla	PRODUCCIÓN
Burden(m)	6 /7.4
Espaciamiento(m)	7 /8.5
Cantidad de taladros cargados	441
Taladros con 01 i-kon III	441
Taladros con 02 i-kon III	00
Taladros secundarios	00
i-kon III para precorte	00
i-kon III para tal. criticos	12
caída de i-kon III	00
i-kon III Programados	453
Detonador No Reply	00
Cantidad de Back Up	00
Consumo de i-kon III	453
Tiempo de retardo (ms)	23 ms/30 ms Entre taladros

Fuente: Asistencia técnica

4.1.1.7 Resumen de la voladura electrónica

Antecedentes

Disparo I Fortis Extra 100

Fortis Extra 100 = 100% Emulsión gasificada

- La cantidad total de taladros cargados en la región de mineral y desmonte fue de 154, equipados con detonadores electrónicos "I-kon III" y detonadores pirotécnicos "Exel™ MS".
- La secuencia de salida, denominada "Diagonales largas", fue coordinada con el personal de "M.M.G. - Las Bambas", con un intervalo de tiempo de retardo 19 m/s Entre taladros
- Se pudo observar un esponjamiento satisfactorio en la zona del taco, y no se registraron casos de "Back Up".

Disparo II Fortis Extra 70-30

Fortis Extra 70/30=70% de emulsion+30% de Anfo

- La cantidad total de taladros cargados en la región de mineral y desmonte fue de 133, equipados con detonadores electrónicos "I-kon III" y detonadores pirotécnicos "Exel™ MS".
- La secuencia de salida, denominada "Diagonales largas", fue coordinada con el personal de "M.M.G. - Las Bambas", con un intervalo de tiempo de retardo 19 m/s Entre taladros.
- Se pudo observar un esponjamiento satisfactorio en la zona del taco, y no se registraron casos de "Back Up".

Disparo III, Fortis Extra 60-40

Fortis Extra 60/40 = 60%de emulsión + 30% de Anfo

- La cantidad total de taladros cargados en la región de mineral y desmonte fue de 453, equipados con detonadores electrónicos "I-kon III" y detonadores pirotécnicos "Exel™ MS".
- La secuencia de salida, denominada "Diagonales largas", fue coordinada con el personal de "M.M.G. - Las Bambas", con un intervalo de tiempo de retardo 23 y 30 m/s Entre taladros
- Se pudo observar un esponjamiento satisfactorio en la zona del taco, y no se registraron casos de "Back Up".

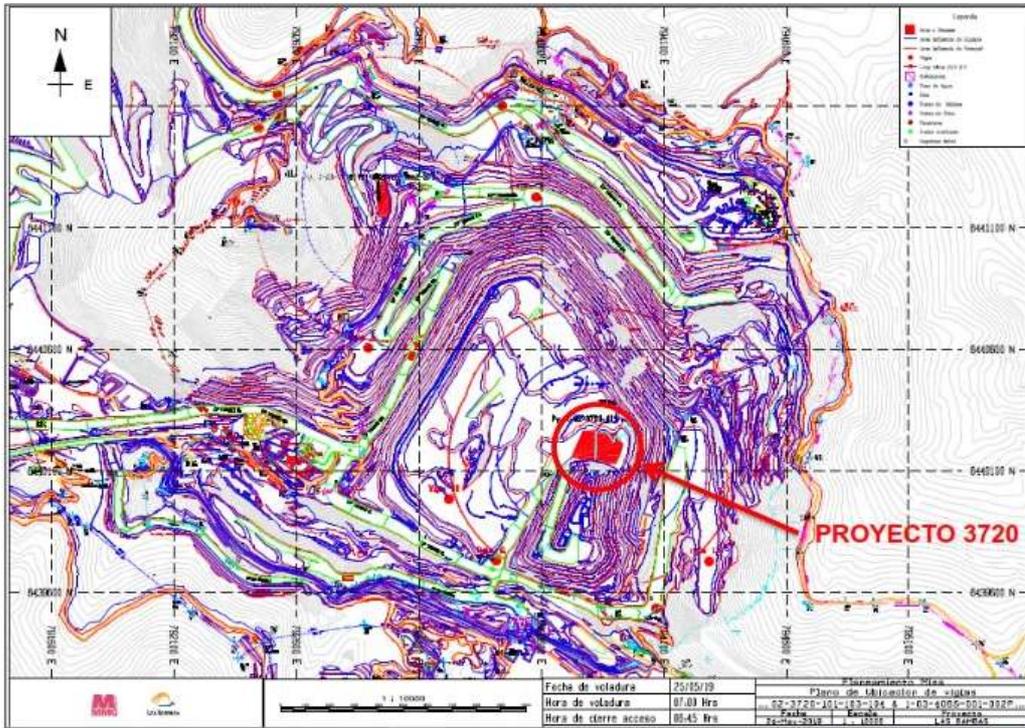
Control de Calidad

Durante el inicio del proceso de carga del proyecto, se lleva a cabo la verificación de densidades:

- El producto Fortis Extra 100 en los proyectos 3735_201-202-205 con camiones fabrica Q-50 y Q-39. Se opera con una densidad promedio inicial de 1.34 y una densidad de copa de 1.15 gr/cm³.
- El producto Fortis Extra 70-30 en los proyectos 3720-202 con camiones fabrica Q-50 y Q-39 se registra con una densidad promedio inicial de 1.32 y una densidad de copa 1.14.
- El producto Fortis Extra 60-40 en los proyectos 3720_101-103-104 con camiones fabrica Q-50 y Q-39 se registra con una densidad promedio inicial de 1.32 y una densidad de copa 1.13.

Figura 35

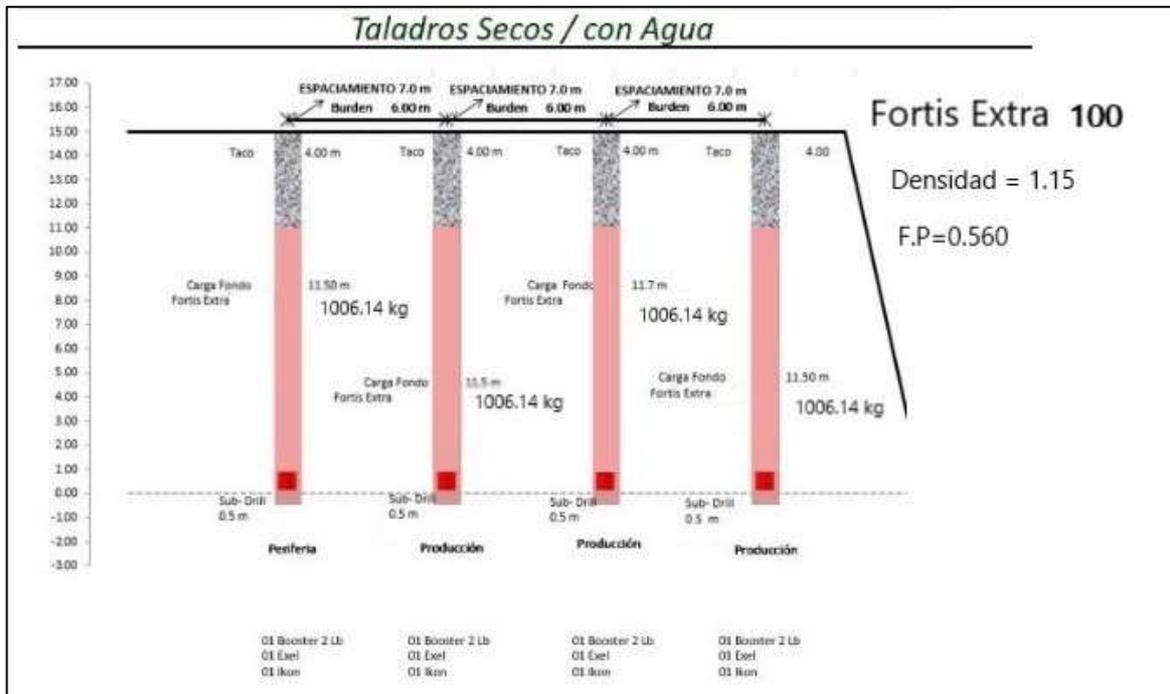
Fortis Extra 60-40. Plano proyecto 3720_101-103-104



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 36

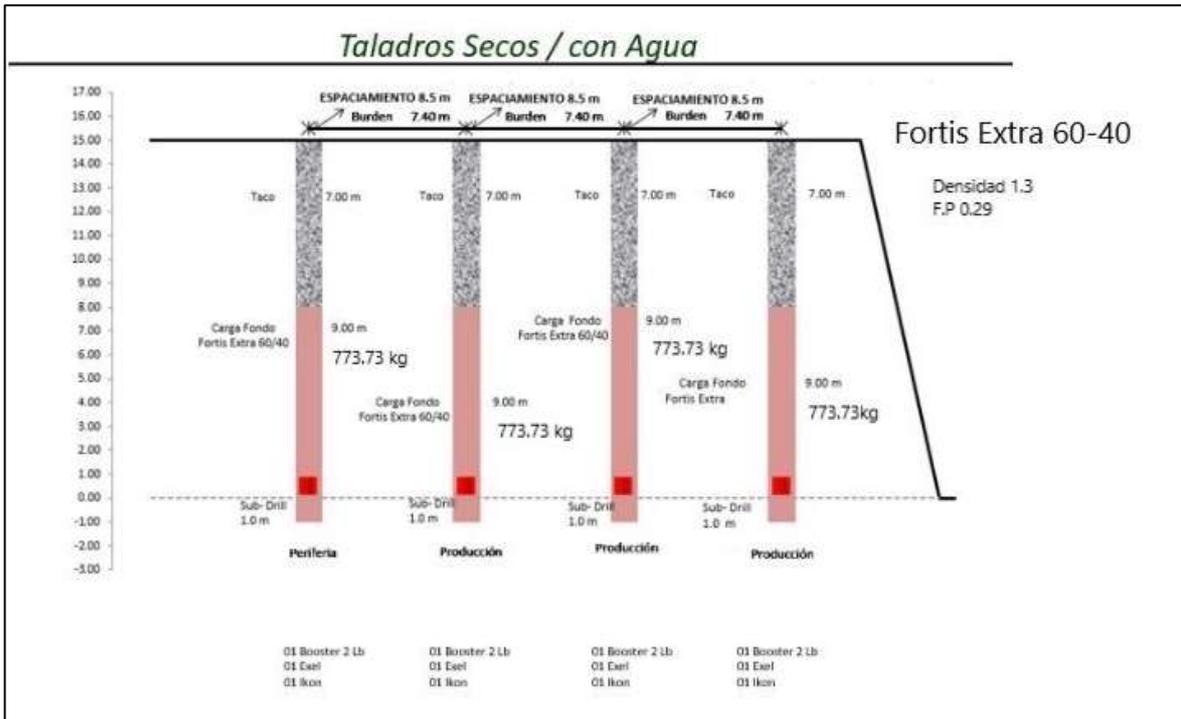
Diseño de carga para taladros en la zona de Jahuaypaylla Alta 3735_201-202-205



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 37

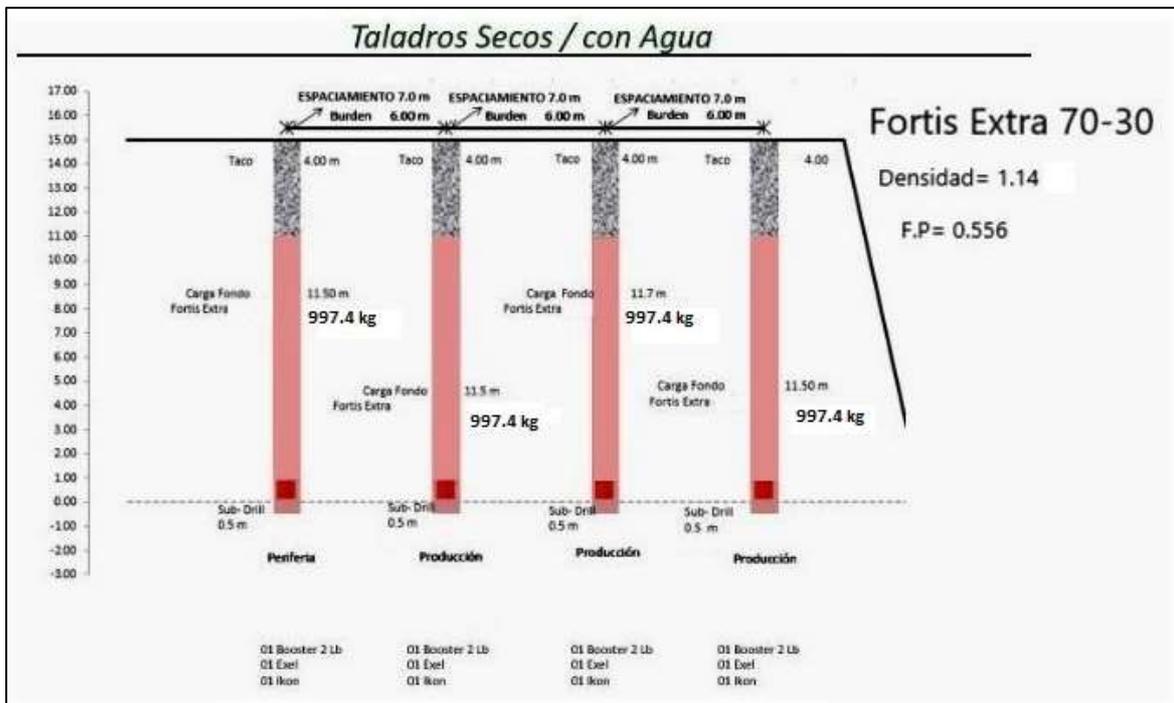
Diseño de carga Jahuapaylla Alta proyecto Fase



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 38

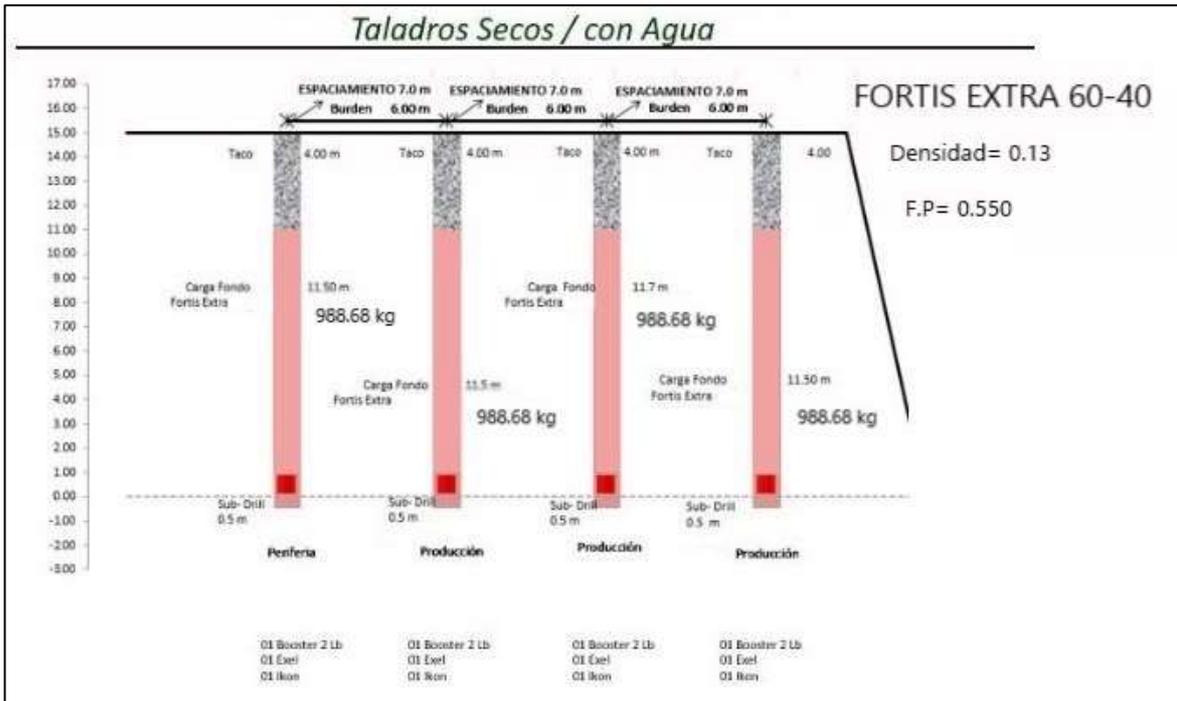
Diseño de carga Jahuapaylla Alta 3720-202



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 39

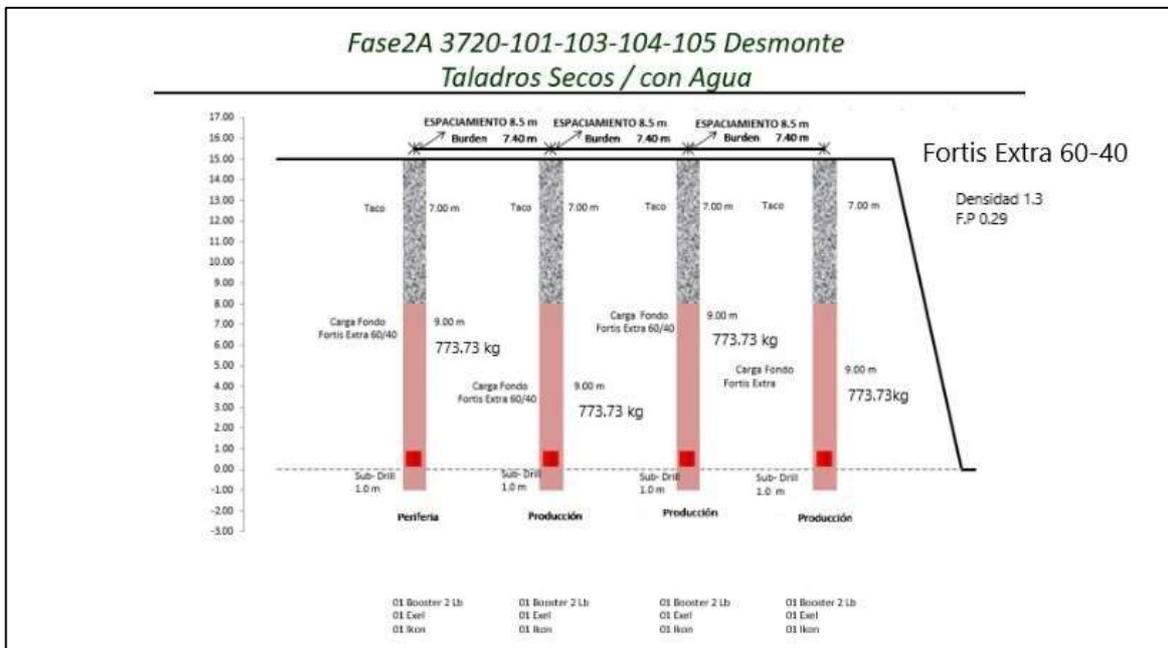
Diseño de carga Jahuapaylla Alta 3720_101-103-104-105



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 40

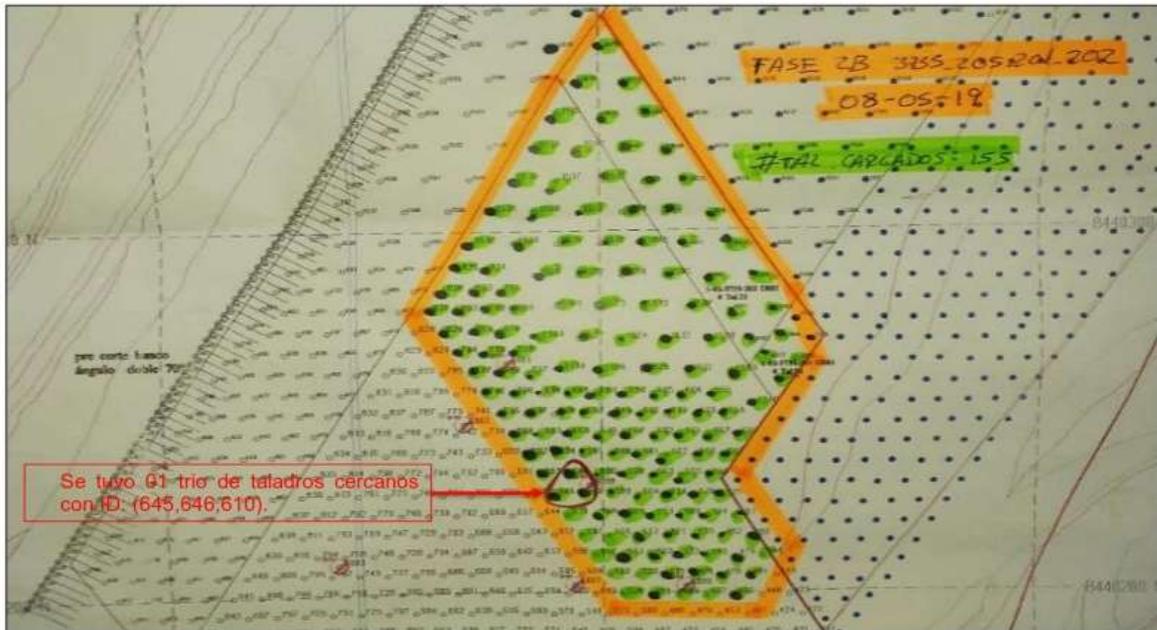
Diseño de carga Jahuapaylla Alta 3720_101-103-104-105, Desmante



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 41

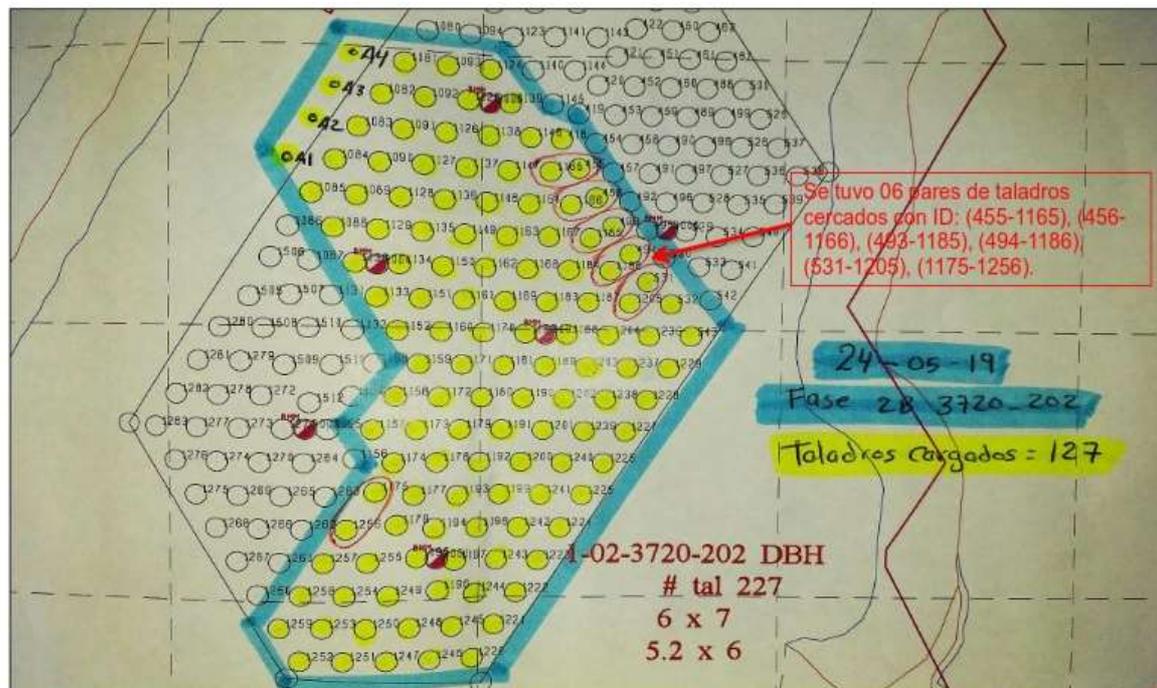
Levantamiento de taladros en la zona de Jahuaypaylla Alta 3735_201-202-205



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 42

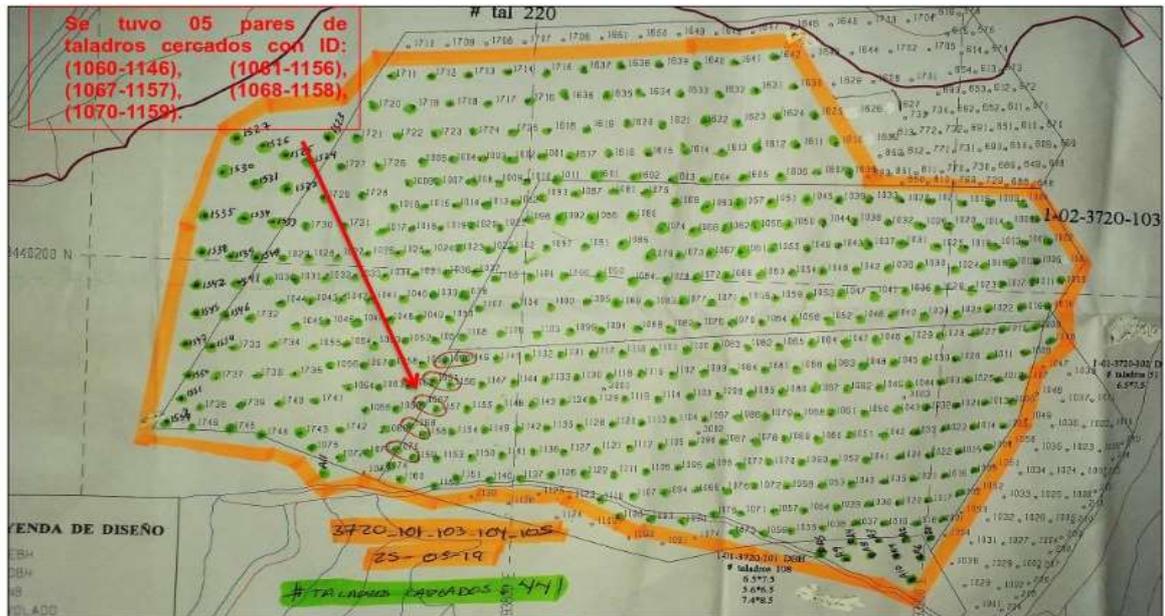
Levantamiento de taladros en la zona Jahuaypaylla Alta 3720_202



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Figura 43

Levantamiento de taladros en la zona Jahuaypaylla 4050-026



Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

4.1.1.8 Análisis económico

A continuación, expondremos el desglose de los costos asociados a las detonaciones de producción en el "Tajo Ferrobamba", conforme a los diseños proporcionados por el departamento de Planeamiento Mina de (M.M.G.) - "Las Bambas". Se incluyen tablas que detallan los carguíos y los costos de las voladuras en la región de "Jahuapaylla Alta" proyectos 3735_201-202-205, 3720_202, 3720_101-103-104-105.

Tabla 11

Diagrama de costo "explosivo" por taladro del proyecto

Datos del taladro	Mineral	Desmante
Diámetro	12 1/4 "	12 1/4 "
Altura	15 m	15m
Burden	5m	7.4m
Espaciamiento	6.5m	8.5m
Densidad de Roca	5 g/cm3	2.50 g/cm3
Altura de Carga	10 - 11 m	9 m
Taco	5 - 4 m	6.5 m

Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Tabla 12

Costos unitarios de explosivos

Descripción	Und/medida	Costo \$\$	Densidad gr/cc
NITRATO	Kg	0.42	1.3
D-2	Gl	4.1	0.84
ANFO	Kg	0.47	0.8
FORTIS 100	Kg	0.77	1.34

Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Tabla 13

Costos unitarios de accesorios

Descripción	Und/medida	Costo U\$\$
BOOSTER 2 Lb	2 Lb	10.98
Excel	Und	6.28
Detonador i-Kon III	Und	50
	Costo Total/tal	67.26

Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

4.2 Fórmulas para determinar la cantidad de explosivo

4.2.1 Volumen de mineral (m³)

$$\text{Vol min (m}^3\text{)} = B(m) * S(m) * HB(m)$$

$$= 6 * 7 * 15$$

$$= 630 \text{ m}^3\text{/tal}$$

4.2.2 Peso del mineral (Tn)

$$\text{Peso mineral (Tn)} = B * S * HB * \delta \text{ mine}$$

$$= 6\text{m} * 7\text{m} * 15 \text{ m} * 2.85 \text{ gr/cm}^3$$

$$= 1795.5 \text{ Tn}$$

4.2.3 Explosivo kg/tal

$$\text{Explosivo kg/m} = 0.507 * \delta \text{ explo} * \phi^2$$

Fortis Extra 100:

$$= 0.507 * 1.15 \text{ g/cc} * (12.25'')^2$$

$$= 87.49 \text{ Kg/m}$$

$$\text{Explosivo Kg/tal} = 87.49 \text{ kg} * 11.5\text{m}$$

$$= 1006.14 \text{ kg/tal}$$

Fortis Extra 70 – 30:

$$= 0.507 * 1.14 * (12.25'')^2$$

$$= 86.73 \text{ kg/m}$$

$$\text{Explosivo kg/tal} = 86.73 \text{ kg} * 11.5\text{m}$$

$$= 997.43 \text{ kg/tal}$$

Fortis Extra 60-40:

$$= 0.507 * 1.13 * (12.25'')^2$$

$$= 85.97 \text{ kg/m}$$

$$\text{Explosivo kg/tal} = 85.97 \text{ kg} * 11.5\text{m}$$

$$= 988.68 \text{ kg/tal}$$

4.2.4 Factor de potencia (kg/tn)

$$\text{Factor de Potencia(Kg/Tn)} = \frac{\text{Kg.de Explosivo}}{\text{Peso minera (Tn)}}$$

Fortis Extra 100:

$$= 1006.14 \text{ kg} / 1795.5 \text{ Tn}$$

$$= 0.560 \text{ kg/Tn}$$

Fortis Extra 70-30

$$= 997.68 \text{ kg} / 1795.5 \text{ Tn}$$

$$= 0.556 \text{ kg/Tn}$$

Fortis Extra 60-40

$$= 998.68 \text{ kg} / 1795.5 \text{ Tn}$$

$$= 0.550 \text{ Kg/Tn}$$

4.2.5 Factor de carga (kg/m³)

$$\text{Factor de carga (Kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Kg.de Explosivos}}{\text{Vol min (M}^3\text{)}}$$

Fortis Extra 100:

$$= 1006.14 \text{ kg} / 630 \text{ m}^3$$

$$= 1.60 \text{ kg/m}^3$$

Fortis Extra 70-30:

$$= 997.43 \text{ kg} / 630 \text{ m}^3$$

$$= 1.58 \text{ kg/m}^3$$

Fortis Extra 60-40:

$$= 988.68 \text{ kg} / 630\text{m}^3$$

$$= 1.57 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 14

Costo total de accesorios y explosivos por taladro

Parámetros de evaluación	Cargas explosivas
--------------------------	-------------------

		F.Ex. 100	F.Ex. 70-30	F.Ex. 60-40
Diseño de carga Explosiva	Densidad de carga inicial (gr/cc)	1.34	1.32	1.32
	Densidad de carga final (gr/cc)	1.15	1.14	1.13
	Altura de carga (m)	11.5	11.5	11.5
	Factor de potencia (kg/tn)	0.560	0.556	0.550
	Factor de carga (kg/m ³)	1.60	1.58	1.57
Malla	Diámetro de taladro (pulgadas)	12.25	12.25	12.25
	Burden (m)	6	6	6
	Espaciamiento (m)	7	7	7
	Altura de banco (m)	15	15	15
Costos	Costo/kg (\$/kg)	0.77	0.68	0.65
	Costo/metro lineal (\$/m)	67.37	58.98	55.89
	Costo/tal (\$/tal)	774.73	678.25	642.64
	Costo/Tn (\$/Tn)	0.43	0.38	0.36

Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

En el cuadro se muestra una diferencia de 0.07 \$\$/Tn del Fortis Extra 100 al Fortis Extra 60-40, la otra diferencia de 0.02 \$\$/Tn del Fortis Extra 70-30 a nuestro producto Fortis Extra 60-40 el cual es un indicador para seguir con nuestro trabajo ya que se mostrará la gran diferencia con miles de toneladas rotas de mineral demostrando en los siguientes pasos.

Tabla 15

Costo de accesorios por taladro

Proyecto	BOOSTER (ud)	Detonador EXEL (ud)	Detonador IKON-III (ud)	Costo / Tal (U\$\$)	Costo Total U\$\$
-----------------	-------------------------	--------------------------------	------------------------------------	--------------------------------	------------------------------

3735_201-202-205 (F.E-100)	157	157	157	67.26	10559.82
3720_202 (F.E-70-30)	133	133	133	67.26	8945.58
3720_101-103-104-105 (F.E-60-40)	453	453	453	67.26	30468.78

Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Tabla 16

Costos por taladros de los proyectos de voladura

Accesorios y Explosivos	Costo (\$/Tal)	Accesorios y Explosivos	Costo (\$/Tal)	Accesorios y Explosivos	Costo (\$/Tal)
F.EX_100	774.73	F.EX_70-30	678.25	F.EX_60-40	642.64
Booster (2lb)/ud	10.98	Booster (2lb)/ud	10.98	Booster (2lb)/ud	10.98
Detonador Exel (ud)	6.28	Detonador Exel (ud)	6.28	Detonador Exel (ud)	6.28
Detonador Electrónico (ud)	50.00	Detonador Electrónico (ud)	50.00	Detonador Electrónico (ud)	50.00
COSTO TOTAL	841.99		745.51		709.90
Diferencia (\$)		U\$\$ 96.48		U\$\$ 35.61	

Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

Tabla 17

Total por proyecto de voladura

COSTO TOTAL POR PROYECTO											
Proyecto	Tipo de taladro	Numero de taladros	Explosivo por Taladro (Kg)	Total de Explosivo (Kg.)	Costo de explosivo por Taladro (U\$\$)	Costo total (U\$\$)	Costo por Tonelada (U\$\$/Tn)	Toneladas Rotas	Costo de Accesorios (U\$\$)	Gastos general en voladura	Costo por proyecto (U\$\$)
3735_201-202-205 (F.E-100)	Mineral	100	1006.14	1006.14	774.73	77473.00	0.43	179550	6726.00	84199.00	116029.72
	Desmonte	55	773.73	42555.15	502.92	27660.60	0.24	129731.25	3699.30	31359.90	
	Tal. criticos	7							470.82	470.82	
3720_202 (F.E-70-30)	Mineral	127	997.43	126673.61	678.25	86137.75	0.38	228028.5	8542.02	94679.77	95083.33
	Tal. Criticos	6							403.56	403.56	
3720_101-103-104-105 (F.E-60-40)	Mineral	363	988.68	358890.84	642.64	233278.32	0.36	651766.5	24415.38	257693.70	302922.60
	Desmonte	78	773.73	60350.94	502.25	39175.50	0.24	183982.5	5246.28	44421.78	
	Tal. Criticos	12							807.12	807.12	

Nota: Elaborado por la asistencia técnica de ORICA.

4.2.6 Análisis ambiental

4.2.6.1 Marco legal

La Ley General del Ambiente (Ley N° 28611) constituye la normativa fundamental que rige el marco legal para la gestión ambiental en el Perú. Esta legislación establece los principios y normas esenciales para garantizar el ejercicio efectivo del derecho a un entorno saludable, equilibrado y propicio para el pleno desarrollo de la vida. Asimismo, impone la obligación de contribuir a una gestión ambiental efectiva y proteger el medio ambiente, con el propósito de mejorar la calidad de vida de la población y alcanzar el desarrollo sostenible del país.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley N° 28611 y en el reglamento para la Protección Ambiental de las actividades Minero Metalúrgicas, aprobado mediante el Decreto Supremo (D.S.) N° 016-93EM, los proyectos de inversión, tanto públicos como privados, que tengan la intención de llevarse a cabo en el territorio nacional y que puedan ocasionar impactos ambientales significativos de índole negativa, incluyendo los proyectos mineros nuevos, requieren la realización y aprobación previa de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) por parte de la autoridad competente. En el caso de los proyectos de inversión en minería, la entidad competente para aprobar los EIA es el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), a través de la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM).

4.2.6.1.1 Normatividad general

- Constitución Política del Perú de 1993.
- Marco normativo para el fomento de la Inversión Privada, Decreto Legislativo N° 757.
- Normativa sobre Comunidades Campesinas, Ley N° 24656.

- Ley de la Inversión Privada en el Desarrollo de las Actividades Económicas en las Tierras del Territorio Nacional y de las Comunidades Campesinas y Nativas, Ley N° 26505.
- Ley General de Salud, Ley N° 26842.
- Código Penal, Sección de Delitos contra la ecología, Título XIII, Decreto Legislativo N° 635.

4.2.6.1.2 Normatividad ambiental

- Normativa Ambiental General, Ley N° 28611.
- Marco Legal para la Gestión de Recursos Hídricos, Ley N° 29338.
- Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua, según el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM.
- Normativas sobre ECA para el aire, establecidas en el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM y el Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM.
- Reglamento de Estándares de Calidad Ambiental para el ruido, contemplado en el Decreto Supremo N° 085-2003-PCM.
- Legislación sobre Gestión de Residuos Sólidos, Ley N° 27314, y su correspondiente Reglamento, Decreto Supremo N° 057-2004-PCM.
- Ley Forestal y de Fauna Silvestre, Ley N° 27308.

4.2.7 Medición de los gases post voladura

Para llevar a cabo la evaluación de los gases nocivos generados tras la explosión en el "Tajo Ferrobamba", se empleó el detector de gases MSA ALTAIR 5X. Este dispositivo posibilita la medición de la concentración de gases tóxicos liberados tras la detonación de rocas en un área específica, operando mediante sensores.

Figura 44

MSA ALTAIR 5x



Nota: extraído de Ubuy Perú (2023)

4.3 Material de la investigación

4.3.1 Entradas

- Ensayos de campo.
- Pruebas de Voladura.
- Uso de la Emulsión matriz.
- Uso de la Emulsión gasificada.
- Densidad.
- Fragmentación de la roca.
- Velocidad de detonación (VOD).

4.3.2 Salidas

- Impacto - Rendimiento técnico operativo.
- Impacto - Rendimiento económico.
- Impacto - Rendimiento Medioambiental.

4.3.3 Instrumentos de la investigación

4.3.3.1 Recolección de información

Durante esta fase, se recopiló información técnica, económica y ambiental sobre la detonación con emulsión base, con el objetivo de contrastar los resultados con la detonación empleando emulsión gasificada.

4.3.3.2 Fuentes de recolección e información

4.3.3.2.1 Fuentes primarias

La información se adquiere de manera directa, desde su fuente original.

4.3.3.2.2 Fuentes secundarias

Los libros, las revistas, los informes, los documentos y todas las formas de medios informativos

4.3.3.3 Técnicas de recolección de información

En esta instancia, se utilizó la metodología de la observación sistemática y su consecuente, el análisis de contenido, junto con archivos (informes).

4.3.3.4 Proceso de recolección de datos

La obtención de datos esencial para validar la hipótesis y los objetivos seguirá estos pasos: recopilación de información conforme a objetivos e hipótesis, elección de la población y muestra, establecimiento de las técnicas de recolección de datos y, por último, el procesamiento de la información.

4.3.3.5 Procesamiento de la información

Las fases para llevar a cabo el procesamiento de la investigación actual siguen estas pautas:

- Se adquirió una base de datos que contiene la información relativa a la población y muestra objeto de estudio.
- Se determinaron las variables para organizar la información recopilada en el terreno.
- Se establecieron las herramientas estadísticas necesarias.
- Los datos fueron introducidos para su procesamiento.

4.3.4 Diseño de materiales

Los recursos empleados en la presente investigación fueron los siguientes:

- Cámaras fotográficas.
- Emulsión base.
- Emulsión gasificada.
- ANFO.
- Computadora portátil.
- Portametrics.
- Shot plus 5 (software).
- ALTAIR 5X (Monitor de gases).
- Balanza.
- Vaso volumétrico.
- Espátula.
- Trapos.

CAPÍTULO V. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Evaluación técnico operativa

De acuerdo con la referencia establecida en el campo de Voladura en el año 2015, se presentan los datos de densidad para las muestras de explosivos "Fortis Advantage 100". Estos valores son consistentes ya que estas emulsiones no experimentan procesos de gasificación.

Figura 45

Densidades del "Fortis Advantage 100" (Emulsión Matriz)



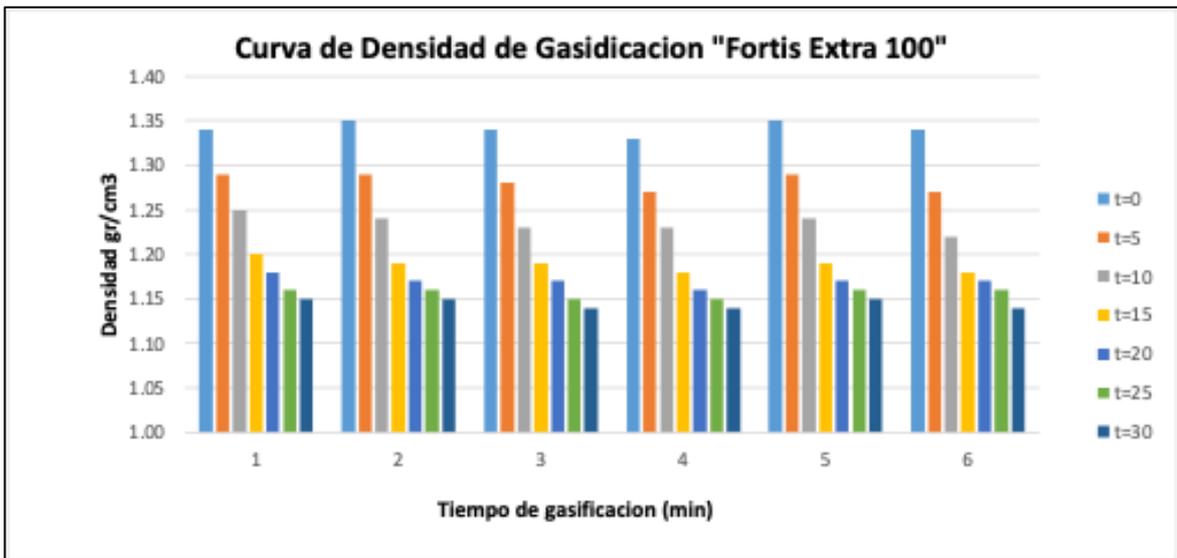
Nota: Elaboración Propia

5.1.1 Densidades "fortis Extra 100", "fortis Extra 70/30" y fortis Extra "60-40" (Emulsión Gasificada)

Después de llevar a cabo los experimentos con la emulsión gasificable recién desarrollada, se registraron los siguientes resultados, en los cuales la densidad final se modifica en función de la cantidad de Nitrito de Sodio con 0.3 % gasificante inyectado durante la descarga.

Figura 46

Cuadro de Gasificación "Fortis Extra 100"

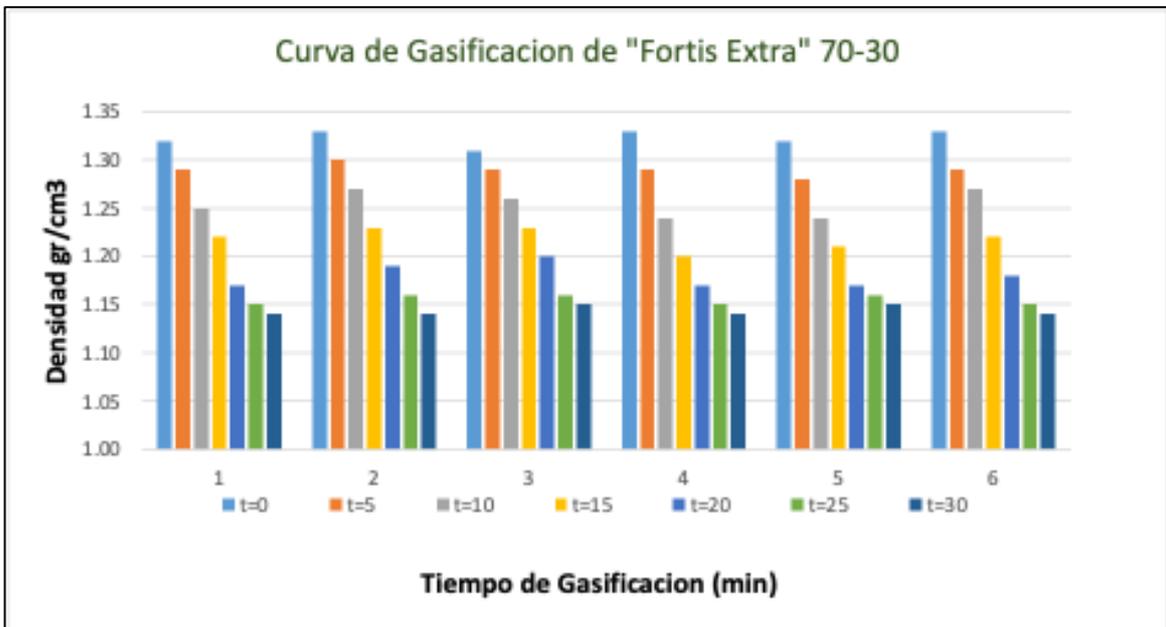


Nota: Elaboración Propia

Fortis Extra 100 tiene una densidad inicial promedio de 1.34 g/cc y densidad final promedio de 1.15 gr/cc.

Figura 47

Cuadro de Gasificación "Fortis Extra 100"

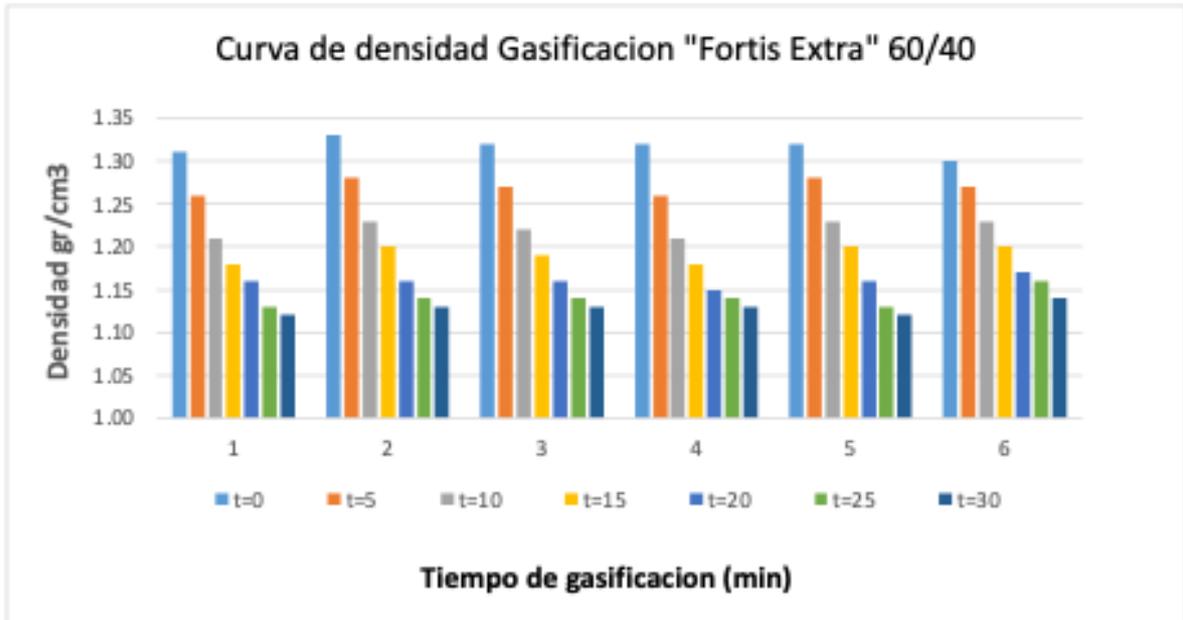


Nota: Elaboración Propia

Fortis Extra 70-30 tiene una densidad inicial promedio de 1.33 gr/cc y con una densidad final promedio de 1.14 gr/cc.

Figura 48

Cuadro de Gasificación "Fortis Extra 60/40"



Nota: Elaboración Propia

Nuestro producto Fortis Extra 60-40 tiene como una densidad inicial promedio de 1.32 gr/cc y como densidad final promedio de 1.13 gr/cc.

5.1.2 Factor de carga

Se determinó el factor de carga correspondiente a la emulsión gasificada y a la emulsión base para el mineral y el estéril, arrojando los resultados siguientes.

Tabla 18

Factor de Carga

Factor de carga según el Taladro (Kg/m ³)		
Explosivo	Mineral	Desmonte
Fortis Extra 100	1.60	0
Fortis Extra 70-30	1.58	0
Fortis Extra 60-30	1.57	1.25

Nota: Elaboración Propia

Tabla 19

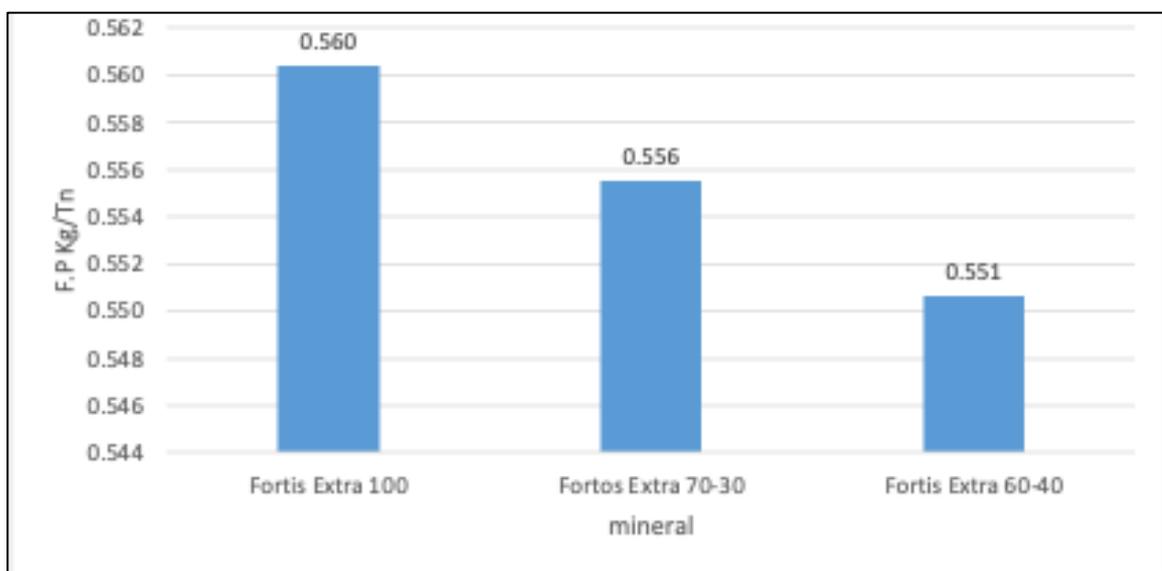
Factor de Potencia de los Explosivos

Tipo de Explosivo	Explosivo (Kg)	Desmonte (tn)	Mineral (tn)	F.P de Explosivo (Kg/tn)
Fortis Extra 100	1006.14		1795.5	0.560
Fortis Extra 70-30	997.43		1795.5	0.556
Fortis Extra 60-40	988.68		1795.5	0.551
	773.73	2358.75		0.328

Nota: Elaboración Propia

Figura 49

Factor de potencia de los explosivos



Nota: Elaboración Propia

5.1.3 Velocidad de detonación

De acuerdo con la referencia inicial, las velocidades de detonación utilizando emulsión base fueron las siguientes:

- Velocidad de detonación promedio (Fortis Advantage 100) = 4000 - 4600 m/s

En las pruebas de campo realizadas con el equipo MICROTRAP utilizando las nuevas mezclas gasificadas, se obtuvieron los siguientes datos:

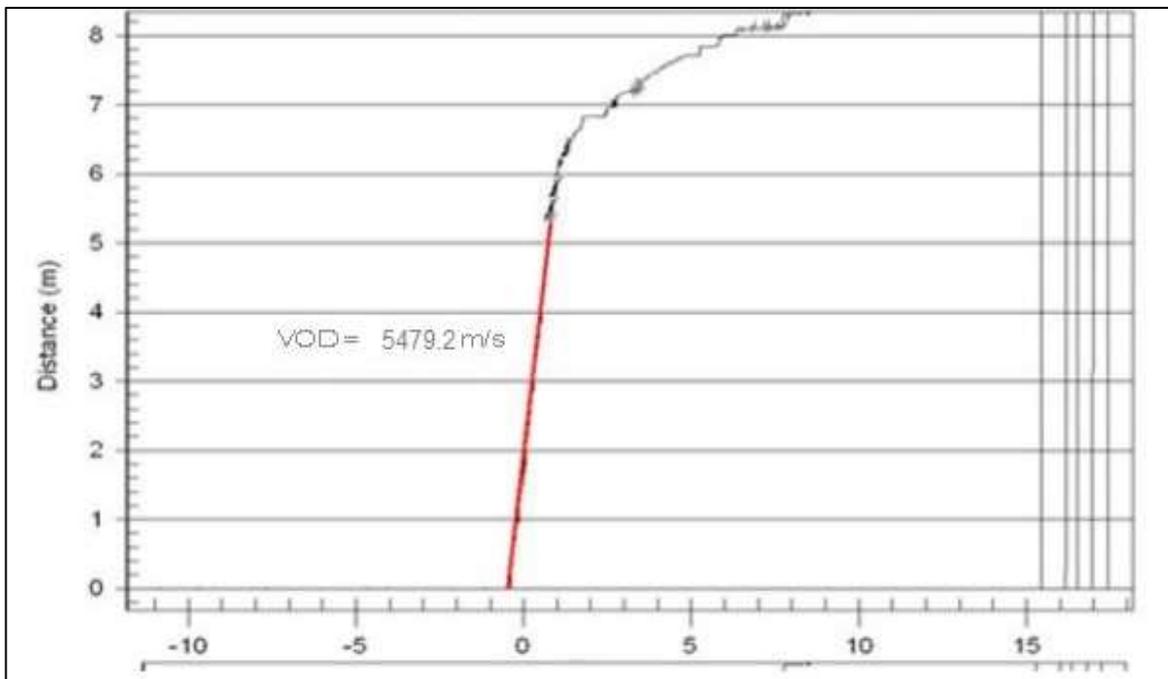
- Velocidad de detonación promedio (Fortis Extra 100) = 5479.2 m/s
- Velocidad de detonación promedio (Fortis Extra 70-30) = 5035.6 m/s

- Velocidad de detonación promedio (Fortis Extra 60/40) = 5149.8 m/s

Según se evidencia en los gráficos, las velocidades de detonación de las emulsiones gasificadas superan a las velocidades registradas en las emulsiones base. Conforme a la regla general, a una mayor velocidad de detonación corresponde un mayor poder rompedor del explosivo. En consecuencia, las emulsiones gasificadas exhiben un poder rompedor superior, lo que mejora la eficacia en las operaciones de voladura.

Figura 50

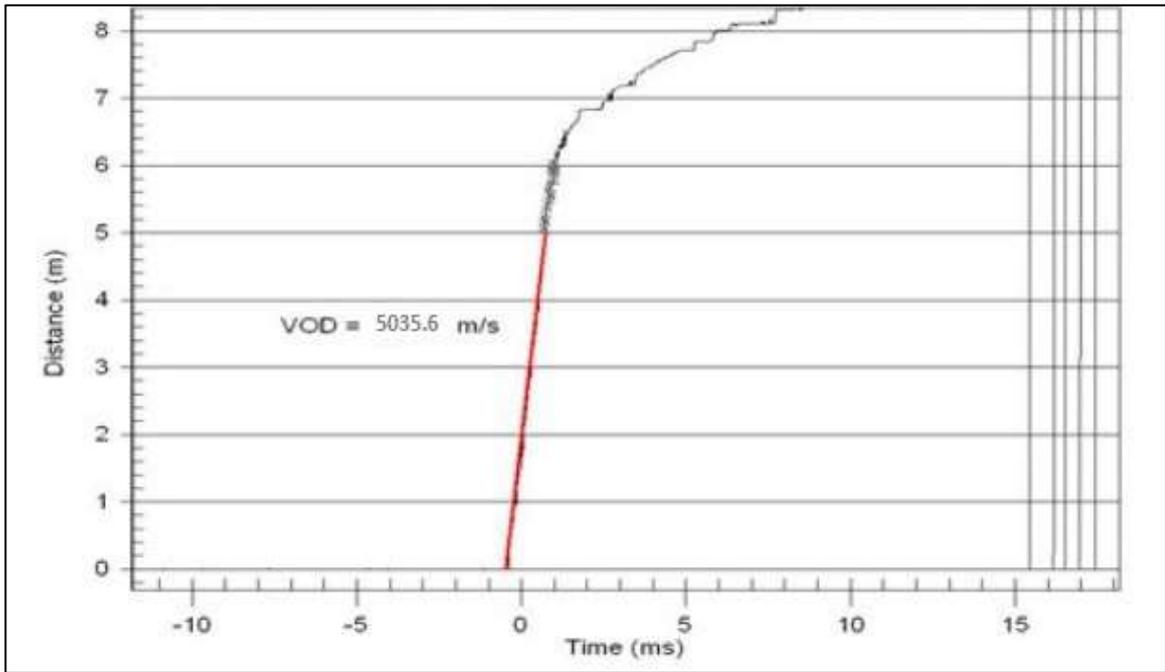
Medición de VOD. (Fortis Extra 100) Proyecto 3735_201-202-205



Nota: Asistencia Técnica ORICA

Figura 51

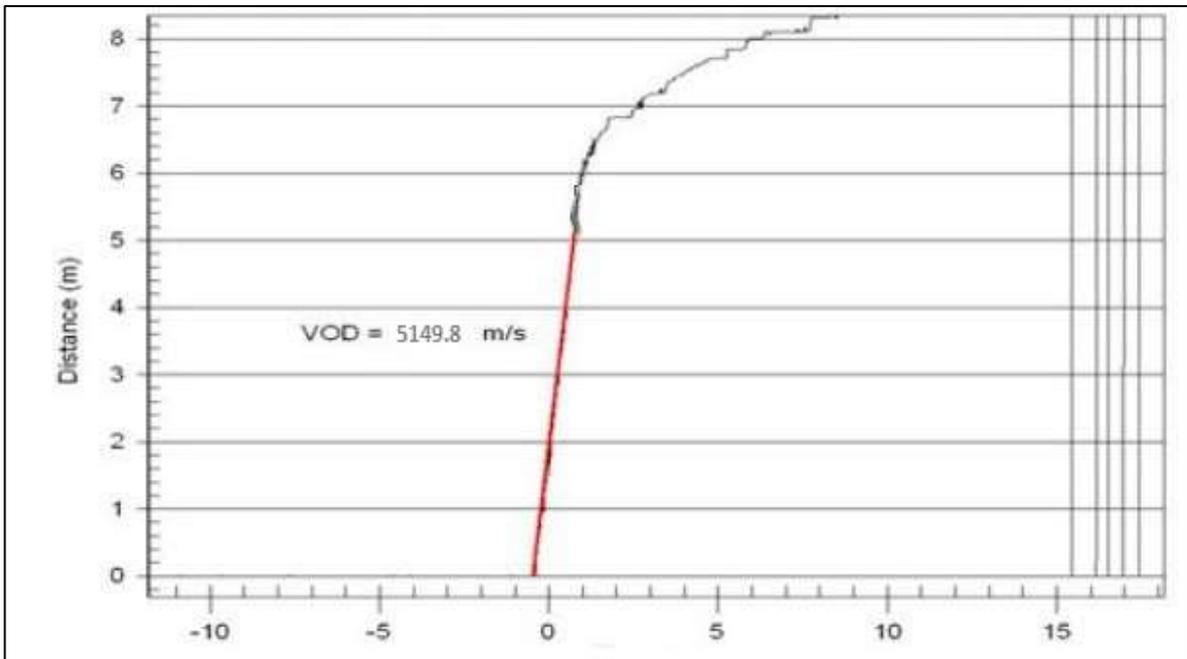
Medición de VOD. (Fortis Extra 70/30) "Jahuaypalla Alta"- Proyecto 3720_202



Nota: Asistencia Técnica ORICA

Figura 52

Medición del VOD. (Fortis Extra 60/40) “Jahuapaylla Alta” – Proy.: 3720_101-103-104



Nota: Asistencia Técnica ORICA

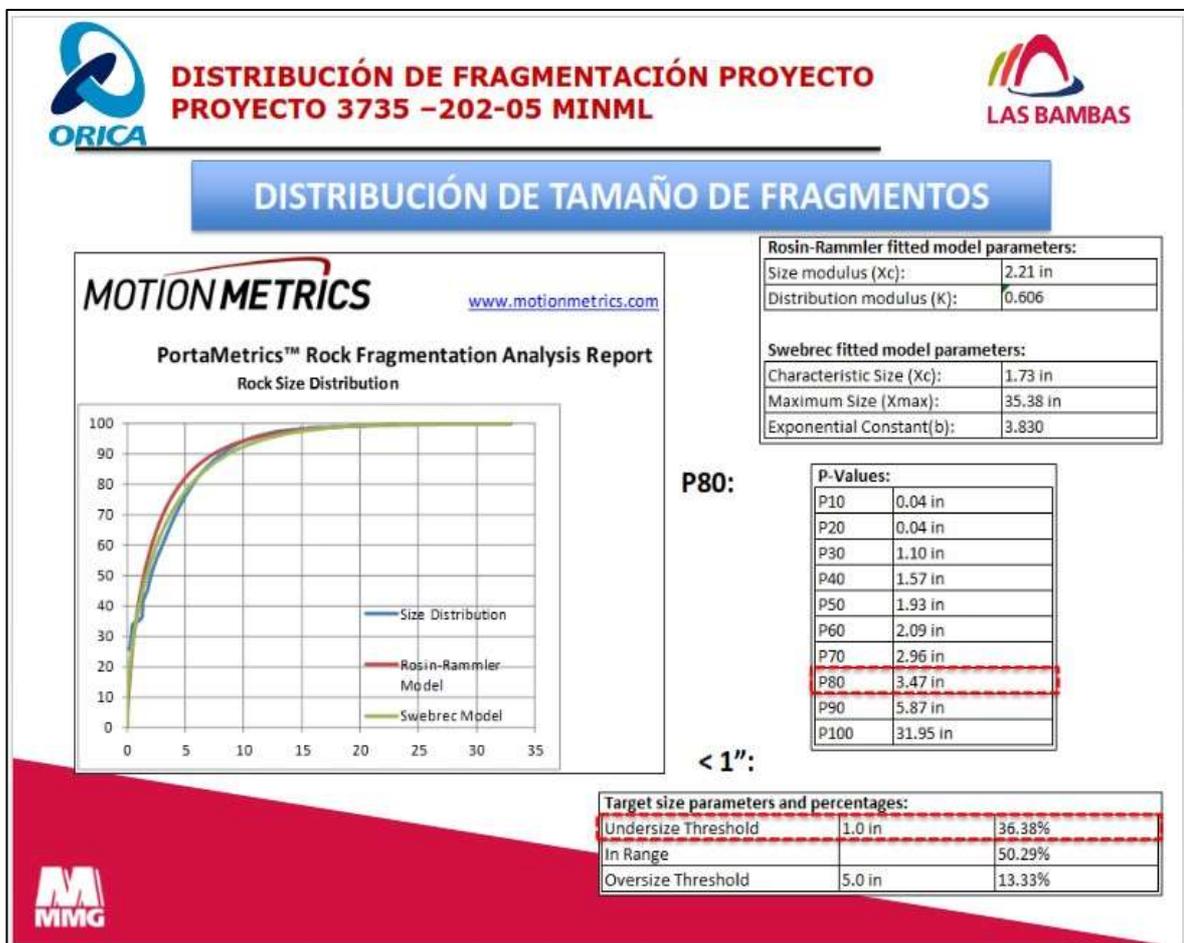
5.1.4 Fragmentación

Después de completar la detonación, se examinó la fragmentación mediante el uso de la cámara Porta Metrics. Este sistema innovador y portátil está equipado con sensores

tridimensionales que permiten medir el tamaño de las rocas in situ, proporcionando información precisa y mediciones independientes de cada roca. En el gráfico se presenta la comparación entre las fragmentaciones resultantes de la emulsión Fortis Extra 100, Fortis Extra 70-30 y nuestro producto demostrando su capacidad de poder rompedor el Fortis Extra 60-40, teniendo buenos resultados favorables al P-80 requeridas por planta, obteniendo resultados de finos en un buen porcentaje, demostradas por la cámara Prta Metrics.

Figura 53

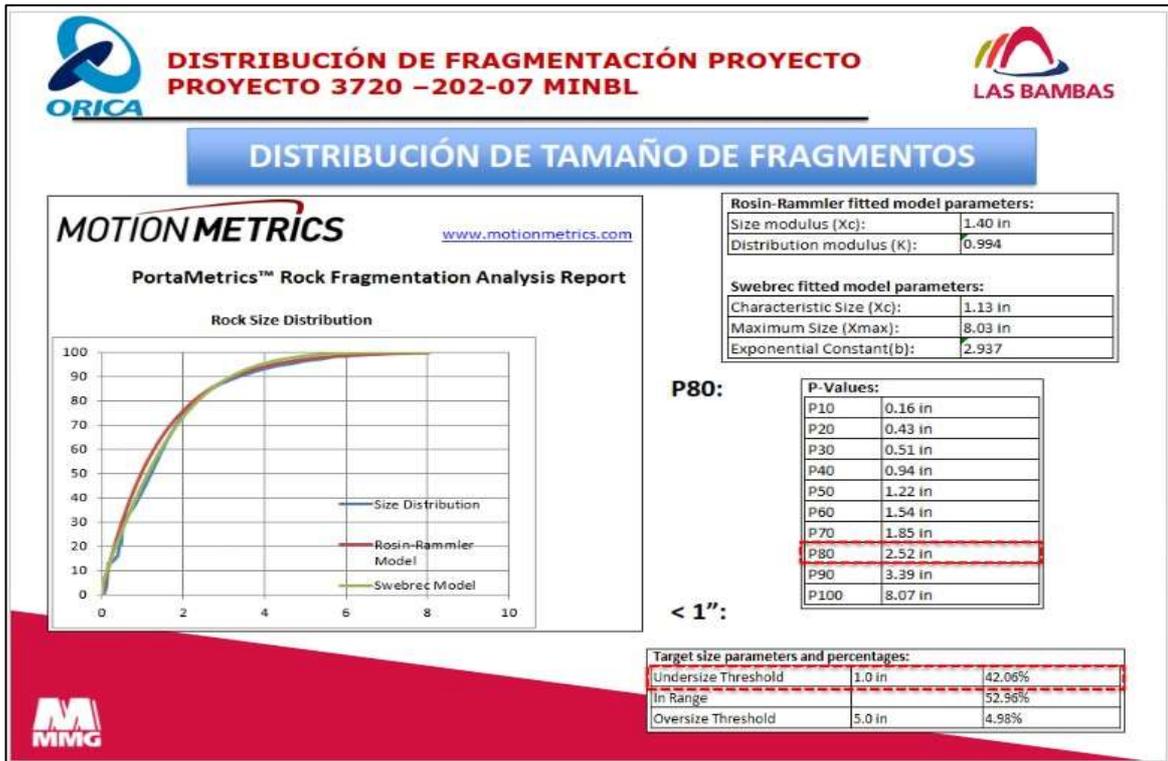
F.E 100, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) “Tajo Ferrobamba”



Nota: Elaboración Propia

Figura 54

F.E 70-30, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) "Tajo Ferrobamba"



Nota: Elaboración Propia

Análisis de la voladura del Proyecto 3720_101-103-104-105 - Fortis Extra 60-40

Figura 55

Ubicación del proyecto con 441 taladros cargados, Proy. 3720_101-103-104-105



Nota: Elaboración Propia

Figura 56

F.E 60-40, Secuencia de disparo "Tajo Ferrobamba" Proy. 3720_101-103-104-105



Nota: Elaboración Propia

Figura 57

Esponjamiento y fragmentación del material volado



Nota: Elaboración Propia

Figura 58

Pala N° 4 Frente a mineral volado, Proy. 3720-101-103-104-105



Nota: Elaboración Propia

Figura 59

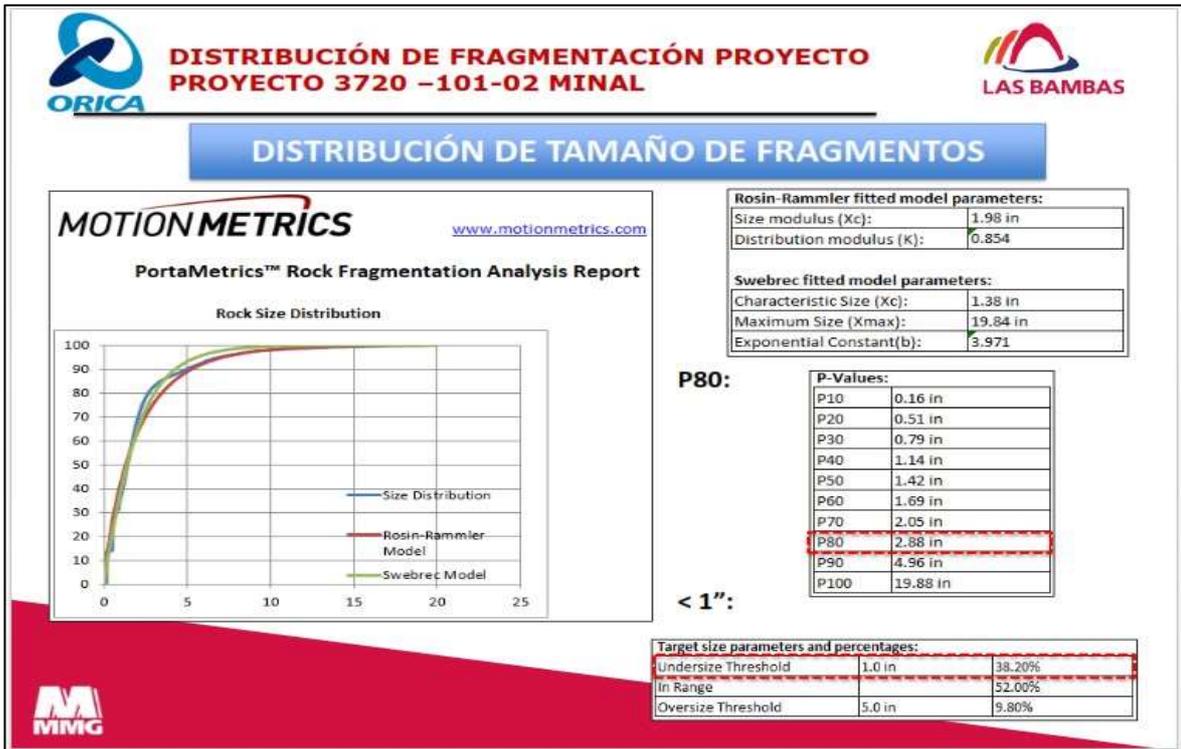
F.E 60-40, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) "Tajo Ferrobamba"



Nota: Elaboración Propia

Figura 60

F.E 60-40, Tamaño de Fragmentación (Pulgadas) "Tajo Ferrobamba"



Nota: Elaboración Propia

Fortis Extra 60-40 da un buen resultado en los finos, cumpliendo con nuestro objetivo $\leq 1''$ con un 38% y dentro del Rango requerido con un 52.00%. demostrando su efectividad con el material rocoso.

5.2 Evaluación económica

Después de llevar a cabo el análisis operativo de costos y la comparación entre las tres mezclas distintas, se presenta a continuación la tabla que resalta las ventajas económicas que la emulsión gasificada aporta a la operación. Este análisis se fundamenta en los costos de las materias primas, las dimensiones del taladro y el nivel de esponjamiento de la mezcla. Se determinaron los costos por metro lineal, por taladro y por tonelada volada, así como el factor por carga y factor de potencia para cada tipo de explosivo. Este análisis abarca diversos niveles en el "Tajo Ferrobamba" y compara las diferentes mezclas, incluyendo Fortis Extra 100 (Emulsión Matriz), Fortis Extra 70/30 frente a nuestro producto Fortis Extra 60/40 (Emulsión Gasificada).

Tabla 20*TM Roto de mineral por Explosivo F.E 60-40*

N°	TM.ROTO	Explosivo
1	354790.8	FORTIS EXTRA 64
2	295659	FORTIS EXTRA 64
3	469942.2	FORTIS EXTRA 64
4	469942.2	FORTIS EXTRA 64
5	469942.2	FORTIS EXTRA 64
6	469942.2	FORTIS EXTRA 64
7	469942.2	FORTIS EXTRA 64
8	469942.2	FORTIS EXTRA 64
9	469942.2	FORTIS EXTRA 64
10	469942.2	FORTIS EXTRA 64
11	469942.2	FORTIS EXTRA 64
12	629386.875	FORTIS EXTRA 64
13	241751.25	FORTIS EXTRA 64
14	502259.0625	FORTIS EXTRA 64
15	683718.75	FORTIS EXTRA 64
16	248086.8	FORTIS EXTRA 64
17	676552.5	FORTIS EXTRA 64
18	581981.4	FORTIS EXTRA 64
19	248086.8	FORTIS EXTRA 64
20	835625.7	FORTIS EXTRA 64
21	188065.8	FORTIS EXTRA 64
22	546024.375	FORTIS EXTRA 64
23	546024.375	FORTIS EXTRA 64
24	771269.85	FORTIS EXTRA 64
25	546024.375	FORTIS EXTRA 64
26	508844.7	FORTIS EXTRA 64
27	508844.7	FORTIS EXTRA 64
28	241195.5	FORTIS EXTRA 64
	13,383,672.41	TOTAL TM.ROTO

Nota: Elaboración Propia

Tabla 21*Optimización de costos según el tipo de Explosivo*

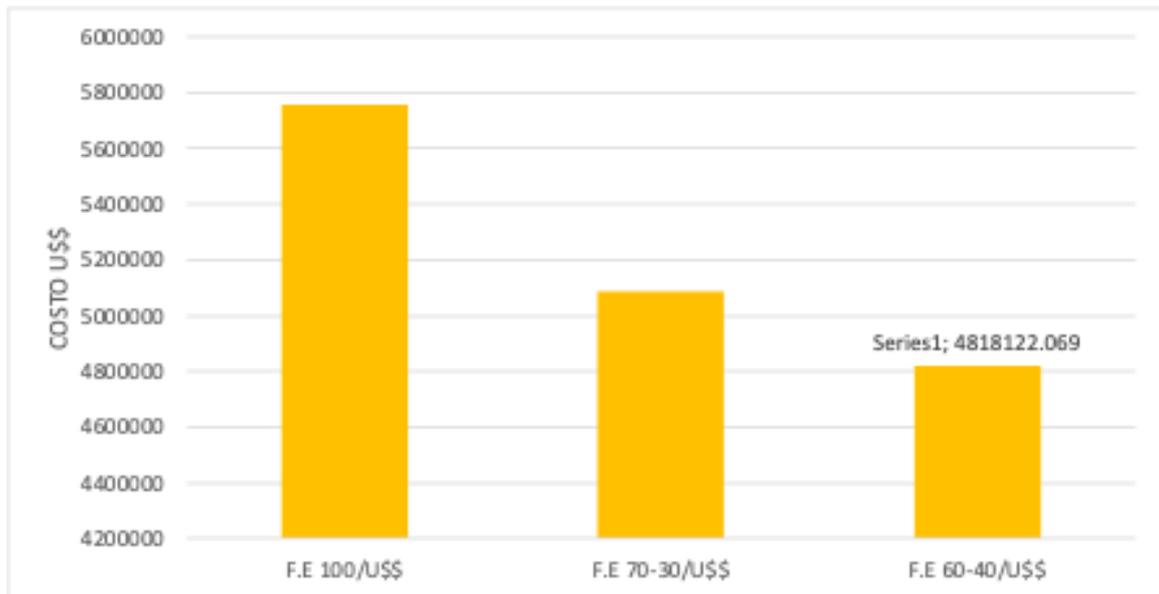
TM. ROTO	F.E 100	F.E 70-30	F.E 60-40
-----------------	----------------	------------------	------------------

1	0.43 EUR/TM	0.38 EUR/TM	0.36 EUR/TM
13'383,672.41	5'754,979.137	5'085,795.517	4'818,122.069

Nota: Elaboración Propia

Figura 61

Análisis de costos según el tipo de Explosivo



Nota: Elaboración Propia

En el mes de mayo la Optimización en los costos de voladura con el explosivo Fortis Extra 60-40 es de 267,673.45 EUR, en comparación con el Fortis Extra 70-30, y de 936,857.07 EUR en comparación del Fortis Extra 100. Teniendo como un proyecto muy importante para las utilidades de la minera MMG Las BAMBAS.

5.3 Evaluación ambiental

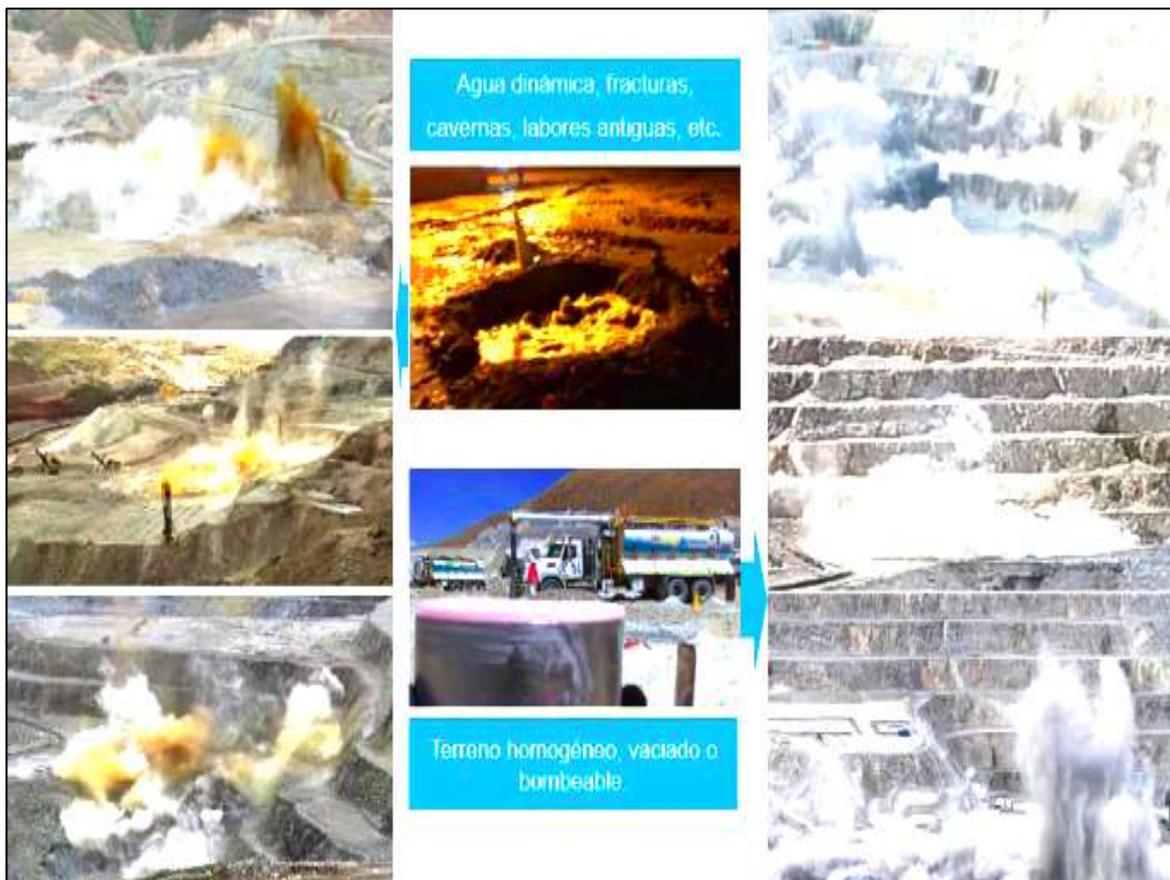
La mayoría de los explosivos carecen de oxígeno en cantidad suficiente para convertir cada átomo de carbono e hidrógeno presentes en la mezcla explosiva en dióxido de carbono y agua. Esta deficiencia en el porcentaje de combustible puede ocasionar la formación de óxidos nitrosos durante la detonación, los cuales son compuestos altamente reactivos y, al inhalarlos, pueden afectar el sistema respiratorio. Las emulsiones gasificadas,

por otro lado, han sido sensibilizadas mediante la generación de pequeñas burbujas dentro de su matriz.

La emulsión Fortis Extra es un ejemplo de emulsión gasificada que se sensibiliza químicamente mediante la incorporación de un aditivo, en este caso, nitrito de sodio. Este aditivo, al entrar en contacto con la emulsión, genera burbujas de nitrógeno (N₂), evitando la formación de humos anaranjados. En el caso específico de "Las Bambas", se observó que de un total de 30 disparos mensuales, aproximadamente el 30% de las voladuras presentaban gases nitrosos.

Figura 62

Emisión de gases producidas post voladuras "Tajo Ferrobamba"



Nota: Asistencia técnica ORICA

Las imágenes del lado izquierdo ilustran los gases nitrosos liberados tras las detonaciones con la emulsión base Fortis Advantage 100, poniendo de manifiesto el impacto

ambiental que estos gases provocan. Estos gases no solo ocasionaban demoras operativas, sino que también representaban un riesgo para los trabajadores. En contraste, en las imágenes del lado derecho se observa el resultado de las detonaciones con la emulsión gasificada Fortis Extra 100 y 60/40, donde la generación de gases nitrosos se reduce significativamente.

Figura 63

Monitoreo de Gases Nitrosos del proy. 3720_101-103-104 “Tajo Ferrobamba”



Nota: Elaboración Propia

Figura 64

Monitoreo de Gases Nitrosos “Tajo Ferrobamba”

CONTROL DE HUMOS TALADROS CON HUMOS VS DISPARADOS



18 © Orica Limited Group



Nota: Elaboración Propia

En el gráfico previos se presentan las mediciones de gases realizadas después de las detonaciones en el "Tajo Ferrobamba" utilizando el monitor de gases MSA ALTAIR 5X. Estas mediciones indican que al emplear emulsión gasificada Fortis Extra 60-40, los resultados se sitúan por debajo de los límites máximos permitidos.

5.4 Discusión de resultados

- Al analizar el desempeño técnico-operativo, se observa que las densidades en la emulsión base permanecen constantes, mientras que en la emulsión gasificada se presentan diversas densidades, lo que facilita su aplicación en diferentes tipos de rocas. En cuanto a la Velocidad de Detonación (VOD), las mediciones indican un valor de 5479.2 m/s para las emulsiones gasificadas, en comparación con los 4,300 m/s obtenidos para las emulsiones base. Esta diferencia sugiere que la emulsión gasificada Fortis Extra 60-40 tiene una VOD de 5149.8 m/s mayor, y por ende, un

mayor poder rompedor. En términos de fragmentación, se observa un mayor porcentaje de finos al emplear emulsión gasificada. Además, el factor de carga es menor con la emulsión gasificada Fortis Extra 60-40, indicando un uso más eficiente del explosivo.

- En relación al rendimiento económico, se obtuvieron costos variables para proyectos utilizando emulsión gasificada Fortis Extra 100, en el proyecto 3735_201-202, con un costo de 841.99 U\$\$/Tal, Fortis Extra 70-30, En el proyecto 3720_202, con un costo 745.51 U\$\$/Tal y mientras que Fortis Extra 60-40 en el proyecto 3720_101-103-104, el costo de 709.90 U\$\$/Tal, Sin embargo, es crucial tener en cuenta que estos valores son susceptibles a variaciones, ya que los costos de explosivos y otros elementos asociados fluctúan en función de los precios y las condiciones del mercado.
- Desde una perspectiva medioambiental, al examinar las fotografías y grabaciones, se puede notar que el uso de emulsión gasificada resulta en una disminución significativa de gases nitrosos, con escasa presencia de gases con tonalidad anaranjada. Esto se atribuye a un equilibrio óptimo de oxígeno en la emulsión gasificada.
- En términos de eficiencia operativa, la emulsión gasificada Fortis Extra 60-40 demuestra ser efectiva en la mayoría de las pruebas, reduciendo los costos por proyecto y minimizando su impacto en el entorno. No obstante, es importante señalar que pueden existir situaciones excepcionales.

CONCLUSIONES

C1: Los factores que influyen en el macizo rocoso son la densidad inicial y la densidad final del explosivo Fortis Extra 60-40 teniendo como densidad final de 1.3 g/cc la que define como un actor importante dentro de los parámetros para roca dura así como también la VOD 5149.8 m/s, siendo eficaz y maximizando los resultados en la voladura de producción.

C2: El grado de fragmentación al implementar las mezclas explosivas de emulsión gasificada "Fortis Extra 60/40 y Fortis Extra 100" de ORICA MINING SERVICES PERÚ S.A. en los proyectos de voladura del Tajo Ferrobamba, fue optimizado en la zona de mineral. El P80 mensual se mantuvo en el rango de [2.09" - 6.18"], teniendo como un rango promedio de 2.88" con un porcentaje de 52.00% , logrando un 38.20% de Finos, logrando así mayor eficiencia en las operaciones unitarias subsiguientes.

C3: En términos de eficiencia operativa, la emulsión gasificada Fortis Extra 60-40 demuestra ser efectiva en la mayoría de las pruebas, reduciendo los costos por proyecto y minimizando su impacto en el entorno. No obstante, es importante señalar que pueden existir situaciones excepcionales.

C4: La magnitud de reducción de costos al implementar el explosivo Fortis Extra 60-40 en el tajo Ferrobamba, genero una diferencia mensual de 16.28% que corresponde a 936,857.07 EUR con respecto al Fortis Extra 100, y con una diferencia de 5.26% que corresponde a un 267,673.45 EUR con respecto al Fortis Extra 70-30, siendo la que mejor optimiza el rendimiento económico, considerando un adecuado control ambiental.

RECOMENDACIONES

R1: Se recomienda al área de operaciones de voladura y planificación minera de MMG Las Bambas continuar con el uso de las mezclas de emulsión gasificada Fortis Extra 60/40 y Fortis Extra 70/30. Esta medida permitirá reforzar la optimización lograda en la fragmentación de roca dura, favoreciendo así una mejor eficiencia en las fases posteriores del proceso productivo.

R2: Se recomienda a los supervisores de calidad y de operaciones implementar un programa de monitoreo continuo sobre las densidades y el nivel de gasificación de las mezclas utilizadas, para asegurar la consistencia en los resultados de fragmentación, trabajando con una densidad promedio de 1.14 g/cm^3 , y consolidar la eficiencia obtenida en la zona de mineral del Tajo Ferrobamba.

R3: Se recomienda a los jefes de mantenimiento y al equipo encargado, establecer mecanismos rigurosos de control y supervisión, así como realizar calibraciones periódicas de dichos equipos, buscando garantizar la homogeneidad en la preparación de las emulsiones, promoviendo así una mejora continua en fragmentación, seguridad operativa y cuidado ambiental.

R4: Se recomienda a la unidad de formación y capacitación de MMG Las Bambas fortalecer los programas de entrenamiento dirigidos a los operadores encargados del manejo de emulsiones, enfocándose especialmente en el control de densidades, tiempos de esponjamiento y correcta inyección de nitrito de sodio, asegurando de esta manera que los beneficios económicos y ambientales demostrados se sostengan a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcocer, E. J., & Salas, J. E. (2020). *Propuesta del uso de emulsión gasificada en el carguío de taladros para reducir los costos en voladura en una mina a tajo abierto con depósitos tipo Skarn, Arequipa 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Continental].
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10239/1/IV_FIN_110_T_E_Alcocer_Salas_2020.pdf
- Alvarez, O. (2024, octubre 24). *Oxidación*. Enciclopedia Concepto.
<https://concepto.de/oxidacion/>
- Bohorque, A. (2016). *Sesión 01: Agentes de Voladuras Secos*. Universidad Privada del Norte. <https://es.scribd.com/doc/310615441/Sesion-03-Agentes-de-Voladura-Secos>
- Cersa. (2021, agosto 30). *Explosivos industriales de Voladura en Minería*. Tipo de explosivo industrial.
https://www.facebook.com/photo.php?fbid=3120073638215862&id=1608477289375512&set=a.1634351610121413&locale=es_LA
- CFR. (2005, septiembre 23). *Description of terms for explosives*. Code of Federal Regulations. <https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-173/subpart-C/section-173.59>
- Clavijo, J. A. (s/f). *Monitoreo de gases en minería*. Safety Instruments. Recuperado el 24 de abril de 2025, de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/presentacion_multidetectors_ibrid-mx6.pdf

- Escriba, E. J. S. (2018). *Utilización de emulsión gasificable en voladura para optimizar factores ambientales, técnicos y económicos en minería a tajo abierto*.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/items/d75f0561-21cf-4d1e-835e-f92e207e3187>
- Hernández, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Primera edición). McGraw Hill Interamericana.
- Ingeoexpert. (2018, enero 19). *Minería a cielo abierto: ¿Qué es, cuáles son sus ventajas y qué tipos hay?* <https://ingeoexpert.com/2018/01/19/mineria-cielo-abierto/?srsltid=AfmBOoruxy4w3ttr98TpRoYYZKSZbLobxZeF3WYii6rFGaKf7fUgwLzc>
- Iturria, D. E. (2008). *Costos Ambientales*. <https://intercostos.org/documentos/congreso-08/194.pdf>
- López, C., López, E., & García, P. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas* (1ra edición). U.D. Proyectos E.T.S.I. Minas.
- MITECO. (s/f). *Guía de buenas prácticas en el diseño y ejecución de voladuras en banco*. Recuperado el 24 de abril de 2025, de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/mineria/Explosivos/Guias/Guia_buenas_practicas_diseno_ejecucion_voladuras_banco.pdf
- MMG. (2021). *Plan de Manejo Ambiental*. <https://es.scribd.com/document/511361353/Indice-Plan-de-Manejo-Ambiental-20211111>
- MMG Las Bambas. (2023). *Acerca de Las Bambas*. Conociendo a Las Bambas. <https://www.lasbambas.com/seccion-acerca-de-las-bambas-conociendo-a-las-bambas>

- O'connor, B. (2023, marzo 27). *Explosiones, deflagraciones o detonaciones*. National Fire Protection Association. <https://www.nfpa.org/es/news-blogs-and-articles/blogs/2023/03/27/explosions-vs-deflagrations-vs-detonations>
- ORICA. (2023). *Sistema Fortis™ Extra*. Technical data sheet – propiedades técnicas. https://www.oricaminingservices.com/es/es/product/products_and_services/bulk_systems/page_bulk_systems/fortis_extra_system/1516
- Pecho, V. (1981). *Geología de los cuadrángulos de Chahuanca, Antabamba y Santo Tomas*. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/154/2/A-035-Boletin_Chahuanca-29p_Antabamba-29q_Santo_Tomas-29r.PDF
- Pernia, J. M., Ortiz, F., Lopez, C., & Lopez, E. (1987). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Instituto Geológico y Minero de España. <https://es.scribd.com/document/590866044/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas>
- Sanchidrián, J. Á., & Muñiz, E. (2000). *Curso de tecnología de explosivos*. Servicio de Publicaciones de la Fundación Gómez-Pardo.
- Ubuy Perú. (2023). *MSA 10165446 ALTAIR 5X Detector Multi-Gas*. Google Imagenes. <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.ubuy.pe%2Fsp%2Fproduct%2F809Q003ZU-msa-10165446-altair-5x-lel-o2-co-h2s-pid-10-x27-line-1-x27-probe-charcoal-device-with-color-display-includes-instrument-line-probe&psig=AOvVaw3a-xNPbEdAsjw8eh7kbUiT&ust=1745648388508000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCMDErJLF8owDFQAAAAAdAAAAABAE>

Vilugrón, E. A. (2020). *Diseño de tronaduras y su impacto en el costo mina de Mina El*

Dorado, Ovalle [Tesis de pregrado, Universidad Andres Bello].

<https://repositorio.unab.cl/server/api/core/bitstreams/a409a501-e23a-4437-b457->

[f8981762a99c/content](https://repositorio.unab.cl/server/api/core/bitstreams/a409a501-e23a-4437-b457-f8981762a99c/content)

VVAA. (1990). *Manual de medidas para la correcta manipulación de los explosivos y*

accesorios. Unión Española de Explosivos.

ANEXOS

Anexo1. Registro fotográfico



Fotografías de trabajo de campo, toma de densidades del explosivo



Abastecimiento del silo de nitrato al camión fabrica



Abastecimiento a los silos de emulsión base



Cancha de Nitrato



En malla de producción con los EPP adecuados



Tajo Ferrobamba



Colocado de Tacos del taladro



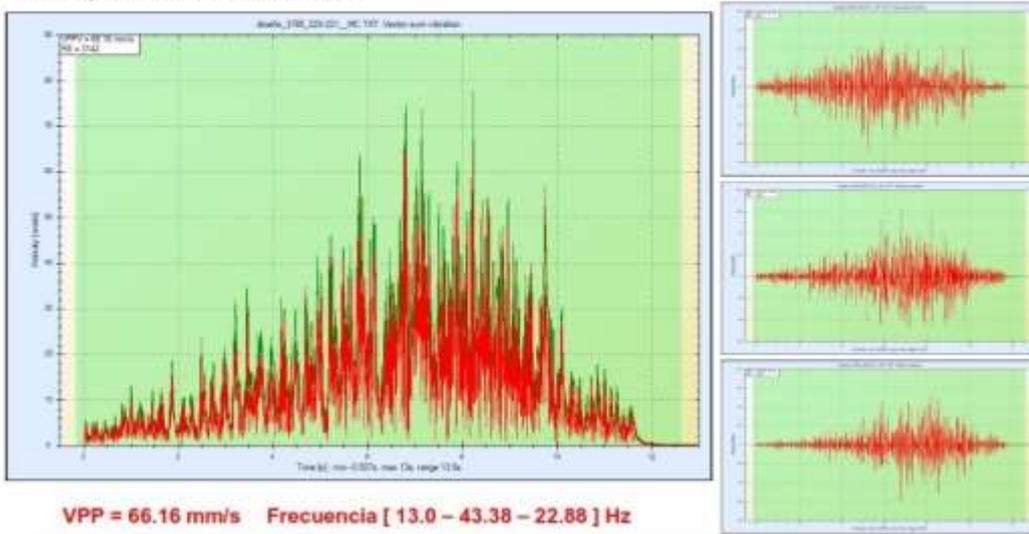
Carguío de mineral con pala hidráulica #13



Planos de ubicación de la Voladura

REPORTE DE SISMOGRAFÍA FASE 2A 3720_101-103-104

Se registró una VPP de 66.16 mm/s en el punto de monitoreo, ubicado a 80.1 metros en dirección suroeste del disparo en el mismo nivel 3720



Reporte de sismógrafo, de las Velocidad Pico Partícula