

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



**Uso de explosivo de baja densidad para optimizar el control de taludes sin
afectar la fragmentación en una unidad minera de cobre a cielo abierto en el
sur del Perú**

Tesis presentada por el Bachiller:

Garcia Huanca, Edwin Samir

ORCID: 0009-0004-2140-3930

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mgter. Tong Ladron de Guevara, Jose Carlos

ORCID: 0009-0002-3911-7815

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 11 de Marzo del 2026

Dictamen: 016525-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 016525, presentado por:

2012700921 - GARCIA HUANCA EDWIN SAMIR

Titulado:

**USO DE EXPLOSIVO DE BAJA DENSIDAD PARA OPTIMIZAR EL CONTROL DE TALUDES SIN
AFECTAR LA FRAGMENTACIÓN EN UNA UNIDAD MINERA DE COBRE A CIELO ABIERTO EN EL
SUR DEL PERÚ**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

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



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



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



USO DE EXPLOSIVO DE BAJA DENSIDAD PARA OPTIMIZAR EL CONTROL DE TALUDES SIN AFECTAR LA FRAGMENTACIÓN EN UNA UNIDAD MINERA DE COBRE A CIELO ABIERTO EN EL SUR DEL PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	1%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.unap.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.uchile.cl	1%
	Fuente de Internet	
4	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorio.continental.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	Submitted to Universidad Nacional de Moquegua	<1%
	Trabajo del estudiante	

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta investigación, en primer lugar, a mis padres, **Edwin y Mery**, quienes han confiado en mí desde que tengo memoria. Ellos son uno de los mayores motivos por los cuales me siento verdaderamente afortunado; tenerlos en mi vida es un regalo invaluable. También deseo reconocer a mi compañera de vida, **Alisson**, quien es una parte esencial de mi camino. Su apoyo y motivación diaria me impulsan a seguir creciendo y a construir, junto a ella, el futuro que soñamos.

No puedo dejar de mencionar a mi tío **Miguel**, quien desde el inicio de mi carrera profesional confió plenamente en mis capacidades. Su apoyo fue fundamental y le tengo gran admiración. Asimismo, quiero agradecer a **Jorge Galarza y Dennys Ramos**, quienes supieron orientarme en mi desarrollo dentro del rubro de la voladura. Sus consejos y enseñanzas fueron pilares fundamentales para mi crecimiento profesional.

A lo largo de este camino he tenido la fortuna de conocer a muchas personas que han marcado mi vida y mi futuro. Mis amigos Diego Miranda, Franco Montoya, Jose Tong les estoy muy agradecido y me comprometo a seguir demostrando, con el mismo ímpetu, que siempre honraré la confianza que depositaron en mí.

EPÍGRAFE

“Ser resiliente marcó mi vida profesional y, con el tiempo, se transformó en uno de los valores más valiosos que llevo conmigo día a día.”

RESUMEN

Uno de los mayores desafíos que enfrentamos en la minería a tajo abierto es el control y la estabilidad de taludes, componentes fundamentales para garantizar la seguridad minera. En este contexto, la planificación de voladura se vuelve crucial, ya que se relaciona directamente con la fragmentación del material y la calidad del talud final. Esta investigación propone que se emplee un explosivo de baja densidad llamado Flexigel, junto con una reconfiguración de la malla de perforación y rediseño de la carga con el nuevo explosivo. El propósito es mejorar el diseño del talud final sin perjudicar la fragmentación en una unidad minera de cobre ubicada en el sur peruano. La investigación se lleva a cabo en la Fase 8 del tajo, donde el tipo de roca predominante es la diorita. Esta roca tiene condiciones geomecánicas complicadas que constituyen un reto extra para la operación.

La metodología incluye el desarrollo de una línea base a partir de los resultados presentes en cuanto a fragmentación y estabilidad, la realización de ensayos con el nuevo explosivo y la comparación estadística de los datos recogidos. Así, se pretende evidenciar que el uso de Flexigel no solo posibilita la conservación de la calidad y productividad de la fragmentación, sino que además ayuda a disminuir las vibraciones, reducir los gases nitrosos y aumentar la seguridad del personal en tajo. Se espera que los resultados faciliten alcanzar un nivel de wall control superior al 85%, verificar la efectividad de la propuesta en situaciones reales de operación y desarrollar un modelo que pueda ser reproducido en otras fases del tajo. Así, este estudio aporta no solo a la esfera técnica, sino también a la económica y a la social, pues propone una alternativa innovadora que combina eficacia con seguridad.

Palabras clave: Flexigel, Wall Control, Campo Cercano.

ABSTRACT

One of the greatest challenges we face in open-pit mining is the control and stability of slopes, fundamental components to guarantee mining safety. In this context, blast planning becomes crucial, since it is directly related to material fragmentation and the quality of the final slope. This research proposes the use of a low-density explosive called Flexigel, together with a reconfiguration of the drilling pattern and a redesign of the charge with the new explosive. The purpose is to improve the final slope design without harming fragmentation in a copper mining unit located in southern Peru. The research is carried out in Phase 8 of the pit, where the predominant rock type is diorite. This rock has complicated geomechanical conditions that represent an additional challenge for the operation.

The methodology includes the development of a baseline from the present results regarding fragmentation and stability, the performance of tests with the new explosive, and the statistical comparison of the collected data. In this way, the aim is to show that the use of Flexigel not only makes it possible to preserve the quality and productivity of fragmentation, but also helps to reduce vibrations, decrease nitrous gases, and increase the safety of the personnel in the pit. The expected results aim to achieve a wall control level higher than 85%, verify the effectiveness of the proposal in real operating situations, and develop a model that can be reproduced in other phases of the pit. Thus, this study contributes not only to the technical sphere, but also to the economic and social, since it proposes an innovative alternative that combines efficiency with safety.

Keywords: Flexigel, Wall Control, Cross Hole.

ÍNDICE

DEDICATORIA

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

Introducción	1
Capítulo 1	3
1. Planteamiento de la investigación	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3 Pregunta de investigación	5
1.3.1. Pregunta general	5
1.3.2. Preguntas específicas	5
1.4 Línea de investigación	5
1.5 Palabras clave	6
1.6 Aporte del desarrollo de tesis	6
Capítulo II	8
2. Fundamentos teóricos	8
2.1 Antecedentes de la investigación	8
2.1.1. Antecedentes internacionales	8
2.1.2. Antecedentes nacionales	11

2.2	Bases teóricas.....	14
2.2.1.	Diseño de malla de perforación	14
2.2.2.	Voladura	15
2.2.3.	Tipos de explosivos.....	16
2.2.3.1.	Explosivos gasificados Quantex 82	16
2.2.3.2.	Flexigel o explosivo de baja densidad	18
2.2.4.	Conciliación geotécnica o Wall Control	19
2.2.5.	Proceso de fragmentación de la roca	21
2.2.6.	Tasa de excavación o DigRate	23
2.2.7.	Gases NOx por voladura.....	23
2.2.8.	Estudio de campo cercano	26
2.2.9.	Densidad lineal del explosivo	27
2.3	Hipótesis	27
2.3.1.	Hipótesis general.....	27
2.3.2.	Hipótesis específica	27
2.4	Variables.....	28
Capítulo III.....		29
3.	Marco metodológico	29
3.1	Alcances de la investigación.....	29
3.2	Limitaciones de la investigación.....	30
3.3	Aporte de la investigación	31
3.3.1.	Aporte técnico	31
3.3.2.	Aporte económico y operativo.....	31

3.3.3.	Aporte en seguridad y sostenibilidad.....	31
3.3.4.	Aporte académico y replicabilidad	32
3.4	Tipo y nivel de investigación.....	32
3.5	Población y Muestra	33
3.5.1.	Población.....	33
3.5.2.	Muestra	33
3.6	Técnicas e instrumentación para recolección de datos	34
3.6.1.	Técnica de recolección de datos	34
3.6.2.	Instrumento de recolección de datos.....	34
3.6.2.1.	Registro fotográfico y video	35
3.6.2.2.	Software de análisis de fragmentación	35
3.6.2.3.	Software de análisis Gconciliation v2.....	35
3.6.2.4.	Registros operativos de producción.....	35
3.7	Plan de análisis de datos	35
3.7.1.	Construcción de la línea base.....	36
3.7.2.	Evaluación de la propuesta con Flexigel	36
3.7.3.	Análisis comparativo	36
3.7.4.	Interpretación de resultados	36
3.8	Desarrollo de la línea base	37
3.8.1.	Línea base wall control	37
3.8.2.	Línea base fragmentación	39
3.8.3.	Línea base DigRate	40
3.8.4.	Línea base en generación de gases NOx.....	41

3.8.5.	Resumen de línea base	42
3.9	Plan del desarrollo del plan de pruebas.....	42
3.10	Control de calidad de materias primas en laboratorio.	43
3.10.1.	Control de densidad del EPS.....	43
3.10.2.	Control de densidad de emulsión.....	45
3.11	Desarrollo del estudio de campo cercano	47
3.11.1.	Instrumentación del estudio de campo cercano en fase 08	49
Capítulo IV		50
4.	Análisis e interpretación de los resultados.....	50
4.1	Análisis del resultado obtenido del estudio de campo cercano.....	50
4.1.1.	Cálculo e interpretación para la Velocidad de onda P.....	50
4.1.2.	Cálculo e interpretación de los parámetros K y Alpha para cada explosivo.....	52
4.1.3.	Cálculo e interpretación del umbral de daño en el macizo rocoso	54
4.2	Rediseño y análisis de la malla de perforación y de carga explosiva	56
4.3	Evaluación de resultados obtenidos en campo.....	60
4.3.1.	Análisis de resultados en wall control	60
4.3.1.1.	Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada Wall Control.....	62
4.3.2.	Análisis de resultados de fragmentación.....	64
4.3.2.1.	Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada fragmentación	65
4.3.3.	Análisis de resultados en DigRate	67
4.3.3.1.	Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada fragmentación	68
4.3.4.	Análisis de resultados de generación de gases nitrosos	68
4.3.4.1.	Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada Gases NOx	69

CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Operacionalización de las variables</i>	28
Tabla 2. <i>Parámetros de medida para generación de línea base wall control</i>	37
Tabla 3. <i>Línea base fragmentación P80</i>	39
Tabla 4. <i>Línea base DigRate</i>	40
Tabla 5. <i>Resultados de gases NOx línea base.</i>	41
Tabla 6. <i>Resumen detallado de la línea base</i>	42
Tabla 7. <i>Control de densidad de EPS (Poliestireno expandido)</i>	44
Tabla 8. <i>Resultados del control de calidad de la emulsión matriz</i>	46
Tabla 9. <i>Resultados obtenidos en la prueba de campo cercano determinar Vp.</i>	52
Tabla 10. <i>Parámetros geomecánicos de la Diorita</i>	55
Tabla 11. <i>Resultados obtenidos aplicando nuevo explosivo en wall control</i>	61
Tabla 12. <i>Análisis comparativo del caso base vs la propuesta optimizada</i>	62
Tabla 13. <i>Resultados obtenidos aplicando el nuevo explosivo en fragmentación.</i>	64
Tabla 14. <i>Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada fragmentación.</i>	65
Tabla 15. <i>Resultados obtenidos aplicando el nuevo explosivo en Gases Nitrosos</i>	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Diseño de malla de perforación.</i>	15
Figura 2 <i>Proceso de voladura</i>	16
Figura 3 <i>Mezcla explosiva Quantex82</i>	17
Figura 4 <i>Explosivo de baja densidad o Flexigel 100</i>	18
Figura 5. <i>Representación de conciliación geotécnica.</i>	21
Figura 6 <i>Tipos de fisuras durante el proceso de detonación.</i>	22
Figura 7. <i>Escala de valoración de gases NOx</i>	25
Figura 8 <i>Técnica sísmica de Cross Hole</i>	26
Figura 9 <i>Frecuencia de fracturas</i>	37
Figura 10. <i>Resultados obtenidos por geotécnia software Gconciliation – Línea Base....</i>	38
Figura 11. <i>Fotografía del EPS muestra en campo.</i>	45
Figura 12. <i>Control de calidad de la emulsión matriz en laboratorio.</i>	46
Figura 13. <i>Niveles de impacto por tipo de explosivo - Mapa de energía.</i>	48
Figura 14. <i>Secuencia de entregables en un estudio de campo cercano.</i>	48
Figura 15. <i>Diseño de perforación y tiempos para el estudio de CC.</i>	50
Figura 16. <i>Forma gráfica de como calcular la Vp</i>	51
Figura 17. <i>Ábaco en función a carga y distancia por explosivo.</i>	53
Figura 18. <i>Modelo de Holmberg and Persson de campo cercano resultados</i>	54
Figura 19. <i>Criterio de daño en función a VPPc</i>	56
Figura 20. <i>Línea Base, diseño de perforación y carguío.</i>	57
Figura 21. <i>Propuesta para rediseño de malla de perforación y voladura.</i>	58
Figura 22. <i>Análisis comparativo línea base vs Propuesta.</i>	59

Figura 23. <i>Resultados de evaluación geotécnica Wall Control</i>	61
Figura 24. <i>Resultados obtenidos aplicando el nuevo explosivo en DigRate.</i>	66
Figura 25. <i>Resultados de voladura aplicando Flexigel gases NOx</i>	68



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos 1.	<i>Procedimiento escrito de trabajo seguro - Análisis de fragmentación</i>	76
Anexos 2.	<i>Procedimiento escrito de trabajo - Medición de vibraciones.....</i>	77
Anexos 3.	<i>Procedimiento de trabajo - Filmación de voladura</i>	79
Anexos 4.	<i>Procedimiento escrito de trabajo - Carguío de taladros</i>	81



Introducción

La minería a cielo abierto constituye una de las principales actividades económicas del Perú. En la región sur, en particular, donde se ubican depósitos de cobre significativos. No obstante, esta actividad también enfrenta desafíos ineludibles. Uno de los más difíciles es la estabilidad de los taludes.

En este contexto, la voladura se vuelve un aspecto crucial. Afectando en gran medida la calidad final del talud y, por lo tanto, el éxito de la operación depende de su planificación. Por lo tanto, se propone investigar opciones novedosas, como la utilización de explosivos de baja densidad y un rediseño de la malla de perforación en la zona del buffer.

No solo facilitan un mejor control de la fragmentación estas medidas técnicas, sino que además disminuyen los daños en la pared del talud. Esto es esencial cuando se persigue una mayor seguridad y sostenibilidad.

Este estudio se llevará a cabo en una mina de cobre con diorita como su litología principal, que es una roca con un comportamiento geomecánico complicado y que supone un desafío permanente.

El estudio se realizará en la fase 8 del tajo; en ella se determinarán las variables requeridas para desarrollar un modelo de campo cercano.

Con base en este modelo, se llevará a cabo el rediseño de la malla en la zona de buffer y la introducción de un explosivo nuevo con una densidad baja denominado Flexigel. Es importante mencionar que su implementación se enfocará únicamente en los taladros de buffer, ya que allí es donde se concentra la mayor parte del control del talud y el impacto del cambio puede medirse con más precisión.

Los pasos de la metodología de esta tesis serán los siguientes:

- Especificar las variables críticas que impactan el caso de estudio: propiedades de los explosivos, geomecánica del terreno, geología y perforación, carga operante y parámetros del diseño del talud.
- Establecer una línea base de fragmentación y cumplimiento del talud final, para compararla con los resultados obtenidos tras aplicar Flexigel en los taladros de buffer y primera producción.
- Por último, en las conclusiones y recomendaciones, se expondrán los hallazgos, resaltando las ventajas, restricciones y posibilidades de mejora.

En resumen, esta investigación no solamente tiene como objetivo mejorar un diseño técnico, sino también mostrar que se puede incrementar la seguridad, la eficiencia en las operaciones y el respeto por el medioambiente al mismo tiempo.

Capítulo 1

1. Planteamiento de la investigación

1.1 *Planteamiento del problema.*

En minería superficial, llegar al talud de diseño no es solo una meta, es una condición de vida para hacer rentable y segura una operación. Pero la realidad es que cuando un talud no alcanza el ángulo diseñado, los resultados se hacen sentir: pérdidas económicas, riesgos operativos y limitaciones al desarrollo del tajo. Económicamente, salirse del diseño impacta en cascada. Si los taludes superiores no se construyen como se había previsto, los bancos inferiores quedan condicionados y tienen que dejar bermas más anchas de lo previsto. Y esto, que puede parecer un cambio pequeño, en realidad significa perder la oportunidad de lograr el pit óptimo. Y si en esa zona se localiza mineral de alta ley, el desfase se convierte en dinero perdido que afecta la rentabilidad del proyecto. Por otro lado, está la parte operativa y de seguridad, aún más delicada. Un talud que no se ajuste al diseño puede transformarse en una amenaza permanente. Es suficiente el desprendimiento de una pequeña roca para causar la muerte de trabajadores y destruir equipos costosos. Y es que, al final, un bloque inestable no entiende de palas, camiones o trabajadores: caerá y las consecuencias pueden ser irreversibles.

Ahora bien, para el área de estudio, el problema se intensifica por el tipo de roca predominante. Es una diorita con RQD que varía entre 35% a 40% y $UCS < 40$ MPa, lo que imposibilita el uso de métodos convencionales de control de taludes como el precorte. En estas circunstancias, el precorte deja de funcionar ya que la mayoría de los taladros no llega a realizarse según el diseño y como consecuencia en el momento de la detonación no genera el plano de falla para marcar el talud.

Ante esta situación, se deben implementar soluciones innovadoras. Una de ellas es el uso de explosivos de baja densidad (Flexigel) y el rediseño de la malla de perforación específicamente en los taladros de buffer y primera de producción, puntos críticos para el control de talud en cuanto a campo cercano. Esta técnica permitiría disminuir vibraciones, reducir daños estructurales en la roca por energía de explosivo y mejorar el cumplimiento del diseño, sin afectar la fragmentación necesaria para la continuidad de la operación minera. En definitiva, no llegar al talud de diseño en estas condiciones no es un tema menor. Es un problema que afecta a toda la mina en términos de seguridad y productividad. Y es que cuando se trata de una roca con bajo RQD y UCS, depender de métodos convencionales como el precorte, tiempos y reducción de carga ya no es suficiente; se necesitan nuevas estrategias que garanticen resultados más fiables y seguros, con bases técnicas en estudios de campo cercano.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar el uso de un explosivo de baja densidad en taladros de buffer, junto con el rediseño de la malla de perforación, con el propósito de optimizar el wall control de taludes sin comprometer la fragmentación del material en una unidad minera de cobre a cielo abierto ubicada en el sur del Perú.

1.2.2. Objetivos específicos

- Optimizar la distribución de carga en los taladros de buffer mediante el uso de Flexigel, con el fin de reducir el daño en la pared del talud.
- Mantener o mejorar los resultados de fragmentación en la zona del buffer y la productividad operativa, garantizando la continuidad del proceso minero al aplicar un explosivo de baja densidad.

- Reducir la generación de gases nitrosos durante las voladuras, promoviendo voladuras más limpias y seguras para el personal en mina.

1.3 *Pregunta de investigación*

1.3.1. Pregunta general

¿De qué manera el uso de un explosivo de baja densidad, aplicado en taladros, puede optimizar el wall control de taludes sin afectar la fragmentación en una unidad minera de cobre a cielo abierto en el sur del Perú?

1.3.2. Preguntas específicas

- ¿Cómo influye la aplicación de Flexigel en la distribución de carga en los taladros de buffer respecto al control del talud final?
- ¿De qué manera el uso de Flexigel permite mantener o mejorar la fragmentación y la productividad de la operación minera?
- ¿En qué medida la aplicación de un explosivo de baja densidad contribuye a reducir la generación de gases nitrosos durante la voladura, mejorando así la seguridad del personal en mina?

1.4 *Línea de investigación*

La presente tesis se enmarca en la línea de investigación de **Optimización de Procesos Mineros y Seguridad Minera**, dado que propone el uso de un explosivo de baja densidad (Flexigel) en combinación con un rediseño de la malla de perforación para optimizar el control de taludes en minería a cielo abierto. Este enfoque busca no solo mejorar la eficiencia del proceso de voladura y mantener la fragmentación requerida, sino también incrementar la seguridad operativa

al reducir vibraciones, minimizar la generación de gases nitrosos y disminuir los riesgos asociados a la inestabilidad de taludes.

1.5 *Palabras clave*

Flexigel, Wall Control, perforación, voladura, fragmentación, DigRate, gases NOx, campo cercano.

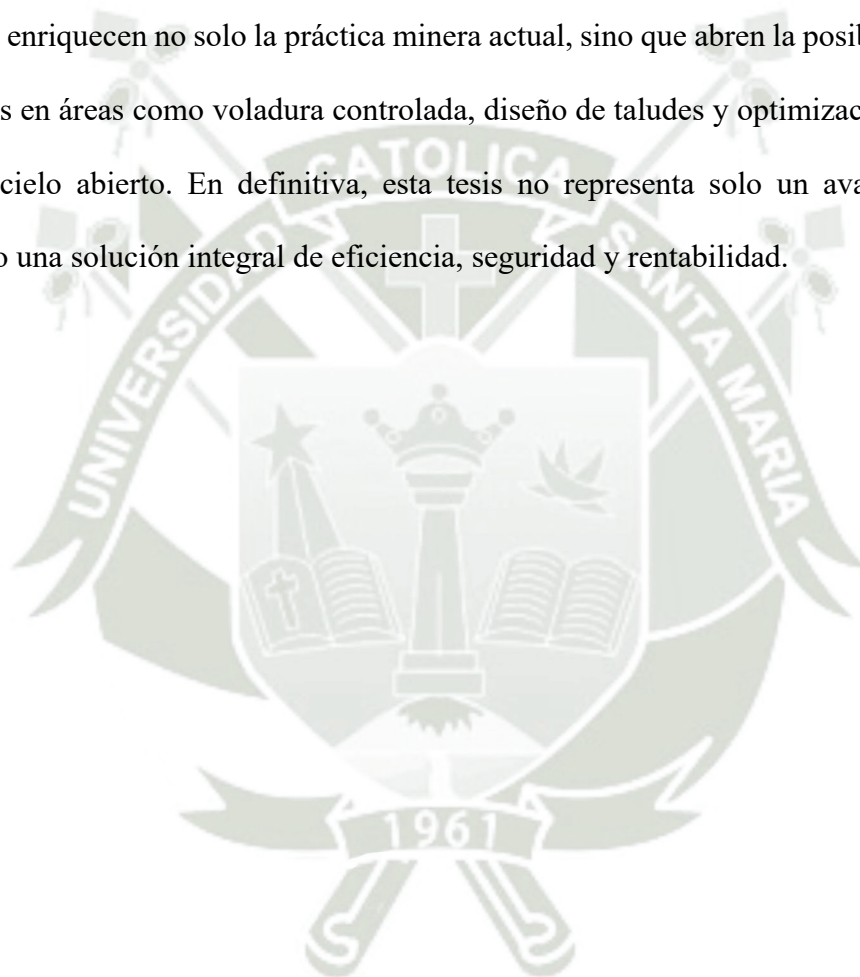
1.6 *Aporte del desarrollo de tesis*

Elaborar esta tesis es una contribución para mejorar procesos mineros y la seguridad en minas a cielo abierto. Y es que propone una solución técnica innovadora ante las restricciones que hoy presentan formas convencionales de control de taludes, en rocas con $RQD < 40\%$ y $UCS < 40$ MPa, donde dejan de ser efectivas. Primero, la **contribución técnica** se basa en el uso de un explosivo de baja densidad, Flexigel, en los taladros, y en el rediseño de la malla de perforación. Esta mezcla reduce a su mínima expresión el daño a la pared del talud, mejora el control geotécnico y mantiene la fragmentación suficiente para no interrumpir el proceso minero. Lo bueno de esta iniciativa es que no se queda en un caso aislado, sino que proporciona un modelo replicable en otras etapas del tajo e incluso en otras minas con condiciones geomecánicas similares.

En segundo lugar, el beneficio económico, que no es poco. Taludes mal diseñados obligan a dejar bermas más anchas de lo necesario, bancos abajo, imposibilitando llegar al pit óptimo. En la práctica, esto se traduce en dejar mineral, a menudo de alta ley, y por lo tanto sacrificar rentabilidad. Con taludes más estables se disminuye ese riesgo, se optimizan los recursos y, por lo tanto, se logra una operación más rentable. Por otro lado, la **contribución en seguridad** minera es esencial. Disminuir vibraciones y minimizar la generación de gases nitrosos en la voladura

significa mejorar el control técnico y generar condiciones de trabajo más seguras para el personal. Esto reduce la posibilidad de desprendimientos y accidentes y fortalece la cultura preventiva en mina, creando condiciones más seguras para quienes se encuentran en la línea de fuego.

Finalmente, está la **contribución académica y científica**. Esta investigación expande el conocimiento sobre el uso de explosivos de baja densidad en ambientes geomecánicos complejos. Los resultados enriquecen no solo la práctica minera actual, sino que abren la posibilidad a futuras investigaciones en áreas como voladura controlada, diseño de taludes y optimización de procesos en minería a cielo abierto. En definitiva, esta tesis no representa solo un avance técnico en voladuras, sino una solución integral de eficiencia, seguridad y rentabilidad.



Capítulo II

2. Fundamentos teóricos

2.1 *Antecedentes de la investigación*

2.1.1. Antecedentes internacionales

- La tronadura no solo produce la fragmentación del macizo rocoso, sino que también genera efectos asociados como vibraciones del terreno, ondas aéreas y proyecciones de roca, los cuales pueden afectar la estabilidad de taludes y estructuras próximas cuando no se controlan adecuadamente. La magnitud y comportamiento de estos fenómenos dependen de distintos factores vinculados tanto a la energía liberada como a las condiciones geológicas del medio, ya que la propagación de las ondas varía según la homogeneidad del macizo, la presencia de fracturas, zonas alteradas o estructuras geológicas complejas. Del mismo modo, a medida que las vibraciones se alejan del punto de detonación, su intensidad disminuye por efecto de la atenuación natural del terreno; sin embargo, este proceso debe evaluarse con especial atención en zonas sensibles o alejadas de la fuente. Asimismo, la intensidad vibratoria está directamente influenciada por la cantidad de carga detonada, la secuencia de disparo, los tiempos de retardo y las variables geométricas del diseño de voladura, como el burden y el espaciamiento entre taladros, debido a que estos parámetros condicionan la distribución de la energía dentro del macizo rocoso. En ese sentido, el control de la vibración no depende únicamente de reducir la cantidad de explosivo, sino de ajustar de manera precisa su distribución y aplicación de acuerdo con las características del terreno, ya que una reducción del consumo específico sin un rediseño adecuado puede generar un confinamiento excesivo e incluso incrementar la respuesta vibratoria. En conjunto, la adecuada comprensión e integración de estos factores permite optimizar la

voladura, reducir sus efectos colaterales y mejorar las condiciones de seguridad y eficiencia operativa **Diaz. (2021)**

- El diseño adecuado de los taludes constituye un aspecto fundamental no solo para garantizar la estabilidad física de una operación minera, sino también para asegurar su sostenibilidad económica en el largo plazo. Las desviaciones respecto a los parámetros de diseño pueden repercutir directamente en el valor del proyecto y en la seguridad del personal, especialmente cuando las voladuras no son ejecutadas bajo criterios de control rigurosos. Asimismo, la tronadura influye de manera determinante tanto en la fragmentación del material como en la integridad del macizo rocoso, por lo que un diseño eficiente, acompañado de una adecuada ingeniería y una ejecución precisa, puede marcar la diferencia entre una condición estable y un escenario de riesgo. En ese contexto, el análisis desarrollado en la mina Los Colorados, ubicada en la Franja de Hierro Chilena y asociada a un entorno geológico complejo influenciado por la Falla de Atacama, permitió evidenciar que las características estructurales del macizo rocoso, tales como la presencia de fracturas, brechas, disseminaciones, un RQD bajo, una resistencia a compresión uniaxial aproximada de 11,5 MPa y densidades menores a 2,0 g/cm³, condicionan de manera importante la respuesta del terreno frente a las voladuras. A partir de la evaluación de 92 eventos de voladura en distintos bancos, se identificó que variables como la dirección de salida, la frecuencia, la velocidad de partícula y la cantidad de explosivo influyen directamente en los desplazamientos registrados mediante extensómetros instalados en grietas activas. Los resultados mostraron que las voladuras dirigidas hacia estructuras desfavorables provocaron mayores desplazamientos, mientras que aquellas ejecutadas con secuencias adecuadamente planificadas redujeron significativamente la respuesta del

terreno. Además, se determinó que las frecuencias bajas generaron menores daños y que las cargas excesivas incrementaron la vibración y el riesgo de activación de fallas. En consecuencia, se concluye que el control riguroso de los parámetros de voladura, integrado con criterios geotécnicos, constituye una condición esencial para preservar la calidad del macizo rocoso, prevenir desplazamientos y fallas en los taludes, y mejorar la seguridad, la productividad y la sostenibilidad de la operación minera **(Salvador & Vergara, 2015)**.

- El control de las vibraciones generadas por las voladuras constituye uno de los desafíos más importantes en la operación minera, debido a que, aunque estas son necesarias para la fragmentación del material y están relacionadas con el tipo de explosivo empleado, también pueden comprometer la estabilidad del macizo rocoso y afectar zonas críticas del talud. Estas vibraciones se propagan a través del terreno y, aunque en algunos casos sus efectos no son perceptibles de manera inmediata, su impacto acumulativo puede alterar el equilibrio interno de bloques rocosos, especialmente cuando las ondas alcanzan estructuras inestables, diaclasas o planos de falla, reduciendo el coeficiente de fricción entre ellas. En los campos lejanos, donde la señal vibratoria tiende a atenuarse con mayor rapidez, el grado de fracturamiento y las características geológicas del macizo adquieren una importancia determinante, ya que en materiales muy alterados o arcillosos la energía se disipa más rápidamente, mientras que en rocas más competentes puede propagarse a mayores distancias. Asimismo, se plantea que los modelos tradicionales de predicción de vibraciones presentan limitaciones, dado que se sustentan principalmente en parámetros empíricos, como la carga detonada por intervalo, los cuales brindan una aproximación general, pero no permiten explicar con precisión la distribución real de la energía en el macizo rocoso ni responder adecuadamente a la variabilidad geomecánica de cada

operación. En ese sentido, se destaca la necesidad de abordar este fenómeno desde una perspectiva integral que combine fundamentos teóricos, observación y medición en campo. Bajo esta lógica, experiencias desarrolladas en operaciones como Minera Spence evidencian que ajustes en el diseño de perforación y tronadura, tales como modificaciones en el espaciamiento, el factor de carga o los tiempos de retardo, pueden reducir de manera significativa el daño al talud y mejorar su estabilidad sin afectar la productividad. De este modo, el control de vibraciones no solo contribuye a la protección del macizo rocoso, sino también a la reducción de impactos sobre instalaciones cercanas y sobre el entorno de la operación, consolidando a las voladuras controladas como una herramienta fundamental para equilibrar productividad, seguridad y sostenibilidad en la minería moderna (**Bravo, 2018**).

2.1.2. Antecedentes nacionales

- Las vibraciones generadas por la voladura de rocas constituyen un aspecto crítico dentro de la operación minera, debido a que pueden ocasionar daños en estructuras, generar molestias en la población cercana e incluso comprometer la estabilidad del terreno. Estas vibraciones se originan por la propagación de ondas a través del macizo rocoso luego de la detonación de las mezclas explosivas, por lo que su medición y control resultan esenciales para garantizar una operación segura. En ese contexto, la velocidad pico de partícula (PPV) se presenta como un parámetro de referencia útil para cuantificar la energía transmitida por las ondas y evaluar su efecto en distintos escenarios de voladura. A partir de mediciones y ensayos realizados en campo, se desarrolló un modelo predictivo que permitió relacionar variables como la carga por retardo, la distancia, el tipo de roca y la energía liberada,

lo que facilitó la optimización del diseño de voladura sin exceder los límites establecidos por normativas internacionales. En los sectores evaluados, particularmente en la litología Dolerita Toquepala, se determinó que un incremento de 100 kg de explosivo podía elevar la PPV en aproximadamente 12 mm/s, alcanzando valores cercanos al límite crítico de vibración, razón por la cual se ajustó la carga operante a 1700 kg de mezcla explosiva para mantener el proceso dentro de rangos aceptables. Asimismo, se evidenció que factores como el tipo de roca, la distribución del explosivo, la geometría de los taladros y la anisotropía del macizo interactúan de manera compleja, lo que exige adaptar continuamente el diseño de voladura a las condiciones geomecánicas reales observadas en campo. En consecuencia, se concluye que el monitoreo permanente, la validación continua de los modelos predictivos y la participación de personal calificado son elementos fundamentales para controlar las vibraciones, mejorar la fragmentación, preservar la integridad de las estructuras y fortalecer la seguridad y sostenibilidad de la operación minera **(Paquera, 2021)**.

- La velocidad pico de partícula crítica (VPPC) constituye un parámetro fundamental para controlar los efectos de las voladuras sobre el macizo rocoso y preservar la estabilidad del terreno. En el yacimiento Toquepala, la evaluación integrada de estudios geofísicos, geotécnicos y de refracción sísmica permitió identificar diferencias en el comportamiento vibracional según la litología, el grado de alteración y la calidad del macizo. Los resultados mostraron que ciertas formaciones presentaron menores valores de VPPC, mientras que zonas intrusivas de mejor competencia alcanzaron valores más altos, evidenciando una mayor

capacidad de transmisión de energía. A partir de estos hallazgos, se elaboró una zonificación sísmica y se propusieron ajustes en la carga explosiva y en la secuencia de disparo, con el fin de optimizar la fragmentación sin comprometer la estabilidad de los taludes. En consecuencia, se concluye que el conocimiento del comportamiento vibracional del terreno constituye una herramienta clave para mejorar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad de la operación minera **(Nina, 2019)**.

- La comparación entre los agentes explosivos HA 64 y ME Quantex 73 permitió evaluar su desempeño en función de los parámetros de diseño, la calidad de fragmentación y el impacto económico en los proyectos de voladura 3880 y 3900. En una cantera con macizo rocoso clasificado como roca de buena calidad y de alta resistencia a compresión uniaxial, se determinó que el explosivo ME Quantex 73 requería una densidad entre 1.10 y 1.15 g/cc para alcanzar un rendimiento óptimo. A partir de estas condiciones, se definieron mallas de perforación específicas para cada banco, lo que permitió ajustar de manera más precisa el diseño de carga. Los resultados de fragmentación evidenciaron que el ME Quantex 73 alcanzó un P80 de 114.3 mm, mostrando una distribución granulométrica más fina y homogénea que la obtenida con el HA 64. Asimismo, este explosivo generó ahorros económicos por taladro en ambos bancos evaluados, demostrando que una adecuada selección del explosivo y un diseño técnico bien ajustado pueden mejorar el control de la fragmentación, optimizar la operación y reducir costos sin comprometer la productividad ni la seguridad **(Mendoza, 2021)**.

2.2 Bases teóricas

2.2.1. Diseño de malla de perforación

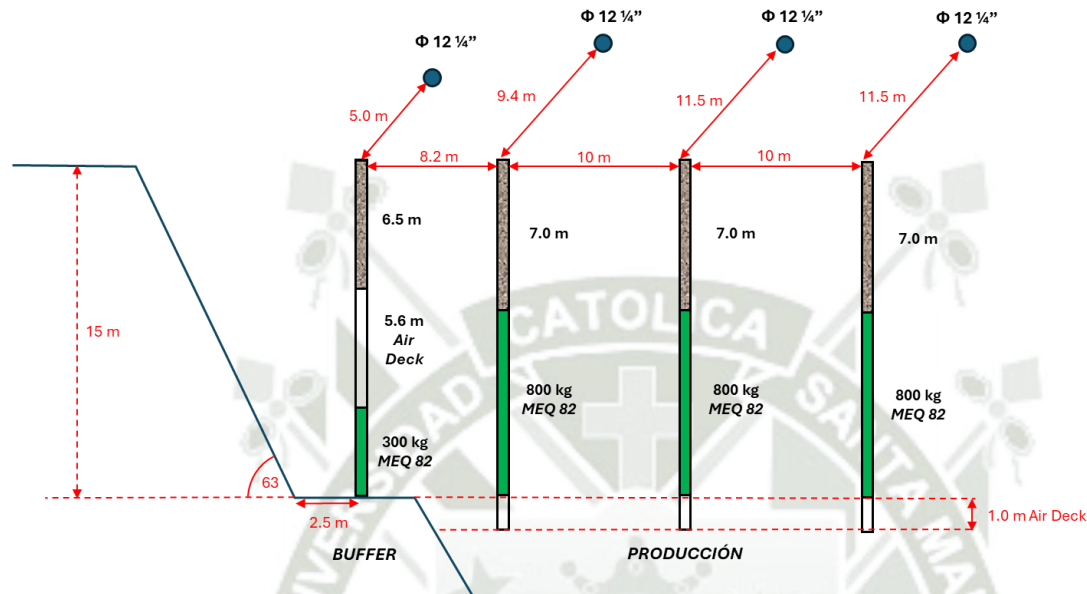
La malla de perforación establece el patrón geométrico de los taladros y juega un papel esencial en el rendimiento de la voladura a cielo abierto. Generalmente, se utilizan mallas triangulares equiláteras, ya que distribuyen de manera más eficiente la energía liberada, logrando una fragmentación uniforme y un mejor aprovechamiento del material. El tipo de malla depende de las condiciones geomecánicas del banco y del objetivo de la voladura. Dentro del diseño, los parámetros principales son el burden, que marca la distancia entre la cara libre y la primera fila de taladros; el espaciamiento, que define la separación entre taladros en una misma fila; y la profundidad de perforación, determinada por la altura del banco y el subdrill, encargado de evitar pisos irregulares tras la voladura. En esta investigación se tomaron como línea base los siguientes parámetros:

- Diámetro de perforación: 12¼"
- Altura de taladro en buffer: 15 m
- Altura de taladros de producción: 16 m
- Burden × Espaciamiento en producción: 10 m × 11.5 m
- Burden × Espaciamiento en buffer: 8.2 m × 5 m
- Offset respecto al toe: 2.5 metros.

Estos valores sirven como punto de partida para los ajustes de campo y las pruebas piloto que nos permitirán optimizar el diseño final, importante aclarar que este diseño es únicamente para la fase 08, con litología diorita con características geomecánicas de RQD entre 35% a 40% y UCS menor a 40 Mpa.

Figura 1.

Diseño de malla de perforación.



Nota: En la imagen se presenta el diseño de perforación correspondiente a la litología diorita, el cual servirá como línea base de referencia para el desarrollo del estudio.

2.2.2. Voladura

Famesa explosivos nos indica que la voladura es una etapa clave dentro de las operaciones mineras, especialmente en minería a cielo abierto, ya que permite fragmentar grandes volúmenes de material de manera eficiente y segura. Este procedimiento involucra varias fases: perforación de taladros, carga con explosivos, conexión del sistema de iniciación y finalmente la detonación. La verdad es que una voladura bien diseñada no solo mejora la fragmentación, sino que también optimiza el uso de equipos de carguío y acarreo, reduce costos operativos y contribuye a mantener la estabilidad de los taludes. Además, su éxito depende de un equilibrio entre factores técnicos y geológicos, como el tipo de roca, la densidad del explosivo, el diseño de la malla y el control de vibraciones. En resumen, la voladura es mucho más que “romper roca”: es una técnica de

ingeniería precisa que transforma la energía almacenada en resultados productivos y seguros.

(Famesa Explosivos, 2019)

Figura 2

Proceso de voladura



Nota: En la imagen se aprecia el proceso de voladura convencional aplicado en una unidad minera a tajo abierto.

2.2.3. Tipos de explosivos

2.2.3.1. *Explosivos gasificados Quantex 82*

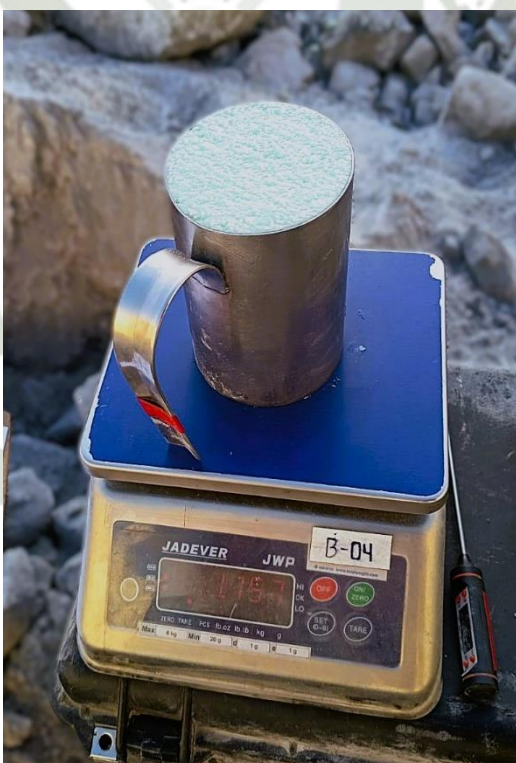
En los últimos años, la mayoría de las operaciones mineras a cielo abierto han incorporado el uso de explosivos gasificados, derivados principalmente de los *Heavy ANFO*. Estos productos incorporan nitrito de sodio (NaNO_2) como agente gasificante; dicho aditivo favorece la generación de múltiples puntos calientes durante la reacción, lo que mejora la eficiencia y el rendimiento de

la detonación. Como resultado, la mezcla alcanza una mayor energía de expansión, constituyéndose en una alternativa eficaz para la fragmentación del macizo rocoso.

La formulación evaluada en este estudio corresponde a Quantex 82, compuesta por 80 % de emulsión gasificable (SlurrexG) y 20 % de ANFO grado técnico (Quantex). Para las pruebas, la dosificación de nitrito de sodio aplicada por los camiones fábrica se fijó en 0,3 % —un valor que permite una gasificación adecuada sin comprometer la estabilidad fisicoquímica de la mezcla— y que, además, posibilita alcanzar una densidad final objetivo de 1,15 g/cc.

Figura 3

Mezcla explosiva Quantex82



Nota: En la imagen se puede observar la forma en que se mide la gasificación del explosivo durante el inicio del carguío de los taladros.

2.2.3.2. *Flexigel o explosivo de baja densidad*

El Flexigel, o explosivo de baja densidad, es un explosivo a granel a base de emulsión pura que se mezcla con sensibilizadores sólidos de poliestireno expandido. Uno de los principales beneficios de su aplicación es la posibilidad de operar a distintas densidades, desde 0,6 hasta 1,1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, lo que lo hace idóneo para rocas de baja competencia o voladuras que requieren un control más exhaustivo. Su velocidad de detonación varía entre 2 500 m/s y 4 500 m/s, en función de la densidad. Además, aporta beneficios como la reducción de la vibración asociada a la voladura y la mitigación de los gases nitrosos. La densidad se ajusta según la cantidad de sensibilizador empleado; en el presente caso de estudio, debido a la mínima presencia de agua en los taladros, se trabajó con un Flexigel de densidad 1,0 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Flexigel 100).

Figura 4

Explosivo de baja densidad o Flexigel 100



Nota: En la imagen se puede apreciar una mezcla explosiva conformada por emulsión matriz y poliestireno expandido, con una densidad de 1,0 g/cc^3 .

2.2.4. Conciliación geotécnica o Wall Control

La conciliación geotécnica constituye una herramienta relevante en minería moderna para evaluar la estabilidad de taludes y verificar el nivel de correspondencia entre la superficie diseñada y la superficie obtenida en campo. Su aplicación permite comparar de manera objetiva ambas geometrías y cuantificar el grado de coincidencia entre lo planificado y lo ejecutado, proporcionando una evaluación más precisa del desempeño geométrico alcanzado. Además de su uso en el control de taludes, esta metodología ha comenzado a aplicarse en la evaluación de voladuras, con el propósito de analizar en qué medida el diseño de la malla de perforación logra los resultados esperados en términos de fragmentación y perfil final del banco. Bajo este enfoque, la conciliación geotécnica aplicada a voladuras no se limita a la comparación de perfiles, sino que incorpora indicadores de desempeño orientados a medir las diferencias entre la superficie real y la planificada. Para ello, se plantean mejoras metodológicas como la eliminación del perfil conciliado, debido a los errores que puede introducir, y el uso de mapas de colores para representar visualmente las distancias entre ambas superficies. Esta representación facilita la identificación de zonas con desviaciones, sobre excavación o incumplimiento del diseño, constituyendo una base técnica útil para ajustar futuros esquemas de perforación y voladura **(GeoBlast S.A., 2010)**.

En resumen, la conciliación geotécnica aplicada a voladuras representa una evolución natural de la ingeniería minera hacia un enfoque más analítico y preciso. Además de optimizar los resultados operativos, permite reducir costos, mejorar la seguridad y fortalecer la toma de decisiones técnicas mediante información objetiva y verificable. Es, en definitiva, una herramienta que conecta la teoría del diseño con la realidad del terreno, aportando claridad y control a cada etapa del proceso minero.

A continuación, indicaremos los criterios que se utilizaron para calcular el % de cumplimiento de talud.

$$WC = \%CB(0.35) + \%BFA(0.30) + \%LP(0.35)$$

$$\%CB = \frac{CBR}{CBD}$$

$$\%BFA = \frac{BFAR}{BFAD}$$

$$\%LP = \frac{CBD - |LPR - LPD|}{CBD}$$

Donde:

WC : Wall Control

%CB : Cumplimiento Ancho de Banco

%BFA: Cumplimiento Ángulo de Talud

%LP : Cumplimiento Línea Programa

CBR : Ancho de Banco Real

CBD : Ancho de banco diseño

BFAR : Ángulo de talud real

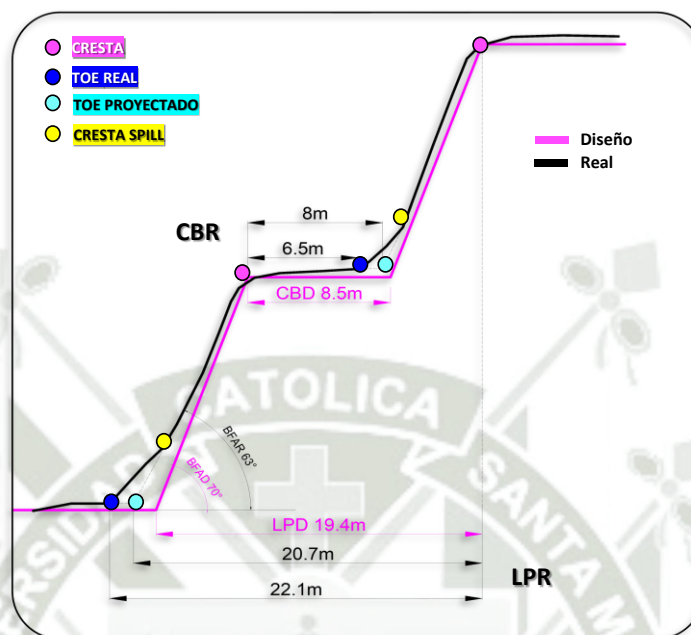
BFAD : Ángulo de talud diseño

LPR : Línea de Programa Real

LPD : Línea de Programa Diseño

Figura 5.

Representación de conciliación geotécnica.



Nota: La imagen muestra de forma detallada cómo se representa visualmente el cumplimiento de los taludes, permitiendo identificar con claridad las áreas que se ajustan o se desvían del diseño original.

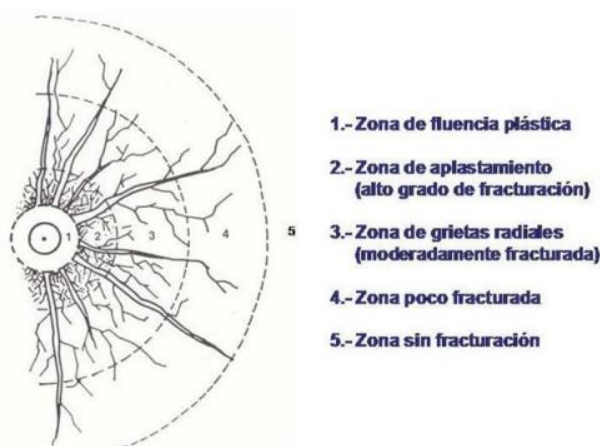
2.2.5. Proceso de fragmentación de la roca

Bernola, Castilla y Herrera (2013) nos indican que el proceso de fragmentación combina la física, geología y la energía contenida en los explosivos. Durante una voladura, se distinguen dos fases principales. La primera corresponde a la onda de detonación, una descarga de alta velocidad que transmite una enorme presión a la roca, actuando como el “golpe inicial” que inicia su fractura. La segunda fase está marcada por la expansión de los gases calientes generados por el explosivo, que terminan de abrir y desplazar los fragmentos formados. Cuando el explosivo se encuentra confinado dentro de un barreno, la onda de detonación se propaga a través de la masa rocosa con velocidades que pueden alcanzar entre 3.000 y 5.000 m/s. En un primer instante, la

roca sufre una compresión extrema, pero al pasar la onda, esa presión se transforma en tracción, lo que favorece la aparición de fisuras y el inicio del proceso de rotura. La verdad es que este cambio de esfuerzo —de compresión a tracción— es el corazón del mecanismo de fragmentación. Además, el fenómeno no ocurre igual en todas las condiciones. Si la roca es dura o frágil, como una cuarcita, responde muy bien a la onda de choque, generando fisuras amplias y fragmentos definidos. Por el contrario, una roca blanda y elástica tiende a absorber parte de la energía, lo que reduce la eficacia de los gases y limita la extensión de la fractura. También influye la existencia de una cara libre cercana al barreno, pues allí la onda se refleja y amplifica, provocando un desmenuzamiento más intenso y aumentando el radio de rotura. En síntesis, la fragmentación de la roca durante una voladura no es solo cuestión de energía, sino de equilibrio: la interacción entre la velocidad de detonación, la resistencia del macizo y las condiciones de confinamiento define si el resultado será una rotura eficiente o una roca apenas agrietada.

Figura 6

Tipos de fisuras durante el proceso de detonación.



Nota: La presente imagen muestra una recreación del comportamiento del macizo rocoso durante el proceso de voladura, ilustrando las fracturas que se generan alrededor del taladro en el momento de la detonación. Esta representación fue citada por López, Jimeno (2003)

2.2.6. Tasa de excavación o DigRate

La tasa de excavación —también conocida como *DigRate*— representa el rendimiento real que alcanza una pala o equipo de carguío cuando trabaja en condiciones ideales. Es, en esencia, uno de los indicadores clave (KPI) más observados en minería, pues refleja cuántas toneladas por hora puede mover el equipo y, con ello, qué tan eficiente resulta el frente de minado.

Ahora bien, aunque solemos asociar su desempeño principalmente a la fragmentación del material, lo cierto es que intervienen varios factores más. Por ejemplo, la altura del frente de carguío, el ancho de minado o incluso la geometría del terreno cuando se trabaja en rampa o contra rampa. Cada uno de estos elementos puede alterar, de forma sutil pero significativa, el comportamiento del KPI.

En el contexto de esta tesis, sin embargo, se ha decidido mantener todos esos parámetros dentro de condiciones óptimas. El objetivo es aislar una sola variable: la fragmentación, especialmente bajo el uso de un explosivo de baja densidad. Lo que buscamos es comprobar que, aun modificando la naturaleza del explosivo, el *digrate* se mantenga estable —o incluso mejor— sin comprometer ni la fragmentación del material ni las condiciones operativas del frente.

2.2.7. Gases NO_x por voladura

Según el Código de Práctica del Grupo de Seguridad de la Industria de Explosivos de Australasia (AEISG), la gestión de gases nitrosos (NO_x) en voladuras es un tema que va mucho más allá de un simple control visual: representa una cultura de prevención y responsabilidad

ambiental profundamente arraigada en la minería australiana. Este código establece una escala de severidad que va del nivel 0, donde no hay presencia visible de gases, hasta el nivel 5, que refleja el escenario más grave, con emisiones densas y peligrosas. Esta clasificación no solo facilita evaluar la magnitud de los gases, sino que también permite actuar con rapidez y precisión frente a cualquier incidente. La verdad es que los NO_x aparecen cuando la detonación no se completa correctamente, algo que suele ocurrir por el uso de explosivos inadecuados (como ANFO en zonas húmedas), una iniciación deficiente o condiciones geológicas complicadas, como grietas o presencia de agua.

Por eso, el AEISG recomienda utilizar emulsiones resistentes al agua, asegurar una buena sincronización de los retardos, y mantener un confinamiento adecuado para que la energía del explosivo se libere por completo. Además, insiste en la capacitación constante del personal, pues identificar a tiempo la presencia de gases puede marcar la diferencia entre un evento controlado y una emergencia.

En situaciones críticas —niveles 4 o 5—, el protocolo exige evacuación inmediata, monitoreo del aire y atención médica para los trabajadores expuestos, ya que el dióxido de nitrógeno (NO₂) puede causar graves daños respiratorios. En resumen, este código refleja una filosofía que combina técnica, conciencia ambiental y cuidado humano, buscando que cada voladura sea no solo eficiente, sino también segura y respetuosa con su entorno.

Figura 7.

Escala de valoración de gases NOx

Nivel	Apariencia típica
NIVEL 0: Gases nitrosos NOx	
Nivel 1: Gases nitrosos NOx leves	
1A: Localizado	
1B: Medio	
1C: Extensa	
Nivel 2: Amarillo / gas naranja	
2A: Localizado	
2B: Medio	
2C: Extensa	
Nivel 3: gases naranjas	
3A: Localizado	
3B: Medio	
3C: Extensa	
Nivel 4: naranja/gases rojos	
4A: Localizado	
4B: Medio	
4C: Extensa	
Nivel 5: Rojo/gases púrpura	
5A: Localizado	
5B: Medio	
5C: Extensa	

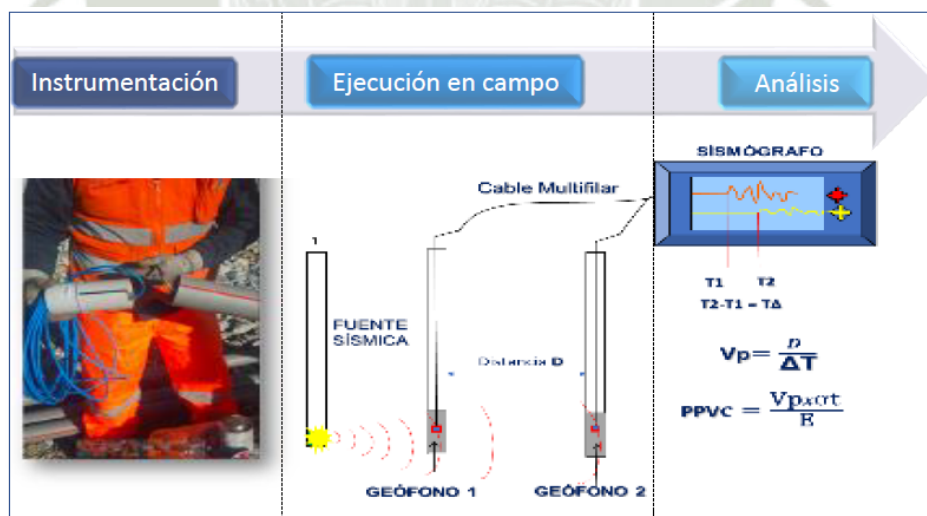
Nota: Esta tabla permite evaluar la intensidad de coloración y la extensión de los gases nitrosos (NOx) generados durante la voladura, ofreciendo una referencia visual para determinar su dispersión y severidad dentro de toda el área intervenida. Fuente (AEISG, 2017).

2.2.8. Estudio de campo cercano

El estudio en campo cercano permite caracterizar con mayor precisión el comportamiento real del macizo rocoso frente a la voladura, sin basarse únicamente en supuestos generales de litología. A través del análisis de la VPP crítica y su relación con el daño inducido, es posible establecer límites vibracionales bajo los cuales el talud no sufre deterioro apreciable. Esta información sirve para ajustar variables de diseño como densidad de carga, retardo entre taladros y secuencia por filas. Además, el uso de técnicas como el Cross Hole aporta datos de velocidad de ondas y propiedades mecánicas en profundidad, lo que ayuda a modelar la transmisión de energía alrededor del frente de carga. Con la combinación de mediciones in situ, parámetros geomecánicos y modelos como el de Holmberg & Persson, se puede optimizar la malla de perforación y carguío, minimizando el daño estructural en el talud y preservando la estabilidad del talón adyacente.

Figura 8

Técnica sísmica de Cross Hole



Nota: En la imagen se aprecia, de manera secuencial, el conjunto de pruebas que deben ejecutarse en campo para determinar la VPPc con precisión.

2.2.9. Densidad lineal del explosivo

La densidad lineal del explosivo representa la cantidad de masa de explosivo, en kilogramos, que se aloja en un metro de longitud de la columna de carga del taladro. Este parámetro está directamente vinculado con la densidad volumétrica del explosivo y el diámetro del taladro, relación que se expresa mediante la siguiente fórmula.

$$Densidad\ Lineal = 0.507 * Diametro\ taladro\ (pulg)^2 * Densidad\ Explosivo$$

2.3 Hipótesis

2.3.1. Hipótesis general

El uso de un explosivo de baja densidad (Flexigel), aplicado en los taladros de buffer, acompañado de un rediseño de la malla de perforación, permite optimizar el control de taludes en roca con bajo RQD y UCS, reduciendo el daño inducido y manteniendo los niveles de fragmentación y productividad requeridos en una unidad minera de cobre a cielo abierto en el sur del Perú.

2.3.2. Hipótesis específica

- El rediseño de la malla con Flexigel permite mantener o incluso mejorar la fragmentación del material sin afectar la productividad.
- El uso de explosivo de baja densidad contribuye a la reducción de gases nitrosos, generando voladuras más seguras para el personal en mina.

2.4 Variables

Tabla 1.

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Sub Indicadores
Variable independiente	Tipo Explosivo (Flexigel, HA80/20)	Densidad	g/cc ³
		Densidad Lineal	Kg/m
		VOD	m/s
	Diseño de malla	Burden	m
		Espaciamiento	m
		Altura de taladro	m
Variable Dependiente	Wall Control	Cumplimiento de diseño	%
	Over break	Sobre rotura	m
	Umbral de daño	ppv	mm/s
	Fragmentación	P80	pulg
	Gases nitrosos	Dióxido de Nitrógeno	ppm

Nota: En esta tabla se detallan las variables que se trabajarán en la presente tesis de investigación.

Capítulo III

3. Marco metodológico

3.1 Alcances de la investigación

La presente tesis se desarrollará en una unidad minera a cielo abierto ubicada en el sur del Perú, específicamente en el distrito de Espinar, Cusco. El propósito principal de esta investigación es encontrar una oportunidad real de mejora en el diseño de las paredes del tajo, de modo que el resultado en campo se ajuste fielmente a lo planificado. Esto cobra relevancia porque cuando el talud no se cumple con el diseño objetivo, se generan banquetas más anchas en los bancos inferiores, lo que implica perder material valioso y en consecuencia reducir la eficiencia global de la operación.

La solución que aquí se propone es aborda dicho problema sin dejar a un lado cuestiones igualmente importantes: no sacrificar la fragmentación del material, prevenir la generación de gases nitrosos y, sobre todo, hacer más segura la mina. Y es que un deslizamiento de talud no solo implica retrasos y sobre costos, sino que puede acabar con una vida y destruir equipos pesados y ligeros en segundos.

Para probar la hipótesis, se realizarán voladuras con un explosivo de baja densidad denominado Flexigel sobre una muestra de aproximadamente 200 toneladas (380 taladros) en la Fase 8, donde predomina la roca diorita ($UCS \approx 40$ MPa y RQD entre 35% y 40%). Dichas pruebas se realizarán en un plazo de 30 días calendario, tiempo suficiente para medir después de la voladura parámetros como cumplimiento de talud, fragmentación, gases NOx y DigRate.

Finalmente, se hará una comparación entre la línea base actual y los resultados alcanzados utilizando Flexigel para verificar de manera objetiva su efectividad y potencial replicabilidad en las futuras etapas del tajo.

3.2 *Limitaciones de la investigación*

Como todo trabajo aplicado en campo esta investigación también tiene ciertos límites que es necesario dejar claros desde el inicio. En primer lugar, el estudio se desarrollará únicamente en la **Fase 8 del tajo**, donde la litología predominante es la **diorita**, la cual está caracterizada por un **RQD entre 35% y 40%** y una **UCS menor a 40 MPa**. Esto significa que los resultados no necesariamente podrán extrapolarse de manera directa a rocas más competentes o con condiciones geomecánicas distintas.

En segundo lugar, las pruebas estarán delimitadas a un periodo de **30 días calendario** y a una **muestra específica de aproximadamente 200 toneladas (≈380 taladros)** por ello este marco temporal y operativo brinda información representativa para el caso de estudio, aunque no incluye escenarios de mayor escala fuera de las condiciones planteadas.

Otro aspecto para considerar es la influencia de **voladuras aledañas** que se ejecutan de manera simultánea en la mina. Estas pueden generar vibraciones adicionales que alteren en cierta medida el control del talud o la interpretación de resultados sin embargo su influencia es mínima, el factor decisivo sigue siendo la **voladura principal** analizada en este trabajo: la manera en que se distribuye la energía del explosivo en el talud y se ejecuta cada disparo es sin duda lo que más condiciona los resultados de fragmentación, estabilidad y seguridad.

Por último, el enfoque de la investigación está puesto de manera exclusiva en los **taladros de buffer y la primera fila de producción**, pues son los puntos críticos para el control de talud. Esto implica que otras configuraciones de perforación y carga no serán objeto de evaluación dentro de este estudio.

En resumen, las limitaciones aquí descritas no restan valor a la investigación; más bien ayudan a entender con claridad el marco en el que se desarrollará, dejando en claro que, aunque hay factores externos, es la **voladura misma y su interacción con voladuras cercanas** lo que determina en mayor medida el éxito de este trabajo.

3.3 *Aporte de la investigación*

3.3.1. Aporte técnico

- Resalta que tu propuesta ofrece una alternativa concreta al precorte, que en condiciones de baja calidad de roca no funciona bien.
- Señala que con Flexigel más rediseño de malla logras un control de talud más confiable, reduciendo daños y manteniendo fragmentación.

3.3.2. Aporte económico y operativo

- Explica que alcanzar el talud de diseño evita perder mineral de alta ley y maximiza la rentabilidad.
- Puedes añadir que reduce sobrecostos por ensanches innecesarios y mejora la continuidad del minado.

3.3.3. Aporte en seguridad y sostenibilidad

- Destaca que reducir vibraciones y minimizar gases nitrosos protege al personal y el ambiente.
- Esto también fortalece la cultura preventiva en mina.
- Ejemplo: *“Más allá de la rentabilidad, lo valioso es que este estudio propone un método que cuida vidas y crea un entorno de trabajo más seguro.”*

3.3.4. Aporte académico y replicabilidad

- Señala que tu investigación abre camino para futuros estudios sobre voladuras controladas en condiciones geomecánicas adversas.
- Refuerza que el modelo puede aplicarse en otras fases del mismo tajo o en minas con contextos similares.

3.4 *Tipo y nivel de investigación*

La presente investigación se clasifica como **aplicada**, porque busca dar solución a un problema real dentro de la operación minera: mejorar el control de taludes en una litología compleja como la diorita. No se trata únicamente de describir un fenómeno, sino de implementar en campo una propuesta práctica que combina el uso de un explosivo de baja densidad (Flexigel) y un rediseño de la malla de perforación. En ese sentido, el propósito no es solo generar conocimiento, sino también provocar un cambio tangible en la operación, aportando mejoras técnicas y de seguridad.

En cuanto a su **nivel**, corresponde a una investigación **explicativa**, ya que no se limita a señalar si existe o no un beneficio, sino que busca comprender las causas de los resultados obtenidos. Se pretende responder a preguntas como: ¿de qué manera influye la densidad del explosivo en el daño al talud?, ¿por qué la redistribución de la carga reduce vibraciones y mantiene la fragmentación?, ¿cómo estas variables repercuten en la seguridad y en la continuidad del proceso minero?

En resumen, esta tesis se enmarca como una investigación **aplicada y explicativa**, pues parte de un problema práctico en campo, ensaya una solución directamente en la operación y explica las razones detrás de los cambios observados, generando así conocimiento útil y transferible para otras realidades mineras similares.

En resumen, esta tesis se enmarca como una investigación **aplicada y explicativa**, pues parte de un problema práctico en campo, ensaya una solución directamente en la operación y explica las razones detrás de los cambios observados, generando así conocimiento útil y transferible para otras realidades mineras similares.

3.5 Población y Muestra

3.5.1. Población

La población de esta investigación está constituida por todas las voladuras realizadas en la Fase 8 del tajo de la unidad minera a cielo abierto. Esta fase se caracteriza por presentar una litología de diorita, con un RQD entre 35% y 40% y una UCS menor a 40 MPa. Dichas condiciones geomecánicas representan un desafío permanente para alcanzar el talud de diseño, por lo que constituyen el universo de estudio en el cual se enmarca esta investigación.

3.5.2. Muestra

De la población descrita, se seleccionó una muestra específica conformada por aproximadamente 200 toneladas de material, distribuidas en 380 taladros. Esta muestra fue elegida de manera intencional y no aleatoria, ya que corresponde a los taladros de buffer y a la primera fila de producción, considerados los puntos más críticos en el control de talud.

La muestra se ejecutará en un periodo de 30 días calendario, lo que permitirá evaluar de manera representativa las variables clave: cumplimiento del talud, fragmentación, generación de gases NOx y DigRate. De esta forma, se asegura que los resultados reflejen la efectividad de la propuesta bajo condiciones reales de operación.

3.6 *Técnicas e instrumentación para recolección de datos*

3.6.1. Técnica de recolección de datos

La técnica central utilizada en este estudio será la **observación directa en campo** la cual resulta indispensable en investigaciones aplicadas a minería, porque permite registrar fenómenos en el mismo entorno donde se producen. Observar de manera detallada las condiciones del talud después de la voladura y el comportamiento del material fragmentado ofrece información mucho más cercana a la realidad que cualquier simulación de gabinete.

Además de la observación, se aplicará la **técnica comparativa**, cuyo propósito es contrastar dos escenarios: la situación actual (línea base con explosivos convencionales) y la propuesta (uso de Flexigel en taladros buffer y primera fila). Esta comparación permitirá identificar con claridad si los cambios introducidos generan mejoras tangibles, lo que nos permitirá cuantificar la magnitud de esas mejoras.

Por lo que ambas técnicas, al juntarse fortalecen la validez de la investigación, ya que no solo se documentan los hechos tal como ocurren, sino que también se analizan en función de una línea base. Dicho de otra forma: Se observa analiza, mide y luego se pone en perspectiva, para que los resultados sean los más certeros con la realidad.

3.6.2. Instrumento de recolección de datos

Para que la investigación tenga rigor, se seleccionaron instrumentos que permitan **medir variables críticas de forma objetiva**. Cada instrumento cumple un rol específico y aporta datos complementarios, lo cual nos permitirá integralmente evaluar el impacto del uso de Flexigel en la operación.

3.6.2.1. Registro fotográfico y video

Nos sirven como evidencia visual para la evaluación de resultados. Una fotografía no solo documenta la generación de gases nitrosos, sino que también permite realizar análisis posteriores, comparaciones y verificaciones independientes por cada voladura a evaluar.

3.6.2.2. Software de análisis de fragmentación

Split-Desktop 4 transforma las imágenes en información numérica, entregando curvas granulométricas y parámetros estadísticos de la fragmentación.

3.6.2.3. Software de análisis Gconciliation v2

Este software permite realizar la conciliación geotécnica entre lo planificado y lo real ejecutado.

3.6.2.4. Registros operativos de producción

El DigRate será obtenido directamente del área de operaciones mina quien nos proporcionará la información que capture Dispatch. Este indicador nos reflejara si la fragmentación alcanzada impactara de forma positiva o negativa al equipo de carguío.

En conjunto, estos instrumentos aseguran que los datos recopilados no dependan de una sola fuente, sino de una triangulación que refuerza la confiabilidad del estudio.

3.7 Plan de análisis de datos

El análisis de datos se efectuará en varias etapas para poder obtener un análisis más eficiente y certero por lo que se dividieron en los siguientes ítems:

3.7.1. Construcción de la línea base

se recopilarán datos de las voladuras convencionales que servirán como punto de referencia inicial. Esta línea base representa el escenario de cómo se comporta actualmente la operación en términos de fragmentación, cumplimiento de talud, generación de gases y DigRate.

3.7.2. Evaluación de la propuesta con Flexigel

se medirán las mismas variables después de aplicar el explosivo de baja densidad en los taladros seleccionados. Así se asegura que la comparación se haga bajo parámetros homogéneos y no distorsionados por factores externos.

3.7.3. Análisis comparativo

los resultados de ambas fases (línea base y Flexigel) serán contrastados utilizando métodos estadísticos simples pero efectivos: cálculo de promedios, dispersión, gráficas de comparación y, en caso necesario, pruebas de significancia que permitan determinar si las diferencias encontradas no se deben al azar.

3.7.4. Interpretación de resultados

Con los resultados obtenidos, se podrá dar énfasis en explicar **qué significan esas diferencias en la práctica**. Si la conciliación geotécnica mejoró el % de cumplimiento, ¿de qué forma afectará a la operación y qué riesgos asociados disminuirán? ¿De qué manera impactó a la fragmentación en el DigRate y si se evidencia taladros con presencia de NOx en la voladura?

En definitiva, el plan de análisis no busca limitarse a mostrar cifras, sino **convertir los datos en información útil para la toma de decisiones**. Con ello se pretende no solo validar la hipótesis planteada, sino también entregar recomendaciones aplicables a otras fases del tajo o a minas con condiciones geomecánicas similares.

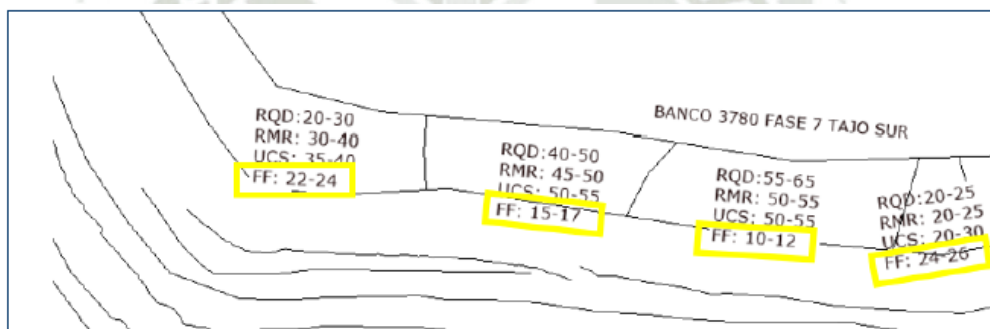
3.8 Desarrollo de la línea base

3.8.1. Línea base wall control

Para definir la línea base del wall control, se trabajó de manera coordinada con los equipos de geotecnia, perforación y voladura, consolidando los resultados de conciliación obtenidos. A partir del levantamiento realizado en campo por el área de geotecnia, se identificaron los valores correspondientes a la frecuencia de fracturamiento para el banco 3780 y porcentaje de cumplimiento.

Figura 9

Frecuencia de fracturas



Nota: La imagen representa las características geomecánicas del macizo rocoso.

En función al levantamiento del porcentaje de cumplimiento por geotecnia nos indica los siguientes resultados:

Tabla 2.

Parámetros de medida para generación de línea base wall control

Parámetros de Medida	%Cumplimiento
Ancho de berma	59%
Angulo de cara de Banco	73%
línea de Programa	60%
Angulo interampa	88%

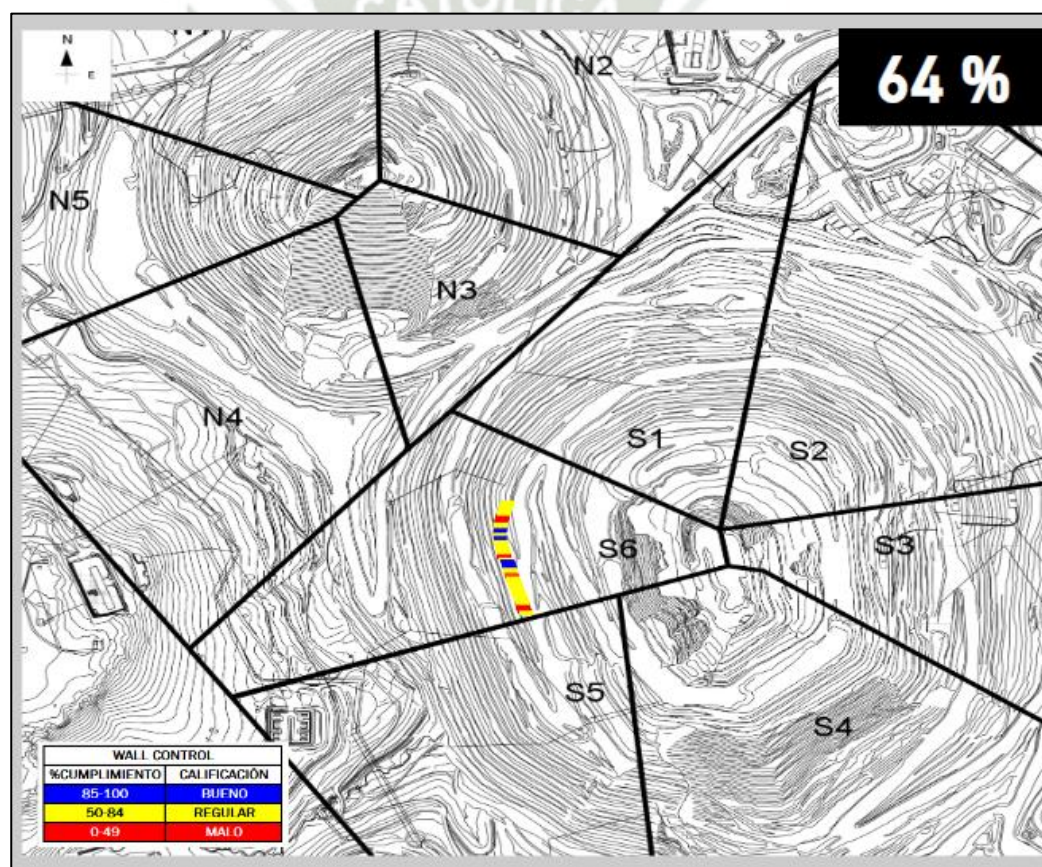
%Cumplimiento Wall Control

64%

Nota: En la tabla se presentan los resultados obtenidos previo al uso del explosivo de baja densidad. Estos valores se consideran como línea base para la posterior comparación de resultados una vez ejecutadas las pruebas.

Figura 10.

Resultados obtenidos por geotécnia software Gconciliation – Línea Base



Nota: En la imagen se presenta el resultado del levantamiento obtenido mediante el software Gconciliation, el cual indica un nivel de cumplimiento del wall control del 64 %, valor que se clasifica dentro del rango Malo–Regular. Este resultado constituye la línea base del presente

estudio y servirá como referencia para la comparación y evaluación de las mejoras alcanzadas con la implementación del nuevo explosivo y la configuración de malla optimizada.

3.8.2. Línea base fragmentación

Se tomo información de todas las voladuras realizadas en la zona bancos superiores y adyacentes a la zona de prueba, tal como se puede apreciar en la imagen el P80 en promedio en función a todos los datos tomados nos indica un valor de 6.2 pulg en la zona de buffer y primera de producción.

Tabla 3.

Línea base fragmentación P80

Fase	Banco	Proyecto	P80 (Pulg)	% de Finos < 1"
08	3900	282	7.2	38
08	3900	282	6.8	37
08	3900	283	6.5	34
08	3900	283	6.7	37
08	3900	284	6.2	38
08	3885	280	5.6	40
08	3885	280	5.8	34
08	3885	280	6.2	38
08	3885	281	5.1	34
08	3885	281	5.3	40
08	3885	281	5.6	38
08	3885	282	6.8	39
08	3885	282	6.8	37
08	3885	282	5.9	38
08	3870	280	6.5	39
08	3870	280	5.9	40
08	3870	280	6.1	38
Total, promedio			6.2	37.6

Nota: En la presente tabla se muestran los resultados obtenidos antes de la aplicación del nuevo explosivo, específicamente en lo referente a la fragmentación. Estos valores constituyen el punto de referencia para la comparación de resultados una vez ejecutadas las pruebas.

3.8.3. Línea base DigRate

Para la obtención de los valores de DigRate se empleó la información proveniente del sistema Dispatch, considerando únicamente los proyectos evaluados dentro de la zona donde se realiza la captura de datos de fragmentación. Los DigRate utilizados corresponden a las áreas denominadas “buffer” y “primera línea de producción”.

Tabla 4.

Línea base DigRate

Fase	Banco	Proyecto	DigRate Ton/hrs
08	3900	282	9042
08	3900	282	9236
08	3900	283	9014
08	3900	283	9114
08	3900	284	9151
08	3885	280	9048
08	3885	280	9030
08	3885	280	9270
08	3885	281	9270
08	3885	281	9050
08	3885	281	9050
08	3885	282	8940
08	3885	282	8797
08	3885	282	8897
08	3870	280	9003
08	3870	280	9007
08	3870	280	9114
Total, promedio			9,061

Nota: En la presente tabla se muestran los resultados obtenidos antes de la aplicación del nuevo explosivo, específicamente en lo referente al DigRate. Estos valores constituyen el punto de referencia para la comparación de resultados una vez ejecutadas las pruebas.

3.8.4. Línea base en generación de gases NO_x

En este apartado se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la voladura respecto a la calificación por presencia de gases NO_x. La evaluación se realizó utilizando la escala visual propuesta por el Australian Explosives Industry and Safety Group Inc. (AEISG), En función a los resultados se promedió el nivel e intensidad dando un valor general de 2A.

Tabla 5.

Resultados de gases NO_x línea base.

Fase	Banco	Proyecto	Mezcla explosiva	Nivel de gases Nox	Intensidad
08	3900	282	MEQ 80/20	2	B
08	3900	283	MEQ 80/20	0	0
08	3900	284	MEQ 80/20	3	B
08	3885	280	MEQ 80/20	3	A
08	3885	281	MEQ 80/20	0	0
08	3885	282	MEQ 80/20	2	A
08	3870	280	MEQ 80/20	1	B

Nota: En la presente tabla se muestran los resultados obtenidos antes de la aplicación del nuevo explosivo, específicamente en la generación de gases nitrosos. Estos valores constituyen el punto de referencia para la comparación de resultados una vez ejecutadas las pruebas.

3.8.5. Resumen de línea base

En la tabla 06 se detalla lo siguiente:

Tabla 6.

Resumen detallado de la línea base

Descripción	Detalle	Valor KPI's actual
wall control	Ancho de berma	59%
	Angulo de cara de banco	73%
	Línea de programa	60%
Fragmentación	P80 Pulgadas	P80: 6.2 pulg
		% finos: 37.6
DigRate	Dispatch Ton/hr	9061 ton/hr
Gases Nitrosos	Escala de gases nitrosos en Buffer	Nivel 2A

3.9 Plan del desarrollo del plan de pruebas

En este apartado se presenta el desarrollo de las pruebas realizadas como parte del plan experimental de la investigación. Las pruebas se ejecutaron en la zona de material estéril, considerando que, al tratarse de un área de desmonte, cualquier posible desviación en los resultados no afectaría el proceso de chancado por un eventual envío de material grueso proveniente del tajo sur. Esta selección permitió realizar los ensayos en condiciones controladas, minimizando riesgos operativos y garantizando la validez de los resultados.

Se llevaron a cabo tres voladuras de prueba sobre el macizo de diorita de la Fase 8 Este, utilizando el explosivo de baja densidad Flexigel 100 en función a los resultados se estandarizará la aplicación del nuevo explosivo.

Previo a la ejecución en campo, se elaboró un proceso de control de calidad (QA-QC) del explosivo en laboratorio, con el propósito de verificar sus propiedades fisicoquímicas y asegurar

que cumpla con los parámetros técnicos establecidos por el fabricante. Este control permitió confirmar la estabilidad, homogeneidad y densidad del producto, garantizando así un desempeño adecuado durante la voladura y la fiabilidad de los resultados obtenidos. Posterior a ello también se realizó el control de calidad durante el carguío en campo para asegurar estar dentro de los parámetros deseados.

Como complemento fundamental del plan de pruebas, se desarrolló un estudio de campo cercano, orientado a evaluar el daño inducido por la voladura en la zona de talud. La información obtenida a partir de este ensayo permitió avanzar al ajuste y rediseño de la malla de perforación y voladura, alineándola con los criterios de estabilidad geotécnica y con el objetivo principal de optimizar el control de taludes en la operación a cielo abierto.

3.10 Control de calidad de materias primas en laboratorio.

Los siguientes cuadros muestran los resultados obtenidos, así como el análisis de variabilidad encontrados para cada caso.

3.10.1. Control de densidad del EPS

Para el control de densidades de EPS, se realizó la extracción de 20 muestras aleatorias de los 55 sacos de EPS presentes en mina. El resultado de la medición, entrega una densidad promedio total de 9.818 Kg/m³, con una variabilidad mínima de 0.11%. tal como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 7.
Control de densidad de EPS (Poliestireno expandido)

N° de Muestra	Densidad Kg/m3
1	9.81
2	9.84
3	9.82
4	9.81
5	9.82
6	9.83
7	9.81
8	9.82
9	9.83
10	9.83
11	9.82
12	9.81
13	9.8
14	9.82
15	9.83
16	9.81
17	9.81
18	9.81
19	9.8
20	9.82
Promedio	9.818

Nota: La tabla representa los valores obtenidos durante la medición de calidad del EPS, los cuales se encuentran dentro de los rangos óptimos para su manipulación y trabajo, garantizando la estabilidad del producto durante el proceso de campo.

Figura 11.

Fotografía del EPS muestra en campo.



Nota: La imagen muestra el EPS obtenido en campo, donde se observa un diámetro constante en toda la sección, lo que confirma la homogeneidad del material.

3.10.2. Control de densidad de emulsión

Para el control de densidad se tomaron muestras de la emulsión matriz proveniente de planta, correspondientes a un total de diez bombonas enviadas desde fábrica. Este procedimiento tuvo como objetivo verificar la uniformidad y calidad del producto base, asegurando que las propiedades de la emulsión se mantuvieran dentro de los parámetros establecidos antes de la fabricación del explosivo de prueba. Las mediciones de densidad se realizaron en laboratorio bajo condiciones controladas, obteniéndose valores comprendidos entre 1.296 y 1.304 g/cm³, con un promedio de 1.301 g/cm³. Este resultado evidencia una variación mínima entre muestras, lo cual demuestra una excelente homogeneidad del producto y un buen control del proceso de emulsificación.

Tabla 8.
Resultados del control de calidad de la emulsión matriz

N° de Muestra	Densidad g/cm ³
1	1.301
2	1.299
3	1.304
4	1.301
5	1.301
6	1.296
7	1.30
8	1.298
9	1.302
10	1.303
Promedio	1.301

Nota. Se observa que los resultados obtenidos para la emulsión matriz se encuentran dentro del rango esperado, lo que confirma la estabilidad y conformidad del producto con las especificaciones técnicas establecidas.

Figura 12.
Control de calidad de la emulsión matriz en laboratorio.

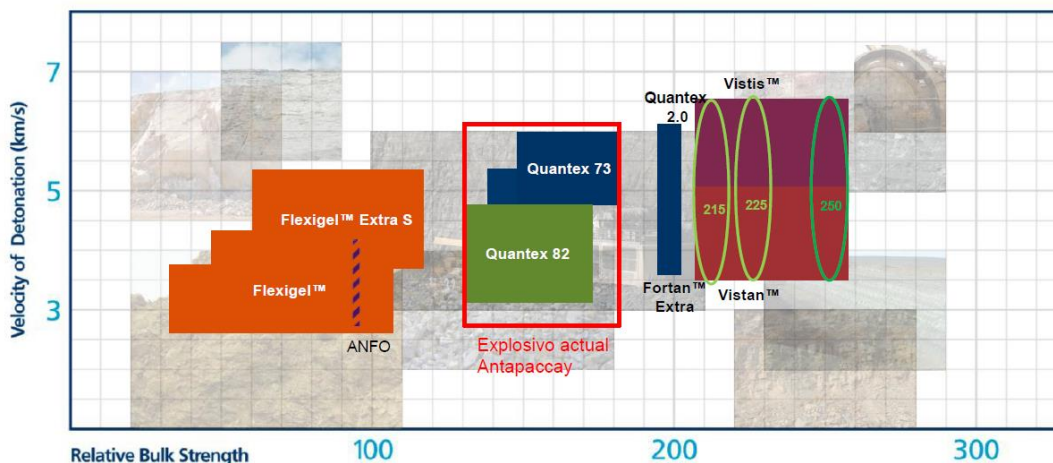

Nota: La imagen representa el método empleado para evaluar la densidad y viscosidad de la emulsión al arribar al sitio, como parte del control de calidad del producto.

3.11 Desarrollo del estudio de campo cercano

Mediante un estudio de campo desarrollado de acuerdo con el dominio geológico–estructural de la Fase 8, se busca evaluar el comportamiento del macizo rocoso en función del uso de un nuevo explosivo de baja densidad aplicado en los taladros de buffer, con el propósito de determinar la velocidad de partícula crítica (PPVc) y establecer un modelo de vibraciones en campo cercano junto con su correspondiente ábaco de vibraciones. Este análisis permitirá identificar los tiempos óptimos de disparo mediante el estudio de la onda elemental, con el fin de reducir las vibraciones y comprender cómo responde el macizo ante el uso del explosivo de baja densidad. Asimismo, se pretende estimar el porcentaje de filtro de precorte asociado al diseño actual, evaluando su capacidad para mitigar el daño inducido por la voladura. Con los resultados integrados, se formulará una recomendación de diseño de voladura de control que minimice el daño por vibraciones generado en la pared de la Fase 8, optimizando el desempeño de los taladros de buffer y contribuyendo a mejorar la estabilidad del talud y la eficiencia global del proceso de perforación y voladura.

Figura 13.

Niveles de impacto por tipo de explosivo - Mapa de energía.



Nota: Esquema que muestra los tipos de explosivos actualmente empleados en la unidad minera, incorporando además el uso de Flexigel como explosivo de control dentro del diseño de voladura.

Figura 14.

Secuencia de entregables en un estudio de campo cercano.



Nota: En la imagen se observa la secuencia completa de trabajos necesarios para obtener los resultados del estudio de campo cercano, comparando el desempeño del explosivo tradicional con el nuevo explosivo en evaluación.

3.11.1. Instrumentación del estudio de campo cercano en fase 08

Para la instrumentación del estudio de campo cercano se consideraron dos escenarios: el explosivo actualmente utilizado en los taladros de buffer (Quantex 82) y la propuesta del Flexigel 100 como alternativa de menor densidad. La elección de Flexigel 100 se sustentó en las condiciones reales del macizo rocoso en la zona de evaluación, donde algunos taladros presentaban una ligera presencia de agua. Bajo estas condiciones, el uso de un Flexigel de menor densidad quedaba descartado, ya que el contacto directo con agua incrementa el riesgo de deflagración, comprometiendo la seguridad y la calidad del ensayo. Por ello, se definió que Flexigel 100 era la opción adecuada para la comparación.

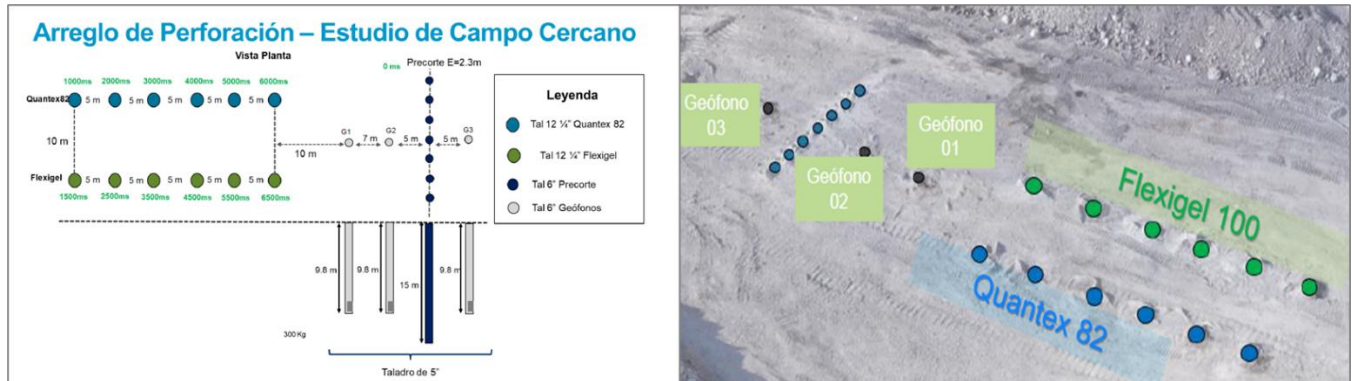
Para el monitoreo se emplearon tres geófonos de campo cercano:

- G3, instalado para evaluar el desempeño del filtro de precorte,
- G1 y G2, dispuestos estratégicamente para la calibración del valor de la onda P, buscando alcanzar un nivel de confianza superior al 85% en la interpretación del comportamiento vibratorio.

En la siguiente figura se presenta el diseño utilizado para el desarrollo del estudio.

Figura 15.

Diseño de perforación y tiempos para el estudio de CC.



Nota: En la imagen se muestra, por un lado, el diseño planificado para el estudio de campo cercano y, por otro, cómo se ejecutó realmente en terreno. La verdad es que este contraste ayuda a visualizar de forma más clara las decisiones tomadas durante la voladura y su adaptación a las condiciones reales del macizo rocoso.

Capítulo IV

4. Análisis e interpretación de los resultados

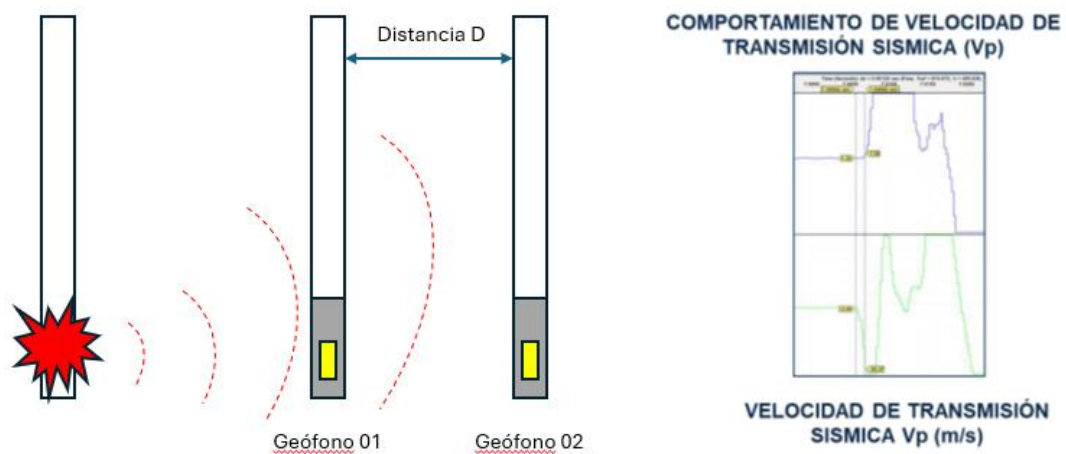
4.1 Análisis del resultado obtenido del estudio de campo cercano.

4.1.1. Cálculo e interpretación para la Velocidad de onda P

De acuerdo con el análisis de los registros de vibración obtenidos por los geófonos 1 y 2, la determinación de la velocidad de onda P (V_p) se realiza siguiendo el procedimiento ilustrado en la Figura 15. Una vez detonado el explosivo, se identifica la diferencia de tiempo entre la llegada de la señal al primer y al segundo geófono. Este delta de tiempo se divide entre la distancia que separa ambos sensores, obteniéndose así la V_p del macizo rocoso, expresada en m/s. Este método permite estimar con precisión la respuesta dinámica del terreno en condiciones reales de voladura. Los valores resultantes del ensayo se presentan en la siguiente tabla.

Figura 16.

Forma gráfica de como calcular la V_p



Nota: En la imagen se ilustra el procedimiento utilizado para la toma de muestras y el cálculo de la velocidad de onda P (V_p) del macizo rocoso, reflejando cada etapa necesaria para obtener un resultado confiable.

Tabla 9.

Resultados obtenidos en la prueba de campo cercano determinar Vp.

ID	Diferencia (seg)	Distancia real en campo (m)	Vp (m/s)
106	0.00464189	6.87	1480
105	0.00463563	6.87	1482
104	0.00469904	6.87	1462
103	0.00478746	6.87	1435
102	0.00462315	6.87	1486
101	0.00459225	6.87	1496
107	0.00468942	6.87	1465
108	0.00469583	6.87	1463
109	0.00462004	6.87	1487
110	0.00472165	6.87	1455
111	0.00467665	6.87	1469
112	0.00482105	6.87	1425
Distribución normal Vp confianza 95%			1467

Nota: Los resultados obtenidos en la prueba indican una velocidad de onda P (Vp) de 1,467 m/s. Además, el análisis presenta un nivel de confianza del 95%, lo que da solidez al valor estimado y respalda su uso en la caracterización del macizo rocoso, el Vp al ser muy bajo nos indica que la roca es muy fracturada.

4.1.2. Cálculo e interpretación de los parámetros K y Alpha para cada explosivo

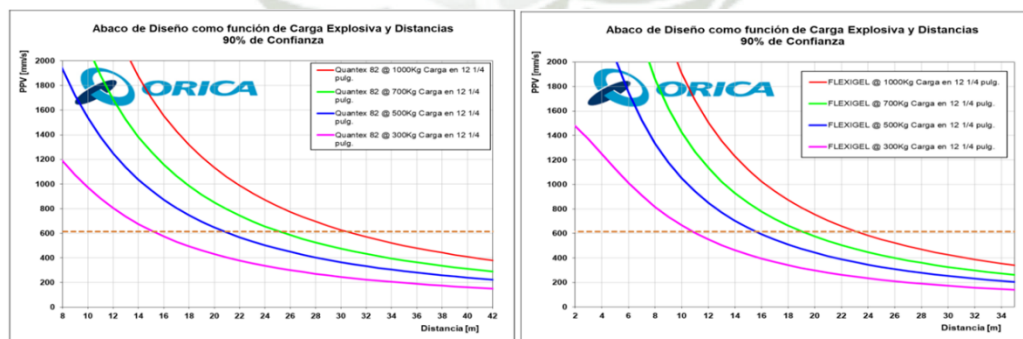
En el modelo de Holmberg & Persson, los parámetros K y α permiten caracterizar la atenuación de la presión generada por la detonación a medida que la onda se propaga en el macizo rocoso. En este estudio se evaluó la diferencia de la respuesta del macizo al emplear el explosivo Quantex 82 y Flexigel 100 (explosivo de baja densidad), con el objetivo de cuantificar en qué medida la aplicación de Flexigel 100 contribuye a la reducción de las vibraciones.

El parámetro K representa la fracción de la presión inicial que se transmite efectivamente desde la columna de explosivo hacia la roca, estando influenciado por el tipo de explosivo empleado, el nivel de acoplamiento en el taladro y el grado de confinamiento. Por su parte, el parámetro α describe la rapidez con la que dicha presión disminuye con la distancia al taladro, en función de la competencia, la integridad estructural y el grado de fracturamiento del macizo rocoso.

La determinación de ambos parámetros se realizó mediante un proceso de calibración basado en registros reales obtenidos con geófonos instalados en campo cercano. Para este estudio se estableció como criterio alcanzar un nivel de confianza superior al 90 % en el ábaco de resultados, asegurando consistencia y confiabilidad en las variables definidas. A partir de la modelación, se obtuvieron los siguientes valores: para el explosivo **Quantex 82**, $K = 744.27$ y $\alpha = 0.75$; mientras que para **Flexigel 100** se obtuvo $K = 532.93$ y $\alpha = 0.73$. Estos resultados evidencian una reducción del 28 % en las vibraciones al aplicar el explosivo de baja densidad Flexigel 100, tal como se observa en la Figura 17.

Figura 17.

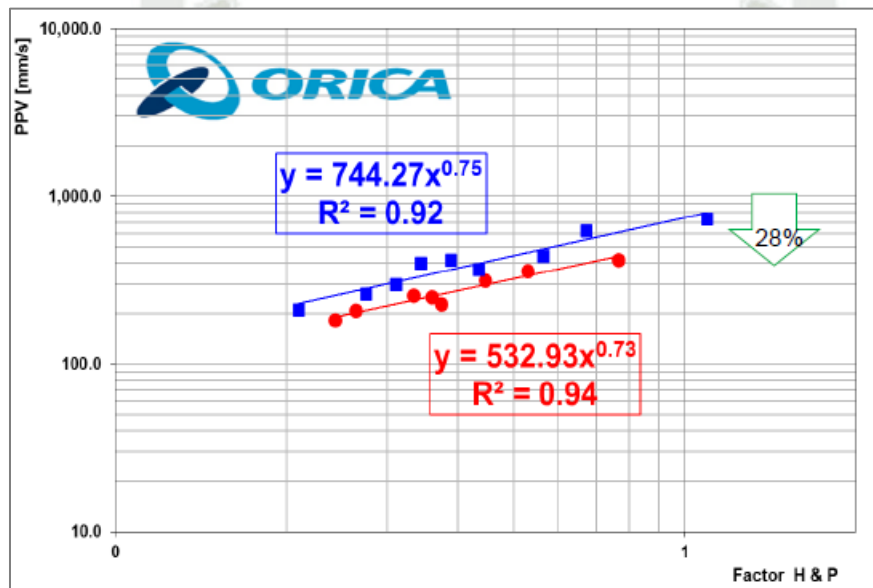
Ábaco en función a carga y distancia por explosivo.



Nota: El ábaco se construyó a partir de los valores de PPV registrados por los geófonos instalados, donde se evidencia una reducción significativa en las vibraciones al comparar los resultados obtenidos con los distintos explosivos.

Figura 18.

Modelo de Holmberg and Persson de campo cercano resultados



Nota: En la imagen se aprecia la modelación de los resultados obtenidos en el estudio de campo cercano, donde se observa una reducción del 28 % en las vibraciones al aplicar el explosivo de baja densidad. Este comportamiento respalda la hipótesis de que el uso de un explosivo de baja densidad contribuye a disminuir el daño inducido sobre el macizo rocoso.

4.1.3. Cálculo e interpretación del umbral de daño en el macizo rocoso

Para determinar el umbral de daño en el macizo rocoso se aplica la siguiente ecuación, en función de los resultados obtenidos en el estudio de campo cercano y de los parámetros geomecánicos proporcionados por el área de Geotecnia. Este cálculo permite definir el nivel de

daño esperado en la diorita y, a partir de ello, modelar una nueva malla de perforación y optimizar la cantidad de explosivo a aplicar con el nuevo explosivo de baja densidad Flexigel 100.

$$PPV_{cmr} = \frac{\sigma_t * e^{\frac{RMR-100}{27}} * Vp(Cross - Hole)}{E * e^{\frac{RMR-100}{36}}}$$

σ_t = Resistencia a la tracción de roca intacta

E_i = Modulo de deformacion de roca intacta

RMR = Clasificacion de macizo rocoso Bieniawski 1989

Tabla 10.

Parámetros geomecánicos de la Diorita

Parámetro	Mínimo	Máximo	Unidad
UCS	30	40	MPa
Resistencia a la tracción	3.5	3.5	MPa
Módulo de Young	4.01	4.01	GPa
Módulo de Poisson	0.25	0.25	-
RQD	35	40	%
RMR	35	40	-
Densidad de roca	2.59	2.59	t/m ³

Nota: En la tabla se presentan los parámetros geomecánicos considerados para el desarrollo del modelo. Esta información fue proporcionada por el área de Geotecnia en función de los ensayos de laboratorio realizados sobre el macizo rocoso.

El valor obtenido de PPV_{cmr} es de 701.4 mm/s, lo que indica que se supera la resistencia a la tracción del macizo rocoso. En estas condiciones se genera la ruptura de los puentes de roca y la apertura de estructuras preexistentes, de acuerdo con el ábaco de resultados utilizado para la determinación del umbral de daño.

Figura 19.

Criterio de daño en función a $VPPc$

Criterio de Daño	Criterio de Daño UG Diorita	Descripción de Daño inducido
Zona 1 > $PPVc$	Zona 1 > 1264 mm/s	Se supera la resistencia a la tracción de la roca intacta, por lo que se produce ruptura de la matriz de la roca y se generan nuevas fracturas.
$PPVc > \text{Zona 2} > PPV_{cmr}$	1264mm/s > Zona 2 > 692 mm/s	Se supera la resistencia a la tracción del macizo rocoso, por lo que se produce ruptura en el macizo rocoso (puentes de roca), además de la apertura de estructuras pre-existentes.
Zona 3 < PPV_{cmr}	Zona 3 < 692mm/s	No se produce daño inducido en el macizo rocoso producto de la voladura.

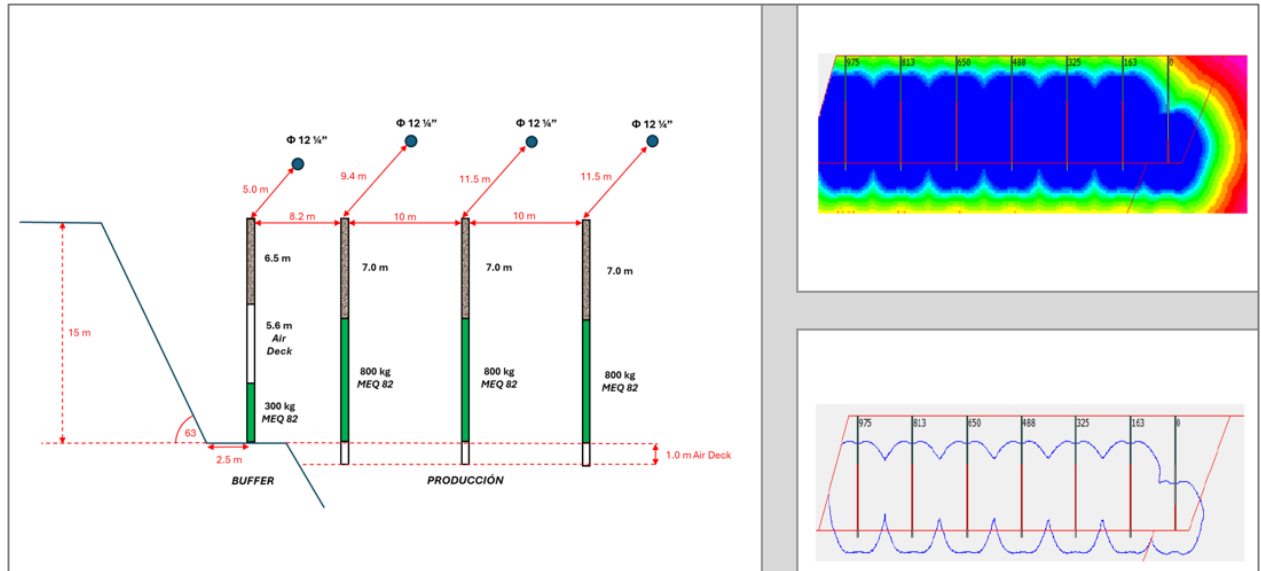
Nota: La presente tabla establece el criterio de daño en función de los resultados obtenidos en el estudio de campo cercano y describe el umbral de daño, así como las posibles consecuencias asociadas a superar los valores determinados para la voladura.

4.2 *Rediseño y análisis de la malla de perforación y de carga explosiva*

En este apartado se presenta el rediseño de la malla de perforación y del esquema de carga en función de los halos de energía del explosivo y del umbral de daño definido a partir del estudio de campo cercano. Con esta base, se propone un nuevo patrón de voladura utilizando explosivo de baja densidad, el cual será posteriormente implementado en campo para contrastar los resultados obtenidos con el diseño original. Este proceso de validación constituye uno de los objetivos centrales de la presente tesis.

Figura 20.

Línea Base, diseño de perforación y carguío.



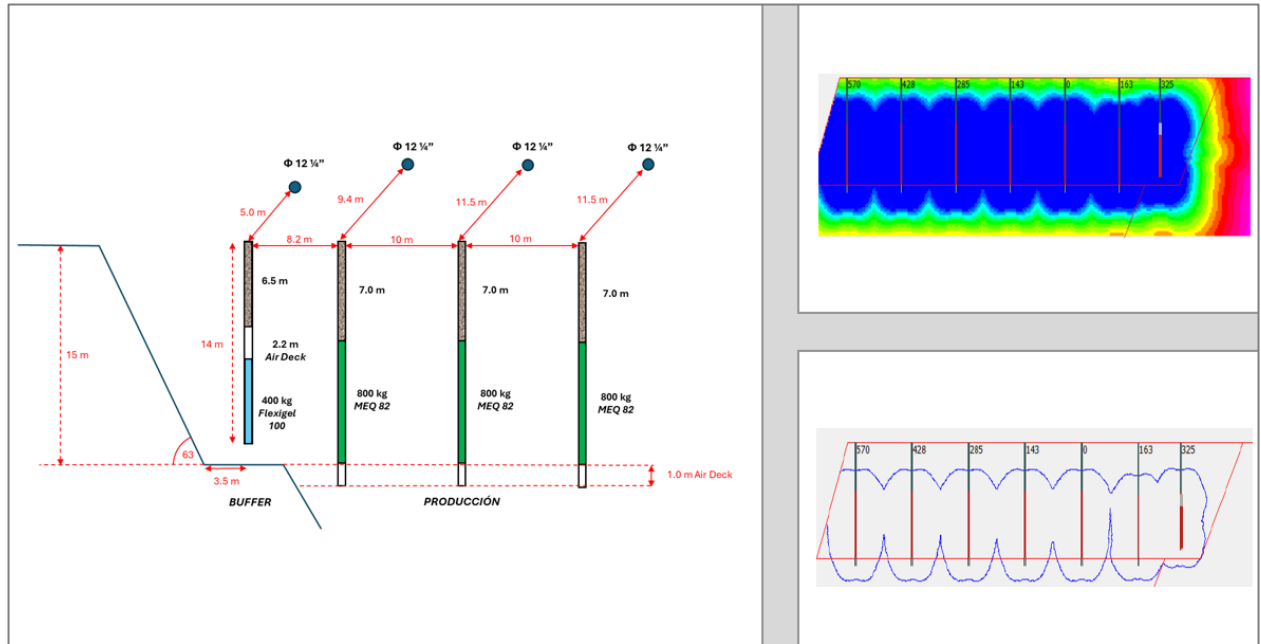
Nota: En la imagen se puede observar el diseño inicial de la malla de perforación carguío.

En la Figura 19 se observa el diseño de la malla de perforación, donde la fila de taladros buffer presenta un offset de 2.5 m respecto al toe del talud. En la parte derecha se muestran los halos de energía asociados a estos taladros, evidenciándose que alcanzan directamente la berma del banco superior, lo que genera un prefracturamiento no deseado en dicha zona.

Asimismo, se aprecia que, en la zona del taco, al colocar 300 kg de explosivo, la energía no llega a esta sección y se concentra en la parte inferior de la columna, ya que solo se cuenta con 2.98 m de carga lineal, dejando aproximadamente 12 m sin carga. Esta condición impacta de manera directa en la fragmentación del material en la zona del taco.

Figura 21.

Propuesta para rediseño de malla de perforación y voladura.



Nota: La imagen presenta el diseño propuesto para optimizar el *wall control* del talud, reduciendo el daño al macizo rocoso y mejorando la estabilidad del talud final.

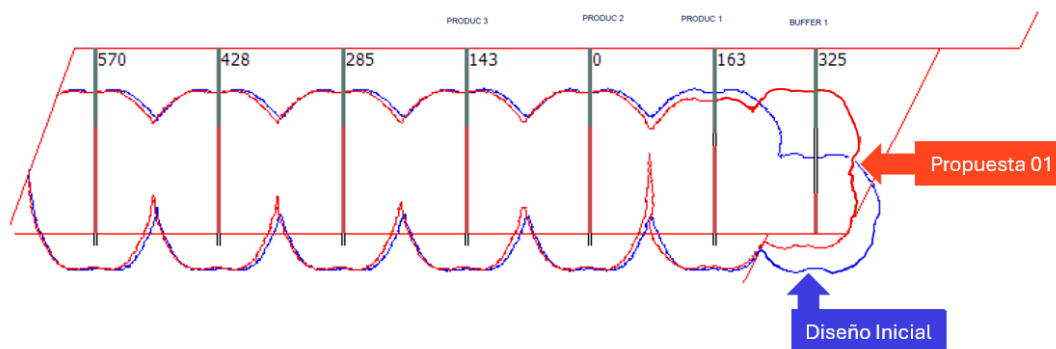
En la Figura 20 se presenta el rediseño de la malla de perforación, donde, como primer control, se incrementó el offset de la fila buffer de 2.5 m a 3.5 m, con el fin de reducir el daño en el toe del talud. Adicionalmente, se disminuyó en 1 m la profundidad de los taladros, obteniendo una longitud final de 14 m para los taladros de buffer. El explosivo Flexigel 100 presenta una carga lineal de 76 kg/m; es decir, en un metro de taladro de 12 1/4" ingresan aproximadamente 76 kg de explosivo. Al tener una densidad menor que el explosivo utilizado previamente, este permite aumentar la longitud de la columna de carga sin incrementar el nivel de daño, dado que su menor densidad genera un impacto menos agresivo sobre el macizo rocoso en comparación con el explosivo tradicional. Como se aprecia en el gráfico derecho, correspondiente a los halos de

energía, se obtiene una distribución más uniforme de la energía a lo largo de todo el taladro y se reduce en aproximadamente un 60 % el daño ejercido sobre la berma del banco inferior, manteniendo al mismo tiempo la protección del toe en toda su extensión.

En la Figura 21 se presentan gráficamente los resultados de distribución de energía, donde el caso base se muestra contorneado con línea azul y la propuesta de rediseño con línea roja. En el escenario base, al emplear en la fila de buffer el explosivo tradicional (mezcla Quantex 82), incluso reduciendo la carga, al ser un explosivo más energético genera un nivel de daño significativo sobre la berma del banco inferior. Al mismo tiempo, la disminución de carga para proteger el talud provoca una energía insuficiente en la zona del taco, favoreciendo la generación de volonería en dicha zona. En contraste, al aplicar el explosivo de baja densidad Flexigel 100, su menor densidad lineal permite incrementar la longitud de la columna de carga y obtener una distribución de energía mucho más uniforme a lo largo del taladro. Esto se traduce en una reducción del daño en la cresta del banco inferior, una disminución de la volonería en la zona del taco y, sobre todo, en una mejor preservación del talud final, es importante mencionar que el diseño propuesto solo se aplica en la zona donde de diorita fase 08.

Figura 22.

Análisis comparativo línea base vs Propuesta.



Nota: En la imagen se presenta un análisis comparativo entre el caso base, donde se aplica explosivo tradicional en la fila de buffer (contorneado en azul), y la propuesta con explosivo de baja densidad (contorneado en rojo). Se observan los halos de mayor daño para cada caso, permitiendo identificar de manera clara la reducción del daño inducido al talud al emplear el explosivo de baja densidad.

4.3 *Evaluación de resultados obtenidos en campo*

En este ítem se analizan los resultados obtenidos en campo a partir de la ejecución de la voladura empleando el nuevo explosivo y la nueva configuración de malla, la cual fue rediseñada con el objetivo de optimizar el *wall control* en los taludes de la Fase 8, zona Diorita.

El análisis se centra en evaluar el desempeño de la propuesta frente al diseño base, considerando el comportamiento del macizo rocoso y la respuesta del talud final posterior a la voladura. Para ello, se detallan de manera ordenada cada uno de los resultados obtenidos, incorporando los principales indicadores de control de daño inducido y las observaciones de campo registradas durante la ejecución. Estos resultados permiten sustentar técnicamente el impacto del nuevo diseño en la mejora del control de taludes y en la estabilidad de las paredes finales.

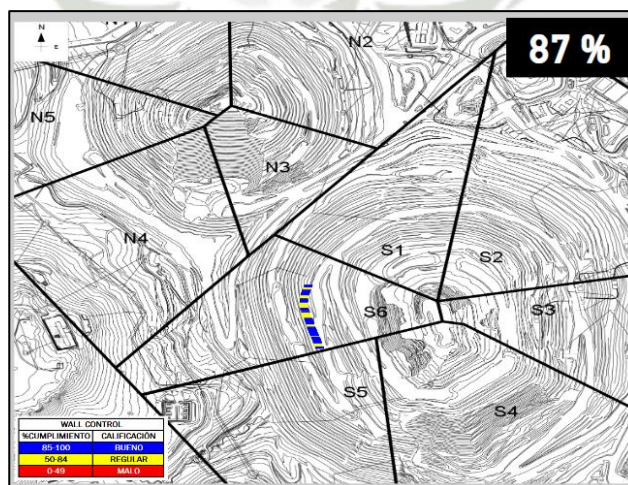
4.3.1. **Análisis de resultados en wall control**

Con la finalidad de validar en campo el desempeño de la voladura aplicando Flexigel y el cumplimiento de los criterios del wall control de taludes establecidos para el estudio. Los resultados obtenidos evidencian un comportamiento favorable en el talud, confirmando la efectividad de la configuración de malla y del explosivo empleado, los cuales se detallan y destacan en el cuadro siguiente.

Tabla 11.
Resultados obtenidos aplicando nuevo explosivo en wall control

Parámetros de Medida	%Cumplimiento
Ancho de berma	92%
Angulo de cara de Banco	87%
Línea de Programa	81%
Angulo interrampa	88%
%Cumplimiento Wall Control	87%

Nota: En relación con los resultados obtenidos en el control de taludes, se evidencia una optimización significativa del talud, destacándose principalmente la mejora en el ancho de berma y en el ángulo de la cara de banco. Estos resultados reflejan un mejor control del daño inducido por la voladura y una geometría final más cercana a los parámetros de diseño establecidos.

Figura 23.
Resultados de evaluación geotécnica Wall Control


Nota: En la figura se presentan los resultados obtenidos a partir de la conciliación geotécnica realizada con el software Gconciliation, la cual arroja un 87 % de cumplimiento, clasificándose este valor dentro de la categoría Muy Bueno. Este resultado evidencia una mejora sustancial en el control del talud respecto a la condición base evaluada.

4.3.1.1. *Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada Wall Control*

En este ítem se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos en el caso base y en la propuesta optimizada, con el objetivo de evaluar el impacto de las mejoras implementadas. El análisis se enfoca en contrastar el desempeño de ambos escenarios, considerando los principales indicadores asociados al *wall control*, la geometría final del talud y el comportamiento geotécnico observado en campo, permitiendo así sustentar de manera objetiva los beneficios alcanzados con la propuesta optimizada.

Tabla 12.

Análisis comparativo del caso base vs la propuesta optimizada

Parámetros de Medida	%Cumplimiento Caso Base	%Cumplimiento Propuesta Optimizada
Ancho de berna	59%	92%
Angulo de cara de Banco	73%	87%
Línea de Programa	60%	81%
Angulo interampa	88%	88%
%Cumplimiento Wall Control	64%	87%

Nota: En la presente tabla se evidencian los resultados favorables obtenidos con el rediseño de la malla de perforación y la aplicación del nuevo explosivo, los cuales permitieron optimizar el *wall control*. Estos resultados reflejan una mejora sustancial en el control geométrico del talud y en el cumplimiento de los parámetros de diseño establecidos.

A partir de los resultados presentados en la tabla comparativa, se evidencia una mejora significativa en el desempeño geotécnico al contrastar el caso base con la propuesta optimizada, especialmente en los parámetros directamente asociados al wall control. En el caso base, el cumplimiento global de wall control alcanza un 64 %, valor que se encuentra condicionado principalmente por los bajos niveles de cumplimiento en el ancho de berma (59 %) y en la línea de programa (60 %), lo que refleja la presencia de sobre-roturas y una geometría final alejada del diseño planificado. Si bien el ángulo de interrampa presenta un valor elevado (88 %), este parámetro por sí solo no logra compensar las deficiencias observadas en los demás indicadores críticos del talud.

Por el contrario, la propuesta optimizada muestra una mejora consistente en todos los parámetros evaluados. Destaca el incremento del ancho de berma hasta un 92 %, lo cual evidencia un control más efectivo del daño inducido por la voladura. Asimismo, el ángulo de la cara de banco mejora de 73 % a 87 %, reflejando una geometría más estable y alineada con los criterios de diseño. La línea de programa también presenta un avance relevante, alcanzando un 81 % de cumplimiento, lo que indica una mayor precisión en la ejecución del contorno final. Como resultado de estas mejoras, el cumplimiento global de wall control se incrementa de 64 % en el caso base a 87 % en la propuesta optimizada, clasificándose este último dentro de un desempeño Muy Bueno. Este incremento valida técnicamente la efectividad del nuevo explosivo y de la configuración de malla rediseñada, demostrando su impacto positivo en el control de taludes y en la estabilidad geométrica final en la Fase 8 – zona Diorita.

4.3.2. Análisis de resultados de fragmentación

En este ítem se analizan los resultados obtenidos en la fragmentación del material, con el objetivo de evaluar si la aplicación del explosivo de baja densidad generó algún impacto en la calidad de la fragmentación. El análisis permite contrastar el comportamiento del material volado respecto al diseño base, verificando que la optimización del *wall control* no haya afectado negativamente la fragmentación requerida para las etapas posteriores de carguío, transporte y procesamiento en planta.

Tabla 13.

Resultados obtenidos aplicando el nuevo explosivo en fragmentación.

Fase	Banco	Proyecto	P80 (Pulg)	% de Finos < 1"
08	3870	269	7	38.5
08	3870	269	6.4	37.2
08	3870	269	6.4	34.5
08	3870	269	6.7	38
08	3870	270	6.1	38.6
08	3870	270	5.3	40.5
08	3870	270	5.6	34.85
08	3870	270	5.6	38.52
08	3870	279	4.8	34.5
08	3870	279	4.9	40.4
08	3870	279	5.1	38.6
08	3870	279	6.95	39.45
08	3870	279	6.45	37.65
08	3870	279	5.91	38.98
08	3870	278	6.2	39.25
08	3870	278	5.8	40.45
08	3870	278	6	38.65
Total, promedio			6.0	38.2

Nota: En relación con los resultados obtenidos en los bancos superiores, se observa una ligera mejora en los indicadores de fragmentación. El valor de P80 se reduce hasta 6 pulgadas, mientras que el porcentaje de finos se incrementa a 38,2 %. Estos resultados, en función del análisis

realizado, evidencian una mejora marginal, indicando que la aplicación del explosivo de baja densidad no afectó negativamente la fragmentación y permitió mantener, e incluso optimizar de manera leve, la calidad del material volado.

4.3.2.1. *Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada fragmentación*

En este ítem se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos en el caso base y en la propuesta optimizada, con el objetivo de evaluar el impacto de las mejoras implementadas, en fragmentación.

Tabla 14.

Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada fragmentación.

ITEM	P80 (Pulg)	% de Finos < 1"
Caso Base	6.2	37.6
Propuesta Optimizada	6.0	38.2

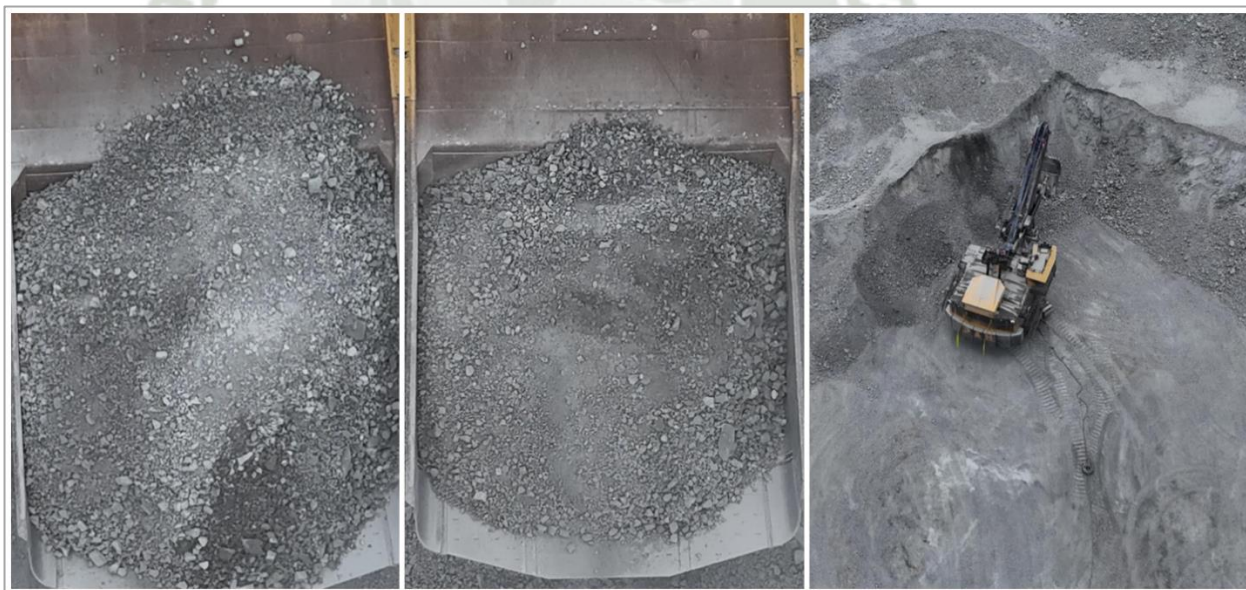
Nota: En la tabla se observa una ligera mejora en los resultados de fragmentación, reflejada en una reducción del P80 y en un incremento moderado del porcentaje de finos. Estos resultados confirman que la propuesta optimizada permitió mantener una fragmentación adecuada, con una tendencia favorable respecto al caso base.

A partir de los valores promedio presentados en la tabla, se realiza el análisis comparativo de los resultados de fragmentación entre el caso base y la propuesta optimizada, considerando como variables principales el P80 y el porcentaje de finos menores a 1 pulgada. En el caso base, el P80 promedio registrado es de 6,2 pulgadas, con un 37,6 % de finos, valores que representan una fragmentación adecuada para las condiciones operacionales evaluadas. No obstante, estos resultados evidencian un margen de mejora en términos de control y homogeneidad del tamaño

del material volado. Por su parte, la propuesta optimizada presenta una reducción del P80 a 6,0 pulgadas, acompañada de un incremento del porcentaje de finos hasta 38,2 %. Esta variación indica una fragmentación ligeramente más fina, manteniéndose dentro de rangos aceptables para las etapas posteriores de carguío, transporte y procesamiento. La mejora observada es de carácter moderado, pero consistente, y no genera impactos negativos asociados a una sobreproducción de finos. En conjunto, estos resultados permiten concluir que la implementación del explosivo de baja densidad, junto con el rediseño de la malla de perforación, no afectó negativamente la fragmentación del material, logrando incluso una ligera mejora.

Figura 24.

Resultados obtenidos aplicando el nuevo explosivo en DigRate.



Nota: En la imagen se observa una fragmentación más homogénea en la totalidad del material, donde la aplicación del explosivo de baja densidad contribuyó de manera significativa a la reducción de bolonerías en la zona del taco. Este comportamiento evidencia una mejor

distribución de la energía a lo largo del taladro, favoreciendo una fragmentación más uniforme y acorde con los requerimientos operacionales.

4.3.3. Análisis de resultados en DigRate

En este ítem se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos en el caso base y en la propuesta optimizada, con el objetivo de evaluar el impacto de las mejoras implementadas, en DigRate, esta información se extrajo del sistema Dispatch.

Fase	Banco	Proyecto	DigRate Ton/hrs
08	3870	269	9092
08	3870	269	9336
08	3870	269	9614
08	3870	269	9314
08	3870	270	9301
08	3870	270	9348
08	3870	270	9130
08	3870	270	9330
08	3870	279	9390
08	3870	279	9160
08	3870	279	9160
08	3870	279	9090
08	3870	279	8847
08	3870	279	8927
08	3870	278	9063
08	3870	278	9032
08	3870	278	9144
Total promedio			9193

Nota: Los resultados obtenidos en el **DigRate** evidencian una **ligera mejora**, lo cual resulta favorable para el caso de estudio, ya que indica un desempeño operativo consistente y alineado con las optimizaciones implementadas.

4.3.3.1. *Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada fragmentación*

En cuanto al DigRate, los resultados obtenidos muestran un comportamiento favorable al comparar el caso base con la propuesta optimizada. El valor registrado en el caso base fue de 9 061, mientras que con la propuesta optimizada se alcanzó un DigRate de 9 193, evidenciando una mejora ligera pero consistente. Este incremento indica que la aplicación del explosivo de baja densidad y el rediseño de la malla de perforación no afectaron negativamente el desempeño operativo, sino que aportaron una mejora marginal en la eficiencia del proceso, resultado que resulta positivo y alineado con los objetivos del presente caso de estudio.

4.3.4. **Análisis de resultados de generación de gases nitrosos**

En este ítem se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos en el caso base y en la propuesta optimizada, con el objetivo de evaluar el impacto de las mejoras implementadas, en Gases Nitrosos.

Figura 25.

Resultados de voladura aplicando Flexigel gases NOx



Nota: En la imagen se evidencia el resultado positivo asociado a la eliminación completa de gases nitrosos (NOx), lograda mediante la aplicación del explosivo de baja densidad. Este resultado confirma un proceso de detonación más controlado y eficiente, contribuyendo a mejorar las condiciones de seguridad y el ambiente de trabajo posterior a la voladura.

Tabla 15.

Resultados obtenidos aplicando el nuevo explosivo en Gases Nitrosos

Fase	Banco	Proyecto	Mezcla explosiva	Nivel de gases Nox	Intensidad
08	3870	269	Flexigel 100	0	0
08	3870	270	Flexigel 100	0	0
08	3870	279	Flexigel 100	0	0
08	3870	278	Flexigel 100	0	0

Nota: En la presente imagen se observan los resultados obtenidos en la zona de *buffer*, los cuales evidencian un desempeño altamente favorable, logrando la eliminación completa de los gases nitrosos (NOx). Este resultado confirma la efectividad del explosivo de baja densidad en dicha zona, permitiendo una detonación más controlada y segura, alineada con los objetivos técnicos del estudio.

4.3.4.1. *Análisis comparativo caso base vs propuesta optimizada Gases NOx*

En el presente apartado se analizan los resultados asociados a la generación de gases nitrosos (NOx) durante la ejecución de las voladuras en la Fase 8, comparando el caso base, donde se empleó una mezcla explosiva convencional (MEQ 80/20), con la propuesta optimizada, que incorpora el uso de un explosivo de baja densidad (Flexigel 100). Los resultados evidencian que, en el caso base, se registran niveles variables de NOx, alcanzando valores de hasta nivel 3, con

intensidades clasificadas entre A y B, lo cual indica la presencia de gases residuales producto de una detonación menos controlada. En contraste, la propuesta optimizada muestra una eliminación completa de NO_x, registrándose niveles cero en todos los disparos evaluados. Este comportamiento confirma que la aplicación del explosivo de baja densidad permite una mejor eficiencia de detonación, reduciendo significativamente la generación de gases nitrosos y contribuyendo de manera directa a la mejora de las condiciones de seguridad y ambientales posteriores a la voladura, sin comprometer el desempeño operativo del proceso.



CONCLUSIONES

Con base en la ejecución de las voladuras de prueba, los levantamientos geotécnicos post voladura y el análisis comparativo realizado en la Fase 8 – zona Diorita, se concluye lo siguiente:

Cumplimiento del objetivo general: optimización del wall control sin comprometer fragmentación. La aplicación de un explosivo de baja densidad en taladros de buffer, en conjunto con el rediseño de la malla de perforación, permitió optimizar de manera significativa el wall control del talud final, manteniendo simultáneamente un desempeño adecuado de fragmentación. Esta conclusión se sustenta en los resultados de conciliación geotécnica, donde el cumplimiento global de wall control se incrementó de 64% (caso base) a 87% (propuesta optimizada), evidenciando un cambio de condición desde un desempeño Malo–Regular hacia una clasificación Muy Buena, lo cual valida técnicamente la efectividad de la propuesta para el control geométrico del talud.

Reducción del daño en pared mediante optimización de carga en *buffer*
La propuesta optimizada mejora los parámetros geométricos que controlan la estabilidad y la calidad del talud final. En particular, se observa una mejora marcada en ancho de berma (59% → 92%), así como en ángulo de cara de banco (73% → 87%) y línea de programa (60% → 81%), lo que indica una ejecución más precisa del contorno y menor sobre-rotura en la zona de influencia del *buffer*. El ángulo interrampa se mantiene en 88%, evidenciando consistencia del comportamiento global y que la mejora se concentra en los elementos más sensibles al daño por voladura (cara, berma y control de línea).

Fragmentación: mantenimiento y mejora marginal controlada

Los resultados de fragmentación muestran que la propuesta optimizada no compromete el tamaño objetivo del material volado. El P80 promedio disminuye de 6,2" a 6,0", mientras que el % de finos (<1") aumenta ligeramente de 37,6% a 38,2%. Esta variación es moderada y favorable, ya que sugiere una fragmentación algo más fina sin evidencia de sobre-generación crítica de finos. Adicionalmente, las observaciones en campo indican una fragmentación más homogénea, con reducción de bolonerías en la zona del taco.

Se logro eliminar la emisión de gases nitrosos En el caso base, se registran eventos con NOx hasta nivel 3 y clasificaciones de intensidad A–B, lo cual evidencia ocurrencia de gases nitrosos bajo el esquema convencional. En contraste, con Flexigel 100 la propuesta optimizada reporta NOx = 0 en todos los casos evaluados, confirmando una mejora sustantiva en la calidad de la detonación y en las condiciones de seguridad ambiental post-voladura, particularmente relevante en la zona de buffer próxima al talud final.

Productividad operativa: mejora ligera sin penalización del desempeño

Los resultados del indicador DigRate muestran una mejora de 9 061 en el caso base a 9 193 en la propuesta optimizada. Este comportamiento confirma que la optimización aplicada en *buffer* no penaliza la productividad, y más bien evidencia una tendencia favorable, coherente con una mejor uniformidad de fragmentación y menor presencia de sobredimensionados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar el uso de explosivo de baja densidad (Flexigel) en taladros de buffer y la malla rediseñada como práctica estándar en los sectores donde el talud final, priorizando áreas con alta sensibilidad a la sobre-rotura y con requerimientos estrictos de wall control. Esta estandarización debe realizarse en función de criterios geomecánicos y de criticidad del talud.

Se recomienda definir rangos operacionales y criterios de control para la densidad lineal, carga de fondo y columna, así como para la longitud de taco, asegurando una distribución de energía uniforme y controlada en la zona de buffer. Asimismo, resulta fundamental reforzar el control de desviación de taladros (orientación, inclinación y profundidad efectiva), debido a que variaciones menores pueden impactar directamente el daño inducido y el cumplimiento del wall control.

Se sugiere reforzar la capacitación del personal involucrado en perforación, carguío y amarre, enfocándose en control de calidad de taladros, control del taco, secuencias de iniciación y buenas prácticas para minimizar el daño al talud. El alineamiento entre las áreas involucradas es clave para reducir la variabilidad operacional y asegurar la repetibilidad de los resultados.

Finalmente, se recomienda replicar la propuesta en otros sectores con diferentes dominios geomecánicos, manteniendo el mismo esquema de evaluación geotécnica y operacional. Este escalamiento controlado permitirá ajustar parámetros por dominio y consolidar criterios de aplicabilidad para una implementación sostenible a escala de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernola, A., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería* (Vol.

1). Madrid: Laboratorio de tecnologías mineras.

<https://doi.org/https://doi.org/10.20868/UPM.book.21848>

Bravo, I. (2018). *Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en minera spence*, [Tesis de

licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168704>

Díaz Leiva, M. (2021). *Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de*

tronadura en campo cercano y lejano en minera Los Pelambres. [Tesis de Licenciatura,

Universidad de Chile], Repositorio institucional de la UC.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180035>

Famesa Explosivos. (2019). *Manual de perforación y voladura* (1 ed.). COSAS.

GeoBlast S.A. (ASP Blastronics). (2010). Conciliación Geotécnica aplicada a la Evaluación de

Voladuras. *ASIEX*, 1, 1-12.

Lopez, J. (2003). *Manual de perforación y voladura* (Vol. 1). Instituto tecnologico geominero de

España. <https://biblioteca.unasam.edu.pe/bib/19195>

Mendoza, G. (2021). *Optimización de la fragmentación y costos de voladura utilizando el*

explosivo Heavy Anfo 64 y ME Quantex 73 en la cantera de caliza Cuadratura, [Tesis de

Licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional.

<https://hdl.handle.net/11537/25905>

Nina, L. (2019). *DETERMINACION DE LA VELOCIDAD PICO PARTICULA CRITICA (VPPc) EN LAS ROCAS MEDIANTE CARACTERIZACION GEOMECANICA Y REFRACCION SISMICA, PARA EL DISEÑO DE VOLADURA DE LA MINA TOQUEPALA*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168704>

Paquera, F. (2021). *Aplicación de modelo de prediccion de vibraciones devine para reducir el impacto por voladura de rocas en mina toquepala* [Tesis de Licenciatura, Universidad nacional de Moquegua]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.14655/244>

Salvador, N., Vergara, J., & Muñoz, C. (2015). Relacion entre los aprametros de voladura y la estabildiad de zonas con restriccion geotecnica. *La SERENA*, 1(1), 230-233. https://doi.org/https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/14905_v2_pp_230_233.pdf

ANEXOS

Anexos 1.

Procedimiento escrito de trabajo seguro - Análisis de fragmentación

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN		
Área: Perforación y Voladura	Versión: V4	
Código: AT-PLB-001	Página: 1 of 4	

4. PROCEDIMIENTO

N°	PASO A PASO
1.	Realizar el IPERC continuo.
2.	Ingreso al área de trabajo de la pala o cargador frontal - Esta operación se realizará durante las horas de cambio de guardia del personal de operaciones entre 6:30 AM Y 7:00 AM. - Solicitar permiso al Supervisor de turno (O1, O2, O3) para el ingreso al área de mina. - Solicitar permiso, por frecuencia radial 6, al operador del equipo para aproximarse al frente de trabajo. - El Operador de la pala debe confirmar radialmente la autorización de ingreso a su frente de minado. - De requerirse el análisis de algún polígono en particular, y fuera del horario de cambio de guardia, se coordinará a través del B1 o B2 la aprobación de la autorización de parada de la pala.
3.	Desplazamiento por el frente de trabajo a ser analizado. - Concentración al trasladarse por el frente de trabajo, y atento a las indicaciones del personal de apoyo (VIGIA). - Evaluar el terreno para ubicar la ruta de traslado más segura. - Estando cerca del talud del banco o frente de carguío cerciorarse de las condiciones del terreno. No arriesgarse, si las condiciones no son seguras y hay desprendimiento de material, comunicar al B2 que el área de análisis es de alto riesgo y proceda a retirarse. - Si se va a realizar el trabajo en áreas alejadas de equipos en movimiento (por lo menos 50 m. del área de trabajo del equipo de carguío) se debe también de llamar por radio al supervisor de mina responsable del área para solicitar la autorización de ingreso.
4.	Muestreo de fragmentación en frente de trabajo - Realizar la evaluación de los taludes próximos a la ubicación del frente a ser analizado. - Se debe identificar rocas sueltas y zonas inestables. - El personal de apoyo (vigía) debe estar atento a cualquier movimiento en el talud potencialmente peligroso para realizar el trabajo, notificando inmediatamente el hecho al personal encargado de la toma de fotografías. - Con la cámara Portametrics acérquese al frente de carguío y ubíquese frente al material fragmentado que desea analizar. - En el visor de la cámara Portametrics, visualice el área de roca fragmentada que desee analizar; el área de análisis dependerá mucho de la distancia a la cual se va a tomar la imagen de interés. - Incluya todos los tamaños. Ningún bloque simple deberá ocupar más del 20 % del ancho de la imagen. - La cantidad de fotos a tomar queda a criterio del examinador, pero se deberá tener en cuenta la uniformidad de la fragmentación. Si la fragmentación de la pila es poco uniforme deberá incluir más fotos. - La cámara cuenta con un sensor que indica si la imagen capturada es ideal para realizar un análisis de fragmentación. No olvidar tomar fotos panorámicas del frente de minado, para tener más información (referencial) de cómo está el frente que se está minando.
5.	Salida del frente de trabajo de la pala o del cargador frontal Comunicar, radialmente por canal 6, al operador del equipo (pala / cargador) que el personal se está retirando del frente de trabajo.

Anexos 2.

Procedimiento escrito de trabajo - Medición de vibraciones

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
MEDICIÓN DE VIBRACIONES		
Área: Perforación y Voladura	Versión: V5	
Código: AT-PLB-002	Página 1 of 1	

1. PERSONAL

PUESTO DE TRABAJO	CANTIDAD
Ingeniero Asistente Técnico	01
Auxiliar Técnico de Campo	01

2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- 2.1 Casco de seguridad con barbiquejo
- 2.2 Guantes para neopreno / nitrilo
- 2.3 Chaleco de seguridad
- 2.4 Traje descartable
- 2.5 Lentes claros u oscuros
- 2.6 Protector auditivo
- 2.7 Chaleco de seguridad
- 2.8 Zapatos de seguridad
- 2.9 Bloqueador solar FPS más de 50
- 2.10 Respirador de media cara con filtros
- 2.11 Mascarilla NK 95

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP)							
							
CASCO DE SEGURIDAD ANSI Z89.1	LENTE DE SEGURIDAD ANSI Z87.1	ZAPATOS DE SEGURIDAD ANSI Z41.1	TRAJE DESECHABLE ASTM F739-85	GUANTES DE LATEX ASTM F496-06	RESPIRADOR ANTI-GASES OSHA (29 CFR 1910.134)	PROTECTORES AUDITIVOS ANSI S3.19	GUANTES ANTI-CORTE ASTM F496-06

3. EQUIPOS / HERRAMIENTAS / MATERIALES

EQUIPOS	HERRAMIENTAS	MATERIALES
Camioneta (01)	Equipada para mina	Block de notas, lapicero, plumón
Monitor Sismógrafo INSTANTEL.	Maletín de transporte	
Geófonos de superficie INSTANTEL.	Pico / Pala para empotrar geófono	

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
	MEDICIÓN DE VIBRACIONES	
	Área: Perforación y Voladura	Versión: V5
	Código: AT-PLB-002	Página 1  1

4. PROCEDIMIENTO

N°	PASO A PASO
1.	Realizar el IPERC continuo
2.	Ubicación del punto de monitoreo - Según la ubicación de la voladura, establecer el punto de monitoreo; puede ser el talud adyacente, alguna estabilidad activa, mismo nivel de disparo para algún estudio especial, etc. - En caso el punto de monitoreo sea en alguna zona especial de operaciones mina, coordinar con el O1 y el B2 el acceso a dicha zona.
3.	Instalación de geófono y programación del equipo - Se coloca al geófono sobre sus tres púas para anclarlo a la superficie (opcional), o se enterrará el geófono a una distancia de 10 cm. aproximadamente. La dirección de la flecha que lleva este, debe de apuntar hacia el disparo. - Se conecta el geófono al monitor Instantel, se programa el Equipo con los datos de la medición y parámetros de grabación. - Se deja el equipo en proceso de monitoreo. - Colocar la caja metálica de tal forma que proteja el sismógrafo. - Usar conos para delimitar el área donde se encuentra colocado el equipo Dejar el equipo en una zona alejada, distancia no menor a 30 metros del disparo.
4.	Recojo de equipo de monitoreo – Post Disparo - Al finalizar la voladura y al haber sido liberada el área, acercarse al punto de monitoreo a recuperar el equipo. - Presione CANCEL, en el sismógrafo para cancelar el registro de datos hasta ese momento. - Apague el equipo y proceda con su recojo de equipos y herramientas (caja metálica, conos, etc) - Practicar el Manejo defensivo para retirarse del área.

5. RESTRICCIONES

- 5.1 En caso de monitoreo en zonas de inestabilidad / fallas activas, considerar deslizamientos de material por efectos de la voladura, y mantener una distancia prudente para la instalación del equipo; **NO ARRIESGARSE.**



Anexos 3.

Procedimiento de trabajo - Filmación de voladura

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
	FILMACION DE VOLADURAS	
	Área: Perforación y Voladura	Versión: V5
	Código: AT-PLB-006	Página 1 of 2

1. PERSONAL

PUESTO DE TRABAJO	CANTIDAD
Ingeniero Asistente Técnico	01
Auxiliar Técnico de Campo	01

2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONA

- 2.1 Casco de seguridad con barbiquejo
- 2.2 Guantes para neopreno / nitrilo
- 2.3 Chaleco de seguridad
- 2.4 Traje descartable
- 2.5 Lentes claros u oscuros
- 2.6 Protector auditivo
- 2.7 Chaleco de seguridad
- 2.8 Zapatos de seguridad
- 2.9 Bloqueador solar FPS más de 50
- 2.10 Respirador de media cara con filtros
- 2.11 Mascarilla NK 95

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP)							
							
CASCO DE SEGURIDAD ANSI Z89.1	LENTE DE SEGURIDAD ANSI Z87.1	ZAPATOS DE SEGURIDAD ANSI Z41.1	TRAJE DESECHABLE ASTM F739-85	GUANTES DE LATEX ASTM F496-06	RESPIRADOR ANTI-GASES OSHA (29 CFR 1910.134)	PROTECTORES AUDITIVOS ANSI S3.19	GUANTES ANTI-CORTE ASTM F496-06

3. EQUIPOS / HERRAMIENTAS / MATERIALES

EQUIPOS	HERRAMIENTAS	MATERIALES
Camioneta (01)	Equipada para mina	Block de notas, lapicero, plumón
Cámara Digital de alta definición / Drone, utilizado para la filmación de proyectos de voladura.	Accesorios de cámara / Drone	
Trípode		
Batería de 12 Voltios.		

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
	FILMACION DE VOLADURAS	
	Área: Perforación y Voladura	Versión: V5
	Código: AT-PLB-006	Página 2 of 2
EQUIPOS	HERRAMIENTAS	MATERIALES
Radio de comunicación tipo Handy operativa, en canal 6		

4. PROCEDIMIENTO

N°	PASO A PASO
1.	Realizar el IPERC continuo
2.	Ubicación del punto de Filmación Ubicar el lugar desde donde se realizará la filmación del disparo y comunicar B-2 y ORICA 1; esta ubicación debe estar fuera del radio de influencia del disparo (no menor a 500m). Analizar la zona de filmación adecuadamente, es decir que no presente peligro/riesgo alguno al personal y equipos durante esta labor (desprendimiento de material o inestabilidad de crestas y taludes).
3.	Posicionamiento de Cámara para Filmación - Inspección de la cámara / drone antes de emprender la tarea, es decir la batería con la carga adecuada y con la memoria de almacenamiento vacía. - Posicionar la cámara con el uso del trípode en un piso estable y firme, encenderla y fijar la imagen haciendo uso del lente de acercamiento y comprobar el buen funcionamiento previo a las filmaciones. - En caso de drone, solicitar autorización de vuelo en el Grupo de RPAs, para evitar interacción con otros equipos que ocupen el espacio aéreo e iniciar el vuelo cuando se inicie el protocolo de voladura, al hallarse en la posición de filmación comunicar al ORICA 1. - La toma tiene que realizarse desde la parte opuesta al inicio del disparo. < Estar atento al inicio del disparo que se anunciará por radio, cuando nuestra vista perciba el término de la misma presionar el botón Stop para almacenar el registro de filmación.
4.	Recojo de equipo de monitoreo – Post Disparo - Al finalizar la voladura, apagar la cámara y desmontarla para guardar. - Regresar el drone al punto de origen con los cuidados de vuelo necesarios e indicar el vuelo concluido en el Grupo de RPAs, estando dentro del tiempo solicitado para vuelo. Ya en la oficina técnica, se procede a la descarga del video en una computadora y se realiza el análisis con el software respectivo.

Anexos 4.

Procedimiento escrito de trabajo - Carguío de taladros

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
CARGUIO DE TALADROS		
Área: Perforación y Voladura	Versión: V5	
Código: OPER-PLB-017	Página 1 of 11	

1. PERSONAL

PUESTO DE TRABAJO	CANTIDAD
Supervisor de operaciones	01
Líder de campo	01
Operador de camión fábrica MMU	01
Operador de campo	01

2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- 2.1 Casco de seguridad con barbiqueo
- 2.2 Guantes para neopreno / nitrilo
- 2.3 Chaleco de seguridad
- 2.4 Traje descartable
- 2.5 Lentes claros u oscuros
- 2.6 Protector auditivo
- 2.7 Chaleco de seguridad
- 2.8 Zapatos de seguridad
- 2.9 Bloqueador solar FPS más de 50
- 2.10 Respirador de media cara con filtros

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP)							
							
CASCO DE SEGURIDAD ANSI Z89.1	LENTES DE SEGURIDAD ANSI Z87.1	ZAPATOS DE SEGURIDAD ANSI Z41.1	TRAJE DESECHABLE ASTM F739-85	GUANTES DE LATEX ASTM F496-06	RESPIRADOR ANTI GASES OSHA (29 CFR 1910.134)	PROTECTORES AUDITIVOS ANSI S3.19	GUANTES ANTI CORTE ASTM F496-06

3. EQUIPOS / HERRAMIENTAS / MATERIALES

EQUIPOS	HERRAMIENTAS	MATERIALES
Camión fábrica MMU	Baldes, manga	Libreta de apuntes
Camioneta 4x4	IPERC	Conos naranjas para calibración
Balanza de 1000 Kg. 300 Kg.	Planilla de calibración de camión	Maxi Bag
Telehandler	Pico, pala, barretilla	Diseño de carga
		Bolsas Plásticas

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
	CARGUIO DE TALADROS	
	Área: Perforación y Voladura	Versión: V5
	Código: OPER-PLB-017	Página 2 of 11
EQUIPOS	HERRAMIENTAS	MATERIALES
		Escalera
		Bandeja Plástica

4. PROCEDIMIENTO

N°	PASO A PASO
1.	Este procedimiento operativo se aplica a todo el personal de Orica autorizado que esté involucrado en la calibración del camión fábrica, desplazamiento de equipos dentro de la malla de carguío, carguío de taladros primarios y secundarios con sistema mecanizado y manual, así como carguío de taladros para pozas e inauguración de bancos con productos explosivos hasta alcanzar las especificaciones del diseño aprobado. Una persona no comenzará ningún trabajo identificado en este procedimiento sin completar la capacitación requerida y recibir el nombramiento apropiado, incluidas las licencias legales pertinentes, o estar bajo la supervisión directa de una persona designada.
2.	Evaluación del entorno (crestas y taludes). < El personal deberá desarrollar una evaluación de entorno mediante el uso de check list de crestas y taludes. < Verificar trabajos alternos con equipos en la parte superior e inferior del proyecto, Solicitar al B2, B3 el retiro de equipos presentes en la parte superior del banco o mantener una distancia de 5m a la cresta superior. < Verificar que la cresta del proyecto tenga conformada berma de seguridad de 1m de altura como mínimo, delimitar con conos amarillos y no acercarse a la cresta a menos de 2 metros. < En bancos donde exista la probabilidad de desprendimiento de rocas, solicitar al cliente la conformación de bermas de seguridad de más de 2 metros de altura. < La zona de exclusión se calculará de acuerdo con la altura del banco, la cual será delimitada con conos amarillos. (1/2H). < H: altura del Banco. < Una vez ingresado el camión MMU a la fila de taladros para iniciar el carguío, deberá mantener distancia de 20 metros o dos filas a las perforadoras que se encuentren realizando trabajos de perforación.
3.	Planificación de calibración de camiones < El supervisor de operaciones debe realizar el seguimiento y autorizar la calibración de camiones fábrica según el programa de ordenes de trabajo y programas de calibración < El camión fábrica se debe calibrar cuando se identifique alguna desviación en la preparación de la mezcla
4.	Calibración de camión fábrica < El supervisor de operaciones designa el personal con experiencia en calibración de camiones fábrica y en conjunto realizan la evaluación del entorno y completar los documentos necesarios para realizar la tarea. (IPERC continuo, Check List, permiso de trabajo en altura y otros, según aplique). < El camión fábrica debe estar en condiciones mecánicas óptimas, ubicar el camión en un lugar adecuado.

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)

CARGUIO DE TALADROS

Área: Perforación y Voladura

Versión: V5

Código: OPER-PLB-017

Página 3 of 11

N°	PASO A PASO
	< Bloquear el camión fábrica con tacos y conos. < Se debe realizar la calibración con emulsión matriz fresca y reciente como mínimo la mitad del tanque de emulsión del camión fábrica. < La operación de calibración debe llevarse a cabo con al menos 01 ayudante como mínimo. < El supervisor operativo debe estar en comunicación de ida y vuelta y realizar el seguimiento del trabajo en terreno, debe dar el tiempo suficiente para realizar la operación aprox. 2.5 horas e informar al cliente la ausencia del camión fábrica por este tiempo. < Para calibrar el camión fábrica el operador de este, debe tener muy claro el proceso de fabricación de la unidad fábrica que opera, tipo de bomba hidráulica (engranajes o de pistones), para determinar el proceso de calibración, según se establece en el manual del fabricante. es obligatorio tomar la densidad específica de cada materia prima y registrarlo y también es muy importante operador del camión fábrica debe tener conocimiento de estas variables antes de comenzar la calibración para así lograr una correcta ejecución. < Las muestras de materias primas utilizadas deben ser devueltas a la unidad o a los lugares de almacenamiento respectivo. < Comprobar niveles de aceite hidráulico, este debe estar más del 75% de su capacidad nominal. < Reabastecer el camión fábrica con las materias primas a utilizar. < El proceso de calibración se debe llevar a cabo con una temperatura acorde que permita un correcto flujo hidráulico en el sistema, una temperatura de 64 °C. < Todo derrame provocado por esta operación deberá ser levantado y depositado en los recipientes respectivos, deben ser eliminados según lo indica el procedimiento local de eliminación de residuos < Según el sistema de control que cuente el equipo, se deben considerar las siguientes condiciones, (consulte el manual de operación). < Ubicar la balanza adecuadamente en un lugar plano determinado – Sistemas DCC, Tread Star, Re Pump, SMI 1.100 RPM – Sistemas DCC+, Bulktec 1.200 RPM – Sistemas ProBlast 1.300 RPM – Sistema Load Plus (auto ajuste según necesidad) < Los parámetros de muestreo son: – AN = más de 300 kg; recomendado 500 a 1.000 kg – Emulsión = 200 Kg – Petróleo = 10 kg – Solución de nitrito de sodio = 5 a 10 kg – Agua = 10 Kg – Agua = 10 Kg – Aluminio = 20 kg – EPS = 1 kg

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
	CARGUIO DE TALADROS	
	Área: Perforación y Voladura	Versión: V5
	Código: OPER-PLB-017	Página 4 of 11

N°	PASO A PASO
	< Mantener en el Sitio carpeta con el programa, registros y evidencias de las calibraciones de los MMU, esta carpeta será auditada < MMU Operator debe contar con Planilla de formulación de los productos con los rangos actualizados según catálogo de producto por país < Personal asignado deberá comunicar al operador del camión fábrica mediante señales la posibilidad de sobrepasar la capacidad máxima del recipiente para evitar derrames de producto. < Controlar la densidad de las materias primas y registrar según catálogo de productos. < Ingresar valores obtenidos del proceso de control de calidad de cada materia prima, verificar que valores estén dentro los parámetros establecidos, comenzar el proceso de calibración. < Tarar el depósito – Delimitar el área de trabajo e inspeccionar por donde se transita – Tarar primero el depósito de plástico encima de la balanza, sin emulsión matriz < Conexión del punto y retiro de manguera de emulsión – Conectar el PTO de la toma de fuerza para que caliente 15 min aprox. a 20°C – Coordinación permanente y uso de EPP – Sacar la manguera de emulsión en el acople hacia el brazo de descarga y colocarla encima del depósito de plástico y la balanza – Abrir la válvula de emulsión, asegurándose que haya suficiente presión de aire < Reiniciar el totalizador digital – Usar los tres puntos de apoyo al subir y bajar del camión fábrica – Reiniciar el totalizador digital de EMULSIÓN – Colocar 100% de emulsión en la divisora de porcentajes y en la válvula selectora < Llenar la manguera de emulsión – Uso de bloqueo de la compuerta – Es obligatorio el uso de EPP adecuado para este trabajo – Llenar la manguera de emulsión, fabricando un poco desde los comandos – Fabricar 50 kg de emulsión aprox. o su equivalente en revoluciones y retirar la muestra para densidad; mantener aceleración del motor a 1100 RPM manuales – Pesar el producto teniendo en cuenta la tara y que esté libre de cualquier obstáculo – Luego de terminar de calibrar, limpiar el área de trabajo, los depósitos de emulsión matriz mantenerlos en bolsas cerradas, para luego emplearlos en el servicio de voladura. Guardar la balanza en su lugar – Después de la calibración está listo para las labores de campo (carguió de explosivos en los taladros)

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
CARGUIO DE TALADROS		
Área: Perforación y Voladura		Versión: V5
Código: OPER-PLB-017		Página 5 of 11
N°	PASO A PASO	
5.	Desplazamiento de equipos dentro de la zona de carguío < Todo vehículo o equipo que transite dentro de la malla de carguío debe ser guiado por un personal durante su desplazamiento temporal < Los camiones fábrica deben hacer su ingreso y salida al proyecto de carguío con el apoyo de un personal de piso, deben ser guiados tanto para adelante como para retroceso en todo momento dentro de malla hasta su salida del área trabajo, teniendo las buenas prácticas de guiado, el operador de piso no debe colocarse en la línea de fuego y puntos ciegos del camión, debe tener las líneas descendentes paralelo al ingreso del camión o reacomodando las líneas fuera de la línea de fuego del camión. < Operadores de camión fabrica deberán hacer uso de claxon para su desplazamiento, según estándar 1 toque para encendido, 2 toques para dar marcha adelante, 3 toques para retroceso < Para el desplazamiento de equipo auxiliar para tapado, debe coordinar los trabajos con el supervisor de operaciones o con líder de grupo la secuencia de tapado según el avance de carguío, debiendo esperar el tiempo de gasificación y sentido de amarre. < El desplazamiento se debe realizar por zonas estables y libres de tránsito, no transitar por zonas agrietadas o crestas peladas < Los equipos deben desplazarse por zonas visibles, no posicionarse en los puntos ciegos o línea de fuego de equipos que realizan trabajos dentro y fuera de la malla < Solo personal autorizado y entrenado debe desplazarse dentro de malla de carguío < Equipos de MMU y Minicargador deberán de mantener distancia entre trabajo de MMU a MMU distancia de 2 filas, MMU a minicargador 20 metros. Todo desplazamiento de MMU debe ser con apoyo de un operador de piso < El ingreso de todo equipo ajeno al área de trabajo debe ser con la autorización del supervisor y/o líder de Orica < Otros equipos que deban ingresar a la malla deberán ser guiados en todo momento por un personal de piso y deben tener la autorización del supervisor de campo	
6.	Preparar para cargar taladros < Revisar el diseño de carga aprobado por el cliente < Busque claridad del Diseñador de voladuras designado sobre problemas con los requisitos de carga de taladros de voladura o la aplicación del diseño en el campo cuando sea necesario. < Todos los taladros en cresta deben reducir su carga según condiciones del terreno. (poco burden, cresta minada, presencia de alto fracturamiento), la supervisión tiene la responsabilidad de decidir la cantidad de carga de explosivo de estos taladros en coordinación con cliente (Supervisor de diseño de P&V). < Los taladros en cresta deberán ser cargados al final, (cargar el día que se va a disparar), evaluando la condición del minado de la pala. < El supervisor encargado del carguío de taladros, al identificar cualquier desviación en los taladros de cresta, debe comunicarse con el área de diseño para decidir el cambio de secuencia de salida de los taladros.	

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO (PETS)		
CARGUIO DE TALADROS		
Área: Perforación y Voladura	Versión: V5	
Código: OPER-PLB-017	Página 6 of 11	

N°	PASO A PASO
	< Asegúrese de que el equipo y los accesorios necesarios según el diseño de carga estén disponibles y accesibles durante las actividades de carga. < Planifique el método de trabajo y la secuencia para incorporar requisitos basados en el diseño de carga, las condiciones del sitio y el cronograma de disparo < Consulte los procedimientos operativos para: – Cargue según las condiciones del taladro (seco, húmedo, fangoso, problemas comúnmente encontrados) – Variaciones de producto (producto empaquetado, tipo de producto, productos que no son de Orica) < Comunique los métodos y procesos de carga con el equipo de voladura y asigne roles < Identifique y comunique escenarios que requieran atención para el Equipo de voladura, por ejemplo: gestión de taladros de voladura sobrecargados para controlar posibles eventos de flyrock, tapado inadecuado, collar fracturado, terreno pre acondicionado. < Asegúrese de que las calibraciones estén actualizadas y que se hayan completado las comprobaciones previas al inicio.
7.	Cargar taladros < Confirme que los taladros estén perforados o hayan sido preparados según diseño < El diseño de carga aprobado por el cliente debe ser entregado y difundido por el supervisor de operaciones en coordinación con el líder de campo a todo el personal involucrado en la tarea < Cargue explosivos según el diseño de carga < Comunicar y resolver problemas de carga con el representante del cliente o Diseñador designado de voladura antes de continuar < Registrar y comunicar variaciones para cargar el diseño de voladura < Informar y registrar información cargada en la documentación de voladura < Administrar la variación para cargar el diseño, dentro de los parámetros de la hoja de información del sitio o equivalente (SIS), Asegúrese de ejecutar los procesos y controles de control de calidad < Carguío de taladros Primarios – El camión fábrica debe ser guiado en todo momento por el operador winchero, desde que ingresa hasta su retiro de la malla de carguío. – El operador de camión fábrica debe ser informado sobre alguna variación en la planificación inicial de carguío, debe ser notificado sobre todos los peligros que hayan identificado previamente en campo, firmando el IPERC de la malla. – El líder de campo debe coordinar con el operador winchero y el operador de camión fábrica, la posición inicial de este y el sentido de avance de carguío. – El operador winchero y el operador de camión fábrica deben coordinar los trabajos que realizarán, deben mantener en todo momento la comunicación de ida y vuelta, tanto radial y contacto visual – Según el diseño de carga y el plano de carguío, el operador de camión fábrica y operador winchero deben asegurarse de que coincida los códigos de las estacas con los del plano de carguío, se deben evaluar las