

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

“ESTUDIO DE CAMPO CERCANO PARA EL CONTROL DE VIBRACIONES POR EFECTOS DE LA VOLADURA EN LA ZONA DE INESTABILIDAD 104 DE LA FASE 3 DEL TAJO FERROBAMBA, MINERA LAS BAMBAS - APURIMAC”

PRESENTADO POR:

**BACH. MARIA ANTONIETA CACERES
QUISPE**

**PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL
DE INGENIERO DE MINAS**

ASESOR:

MGT. EDMUNDO ALARCON CACERES

CUSCO-PERÚ

2023

DEDICATORIA

A mis padres, Pio Caceres y Maria Quispe por sus enseñanzas, por impulsarme a superarme y por todo el amor que siempre me brindan.

A mi hermano Oscar Caceres por ser mi guía y mi apoyo.

Con mucho cariño les dedico esta tesis.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por haberme acompañado a lo largo de cada uno de mis pasos y por haberme brindado a mis espaldas personas que han sido mi apoyo y compañía durante este proceso.

A mi alma mater Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, a mis maestros y compañeros de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas quienes aportaron en mi formación profesional.

Al Magister Edmundo Alarcón Cáceres por su asesoría y sugerencias para la presentación de esta Tesis.

A mis compañeros de trabajo de Orica Mining Services Perú SA, quienes me orientaron y complementaron con su experiencia y su conocimiento para la ejecución de esta Tesis.

Y por supuesto a mi familia en general en especial a mis padres y a mi hermano quienes son los pilares fundamentales para este logro.

INDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO I.....	3
MARCO METODOLÓGICO	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Formulación del Problema	4
1.2.1. Problema General.....	4
1.2.2. Problemas Específicos	4
1.3. Objetivo General	4
1.4. Objetivos Específicos.....	4
1.5. Hipótesis General	5
1.6. Hipótesis Específicas.....	5
1.7. Justificación de la Investigación	5
1.8. Alcances	6
1.9. Variables e Indicadores	6
1.10. Tipo de Investigación	7
1.11. Nivel de Investigación	7
1.12. Población	7
1.13. Muestra	7

1.14. Matriz de consistencia	11
CAPITULO II	12
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Antecedentes de la Investigación	12
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	12
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	14
2.1.3. Antecedentes Locales.....	16
2.2. Bases teóricas	17
2.2.1. El macizo rocoso	17
2.2.2. Mecanismos de Fractura.....	18
2.2.3. Mecanismo de Fragmentación de la Roca.....	19
2.2.4. Tipos de Voladura	20
2.2.5. Teoría de la voladura de contorno.....	21
2.2.6. Tipos de voladura de contorno	22
2.2.7. Fundamentos de Vibración por Voladura	24
2.2.8. Parámetros que Influyen en las Vibraciones	25
2.2.9. Daño Inducido por la Voladura.....	26
2.2.10. Modelo de Campo Cercano	26
2.2.12. Deformación Inducida	29
2.2.13. Velocidad Pico Partícula Crítica.....	29

2.2.14.	Vibraciones.....	30
2.2.15.	Criterio de Daño Adaptado.....	30
2.2.16.	Tipos de Ondas	32
2.2.17.	Propiedades Básicas de Ondas	33
2.2.18.	Velocidad de Propagación.....	34
2.2.19.	Carga Operante	36
2.2.20.	Velocidad de Detonación (VOD)	36
2.3.	Marco Conceptual	37
2.3.1.	Campo Cercano.....	37
2.3.2.	Vibraciones.....	37
2.3.3.	Velocidad Pico Partícula	37
2.3.4.	Velocidad de Propagación.....	37
2.3.5.	Talud.....	38
2.3.6.	Fractura.....	38
CAPITULO III.....		39
DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD MINERA LAS BAMBAS.....		39
3.1.	Ubicación	39
3.2.	Acceso	40
3.3.	Clima y Recursos	41
3.3.1.	Clima.....	41

3.3.2. Recursos	42
3.4. Geología	44
3.4.1. Geología Local	44
3.4.2. Geología Regional.....	46
3.4.3. Geología Económica	48
3.5. Descripción de las Operaciones Unitarias de Mina	50
3.5.1. Perforación	50
3.5.2. Voladura	51
3.5.3. Carguío y Transporte.....	53
3.6. Planeamiento	55
3.7. Administración.....	56
3.7.1. Reseña histórica.....	56
3.7.2. Características Operativas	58
3.7.3. Proyecciones.....	56
CAPITULO IV.....	58
ANÁLISIS DE VIBRACIONES DEL MACIZO ROCOSO Y EL DISEÑO DE LA VOLADURA	58
4.1. Descripción de las Voladuras Realizadas.....	58
4.2. Descripción de Explosivos Usados	58
4.2.1. Emulsión Fortis Advantage.....	58

4.2.2. Emulsión Fortis Extra.....	59
4.2.3. Flexigel Extra	59
4.3. Voladura de Prueba	60
4.3.1. Descripción del Diseño de Carga de Voladura de Prueba	61
4.4. Prueba de Vibraciones de Campo Cercano.....	65
4.4.1. Determinación de la Velocidad de Propagación (Cross Hole).....	68
4.4.2. Determinación del Modelo de Vibraciones.....	72
4.5. Cálculo de Parámetros del Macizo Rocoso.....	82
4.6. Criterio de daño y Abaco de diseño	83
CAPITULO V	88
RESULTADOS Y DISCUSION.....	88
5.1. Diseños de Carga.....	88
5.1.1. Diseño de Carga Línea Base	88
5.1.2. Propuesta de Diseño de Voladura para el Control de Vibraciones	90
5.1.3. Comparación de Contorno de Vibraciones Diseño Línea Base con Diseño Propuesta. 92	
5.2. Tiempo Entre Taladros y Filas.....	93
5.2.1. Onda Elemental	93
5.2.2. Secuencia de Salida.....	95
5.3. Impacto al Talud.....	95

5.4. Aplicación de Propuesta en Campo (Fase 03 Py 3750_024)	97
5.5. Resultados de Voladura.....	98
5.5.1. Monitoreo de Gases Post Voladura.....	100
5.5.2. Reporte de Vibraciones	102
5.6. Situación del Antes y Después de la Aplicación.....	104
5.6.1. Conciliación Línea Base Nv3765 (Fortis Advantage)	104
5.6.2. Conciliación Resultado Nv3750 (Flexigel Extra-100).....	105
5.7. Deformación Crítica.....	107
5.8. Estudios Posteriores	108
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	111
BIBLIOGRAFIA.....	112
ANEXOS.....	111

INDICE DE FUGURAS

Figura 1 <i>Tipos de fisuras en las proximidades del barreno.....</i>	18
Figura 2 <i>Resumen de Mecanismos de rotura</i>	20
Figura 3 <i>Ejemplo de Voladura de Precorte</i>	22
Figura 4 <i>Ejemplo de Voladura de Recorte.....</i>	23
Figura 5 <i>Ejemplo de Voladura Amortiguada.....</i>	24
Figura 6 <i>Figura Explicativa de Holmberg y Persson</i>	27
Figura 7 <i>Tipos de Ondas Sísmicas</i>	33
Figura 8 <i>Propiedades de una onda</i>	34
Figura 9 <i>Instrumentación de técnica CrossHole.....</i>	35
Figura 10 <i>Cronoestratigrafía generalizada del distrito minero Las Bambas.....</i>	47
Figura 11 <i>Mezcla de Flexigel Extra</i>	59
Figura 12 <i>Comparación de los explosivos</i>	60
Figura 13 <i>Ubicación de Taladros de Prueba.....</i>	61
Figura 14 <i>Control de calidad en gabinete</i>	62
Figura 15 <i>Control de calidad de flexigel en campo</i>	63
Figura 16 <i>Conexión de cable resistivo junto a la prima en el taladro.....</i>	64
Figura 17 <i>Instrumentación y arreglo de Geófonos</i>	66
Figura 18 <i>Instrumentación de Geófonos en Campo.....</i>	67
Figura 19 <i>Tiempos de retardo de prueba.....</i>	68
Figura 20 <i>Registro de llegada de la Onda</i>	69
Figura 21 <i>Configuración de Taladros de Prueba</i>	72
Figura 22 <i>Diseño de carga con Fortis Advantage (buffer y producción)</i>	89

Figura 23 <i>Halos de contorno de vibraciones con Fortis Advantage (buffer y producción) ..</i>	90
Figura 24 <i>Diseño de Carga Propuesto</i>	91
Figura 25 <i>Simulación de Halos de Vibraciones con BDA- diseño propuesto</i>	91
Figura 26 <i>Comparación contorno de vibración en 02 escenarios</i>	92
Figura 27 <i>Seccionamiento de malla por tipo de carga</i>	97
Figura 28 <i>Ubicación del Sismógrafo</i>	102
Figura 29 <i>Resultado de Sismógrafo</i>	103
Figura 30 <i>Conciliación del diseño nivel 3765 en la fase 03 inestabilidad 104</i>	104
Figura 31 <i>Conciliación del diseño nivel 3750 en la fase 03 inestabilidad 104</i>	105
Figura 32 <i>Plano de Ubicación de estudios posteriores a realizar.....</i>	109
Gráfico 1 <i>Tipos de materiales en Las Bambas.....</i>	49
Gráfico 02 <i>Diseño de P&V de los taladros de Prueba</i>	62
Gráfico 3 <i>Resultados de Velocidad de Detonación.....</i>	65
Gráfico 4 <i>Modelo de Campo cercano del Fortis Advantage 70 para G1</i>	74
Gráfico 5 <i>Modelo de Campo cercano del Flexigel Extra-100 para G1.....</i>	76
Gráfico 6 <i>Modelo de Campo cercano del Fortis Advantage 70 para G2</i>	77
Gráfico 7 <i>Modelo de Campo cercano del Flexigel Extra-100 para G2.....</i>	79
Gráfico 8 <i>Abaco distancia vs cargas explosiva</i>	86
Gráfico 9 <i>Determinación de Tiempo en entre taladros.....</i>	93
Gráfico 10 <i>Determinación de tiempo entre filas</i>	94
Gráfico 11 <i>Parámetros de deformación crítica establecido por las Bambas</i>	108

Foto 1 <i>Perforación de taladros de producción</i>	51
Foto 2 <i>Carguío de Taladros con camión fabrica</i>	52
Foto 3 <i>Carguío y transporte en Tajo Ferrobamba</i>	54
Foto 4 <i>Flota de Camiones Mineros</i>	55
Foto 5 <i>Malla 3750-24</i>	97
Foto 6 <i>Malla Post Voladura</i>	99
Foto 7 - Foto 8 <i>Esponjamiento de material , Regular fragmentación</i>	99
Foto 9 <i>Ligera presencia de humos</i>	100
Foto 10 <i>Instrumentación de Geófonos</i>	117
Foto 11 <i>Cimentación de Geófonos con mezcla</i>	117
Foto 12. <i>Medición y carguío de taladros</i>	118
Foto 13 <i>Disparo de proyecto de Voladura</i>	118
Foto 14 <i>Zona de Inestabilidad 104 antes de la voladura – Nov 2021</i>	119
Foto 15 <i>Zona de estudio en Inestabilidad 104</i>	120
Foto 16 <i>Zona de estudio en Inestabilidad 104</i>	121
Foto 17 <i>Post Voladura de malla 3570-024</i>	122
Foto 18 <i>Zona de Inestabilidad 104 – diciembre 2022</i>	123

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variables e indicadores	6
Tabla 2 Matriz de Consistencia.....	11
Tabla 3 Criterio de daño adaptado (Vergara 2016).....	32
Tabla 4 Rutas de acceso a la mina Las Bambas	40
Tabla 5 Flota de Perforadoras	50
Tabla 6 Flota de camiones fabrica.....	52
Tabla 7 Flota de camiones mineros.....	53
Tabla 8 Flota de Palas y cargador	54
Tabla 9 Coordenadas de la Ubicación de los Geófonos.....	69
Tabla 10 Cálculo de VP para G 1 y G2.....	71
Tabla 11 Clasificación de ingeniería para roca Insitu.....	71
Tabla 12 Datos para el modelo de Fortis Advantage 70 en el G1.....	73
Tabla 13 Datos para el modelo de Flexigel Extra-100 en el G1	75
Tabla 14 Datos para el modelo de Fortis Advantage 70 en el G2.....	77
Tabla 15 Datos para el modelo de Flexigel Extra-100 en el G2	78
Tabla 16 Análisis de impacto por vibraciones del Fortis Advantage 70 vs Flexigel Extra-100	79
Tabla 17 Análisis del comportamiento de impacto por fracturas en G1 y G2.....	81
Tabla 18 Datos Geotécnicos de la U.M. Las Bambas.....	82
Tabla 19 Datos Geotécnicos para Caliza Margosa.....	83
Tabla 20 Criterio de Daño para Caliza margosa en zona de inestabilidad 104Fuente: Criterio de daño PPVcmr J. Vergara 2014.....	85

Tabla 21 Comparación de reducción de Vibraciones.....	93
Tabla 22 Variación en vibraciones - diseño línea base y diseño propuesto	95
Tabla 23 Reducción del Impacto al Talud	96
Tabla 24 Límites máximo Permisibles según D.S. N° 024-2016-EM	101
Tabla 25 Resultados de Monitoreo de Gases	101
Tabla 26 KPI de cumplimiento de condición y diseño nivel 3765	105
Tabla 27 Cuadro de cumplimiento de condición y diseño nivel 3750	106
Tabla 28 Resultados de conciliación.....	106
Tabla 29 Información de valores geotécnicos escalados al macizo rocoso.	107

RESUMEN

Como parte de la continuidad de la explotación del tajo Ferrobamba se requería hacer una voladura al pie de la zona de inestabilidad 104 en el nivel 3570, por ello la necesidad de hacer un estudio de campo cercano que nos brinde datos del macizo rocoso y nos permita predecir el máximo nivel de soporte a la vibración del macizo rocoso con el cual se pueda elaborar un diseño de voladura más adecuado. El trabajo de investigación presentado, de título “Estudio de campo cercano para el control de vibraciones por medio de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba, Minera Las Bambas - Apurímac, plantea como objetivo controlar las vibraciones originadas por la voladura y así reducir la probabilidad de deslizamiento de la inestabilidad 104. El tipo de investigación fue Tecnológico debido a que se hizo un estudio para la obtención de datos del macizo rocoso, en base a esos conocimientos y datos se construyó un nuevo diseño de voladura. Finalmente se puede concluir que con el estudio de campo cercano se pudo controlar y reducir el impacto de las vibraciones a las paredes del talud de la inestabilidad 104.

Palabras clave: Campo cercano, voladura, control de vibraciones, Inestabilidad, macizo rocoso.

ABSTRACT

As part of the continuity of the exploitation of the Ferrobamba pit, blasting was required near the instability zone 104, therefore the need to carry out a near field study that provides us with data on the rock mass and allows us to predict the maximum level of resistance. to the vibration of the rock mass with which a more suitable blasting design can be elaborated. The present research work entitled "Near field study for the control of vibrations due to the blasting in the instability zone 104 of phase 3 of the Ferrobamba pit, Minera Las Bambas - Apurímac, aims to control the vibrations generated by the blasting and thus reduce the probability of sliding instability 104. The type of research was Technological because a study was conducted to obtain data from the rock mass, based on that knowledge and data a new blasting design was built. Finally, it can be concluded that with the near field study it was possible to control and reduce the impact of vibrations on the walls of the instability slope 104.

Keywords: Near field, blasting, vibration control, instability, rock mass

INTRODUCCION

La Voladura es de vital importancia dentro del ciclo minado en un tajo a Cielo Abierto ya que sus resultados influyen de manera significativa en las operaciones unitarias posteriores, sin embargo, una mala elección de explosivo o un mal diseño de carga puede causar daño al macizo rocoso causando deslizamientos por inestabilidad en los taludes.

En esta investigación se averiguó como controlar los efectos de la voladura en la zona de inestabilidad 104 en el nivel 3570 de la Fase 03 del Tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas, para ello se realizó un estudio de campo cercano con el fin de hacer un diseño de voladura adecuado y obtener el criterio de daño del macizo rocoso de esa zona para hacer análisis con mayor precisión y poder disparar el proyecto de voladura que se encuentra ubicada al pie de la falla.

La presente tesis consta de cinco capítulos, siendo estos organizados como se muestra:

En el Capítulo I, se desarrolla el marco metodológico donde se presenta el planteamiento y la formulación del problema, los objetivos a alcanzar, la justificación de la investigación e información adicional.

El Capítulo II está conformado por el marco teórico en él, se narran los antecedentes de la indagación, los fundamentos teóricos y el esquema conceptual que están orientados según los ejes más relevantes de la indagación.

El Capítulo III describe la Unidad Minera Las Bambas, como la localización, las rutas de acceso, su reseña histórica, sus proyecciones entre otros aspectos.

El Capítulo IV, analiza las vibraciones y el diseño de la voladura, se hace una voladura de prueba para obtener datos del macizo rocoso y poder elaborar un modelo matemático que nos ayuda a simular la voladura del proyecto 024 y predecir las vibraciones.

En el Capítulo V, se extiende la propuesta de mejora y se analiza los resultados obtenidos.

Por último, se explica las conclusiones según los objetivos planteados y se describe las recomendaciones, asimismo se menciona la bibliografía y anexos que sirvieron de información relevante para el desarrollo de este trabajo de investigación.

CAPITULO I

MARCO METODOLÓGICO

1.1. Planteamiento del Problema

La Unidad Minera Las Bambas es un yacimiento de cobre a corte abierto que comprende 3 yacimientos mineros: Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba. En la actualidad se viene avanzando con la explotación del Tajo Ferrobamba estando ahora en la fase 3, 4 y 5; como parte de la continuidad de la explotación se deben realizar una voladura al pie de la zona de inestabilidad 104 en la tercera fase del tajo Ferrobamba.

En la tercera fase del tajo Ferrobamba se observan zonas de inestabilidad natural, debido a que localmente se tiene una falla que atraviesa parte del depósito de mineral, por lo que el desconocimiento del criterio de perjuicio que se tiene en el macizo rocoso influye negativamente al momento de realizar el diseño de voladura.

Un mal diseño de voladura ya sea diseño de carga, secuencia de salida y tiempos entre taladros tiende a generar elevados niveles de vibración causando perjuicio al macizo rocoso aumentando la probabilidad de deslizamientos en esta zona de inestabilidad por lo que estaría en riesgo la vida

de las personas, equipos e incluso puede generar la paralización de proyectos en ese sector ocasionado grandes pérdidas económicas.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

- ¿Cómo controlar los efectos de las vibraciones en el macizo rocoso producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el criterio de análisis del macizo rocoso para reducir el daño generado por las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas?
- ¿Cuál es el diseño de voladura recomendado para el control de vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas?

1.3. Objetivo General

- Controlar los efectos de las vibraciones en el macizo rocoso producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba de la Unidad Minera las Bambas.

1.4. Objetivos Específicos

- Determinar el criterio de análisis del macizo rocoso para reducir el daño generado por las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas.
- Proponer un diseño de voladura para el control de vibraciones producto de la voladura en

la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 en la Unidad Minera Las Bambas.

1.5.Hipótesis General

- El control de vibraciones se logrará mediante el estudio en campo cercano en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del Tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas.

1.6.Hipótesis Especificas

- Aplicando el método del Criterio de Daño se logrará analizar el macizo rocoso con mayor precisión con la finalidad de reducir el daño generado por las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera las Bambas.
- Aplicando un diseño adecuado de la voladura nos permitirá controlar las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 en la Unidad Minera las Bambas.

1.7.Justificación de la Investigación

En la Unidad Minera Las Bambas se lleva a cabo la extracción del yacimiento de Ferrobamba, en la fase 3 existe zonas de inestabilidad natural como la inestabilidad 104, esta inestabilidad dificulta la continuación de la explotación del tajo por medio de voladuras, es por tal motivo que, se debe realizar un estudio de campo cercano, tomando en cuenta los criterios que comprende el análisis tanto del diseño de la voladura y el macizo rocoso. El trabajo de investigación pretende controlar lo que genera las vibraciones por efecto de la voladura que se realizara en la inestabilidad 104 nivel 3750, hallando el límite máximo del nivel de vibración sin dañar las paredes del tajo, ya que, si estas no son controladas y determinadas, pueden ocasionar daños económicos y humanos, provocados por los deslizamientos en los taludes del tajo.

1.8. Alcances

La presente investigación se ejecuta en la zona de inestabilidad 104 de la tercera fase del nivel 3750 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas, que se encuentra localizada en el distrito de Progreso, provincia de Grau, y los distritos de Tambobamba, Challhuahuacho y Coyllurqui, provincia de Cotabambas, en la Región Apurímac.

1.9. Variables e Indicadores

Tabla 1

Variables e indicadores

Variables		Dimensiones	Indicadores
Independiente	Estudio de campo cercano	Diseño de carga	Kg/Tm
		Secuencia de salida	ms/m
		Tiempo entre taladros	ms
		Velocidad pico Partícula de la voladura	mm/s
		Velocidad de propagación	m/s
		Velocidad pico partícula crítico	
Dependiente	Vibraciones producto de la voladura	Impacto al talud	mm/s
		Frecuencia de fracturas	%
		Deformación Crítica	n°fr/m
			mm/s

Nota: Elaboración Propia

1.10. Tipo de Investigación

La presente tesis se enmarca en el ámbito de la investigación *tecnológica*, (Carrasco, 2007) El propósito de esta investigación es descubrir y comprender competentes son las técnicas más efectivas o adecuadas para lograr cambios o mantener los avances obtenidos, como también mejorar las actividades fructíferas o maniobrar algún aspecto de la realidad.

1.11. Nivel de Investigación

La profundidad de la investigación será bajo el enfoque *aplicativo*, pues se busca el conocimiento para el control del problema.

1.12. Población

La población del presente estudio lo conforman la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del "Tajo Ferrobamba" de la Unidad Minera Las Bambas.

1.13. Muestra

Para la muestra del presente trabajo de investigación se tomará un área de la población que será el Proyecto 23, del nivel 3750, de la fase 3 del tajo Ferrobamba. La muestra será no probabilística ya que se elige de acuerdo con el criterio e intención del investigador. En este caso el criterio de elección es la litología del macizo rocoso, el proyecto 23 es el área más representativa de la inestabilidad 104 indicado por el área de Geología.

Las muestras aleatorias se basan en la selección mecánica o aleatoria de todas las unidades del muestreo, cada miembro de la población tiene la misma oportunidad de ser escogido para formar parte del muestreo. Se define en función de los rasgos de la población y la cantidad de sujetos que se toman como muestra. Por otro lado, en las que es poco probable que ocurran, las muestras de los elementos no se basan en la probabilidad, sino en factores que se relacionan con los objetivos del investigador o las características específicas de la investigación. Por lo tanto, los componentes

se eligen en base a su facilidad de acceso o de manera personal e intencional del investigador. En este contexto, el modo a realizar no se fundamenta en fórmulas de probabilidades y tampoco es de carácter mecánico, pues está basado en el procedimiento que realizara un investigador o grupo de investigadores al momento de tomar decisiones.

Escoger entre una muestra probabilística o una no probabilística tendrá que ver con la metodología de investigación, diseño del estudio y contribuciones previstas al mismo (Sampieri, 2014).

1.14. Matriz de consistencia

Tabla 2
Matriz de Consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES
<p>Problema General ¿Cómo controlar los efectos de las vibraciones en el macizo rocoso producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba de la Unidad Minera Las Bambas?</p>	<p>Objetivo General Controlar los efectos de las vibraciones en el macizo rocoso producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba de la Unidad Minera las Bambas.</p>	<p>Hipótesis General El control de vibraciones se logrará mediante el estudio en campo cercano en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del Tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas.</p>	
<p>Problemas Específicos ¿Cuál es el criterio de análisis del macizo rocoso para reducir el daño generado por las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas?</p>	<p>Objetivos Específicos Determinar el criterio de análisis del macizo rocoso para reducir el daño generado por las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas.</p>	<p>Hipótesis Específicas Aplicando el método del Criterio de Daño se logrará analizar el macizo rocoso con mayor precisión con la finalidad de reducir el daño generado por las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unida Minera las Bambas.</p>	<p>Independiente</p> <p>Estudio de Campo cercano</p>
<p>¿Cuál es el diseño de voladura recomendado para el control de vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del tajo Ferrobamba en la Unidad Minera Las Bambas?</p>	<p>Proponer un diseño de voladura para el control de vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 en la Unidad Minera Las Bambas.</p>	<p>Aplicando un diseño adecuado de la voladura nos permitirá controlar las vibraciones producto de la voladura en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 en la Unidad Minera las Bambas.</p>	<p>Dependiente</p> <p>Vibraciones producto de la voladura</p>

Nota: Elaboración Propia

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Bravo (2018), en su estudio “Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en Minera Spence” para optar el título de ingeniero Civil de Minas, cuyo objetivo fue examinar las vibraciones provocadas por la tronadura para cada componente geotécnico en el yacimiento Spence, reducir el perjuicio transmitido al macizo rocoso y evitar que más adelante haya deslizamientos. Para su diagnóstico, optimización y seguimiento se llevaron a cabo observaciones, mediciones y monitoreos en el lugar de la práctica de talar, además se analizó los parámetros clave relacionadas con el diseño.

En base a ello, se logró armar un patrón de propagación de vibración que represente el tipo de roca. En su conclusión refiere, que: De manera general, es posible disminuir las vibraciones a través de una campaña de monitoreo adecuada que correlacione las vibraciones generadas a causa del daño, y la regulación del tiempo de detonación de explosivos detonados. De esta manera, se podrían reducir las condiciones que pueden ser perjudiciales para la mina y/o causar molestias a la población. Además, se ha demostrado que una combinación de un coeficiente de carga que solo se

incrementa ligeramente y una concentración lineal de carga que solo se reduce es una técnica muy eficaz para lograr caras de excavación suaves y reducir al mínimo el sobre quiebre.

Diaz (2021). realizo una investigación a la que denomino “Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres “que tuvo por objetivo el estudio de vibraciones por tronadura tanto en áreas cercanas como lejanas, entender cómo afectan al montañoso conjunto que está en Minera los Pelambres para las fases 7, 9,10 y 11. La metodología que se consideró se basó en identificar componentes relevantes y medibles en el proceso de voladura, recolección de mediciones tomadas en la tronadura y observación de las prácticas realizadas en campo.

En cuanto al campo cercano, se ha llegado a dos conclusiones sobre las variables que lo destruyen. La primera variable se refiere a la distancia que debe haber entre la columna del pozo cargado y el área que se quiere proteger o minimizar su impacto. La segunda variable es la altura a la que se debe cargar el pozo para evitar daños mayores.

En contraste con los modelos de campo lejano, el modelo que mejor se ajusta a las explosiones realizadas en Minera Los Pelambres es aquel que toma en cuenta la variable explosiva, ya que se ha demostrado que los explosivos los de mayor intensidad son los que producen un mayor nivel de vibraciones.

Perez (2019) en su tesis titulada “ Utilizacion de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo rocoso ornamental” (Tesis doctoral), que tuvo como objetivo examinar e instituir los puntos de acuerdo necesarios para modificar los estatutos de amortiguación de la vibración, específicamente los rangos de variación de la curva carga-distancia que tienen que acomodarse a los datos tomados de campo que se encuentran a una distancia inferior a 50 metros. Este análisis se centra en el lugar cercano, en donde la roca es sometida a mayor cantidad de

energía durante las explosiones. La metodología de trabajo se basó en la obtención más adecuada de datos con ensayos mecánicos, perfiles sísmicos, y registro de voladuras. A lo largo de los trabajos realizados, se ha demostrado de forma concluyente que es posible determinar con certeza, utilizando técnicas como el estudio de vibraciones, pruebas mecánicas y la medición de la transmisión sísmica en la roca, a qué distancia los explosivos no causarían daño alguno en la roca ornamental.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Dueñas (2018), en su investigación “Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el bypass 179. Compañía Minera Kolpa S.A.” (Tesis de pregrado). Busca explorar y vivenciar el procedimiento de disminución de los efectos adversos sobre la estructura de roca a través de la supervisión, simulación y evaluación de las vibraciones producidas por explosiones en el Bypass 179, se aplicó el tipo de investigación tecnológica de nivel experimental, la forma de recolectar datos fue la observación sistemática, estructurada, regular o controlada y escrita, que se empleó como instrumento un reporte de vibraciones.

Se procedió a simular las intensidades de vibración alrededor de los motores de perforación, tanto en planta como en perspectiva, en base al criterio de daño ya establecido según explosivo en análisis. Llegando a la conclusión que el control y reducción del daño en el macizo rocoso en el ByPass 179 de la Compañía Minera Kolpa SA se detecta a través del monitoreo, simulación y predicción de movimientos sísmicos generadas por las voladuras. Mediante el modelamiento se pudo conocer cómo se comportarían las vibraciones según el tipo de explosivo utilizado y, finalmente, a través del análisis de vibraciones se identificó el adecuado explosivo generaría el que el mínimo daño que producen las voladuras de borde.

Cornejo y Huaman (2022) hizo una investigación titulada “Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre”, que tuvo como objetivo formar un modelo matemático de precisión, se propone establecer la capacidad máxima de carga de los taladros se encuentra en su límite operativo utilizados en detonaciones del tajo, con el fin de controlar los movimientos vibratorios formados y minimizar su efecto sobre los taludes finales y las estructuras cercanas a la operación minera, para la investigación se recolecto datos históricos de monitoreo de vibraciones en los 2 últimos años y se recurrió a estudios técnicos pasados.

Finalmente se concluyó que es factible desarrollar un tipo predictivo de modelo predictivo preciso de movimientos vibratorios generadas por las voladuras en una operación minera, siempre y cuando se cuente con una recopilación adecuada de datos de seguimiento de vibraciones y se realice una distinción adecuada de la información obtenida.

Orihuela y Dapello (2009) en su investigación de título “Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una Mina modelo” plantea como objetivo desarrollar un modelo de predicción que puede ser empleado como referencia para futuros trabajos en la mina de prueba, para lo cual se hizo primero mediciones de VPP sin cambiar la cantidad de carga pero modificando la ubicación de los equipos de medición y segundo se hizo mediciones de VPP sin modificar las ubicaciones de los equipos de medición pero cambiando la cantidad de carga, con los resultados se construyó una modelo predictivo, se llegó a la conclusión en el modelo creado se ha evaluado mediante pruebas de voladuras en una mina modelo, demostrando que no se producirán vibraciones que superen la extensión reconocida por el Bureau of Mines (50.8 mm/s) y, por lo tanto, no representarán una conminación para las distribuciones cercanas. Asimismo, destaca la importancia de contar con modelos predictivos basados en datos reales y adaptados a

las condiciones específicas de cada operación minera, incluyendo aspectos como la geología, topografía, parámetros de voladura, clima, entre otros.

2.1.3. Antecedentes Locales

Huaracco y Quintanilla (2019) en su investigación titulada “ Diseño de carga y amarre para optimizar la voladura y su impacto económico en el tajo Ferrobamba – Las Bambas 2018” realizada con el propósito de definir estudios de embarcar y atener para incrementar la voladura, evaluar su impacto financiero y reducir el sobrequebre y vibraciones en el Tajo Ferrobamba. La investigación fue de tipo descriptivo - correlacional y de diseño cuasi experimental, para la recolección de la información se usó reportes e informes de diferentes áreas operativas. Se realizó una prueba para determinar la distancia de sobrequebre y determinar las cargas en buffer, finalmente se concluyó que para los taladros de contorno se necesitan alrededor de 300 kg de fluido gasificado para empujar los perforadores de ajuste. Por otra parte, el análisis de la ondulación fundamental en las colosales permitió identificar los momentos en los que la amplitud de las velocidades era menor. Como resultado, se disminuyó el ruido producido por las explosiones y sus consecuencias en los lechos de roca del tajo Ferrobamba.

Aragón (2019) hizo una investigación titulada “Aplicación de voladura controlada para estabilizar taludes de banquetas en el sector de Senseccalla, del tramo VII proyecto de la carretera Ayacucho Abancay y Div. Kishuara” que planteó como objetivo determinar si es posible estabilizar taludes de corte a través de una voladura, el estudio se realizó mediante metodología inductiva de tipo aplicada, como parte del estudio se ejecutaron investigaciones geofísicas a través del método de refracción sísmica y MASW, determinando presencia de discontinuidades paralelas al talud por lo que se recomienda como talud de corte 1H:3V con banquetas de 3m cada 10m de altura en los cortes que se realice.

Eliza (2021) en su investigación titulada “Optimización de costos en la voladura de precorte en la mina Cuajone – Moquegua” plantea como objetivo optimizar los parámetros técnicos – operativos para obtener paredes de taludes estables finales, la investigación fue cuantitativo de nivel evaluativo experimental para la toma de datos se usó ficha de evaluación de disparo, software de simulación de perforación y voladura, sismógrafos. Luego del monitoreo de voladuras y haber realizado las pruebas se concluyó que al emplear en paredes finales el método de voladura controlada de precorte, se ha podido aumentar en declives próximos el Factor de Seguridad a partir de 1.476 hasta 1.798, según se ha comprobado mediante el uso del Software Slide de Rock Science. Además, los registros de los sismógrafos de campo lejano exhiben que la cantidad de vibraciones amortiguadas por los taladros de extracción es también se ha incrementado, pasando de un 44,79% a un 71,5%, lo que es una significativa mejora en comparación con el año anterior. con la técnica utilizada anteriormente.

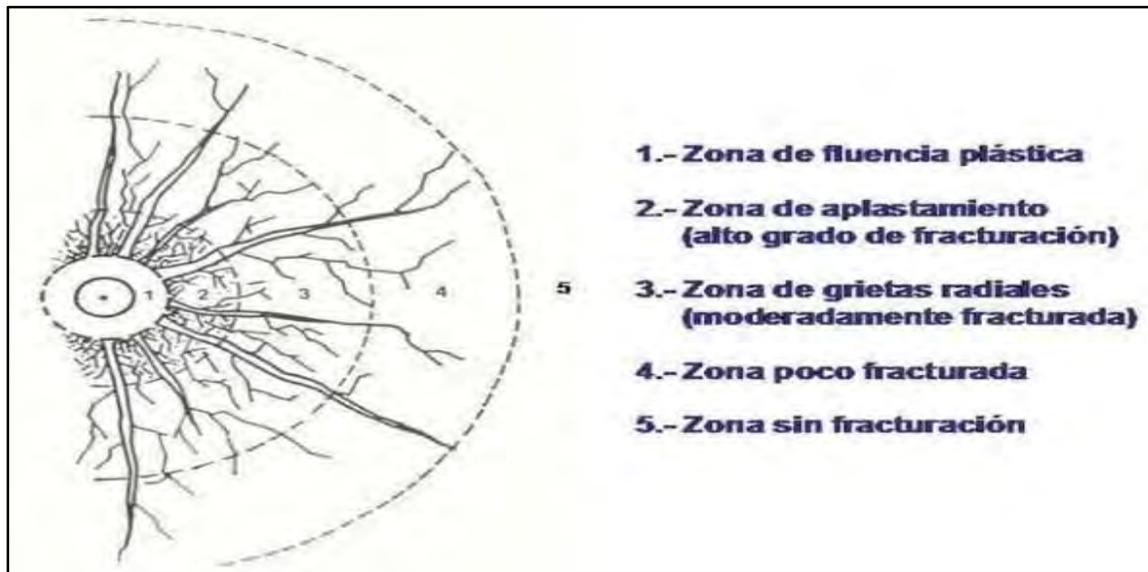
2.2.Bases teóricas

2.2.1. El macizo rocoso

Las características de las rocas conforman el sustancial inconveniente mientras se avanza hacia la voladura ideal Alejano (2004) precisa que el macizo rocoso es la manera como están compuestas en su estado oriundo las rocas. Por tanto, el conjunto de rocas será determinado por la roca y su estructura, la cual incluirá fallas, estratificación, juntas, pliegues y demás rasgos de la estructura. Es por ello por lo que los pastizales son discontinuos y pueden tener características diferentes o no homogéneas.

Figura 1

Tipos de fisuras en las proximidades del barreno



Nota: Libro de perforación y voladura de rocas en minería

En la figura 1, se instituye la interconexión que existe entre las características de las rocas, los factores que se pueden controlar y algunos de los procedimientos más importantes del tiempo minero.

2.2.2. Mecanismos de Fractura

Por mucho tiempo varios investigadores han pretendido emplear las definiciones de la física y el funcionamiento de la ruptura, con el fin de entender los principios básicos que causan que se rompa la materia mineral. Las partículas no siempre se comportan como materiales frágiles porque normalmente estas partículas tienen fallas a macro y microescala.

A excepción de los tamaños más diminutos, un grano de roca puede ser considerada un material endeble, o sea, que la fuerza aplicada en un punto que ocurra una fractura es proporcional a dicha fuerza. Griffith observó que, cuando un material está sometido a tensión, la presencia de fisuras o

aberturas conduce a que haya una mayor concentración de fuerza en un objeto sólido. (Ricardi, 2017)

2.2.3. Mecanismo de Fragmentación de la Roca

Bernaola et al. (2013) en su libro perforación y voladura de roca en minería divide la detonación del explosivo en dos fases:

- La fase inicial de una voladura se identifica debido a la existencia de una onda expansiva que puede variar en velocidad y que es un señalizador importante de la cabida de fracturación del detonante.
- Una segunda etapa, en la que se genera una elevada concentración de vapores a una alta temperatura.

En el tiempo en que el material detonante se halla encerrado en un taladro, puede percibirse que se origina una explosión de onda que se extiende por del bloque de roca que lo rodea.

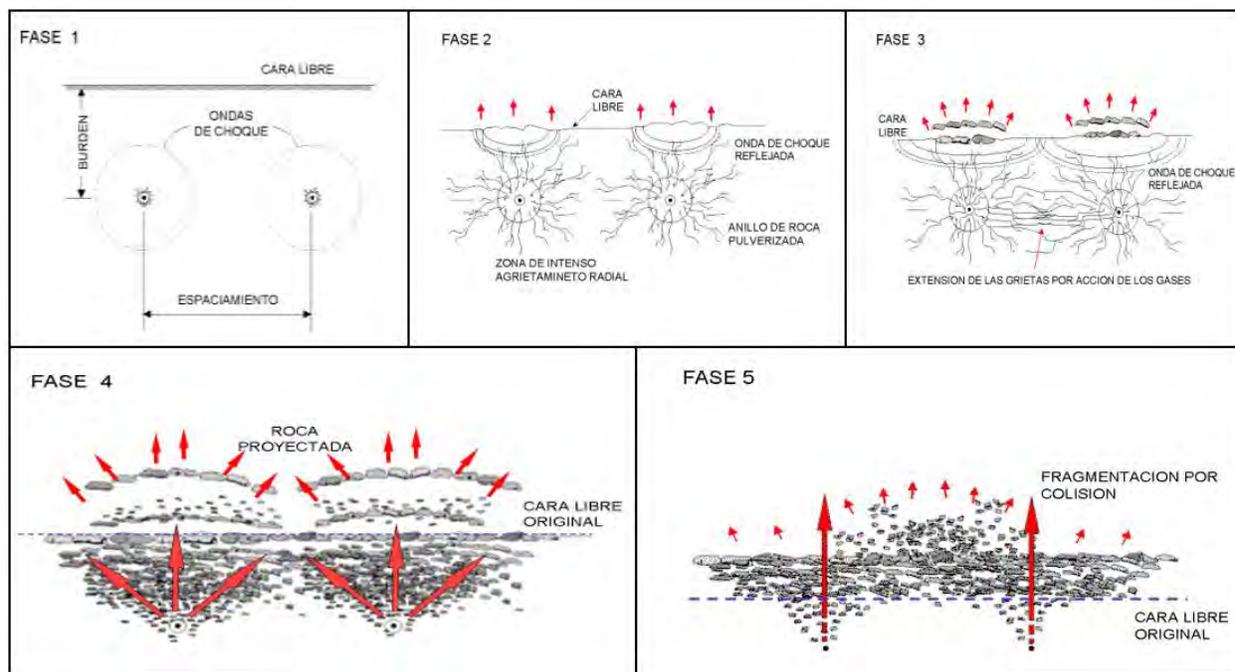
Al aproximarse al barreno, la onda de detonación genera una sensación de compresión, sin embargo, una vez que ha alcanzado a la onda, este efecto se convierte en una acción de tirar.

Esta primera ola de choque viaja a entre 3000 y 5000m/s a través de la roca que la rodea.

Bernaola et al. (2013)

Pernia et al. (1987) en su manual de Perforación y voladura de rocas menciona “La fragmentación de materiales rocosos con explosivos intervienen, al menos, ocho mecanismos de rotura, con mayor o menor responsabilidad, pero participes todos en los resultados de las voladuras”.

El agrietamiento radical, la fracturación por liberación de carga, la trituración de roca, el rebote de la onda de choque, amplitud y apertura de las hendiduras radicales, rompimiento por cizallamiento y rotura por colisión y flexión.

Figura 2*Resumen de Mecanismos de rotura*

Nota: Tomado de informe de Orica Mining Services

2.2.4. Tipos de Voladura

Las Voladuras de producción convencional: Busca la mayor la separación y el ensanchamiento de la roca.

- a) **Voladuras de contorno:** Empleadas con el objeto de reducir el deterioro de muros, terrazas, cimientos y edificaciones.
- b) **Voladuras de rampas:** Debido al aprieto y la disposición de las cavidades, el peso de las cosas es limitado.
- c) **Voladuras secundarias:** Voladura empleada con el fin de disminuir el tamaño de bolones.

2.2.5. Teoría de la voladura de contorno

Pernía et al. (1987), en su Manual de Perforación y Voladura menciona que, durante la detonación de un explosivo en un taladro lleno completamente, se crea una zona cercana a la carga en la que la capacidad de resistencia a la compresión es sobrepasada, provocando la trituración y pulverización de la roca. En las zonas alejadas de este lugar de transformación, los afanes de arrastre generados por la onda de presión crean un patrón de fisuras rigurosas que se extienden en torno a de la broca.

Si un par de cargas explosivas son detonadas al mismo tiempo, las grietas radiales que se generan alrededor de los taladros tienden a propagarse de manera uniforme en todas las direcciones. Cuando las ondas de choque producidas por ambas cargas se encuentran en el lugar intermedio entre los taladros, se generan esfuerzos de tracción que no se orienten en la dirección del eje de simetría. Los cuales superan la resistencia dinámica de la roca a la tracción, lo que genera nuevas grietas y favorece la apertura de grietas radiales que se extiendan en la dirección del trayecto proyectado.

Más tarde, el ancho de las grietas aumenta debido al acto de calza que ejercen los vapores de gas de la detonación que las rodean y penetran en las mismas. La expansión selectiva en el eje y al igual que la acción de abrir causado a causa de la acumulación de vapor de gas, genera un patrón de ruptura que se corresponde con la cisura que se planeó. El empuje que generan los gases es el componente más importante por medio de una voladura de perfil, por lo tanto, debe permanecer hasta que se haga la unión de las fisuras que surgen desde los taladros más cercanos. Para lograr esto, se debe ajustar la distancia entre el taco y el palo para evitar que los gases salgan de la superficie terrestre.

2.2.6. Tipos de voladura de contorno

Los métodos de excavación controladas más comunes actualmente son:

- Voladura de Precorte.
- Voladura de Recorte.
- Voladuras Amortiguadas.

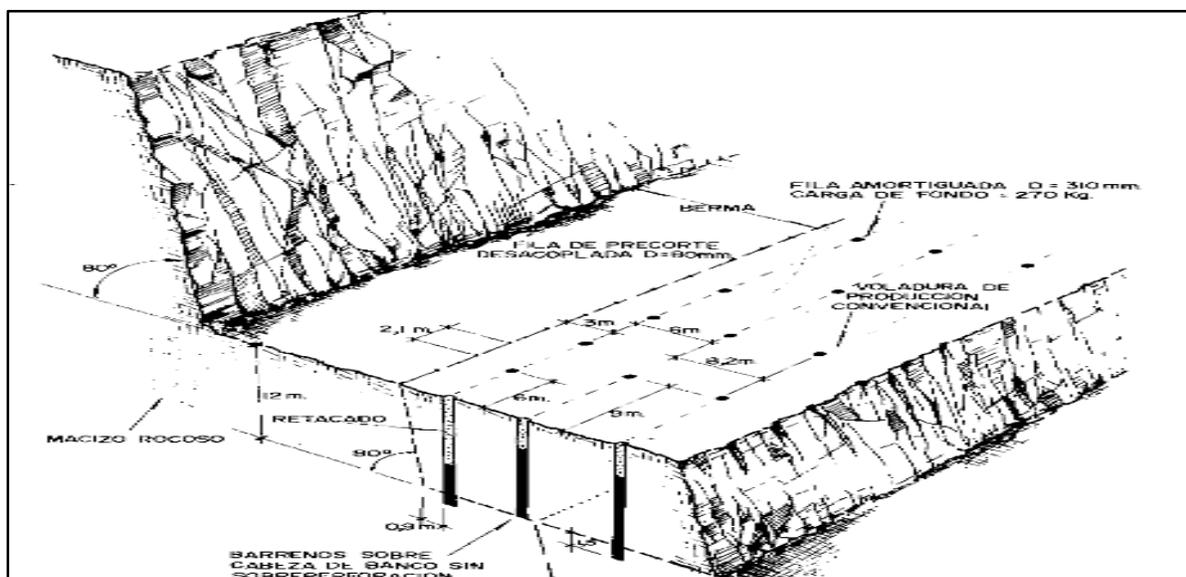
2.2.6.1. Voladura de Precorte

Las voladuras de precorte se disparan antes de las voladuras con el propósito de elaborar un mapa de grietas y un filtro para las vibraciones entre el banco volado y el resto de macizo rocoso.

Básicamente en este tipo de voladuras los taladros están alineados en una sola línea de menor diámetro y menor carga explosiva por lo que su carga de perforación es menor y, por ende, el costo es mayor, ya que no se utiliza para romper la roca.

Figura 3

Ejemplo de Voladura de Precorte



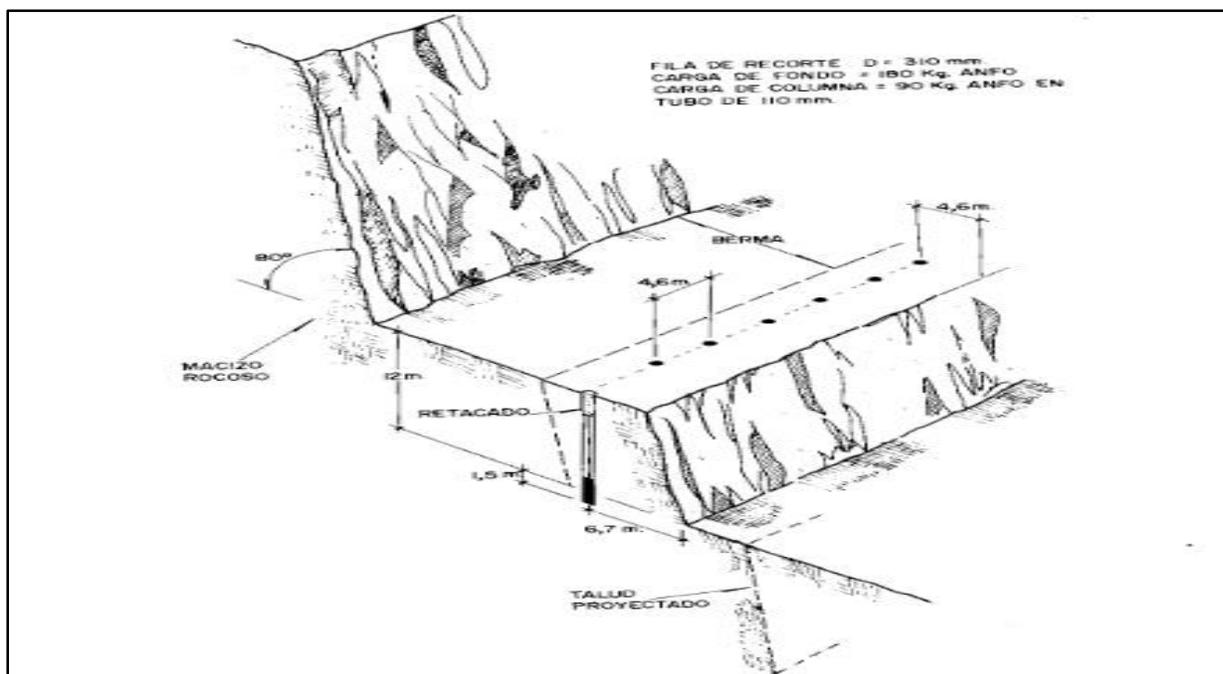
Nota: Tomado de (Pernia , Lopez, Lopez, & Ortiz, 1987)

2.2.6.2. Voladura de Recorte

Es la destrucción de un solo conjunto de agujeros de perforación con cargas independientes. Según Pernia et al. (1987) esta forma de minería implica arrancar en dirección de un frente despejado a la roca, de modo que la distancia entre las cargas es superior que en el corte y conlleva un costo menor. En la minería de superficie, al momento en que los barrenos que se utilizan para reducir el tamaño de los mismos son idénticos a los que se utilizan para obtener el producto, se denomina a este procedimiento "trim blasting".

Figura 4

Ejemplo de Voladura de Recorte



Nota: Tomado de (Pernia , Lopez, Lopez, & Ortiz, 1987)

2.2.6.3. Voladuras Amortiguadas

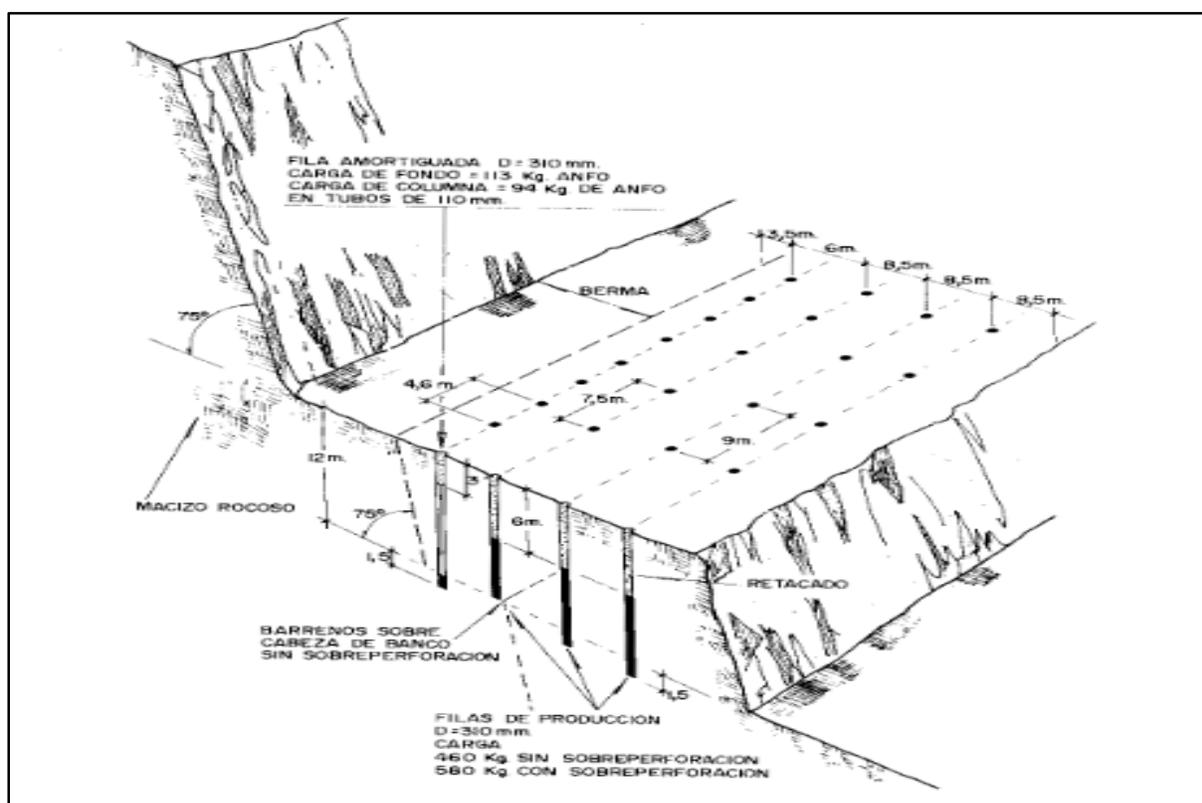
Pernia et al. (1987) define estas voladuras como “Voladuras similares a las convencionales que ha sido modificado el diseño de la última fila, El esquema geométrico es más reducido y las

cargas de explosivo deben ser menores y desacopladas. El disparo se hace normalmente en una sola etapa” (p.294).

Al ser volado la pata, la vibración dirigida hacia la pared terminada es amortiguada por el taco, disminuyendo de esa manera el mínimo las tensiones y la fractura en esta pared.

Figura 5

Ejemplo de Voladura Amortiguada



Nota: Tomado de (Pernia , Lopez, Lopez, & Ortiz, 1987)

2.2.7. Fundamentos de Vibración por Voladura

Dentro de la mejora de la maniobra de la explosión, es fundamental anticiparse mediante un modelo, los efectos y las utilidades de variar ciertos parámetros importantes de la voladura, con la

finalidad de poder deducir la cantidad de vibración en un área específica según el diseño de la voladura.

La voladura no solo fragmenta y mueve la roca, también origina ondas sísmicas que pueden generar daño al macizo rocoso, y pudiendo afectar a fallas y estructuras principales.

Cuando las ondas de vibraciones se dan con elevados niveles de vibraciones y frecuencias dominante más baja, puede ocasionar mayor daño, lo que establece mayores desplazamientos y mayor probabilidad de dañar la roca en su totalidad.

2.2.8. Parámetros que Influyen en las Vibraciones

En las vibraciones influyen los siguientes parámetros:

Geología Local y Características de las Rocas: Este parámetro es muy importante puesto que la amplitud de las vibraciones puede variar según el medio en el que se generen. Por ejemplo, en macizos rocosos uniformes, las ondas se extienden de forma homogénea por todas las direcciones. Sin embargo, la propagación puede ocurrir en estructuras geológicas complejas, como en las pirámides, cambiar según la dirección y exhibir diversos tipos de reducción y leyes de propagación.

- **Cantidad de Explosivo:** Este factor es fundamental porque la magnitud de las vibraciones dependerá proporcionalmente a la cantidad de carga explosiva, a una superior carga habrá un alto riesgo de inestabilidad.
- **Distancia al Punto de Voladura:** Este parámetro tiene un vínculo que se adecúe al grado de vibración; normalmente mientras la distancia a la voladura incrementa reduce la intensidad de las vibraciones.

2.2.9. Daño Inducido por la Voladura

Sanchez (2018) toma en cuenta a la velocidad pico partícula (VPP) al igual que un indicativo de cuán perjudicial puede ser un temblor sísmico. Por lo tanto, se han ideado muestras que evalúan la actuación de la celeridad pico de la partícula cuando ciertas circunstancias específicas de explosión se cumplan. En base a la ubicación de los instrumentos de medición y el impacto que tenga en el lecho de un arroyo, se pueden hallar dos formas de representar el daño causado por la detonación de explosivos.

Diagrama 1

Esquema de tipos de daño inducido por voladura



Nota: tomado de (Sanchez, 2018)

2.2.10. Modelo de Campo Cercano

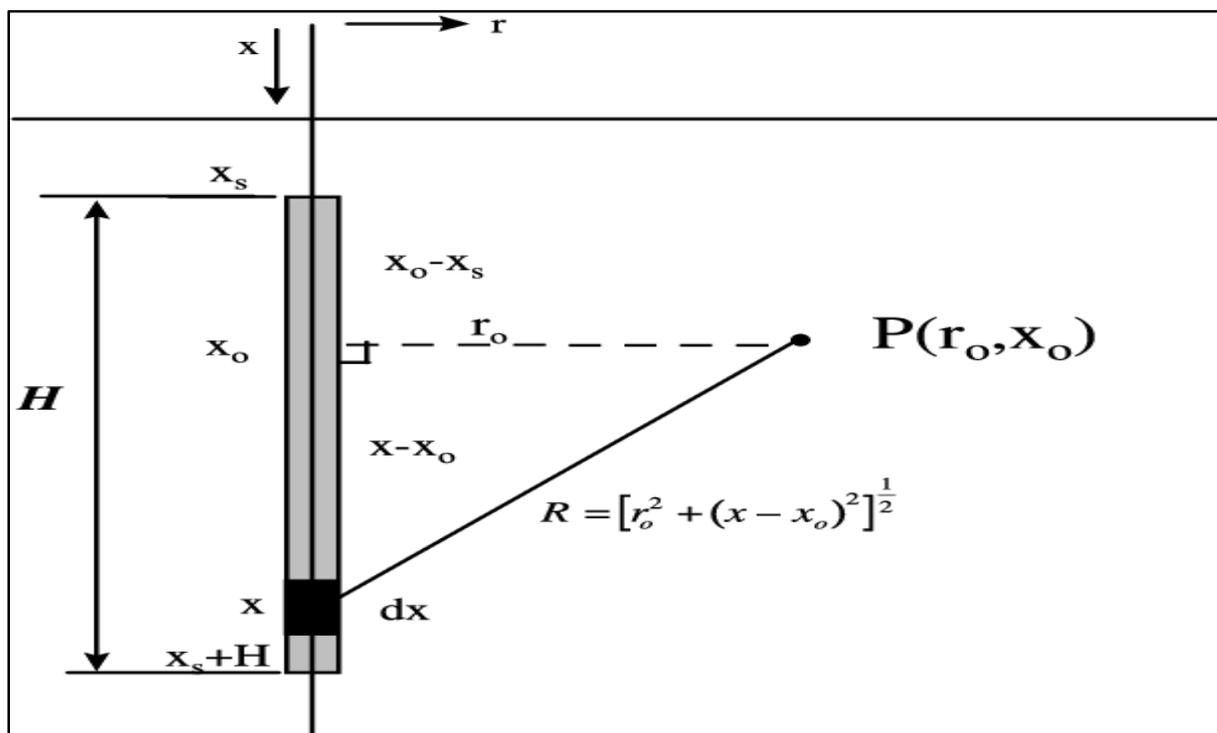
Los daños en campo próximo ocurren junto a la zona de voladura donde ocurre el fracturamiento (<50 m). Holmberg y Persson (1979) desarrollaron para poder predecir las sacudidas en el lugar vecino, una ecuación.

Cano Mucha (2019) señala que en el lugar vecino (bastante próximo de los lugares en los cuales se fractura el mineral), debe modificarse la ecuación para tener presente la representación cilíndrica larga de la carga. La fórmula para pronosticar los movimientos vibratorios en el entorno próximo,

tal cual se describe en la ecuación 1, fue ideada por Holmberg y Persson (1979). La ecuación de H&P indica que el factor que más afecta la máxima vibración y el perjuicio no son el peso del retraso, ya que es más importante la carga lineal, controlada por la mezcla de la densidad de carga y el diámetro del hoyo.

Figura 6

Figura Explicativa de Holmberg y Persson



Nota: Tomado de (CINTEX, 2005)

Ecuación 1: Ecuación de Holmberg & Persson

$$PPV = K \left[\left(\frac{\gamma}{Ro} \right) \left(\arctan \left(\frac{H + X_s - X_0}{Ro} \right) + \arctan \left(\frac{X_0 - X_s}{Ro} \right) \right) \right]^\alpha$$

Donde:

H = Longitud de Carga..... [m]
 γ = Densidad de carga Lineal [kg/m]
 X_s = Longitud de Taco..... [m]
 R_o = Distancia de medición, desde la carga [m]
 X_o = Profundidad de medición [m]
 α = Factor de Decaimiento
 K = Factor de Velocidad

El gráfico ilustra a la velocidad de partícula en su puesto máximo (PPV), en un espacio determinado, está asociada con la posición de este punto en relación con la carga, el mecanismo de detonación y la forma del hoyo, que está determinada por la intensidad de carga lineal " γ " (Kg/m), y lo más relevante, por la manera en que cada macizo rocoso afecta la atenuación (las constantes K y a).

2.2.11. Campo Medio y Campo Lejano

Para pronosticar el movimiento de un objeto en el espacio lejano, el modelo más empleado es el de Devine.

Desde una perspectiva teórica, este criterio es el más adecuado para describir la conducta de la agitación en el espacio distante generado por cargas cilíndricas. Según el análisis dimensional, para corregir los trayectos en este caso, es necesario dividirlos por el cuadrado de la cantidad de peso. (Contreras, 2011).

Cornejo y Huaman (2022) en su investigación “Estimación de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de estructuras en una mina superficial en proceso de cierre” considera el modelamiento para distancias mayores a 350 m desde el lugar del disparo en campo lejano.

No se toma en cuenta un punto medio en cuanto a la medición de ruidos. Sin embargo, para dicha investigación se consideró las mediciones que se sitúan entre los 30 y los 150 metros desde el punto de detonación se consideran mediciones en el campo medio. Para estas mediciones, se utiliza el modelo de Devine, ya que es el modelo más utilizado debido a su practicidad. (Cornejo & Huaman, 2022)

2.2.12. Deformación Inducida

CINTEX (2005) en su “Manual de monitoreo de vibraciones generadas por tronaduras, análisis y modelamiento” precisa que El motivo por el que se utiliza el PPV como base es que la mayoría de los estudios cree que el perjuicio se origina por la velocidad de la onda P y la distorsión inducida, en otras palabras, que la frecuencia de vibración posee una relación inmediata con la fuerza una vez que la onda viaja tal y como una superficie lisa y la distensión es elástica. Debido a que las vibraciones se componen de una componente de frecuencia sinusoidal de compresión y tensión que se aproximan en cantidad y el soporte a la tiesura es persistentemente más pequeña que la de compresión, la roca puede soportar la mayor cantidad de esfuerzo a tensión.

Ecuación 2: *Deformación inducida*

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma}{E}$$

2.2.13. Velocidad Pico Partícula Crítica

Según CINTEX (2005) la velocidad de partícula máxima (crítica), PPV_c, que es capaz de soportar la roca antes de que ocurra el fallo por tensionamiento, se estima a partir de la Resistencia a la Tensión (σ), el Módulo de Young, E y la celeridad de expansión de la onda P, V_p, empleando la ecuación:

Ecuación 3: Velocidad pico partícula crítica

$$PPV_c = \frac{\sigma t V_p}{E}$$

2.2.14. Vibraciones

Bernaola et al. (2013) entiende por vibraciones como los acontecimientos que causan la propagación de energía a través de un medio por medio de un movimiento ondulatorio. El suceso de vacilación esta caracterizado a través de un origen o transmisor, el cual es un productor de vibración, y por una materia que es receptora de estas. El suceso de las vibraciones se evidencia por un movimiento ondulatorio.

El estampido de un detonante confinado dentro de un barreno en un bloque de roca produce rápidamente una liberación de gases a altísimas presiones y temperaturas. Este súbito incremento de presión en las paredes del barreno se asemeja a un impacto, generando una onda de deformación que se propaga en forma de cilindro en la situación de una carga cilíndrica que se esparce en el barreno, o en forma de esfera en las circunstancias donde sea una carga puntual o esférica. Sin embargo, a distancias considerables en relación con la longitud del barreno, la explosión se puede considerar limitada a un solo número y la onda de propagación se comporta como esférica. En resumen, la cantidad de la fuerza que se requiere para romper un objeto dependerá inversamente de la distancia. Bernaola et al. (2013)

2.2.15. Criterio de Daño Adaptado

Bravo (2018) sostiene que este criterio se asemeja al criterio PPV_c , el cual necesita de fundamento al emplear valores de roca incólume ($\sigma t(i)$ y $E(i)$) al igual que macizo rocoso (V_p), ya que los valores de σt y E se obtienen a través de pruebas en laboratorio y la V_p se obtiene por medio de la técnica de Cross-Hole, que se practica en el terreno. Se pretende que en su totalidad las variables de la muestra se conviertan en variables de masa de roca.

Ecuación 4: *PPVc adaptado al macizo rocoso*

$$PPV_c * = \frac{\sigma_{trm} * V_p (Cross-Hole)}{E_{rm}}$$

Con:

σ_{trm} = Resistencia a la tracción de macizo rocoso.

E_{rm} = Módulo de deformación escalado a macizo rocoso.

Se utiliza el criterio de perjuicio sugerido por Vergara (2016) porque fusiona el juicio de perjuicio de McKenzie con el concepto de vibración de partículas por segundo (PPV) ajustado para el macizo rocoso.

De esta manera, la representación del modelo queda de la siguiente manera:

Ecuación 5. Ecuación para velocidad peak de partícula para macizo rocoso, nuevo modelo propuesto.

$$PPV_{cmr} = \frac{\left(\sigma_t * \exp\left(\frac{RMR-100}{27}\right) \right) * V_p \text{ cross-hole}}{E_i * \exp\left(\frac{RMR-100}{36}\right)}$$

Ecuación para velocidad peak de partícula para macizo rocoso, nuevo modelo propuesto.

En donde:

- σ_t = Resistencia Traccional de roca intacta.
- E_i = Modulo de deformación de roca intacta.
- RMR = Clasificación de macizo rocoso Bienaski 1989

Tabla 3*Criterio de daño adaptado (Vergara 2016)*

Criterio de Daño	Descripción de daño Inducido
Zona 1 > PPV _c	Se supera la resistencia a la tracción de la roca intacta, por lo que se produce ruptura de la matriz de roca intacta y se generan nuevas estructuras.
PPV _c > Zona 2 > PPV _{cmr}	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}	No se produce daño inducido en el macizo rocoso producto de la voladura.

Nota: Estudio de Vibraciones Inducidas por Tronadura en Minera Spence,

2.2.16. Tipos de Ondas

La vibración consiste en propagación de ondas con movimiento armónico.

Aguilar (2018) menciona que la onda de choque de la explosión de la dinamita crea tensión que crea grietas en la roca. Esta también se propaga esféricamente (en todas las direcciones) y traslada energía vibratoria a la roca sólida, la cual es divulgada por medio de una mezcla de módulos representados esencialmente como ondas.

Existen 3 principales tipos de onda, las cuales se observan al momento de analizar las vibraciones por detonación.

Onda Longitudinal - Onda de Compresión (P): Se distinguen porque el desplazamiento de la partícula es normal a la orientación de la detonación en el a nivel horizontal. Se basa en una

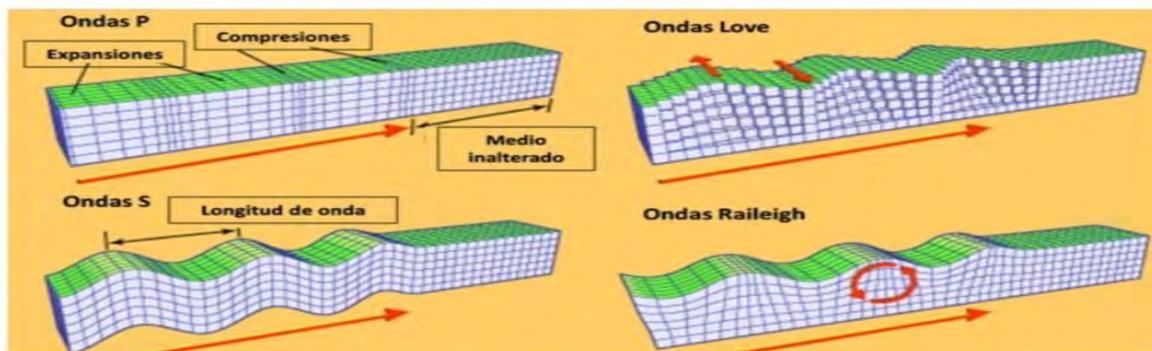
sucesión de compresiones y estiramientos, con alteraciones en el desplazamiento de las moléculas en el mismo sentido en el que se extiende.

Onda Transversal (S): Estas ondas se caracterizan porque el desplazamiento de la partícula se produce de forma vertical a la trayectoria de la explosión en el sentido horizontal, siguiendo trayectorias que forman ángulos rectos con respecto a la recta que articula el origen de la explosión y el lugar de exploración.

Onda de Superficie: Se originan sobre el terreno como réplica a la interrelación de ondas S y P con dicha superficie. Este tipo de ondas experimenta movimientos verticales y horizontales.

Figura 7

Tipos de Ondas Sísmicas



Nota: Tomado de (Pernia , Lopez, Lopez, & Ortiz, 1987)

2.2.17. Propiedades Básicas de Ondas

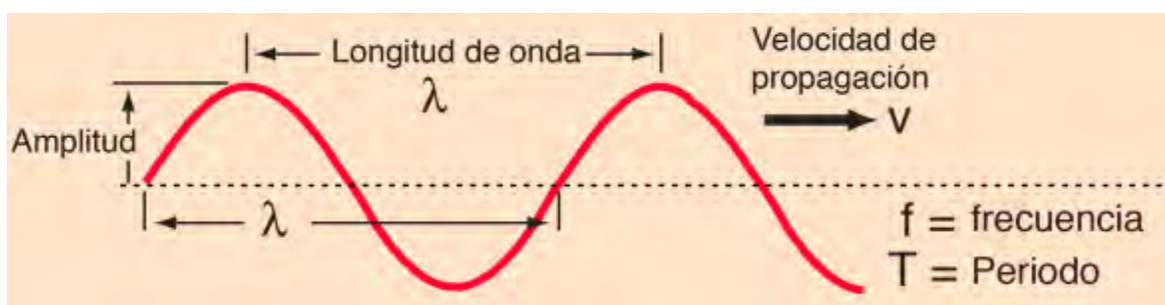
Las características más esenciales de transmisión de ondas según (CINTEX, 2005) de agitaciones son:

- Frecuencia: La cantidad de ciclos de presión y tensión se entregan por un segundo.
- Amplitud: El nivel más alto de presión experimentado por el entorno (relacionado con la alteración individual de partículas bajo presión).

- Duración: El momento completo que el espacio estuvo sujeto a vibración.
- Longitud de onda: La longitud que recorre una onda en un lapso entero de compresión y tensión.
- Velocidad de propagación: La velocidad a la que se mueve la onda, a diferencia de las velocidades de movimiento individuales de las partículas.

Figura 8

Propiedades de una onda



Nota: tomado de página web: (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/wavrel.html>)

2.2.18. Velocidad de Propagación

Aguilar (Aguilar, 2018) describe la velocidad de propagación como la velocidad a la que la onda viaja por medio de la roca. Dicha velocidad se consigue medir empleando un par de geófonos localizados a desemejantes trechos de la detonación y midiendo la discrepancia en el lapso de llegada de cada indicación. En el momento en que se utilizan varios geófonos con el fin de calcular la velocidad de propagación, los geófonos deben estar separados por una distancia suficientemente grande para permitir cálculos más precisos.

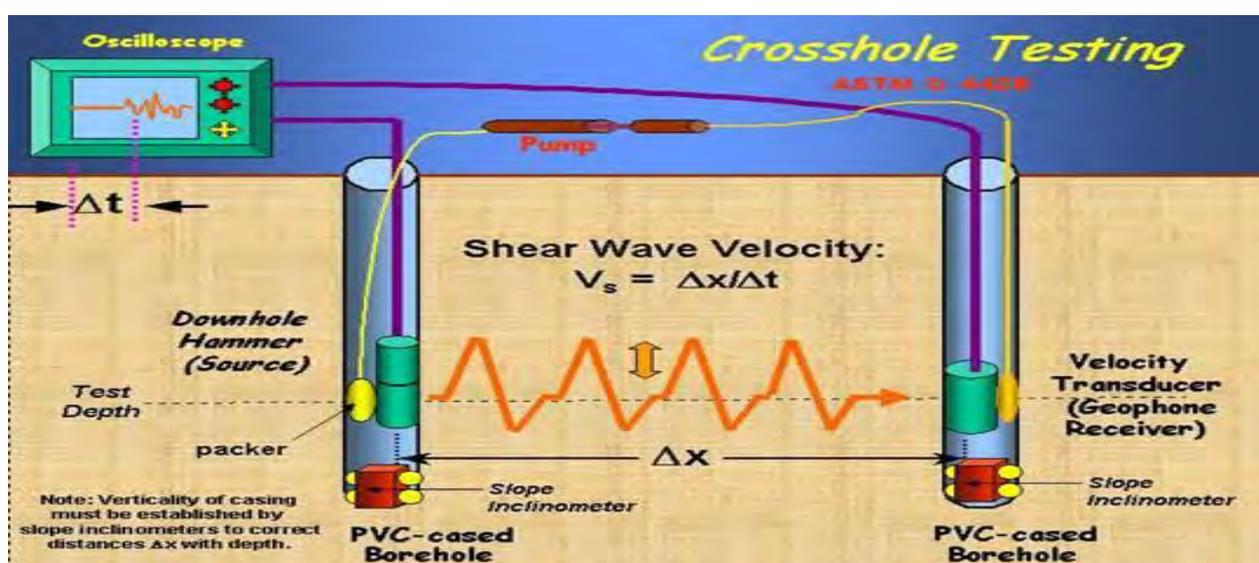
La velocidad de propagación se consigue mediante el método de Cross Hole, que consiste en colocar dos geófonos uno que sea la fuente sísmica y otro el receptor, ambos se colocan a una misma profundidad del taladro de tal manera que la onda generada por la detonación viaje por el

medio circundante y genere una línea más o menos recta. El arreglo permite medir los tiempos de llegada de ambas ondas, (P) y (S). Los datos de tiempo de viaje y la distancia corregida entre los pozos sirven para calcular las velocidades sísmicas de las ondas, P y S.

En la siguiente formula se detalla

Figura 9

Instrumentación de técnica CrossHole



Nota: Tomado de página web: (<https://www.sergeolog.com/metodo-sismico-cross-hole/>)

Ecuación 6: Velocidad de Propagación

$$V_p = \frac{D}{\Delta T}$$

Donde:

D = Distancia de la fuente al geófono

▲ T = Variación de tiempo de llegada

2.2.19. Carga Operante

Es la totalidad de los artefactos explosivos volados en un período establecido durante la explosión de roca. Se considera que el tiempo máximo es de 8 milisegundos para la sincronización de los taladros, lo que implica la suma más alta de kilogramos de explosivos detonados en múltiples taladros dentro de ese lapso.

Las vibraciones generadas están directamente relacionadas con la cantidad de carga explosiva utilizada. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esto no implica necesariamente reducir el consumo específico directamente, sino más bien ajustarlo para lograr una distribución óptima en los taladros, un confinamiento adecuado y un tiempo de retardo apropiado.

2.2.20. Velocidad de Detonación (VOD)

(Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013) menciona que la detonación de la columna explosiva continua hará que el detonante se transforme en una gran cantidad de gas a alta presión y temperatura. La velocidad con la que ocurre esta transición se denomina velocidad de detonación, que se mide en m/s. Es fundamental diferenciar entre la velocidad de voladura (de la respuesta de tipo química) y la onda de encuentro (transporte físico).

La velocidad de detonación es un atributo a considerar al seleccionar explosivos. Cuando se realicen voladuras de rocas blandas o se requiera trituración gruesa, se seleccionará un explosivo de detonación lenta para permitir que su energía se desarrolle gradualmente, y cuando se requiera una fragmentación más intensa, convendrá seleccionar un artefacto explosivo de gran velocidad de estallido.

2.3.Marco Conceptual

2.3.1. Campo Cercano

Es la región o espacio que tiene distancias más cercanas a la fuente de las vibraciones. Los daños en campo cercano se consideran aproximadamente hasta los 50 metros de la voladura porque es donde ocurre el fracturamiento.

2.3.2. Vibraciones

La vibración se refiere a la transmisión de ondas elásticas que causan deformidades y tensiones en un espacio extenso. En el caso de las explosiones en rocas, se genera una vibración debido a la sacudida que causa el encuentro de la bomba al encenderse con la masa de roca.

2.3.3. Velocidad Pico Partícula

Las velocidades pico partícula (VPP) se definen de tal manera que es el mayor valor alcanzado por de entre las tres medidas (desplazamiento, velocidad y aceleración) durante un intervalo de tiempo específico. De todos estos parámetros, la velocidad de vibración se considera universalmente como el indicador más representativo de la intensidad de vibración y los posibles efectos nocivos que puede tener tanto en las estructuras como en las personas. (Minas, 2015)

2.3.4. Velocidad de Propagación

La rapidez con la que viaja una onda es la velocidad a la cual la perturbación se desplaza a través del medio desde su fuente emisora. Si la extensión de onda es definida como el trecho que recorre la onda en un periodo igual a su duración, el lapso es la cantidad de tiempo que demora una onda en recorrer una distancia que sea igual a la longitud de onda. (Ministerio de minas y energía, 2015).

2.3.5. Talud

Se refiere a una elevación o inclinación en la topografía, ya sea natural o creada por el ser humano, que presenta una pendiente generalmente más suave que la de los acantilados. Su altura es menor a los 8 metros. (Becerra, 2020)

2.3.6. Fractura

Fractura estructural es el término empleado para describir la rotura de una roca, ya sea con o sin desplazamiento a lo largo del plano de ruptura. (MINAS, 2019).

CAPITULO III

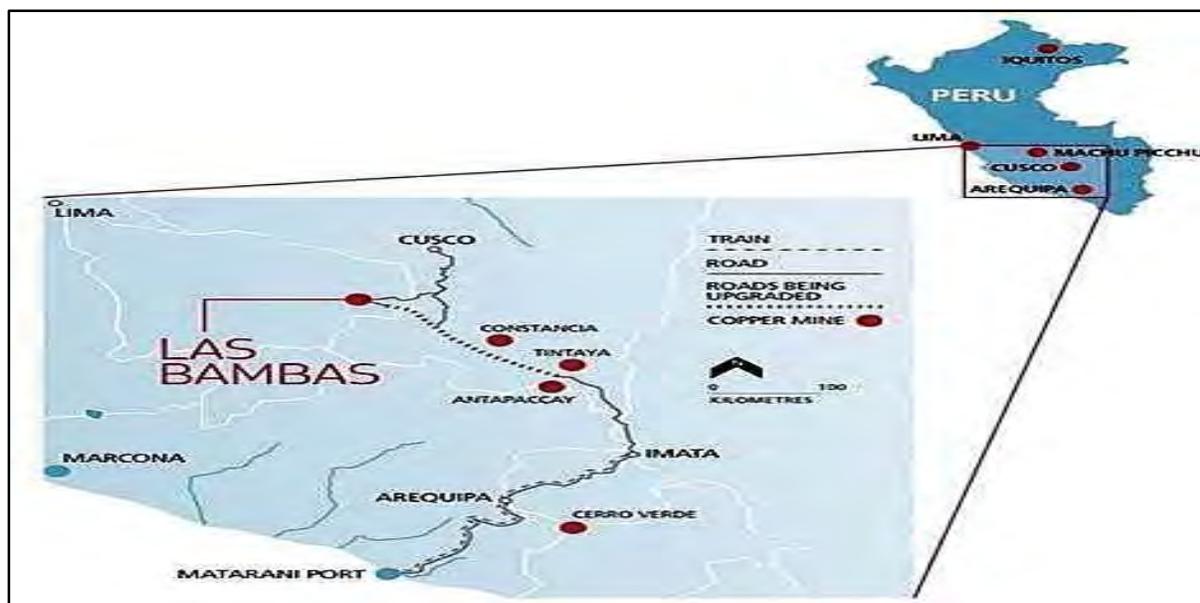
DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD MINERA LAS BAMBAS

3.1. Ubicación

La Unidad Minera Las Bambas se encuentra en la Región Apurímac, a través de los distritos de Tambobamba, Challhuahuacho y Coyllurqui en la provincia de Cotabambas, y en la provincia de Grau, en el distrito de Progreso. Su ubicación se sitúa a una la elevación que fluctúa entre los 4.600 y los 4.800 msnm, aproximadamente a 75 km al suroeste de la ciudad de Cusco. (MMG, LAS BAMBAS, 2017)

Mapa 1

Ubicación Geográfica de Minera Las Bambas



Nota: Tomado de: página web de (MMG, LAS BAMBAS, 2022)

3.2. Acceso

El acceso desde Lima a Cusco se puede realizar vía aérea, de cusco al campamento se puede llegar vía área mediante helicóptero o por carretera; Existen dos rutas de Cusco al campamento minero.

Tabla 4

Rutas de acceso a la mina Las Bambas

Acceso	Distancia Km	Tiempo Hrs.	Tipo de Via
Cusco - Capacmarca - Mara - Campamento	220	6	Trocha Carrozable
Cusco – Anta – Cotabambas – Campamento	260	7	Carretera Asfaltada
Cusco - Helipuerto Las Bambas		0.5	Aéreo

Nota: Elaboración propia.

3.3. Clima y Recursos

3.3.1. Clima

Tomando en cuenta la clasificación del clima de Thornthwaite, el clima de Las Bambas es de tipo B2 S B'3^{ar}, lo que significa que es húmedo, con una regular falta de humedad durante el verano. Además, es un clima mesotérmico y presenta una poca eficacia térmica concentrada durante el verano. (3er EIA de la Unidad Minera Las Bambas, 2016).

En el área que comprende la mayor parte de la acción minera (subcuenca del río Ferrobamba) se tiene la precipitación promedio anual es de 1082.3 mm, pero en enero es de 232.4 mm y en junio es de 2.7mm.

En la cuenca del río Challhuahuacho, la cantidad promedio de lluvia es de 1094.8 mm variando entre 235.1 y 2.8 mm en enero y junio respectivamente.

El 73.8 % de lluvias al año se concentra entre diciembre y marzo. Los meses entre mayo y setiembre comprenden la temporada seca donde solo el 3.3 % de la lluvia anual se registra como lluvia. Los meses de transformación de la temporada seca a húmeda son abril, octubre y noviembre donde ocurre el 22.9 % de lluvias al año.

En las Bambas la estación más fría del año se extiende desde mayo hasta agosto, entre tanto la estación más calurosa abarca de octubre a abril.

Entre los meses de abril y octubre, las temperaturas son menores a 0°C, siendo los meses de julio y agosto las más frecuentes.

Según registros de las estaciones locales en Las Bambas la humedad relativa promedio al año se encuentra alrededor de 62%, la temporada seca registra cantidades menores de humedad relativa que se aproximan al 50%. La humedad relativa durante la temporada húmeda se encuentra alrededor del 80%. La radiación solar fluctúa alrededor de 230 W/m² durante todo el año.

3.3.2. Recursos

3.3.2.1. Flora

Durante el periodo de estudio para el tercer MEIA, se registraron 498 especies de plantas, de los cuales los registros fueron esporádicos y están limitados a unidades de vegetación y zonas específicas

Entre las especies más abundantes se encuentran 322 especies que pertenecen al grupo de las Magnoliopsidas (Dicotiledoneas), 142 especies que corresponden a los Liliopsida (Monocotiledoneas), y los grupos de poca abundancia con 32 especies son los Pteridofitos (Helechos) y las Gimnospermas conformadas solo por un par especies.

En Las Bambas las hierbas son las dominantes en cuanto a su forma de crecimiento, representan el 88.95% de las 498 especies. Más adelante, los arbustos poseen el 7.69% de la vegetación y poseen 12 especies de subarbustos que representan el 2.37%, los árboles representan el 0.59% con solo 3 especies y finalmente 2 especies de cactus que representa el 0.39%.

En relación a las especies clave, se han identificado que existen 8 especies (Echinopsis maximiliana, Escallonia myrtilloides "tashta", Lupinus cuzcensis, Distichia muscoides "maqui maqui", Nototriche armeriifolia, Plantago tubulosa "pako" y Festuca spp.). "ichu", que es Polylepis racemosa "queñual"), se distribuyen por las regiones naturales de vegetación analizadas. Las tres

partes fundamentales se han mantenido previamente identificadas en la Segunda Evaluación de Impacto Ambiental (MEIA) realizada en 2014, que son Pumamarca, Choquecca y Polylepis.

3.3.2.2.Fauna

- Mamíferos

Durante el periodo comprendido entre 2012 y 2016, se han documentado un total de 16 especies de mamíferos en Las Bambas. Estas especies se distribuyen en siete linajes y cinco clases. De las diecinueve especies que se han registrado, nueve son animales pequeños de sangre caliente que no vuelan, uno es un ave de sangre caliente y las seis restantes son mamíferos de mayor tamaño.

Se observó la presencia del zorro colorado y la taruca que son especies tomadas con mucho interés para la conservación. El ratón orejón de ancas amarillas es la especie más abundante registrada en el hábitad de pajonal, el roedor es la especie más abundante en hábitad de matorral seguida del ratón vespertino precioso.

En la sección de flora en ámbito rocoso, se encontraron únicamente roedores como especies registradas. En esta sección, siendo más común la especie fue el ratón de ancas amarillentas de cola peluda.

Se registraron cuatro especies de uso local en esta área: la vizcacha (*Lagidium viscacia*), el gato de los pajonales (*Leopardus pajeros*), el zorro colorado (*Lycalopex culpaeus*) y el zorrino (*Conepatus chinga*).

- Aves

En Las Bambas durante el 2012 y 2016 se identificaron 75 especies de aves, de las cuales 28 eran de familias diferentes y otras 14 de órdenes diferentes.

El gorrión de collar rufo, el carpintero andino, y el fringilo de pecho cenizo son las especies de aves de mayor abundancia en pajonal, mientras que las especies de mayor abundancia en la unidad de vegetación son el gorrión de collar rufo, el fringilo de pecho cenizo y el zorzal.

La especie de mayor representatividad en las lagunas es el Anatidae con 3 especies. El fringilo de pecho cenizo, y cauquén huallata y el pato crestón respectivamente. Las aves terrestres clave en la zona son el canastero de dorso rayado, el canastero cordillerano (*Asthenes modesta*) y el pitajo d'Orbigny. Por otro lado, las aves acuáticas clave identificadas son el cauquén huallata y el pato crestón.

- Anfibios y reptiles

En Las Bambas, se han documentado un total de seis especies de herpetofauna, las cuales se distribuyen en seis familias y pertenecen a dos órdenes. De estas especies, cuatro son anfibios y dos son reptiles.

En los pastizales y pantanos, la cantidad de especies de anfibios y reptiles es mayor. Gran parte de la diversidad de especies de reptiles y anfibios se observó en el pajonal y bofedal, con un total de seis especies registradas. Le sigue el roquedal, donde se encontraron 5 especies, y los sitios intercedidos, donde se registraron cuatro especies. En las 6 reportadas especies, tanto la rana acuática como la lagartija son consideradas de importancia para la conservación. En temporada húmeda y seca la más abundante especie es el sapo, continuado por la rana *Pleurodema marmoratum*.

3.4. Geología

3.4.1. Geología Local

Por lo usual, la geología del substrato en el lugar está formada por rocas carbonatadas y clásticas del Cretácico, las cuales están moderadamente a fuertemente plegadas. Estas rocas

y asientan en la parte superior de un batolito de granodiorita del Terciario (Eoceno). En el área, las cadenas cretácicas se exhiben como grandes pedazos de tejado que se han preservado dentro del batolito. Tanto las capas cretáceas como el batolito granodiorítico han emergido a la parte superior debido a una combinación de levantamientos regionales, fallas de bloque y erosión.

En el Pleistoceno tardío, se produjeron flujos volcánicos piroclásticos que se originaron en centros volcánicos hacia el sur. Estos caudales se depositaron en depósitos como un terrado en las zonas menos profundas de los valles, estos depósitos se formaron de forma contradictoria sobre las rocas sedimentarias e intrusivas que fueron desgastadas.

Localmente el área del presenta afloramientos aislados de monzonitas, dentro del complejo de intrusiones graníticas, en contacto gradacional con estructuras sedimentarias, suprayaciendo a las formaciones se presenta depósitos no consolidados compuestos por suelo residual producto de la alteración in situ de la roca, cuya descripción es citada a continuación:

- Calizas: se presenta en estratos sedimentarios de resistencia baja a alta, moderadamente alterada a caliza marmolizada de grano fino en estratos medianos a gruesos.
- Monzonita: se presenta en afloramientos intrusivos que surgen en todo el sector noreste donde se emplazará el botadero. En superficie esta roca se encuentra moderadamente fracturada y alterada; textura granular y de coloración gris blanquecino.
- Suelos residuales: alteración in situ de la roca, compuesta por grava arcillosa con arena, grava limosa, plasticidad media a alta, densa a medianamente densa, color gris claro, organización uniforme, grava angulosa a subangulosa, con bolonería y bloques.

La formación de mineralización está asociada a los depósitos de skarn controlados por la estructura, que están relacionados con intrusiones ígneas del Eoceno tardío, así como con la presencia de fallas y fluidos.

3.4.2. Geología Regional

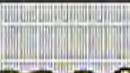
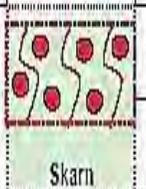
Se encuentran series sedimentarias del Cretácico inferior que están fuertemente plegadas y falladas. Estas secuencias incluyen, desde la base hasta la parte más reciente, la Formación Soraya, compuesta por cuarcitas, seguida por la Formación Mara, que consiste en Las lutitas rojas y las calizas, y finalmente las calizas de la capa más elevada de la Formación Ferrobamba, conforman la base del grupo. Durante el Cretácico tardío y el Terciario temprano, estas cadenas experimentaron deformación y levantamiento.

Las capas clásticas continentales del Grupo de Puno se asentaron encima de la cadena cretácica que había sido desnaturalizada y elevada en dirección noreste del lugar de explotación.

La formación de cobre se concentra mayormente en los puntos de encuentro entre las calizas de la Formación Ferrobamba y las rocas intrusivas de la Era Terciaria, como la granodiorita, la monzonita y la diorita. Los depósitos de caliza pertenecen a la era Cretácica y su mineralización es parecida a los Skarn de Tintaya, Antamina y Magistral, esto se observan en la figura 10.

Figura 10

Cronoestratigrafía generalizada del distrito minero Las Bambas

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOSTRATIGRAFICAS			MAGMATISMO	MINERALIZACION	OROGENIA		
CENOZOICO	CUATERNARIO	Reciente			30 - 50 m		Morrena, aluvial			
		Pleistoceno	Gpo Barroso	Vol. Vilcarani	100 m		Tufos dacíticos		Quechua 4 1.5 Ma	
	TERCIARIO	Plioceno							Quechua 3 5 - 4 Ma	
		Mioceno							Quechua 1, 2 17 - 4 Ma	
		Oligoceno								Incaica 3, 4 30 - 22 Ma
		Eoceno								Incaica 2 43 - 42 Ma
Paleoceno							Incaica 1 59 - 55 Ma			
MESOZOICO	CRETACEO	Superior		Fm Anta	50 - 150 m		Limo-lutitas rojizas		Peruana 84 - 79 Ma	
		Medio		Fm Ferrobamba	300 - 500 m		Calizas masivas, clásticas, bioclásticas, chert			
		Inferior		Fm Mara	50 - 200 m		Clásticos calcáreos limolutitas areniscas			
Gpo Yura	Fm Soraya		200 - 300 m		Areniscas					

Nota: Tomado de Tesis Rodolfo Mujica G.2019

3.4.3. Geología Económica

Según Acosta et al. (2011), el plan minero está localizado en el Distrito de Coyllurqui, Provincia de Cotabambas, Provincia de Apurímac. Ubicado en las coordenadas UTM: 786500 E y 8444000 N, Distrito 18. Siendo un almacén de skarn de cobre y oro. Se sitúa en representación de dique en una secuencia cretácica degenerada de areniscas y cuarcitas en F.m. Soraya, arenisca, limolita roja y lutita en F.m. Calizas de las formaciones Mara y Ferrobamba. El ordenamiento de las rocas está basado en la secuencia del lecho rocoso Andahuaylas-Yauri (Oligoceno-Mioceno). Dentro de los más importantes minerales se encuentran oro (Au), cobre nativo (Cu), bornita (bn), calcopirita (cp) y están dominados por variación de skarn. Almacenamientos Estimadas 40 Mt @ 2.1-6.0% Cu, Potencial Estimado 500 Mt (Minero Perú).

Las Bambas es un yacimiento de cobre que se clasifica como un depósito del tipo pórfido-skarn, con un volumen relativamente pequeño, pero con una alta ley de mineralización. En este yacimiento, se encuentran sulfuros, óxidos y minerales de hierro asociados a la mineralización pórfida. El proyecto de Las Bambas considera el progreso de tres depósitos minerales distintos: Chalcobamba – Charcas, Ferrobamba y Sulfobamba.

Las reservas minerales de Las Bambas consisten en aproximadamente 6,9 millones Tn de cobre con una ley de cobre de 0,73 %. Además, se estima que existen recursos minerales de alrededor de 10,5 millones de toneladas de cobre con un estatuto de cobre de 0,61 %, utilizando un estatuto de corte de 0,3 %. Estos resultados se obtuvieron a través de un extenso programa de perforación que abarcó aproximadamente 329.000 metros.

Se proyecta que la producción inicial de Las Bambas será de más de 2 millones de toneladas de cobre en pasta durante los 5 primeros años de operación.

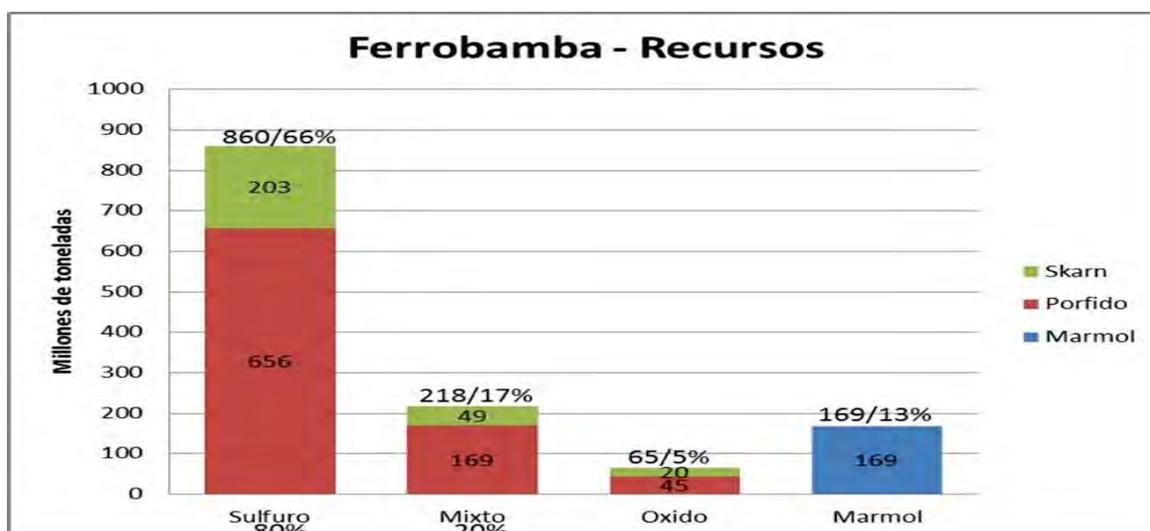
Las exploraciones y perforaciones realizadas han confirmado el gran potencial de Las Bambas como un depósito de clase mundial de cobre y oro. Se considera que el yacimiento se encuentra en una posible constancia geológica del conocido "Copper Belt del Sur", donde se hallan sustanciales depósitos de cobre como Tintaya-Antapaccay y quechua en Perú, y Escondida y Chuquicamata en Chile.

La calcopirita es el mineral de mineralización más común en Las Bambas, y contiene también oro y plata en asociación con el cobre. La mineralización se encuentra distribuida en rocas ígneas de magnetita y granate en un yacimiento de cobre.

Los minerales con alteración potásica y silicificación tienen diseminaciones de calcopirita. El proceso de mineralización secundaria de enriquecimiento es leve por el intenso desgaste glacial y a la consistencia del skarn. No obstante, se han encontrado diversos minerales metálicos, solo algunos de ellos son comunes y a bajo costo y principalmente en el cuerpo de skarn. (MMG, LAS BAMBAS, 2022)

Gráfico 1

Tipos de materiales en Las Bambas



Nota: Tomado de informe de (EXSA, 2020)

3.5. Descripción de las Operaciones Unitarias de Mina

3.5.1. Perforación

Es la acción de inicio dentro del período de minado que radica en ejecutar un orificio sobre la superficie del macizo rocoso con el fin de albergar en él se encuentran los detonantes, los cuales se utilizarán en posteriormente realizar la detonación.

En las bombas actualmente se tiene 10 perforadoras para taladros de producción y 4 perforadoras para perforación secundaria y de precorte.

La flota de perforadoras se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 5

Flota de Perforadoras

Cantidad (unidad)	Modelo	Diámetro
3	P&H 320XPC	12.25 pulgadas
4	CAT MD6040	12.25 pulgadas
3	PV 351	12.25 pulgadas
2	DR560	5 pulgadas
2	SMART ROCK	5 pulgadas
14	TOTAL	

Nota: Tomado de Oficina de Perforación y Voladura, MMG

Foto 1*Perforación de taladros de producción*

Nota: Foto tomada en tajo Ferrobamba

3.5.2. Voladura

La actividad de detonación implica la iniciación de los detonantes ubicados en las brocas con el propósito de partir el material para facilitar su carga, transporte y procesamiento. La empresa encargada del carguío de los taladros es Orica Mining Services Perú S.A.

Explosivo Utilizado: ANFO, Heavy ANFO en sus diferentes mezclas: 65/35,70/30 y 100% emulsión y Flexigel (explosivo en prueba).

- Anfo = Nitrato de Amonio (94%) + Diesel N° 2 (6%)
- Heavy Anfo = Anfo + Emulsión
- Flexigel = Emulsión + EPS (perlas de poliestireno expandido)

Los camiones fabrica se utilizan para transportar materias primas para su posterior fabricación Insitu en la malla de carguío.

Actualmente se tiene 5 camiones fabricas para el carguío de taladros en los diferentes proyectos en el Tajo Ferrobamba. Las capacidades son las siguientes:

Tabla 6

Flota de camiones fabrica

Cantidad (Unidades)	Capacidad	
	Emulsión (Ton)	Nitrato (Ton)
2	17	8
2	14	5
1	12	6
5	TOTAL	

Nota: Tomado de Oficina de Perforación y Voladura, MMG

Foto 2

Carguío de Taladros con camión fabrica



Nota: Foto tomada en Tajo Ferrobamba

3.5.3. Carguío y Transporte

El Carguío y el Transporte son procesos que tienen gran relevancia dentro del ciclo de extracción de minerales que consiste en cargar el material volado del frente de minado y transportarlo según su granulometría y/o tipo de material a una ubicación específica (Chancadora, Stock, botadero, presa de relaves, etc.)

En este proceso es donde se abarca una gran cantidad de equipos con un grado de mecanización alto.

En las Bambas se posee una flota de vagones de carga que se desplazan por los canales que consta de palas eléctricas, palas hidráulicas y un cargador frontal y su flota de transporte consiste en camiones mineros Komatsu y Caterpillar. Se detalla las cantidades de equipos en la siguiente tabla:

Tabla 7

Flota de camiones mineros

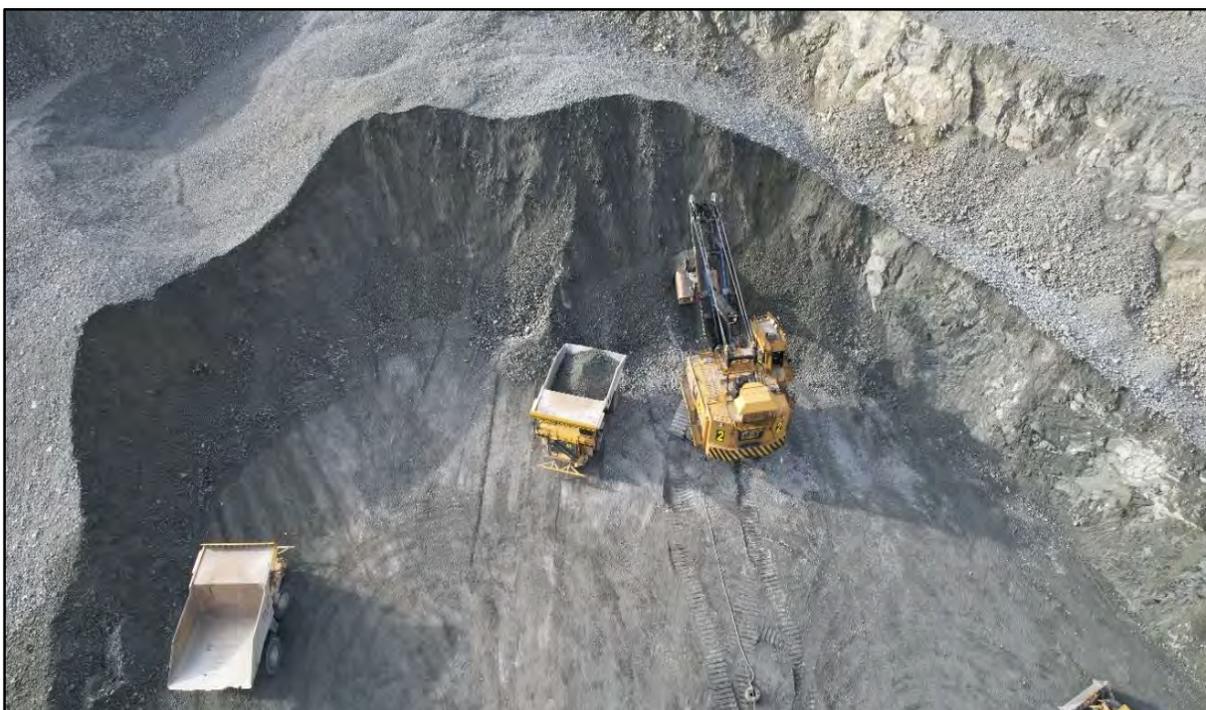
Cantidad (Unidad)	Modelo	Capacidad de carga	Capacidad de tolva
44	Komatsu 930E	290 t	211 m3
15	Caterpillar 797F	400 t	240 m3
15	Komatsu 980E	363 t	250 m3
74		TOTAL	

Nota: Información obtenida de Oficina de Planeamiento, MMG

Tabla 8*Flota de Palas y cargador*

Cantidad (Unidad)	Modelo	Capacidad de cuchara	Tipo
3	CAT 6060S	50 tm	Hidráulica
2	CAT 7495HR	81.8 tm	Eléctrica
3	P&H 4100XPC	70 tm	Eléctrica
1	LE TORNEAU LT 2350	40.5 m3	Diesel
9	TOTAL		

Nota: Tomado de Oficina de Planeamiento, MMG

Foto 3*Carguío y transporte en Tajo Ferrobamba*

Nota: Foto tomada en Tajo Ferrobamba

Foto 4*Flota de Camiones Mineros*

Nota: Foto tomada con dron donde se observa camiones mineros transportando material

3.6. Planeamiento

Con la ayuda de la planificación minera se espera definir un plan de negocio con el que se logre explotar de la mejor manera el yacimiento.

El planeamiento considera todas las actividades y acciones a realizar durante un periodo ya sea corto, mediano y largo plazo para alcanzar una visión establecida. Para ello se elabora estrategias que conducirán a la empresa de la situación actual a una situación deseada.

Inicialmente se realiza un plan para toda la vida útil de la mina considerando las inversiones, los ingresos y los costos operativos incluyendo las fluctuaciones de los precios de los productos en el mercado, anualmente se hace una revisión evaluando económicamente a largo plazo considerando las variaciones del precio del metal.

Las variables que se consideran para la estrategia en la planificación son los recursos que se tiene, equipos, proceso productivo, capacidad de producción.

Cada año se reduce el valor del negocio porque cada año que pasa es un año que se produjo, para ello se considera diferentes objetivos a mediano plazo como la expansión de la mina, la optimización de procesos con enfoque en costos, incluso el uso de nuevas tecnologías desempeña un papel importante.

3.7.Administración

Las Bambas es una de las minas más relevantes y de mayor potencial de mundo. Actualmente la administración es administrada por el consorcio está compuesto por Minerals and Metals Group (MMG), Guoxin International Investment Corporation y CITIC Metal Co. Estas empresas poseen participaciones del 62,5%, 22,5% y 15% respectivamente en la sociedad.

MMG es una compañía que produce a nivel global metal de base medio, entre ellos se incluye el cobre y zinc, además MMG cotiza en las Bolsa de valore de Hong Kong y se cotiza en el mercado de valores de Australia, pero no tiene una cotización primaria.

3.7.1. Reseña histórica

Por medio de una licitación pública, Xstrata Copper, en el 2004 se le otorga la facultad de explorar Las Bambas.

Durante los años 2008 y 2010 una vez que se haya explorado un total de 306.908 metros de pozos, finaliza el Estudio de Fiabilidad, la audiencia pública del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se lleva a cabo en Challhuahuacho, ubicado en Cotabambas es una provincia de la región Apurímac, en la región central de Perú. Durante este procedimiento, se celebra el Contrato de Transferencia de Derechos Mineros de Las Bambas con el Estado, el cual tendrá un costo de USD 4.200 millones.

En el año 2011, el Estado aprueba el EIA después de un extenso procedimiento de participación ciudadana. Durante este proceso, se informa sobre un aumento del recurso mineral de Las Bambas en un 10%, la obtención de cobre en Chile en el año 2012 fue de 1.710 millones de Tn, con una ley de 0,60%. En el 2012, se llevan a cabo los trabajos de ingeniería de carreteras y los primordiales componentes con el fin de preparar la operación futura, y también se inicia la mejora de la vía que conecta Las Bambas con Espinar.

En el año 2013, Glencore obtiene Las Bambas como parte de la adquisición de Xstrata. En ese mismo año, se registra un avance del 65% en los caminos pioneros, un 40% en la planta concentradora y un 95% en el mejoramiento de la carretera que conecta Las Bambas con Espinar. Entre los años 2014 y 2016, después de que se haya aprobado el EIA, se realiza una modificación para que el cobre pueda ser transportado por carretera. Durante este periodo, el consorcio que integraban MMG Limited y Guoxin International Investment Co. estaba conformado. China Resources Ltd. y CITIC Metal Co. Ltd. adquiere Las Bambas. Al mismo tiempo, se llevan a cabo los traslados físicos de la comunidad de Fuerabamba.

Durante estos años, fue la primera vez que se produjo concentrado de cobre como del acuerdo. Se inicia el proceso de comisionamiento y luego se incrementa gradualmente la cantidad producida con el objetivo de lograr el nivel de plena producción. Como resultado, se logró la primera vez que se produjo concentrado de cobre.

El 2017 fue el primer año en el que se produjo de manera comercial y se alcanzaron las 450.000 toneladas de concentrado de cobre.

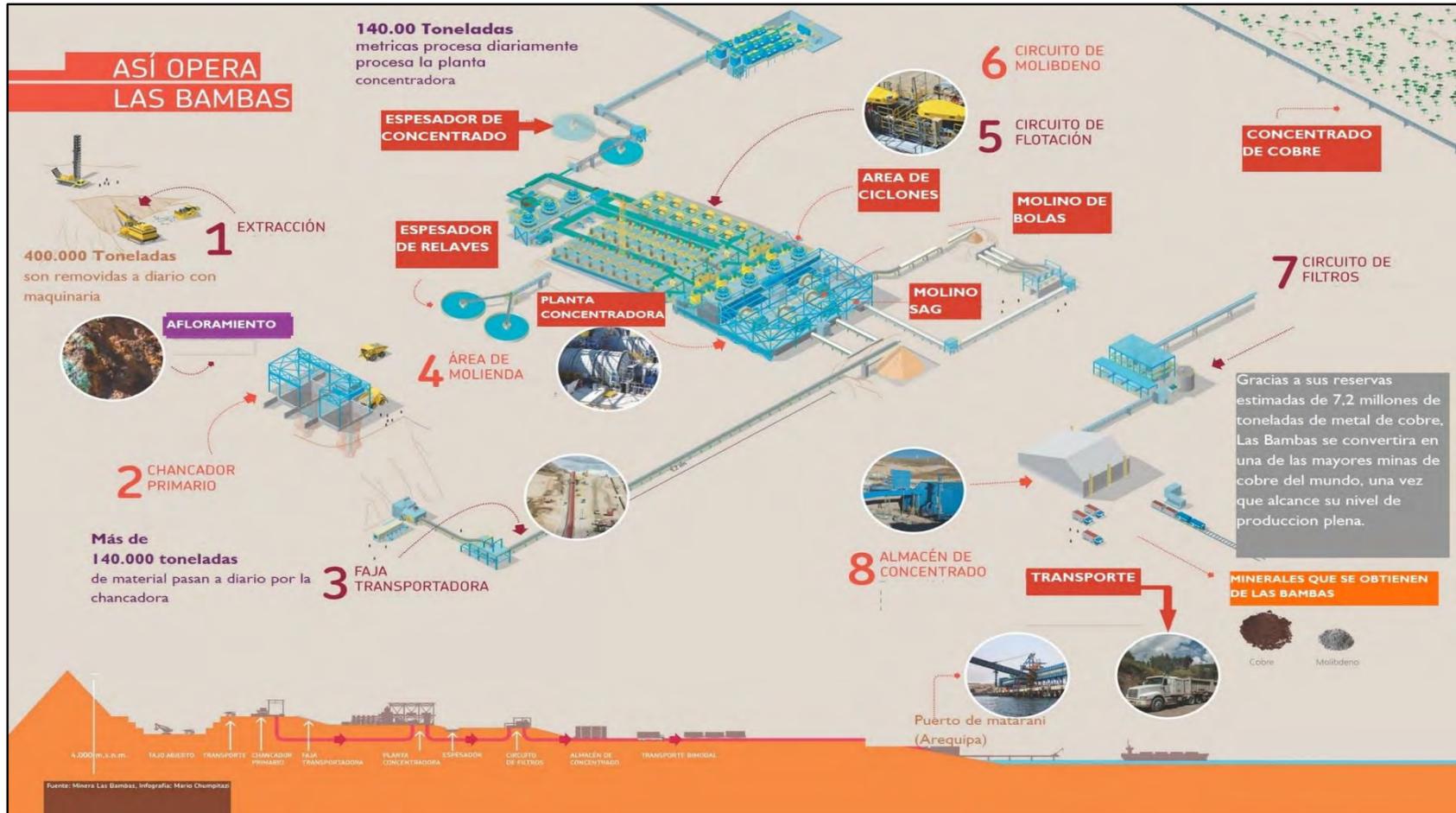
Durante los años 2018 y 2020 se presenta y aprueba la 3era MEIA. y se inicia la 4.ª MEIA. Además, se inició estudios de exploración en la sección occidental de la concesión y se empezó la segunda etapa de progreso de la manipulación. (MMG LAS BAMBAS, 2022)

3.7.2. Características Operativas

Las Bambas es una mina a cielo abierto que cuenta con una avanzada tecnología y equipos mineros de vanguardia, lo que la posiciona como una de las minas más modernas del país. El proceso de producción se inicia con el procedimiento de perforación y voladura, seguido de la extracción del metal del yacimiento de hierro de Ferrobamba, uno de los tres depósitos presentes en la mina. Una vez extraído, el mineral es triturado y transportado a través de una cinta transportadora hacia un circuito de flotación convencional, lugar en el cual se mezcla el condensado de cobre y molibdeno. En el procedimiento de producción se utiliza principalmente agua fresca proveniente del río Challhuahuacho, aunque además se cuenta con un depósito para su uso durante la temporada seca. Es importante destacar que se lograron eficiencias en la gestión hídrica en el año 2017. Además, se implementan medidas de recirculación del agua utilizada en los espesadores de relaves y concentrado, así como en la toma de relaves, con el objetivo de utilizar los recursos de manera sostenible.

Diagrama 2

Características Operativas de Las Bambas



Nota: Tomada de Pagina web (MMG LAS BAMBAS, 2022)

3.7.3. Proyecciones

Los 3 principales yacimientos de Las Bambas son: Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba. Actualmente las labores se ejecutan en el tajo Ferrobamba que en el 2021 obtuvo una producción de cobre de 339.682 toneladas al año, y la producción total de zinc fue de 249.767 toneladas.

Las Bambas paralizó sus operaciones las dos últimas semanas de diciembre debido a bloqueos en el corredor minero que no permitían el ingreso de insumos; esto y las leyes bajas afectaron la producción de concentrado de cobre obteniendo una producción anual menor en 7% respecto al 2020.

A pesar de las continuas huelgas y bloqueos en el corredor minero se espera que para el segundo semestre del 2022 se inicie con la primera producción del tajo Chalcobamba.

Con la ejecución de este tajo se calcula que en el transcurso de un periodo de tiempo más corto ayudara a mantener los niveles de producción del tajo Ferrobamba y en el mediano plazo se prevé que aumentara la producción de Las Bambas a entre 380,000 y 400,00 toneladas de cobre concentrado al año.

Es importante tener en cuenta que el proyecto de Las Bambas incluye la planificación para el progreso de tres tajos. Además del tajo Ferrobamba que está en operación y el tajo Chalcobamba que ya ha sido autorizado, se tiene previsto la apertura de un tercer tajo conocido como Sulfobamba. Según los planes actuales, se estima que las obras de este tercer tajo podrían comenzar entre los años 2026 y 2027. (Minero, 2022)

Mapa 2*Delimitación Mina Las Bambas*

Nota: Tomada de Pagina Web (MMG, LAS BAMBAS, 2022)

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE VIBRACIONES DEL MACIZO ROCOSO Y EL DISEÑO DE LA VOLADURA

4.1. Descripción de las Voladuras Realizadas

Previo al desarrollo del presente estudio se analizó las mezclas y explosivos usados en voladuras anteriores a la prueba y con la información otorgada por el área de geotecnia se observó en el banco superior 3765 con el uso del explosivo Fortis Advantage una deficiencia en el promedio del cumplimiento para la distancia hacia la cresta generando una pérdida de cresta de -5.45m, igualmente se aprecia un promedio en la distancia hacia el toe del talud en un sobre dimensionamiento + 9.66m , lo cual genera una condición ineficiente en la distribución de esfuerzos para la geometría asociada al talud.

4.2.Descripción de Explosivos Usados

En los diferentes proyectos de voladura el explosivo utilizado es el heavy anfo con emulsión Advantage para desmonte y con emulsión Extra para mineral. Para el presente estudio se pondrá a prueba el Flexigel Extra-100.

4.2.1. Emulsión Fortis Advantage

La Emulsión Gasificable es un producto no explosivo que se transporta y almacena de forma segura. Antes de su carga en los taladros, se activa a través de la adición de una solución de Nitrito

de Sodio, lo cual genera burbujas de nitrógeno en la masa de la emulsión. Esto produce una mezcla explosiva de densidad mínima y alta velocidad de detonación en comparación con los explosivos convencionales. Además, este producto es resistente al agua y posee una alta energía.

4.2.2. Emulsión Fortis Extra

Fortis Extra es una emulsión a granel altamente energética que fue especialmente perfeccionada teniendo como fin su utilización en la minería a cielo abierto y en voladuras que involucran agua. Es adecuada para situaciones desafiantes de voladuras. Fortis Extra puede ser empleado en áreas donde se encuentren materiales estériles con presencia de agua. Sin embargo, no se recomienda su uso en terrenos contaminados con sulfuros reactivos.

4.2.3. Flexigel Extra

El sistema Flexigel™ Extra es una mezcla de la emulsión extra con perlas de poliestireno expandido (EPS) con tamaños y densidades específicos, forma parte de la línea de productos a granel de Orica, que está especialmente diseñada para su uso en voladuras en taladros secos, húmedos y desaguados en operaciones de minería a cielo abierto de metales.

Tiene múltiples beneficios dentro de ellos la capacidad de reducir vibraciones de las operaciones de la voladura, cargar productos de baja densidad contra la pared final en minas de cielo abierto.

Figura 11

Mezcla de Flexigel Extra



Nota: Elaboración Propia

4.2.3.1. Propiedades Técnicas de Flexigel Extra-100

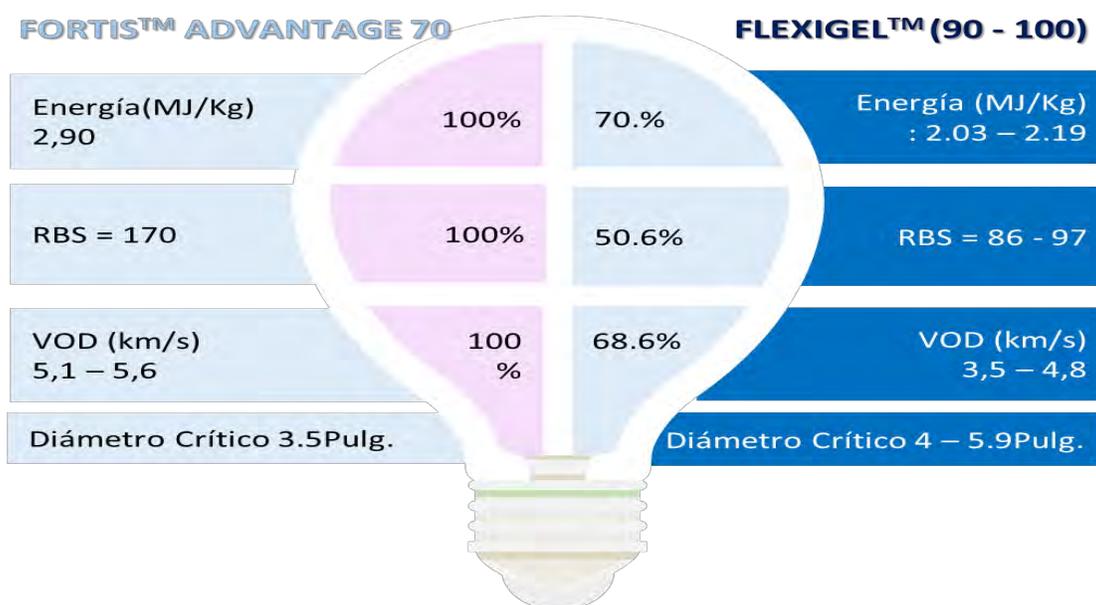
En la figura 12 se hace un comparativo de las propiedades del Flexigel Extra-100 tomando de referencia la mezcla Fortis Advantage 70 que es el explosivo que normalmente se usa en mallas de desmonte.

Se puede observar que la energía y el VOD (Velocidad de Detonación) del Flexigel extra-100 es menor al Fortis Advantage 70.

- Fortis Advantage 70 = 70 % Emulsion Advantage + 30 % de Nitrato
- Flexigel 100 = Emulsión Advantage + EPS

Figura 12

Comparación de los explosivos



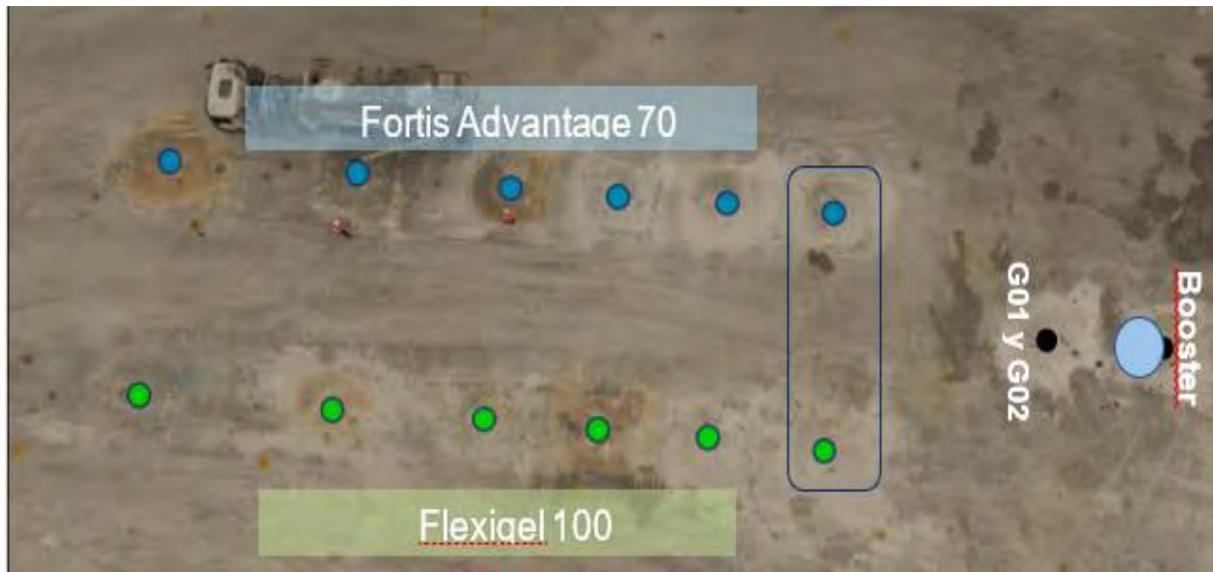
Nota: Elaboración Propia

4.3. Voladura de Prueba

Para el estudio de campo cercano se realizó una voladura de prueba que nos permitió hacer el análisis y el modelo de vibraciones, se seleccionó una zona con la misma litología de la inestabilidad 104 en el nivel 3750. Esta zona está formada por una litología de caliza margosa.

Figura 13

Ubicación de Taladros de Prueba



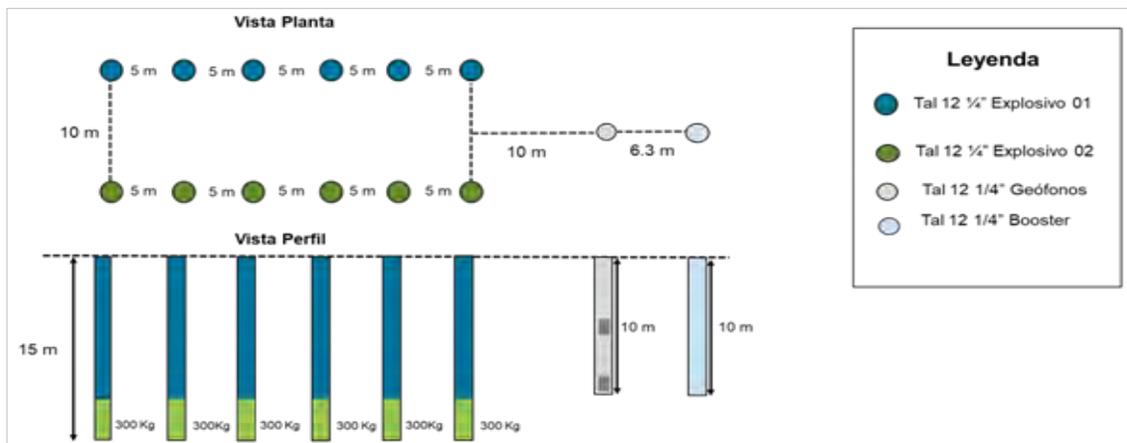
Nota: Elaboración Propia

4.3.1. Descripción del Diseño de Carga de Voladura de Prueba

En el siguiente Grafico se aprecia el diseño de los taladros de prueba, los taladros fueron cargados con explosivo Fortis Advantage 70 y con Flexigel Extra-100 con cargas de 300 kilos. Para el modelo se cargó una fila con el explosivo 01 que es la emulsión Advantage 70 y otra fila del explosivo 2 es el Flexigel Extra-100 que es el explosivo que pondremos de prueba para la propuesta. Esto nos permitirá hacer el análisis y la simulación con ambos explosivos para ver el nivel de perjuicio que genera a la roca sólida.

Gráfico 02

Diseño de P&V de los taladros de Prueba



Nota: Elaboración Propia

4.3.1.1. Control de Calidad de Mezcla Explosiva Previo a la Voladura.

Se realizó el monitoreo de la calidad de la combinación explosiva en gabinete y en el lugar de uso. Para el control de la calidad de mezcla explosiva en gabinete se obtuvo una muestra de emulsión extra y EPS para proceder a realizar la preparación del Flexigel Extra-100 y su posterior control de la densidad obteniendo como resultado 1.00 g/cc.

Figura 14

Control de calidad en gabinete



Tara vaso: 325gr Volumen: 496.52 ml
Peso muestra: 330 gr Densidad: 1.00 g/cc



Tara vaso: 0 gr. Volumen: 496.52 ml
Peso muestra: 496 gr Densidad: 1.00 g/cc

Nota: Elaboración Propia

Figura 15

Control de calidad de flexigel en campo



Nota: Elaboración Propia

Posteriormente se hizo el control de calidad in situ para analizar la cantidad apropiada de densidad de la mezcla explosiva dado que esta propiedad es de las más esenciales en el contexto de una bomba porque establece la velocidad de explosión, la sensibilidad y el diámetro crítico de carga.

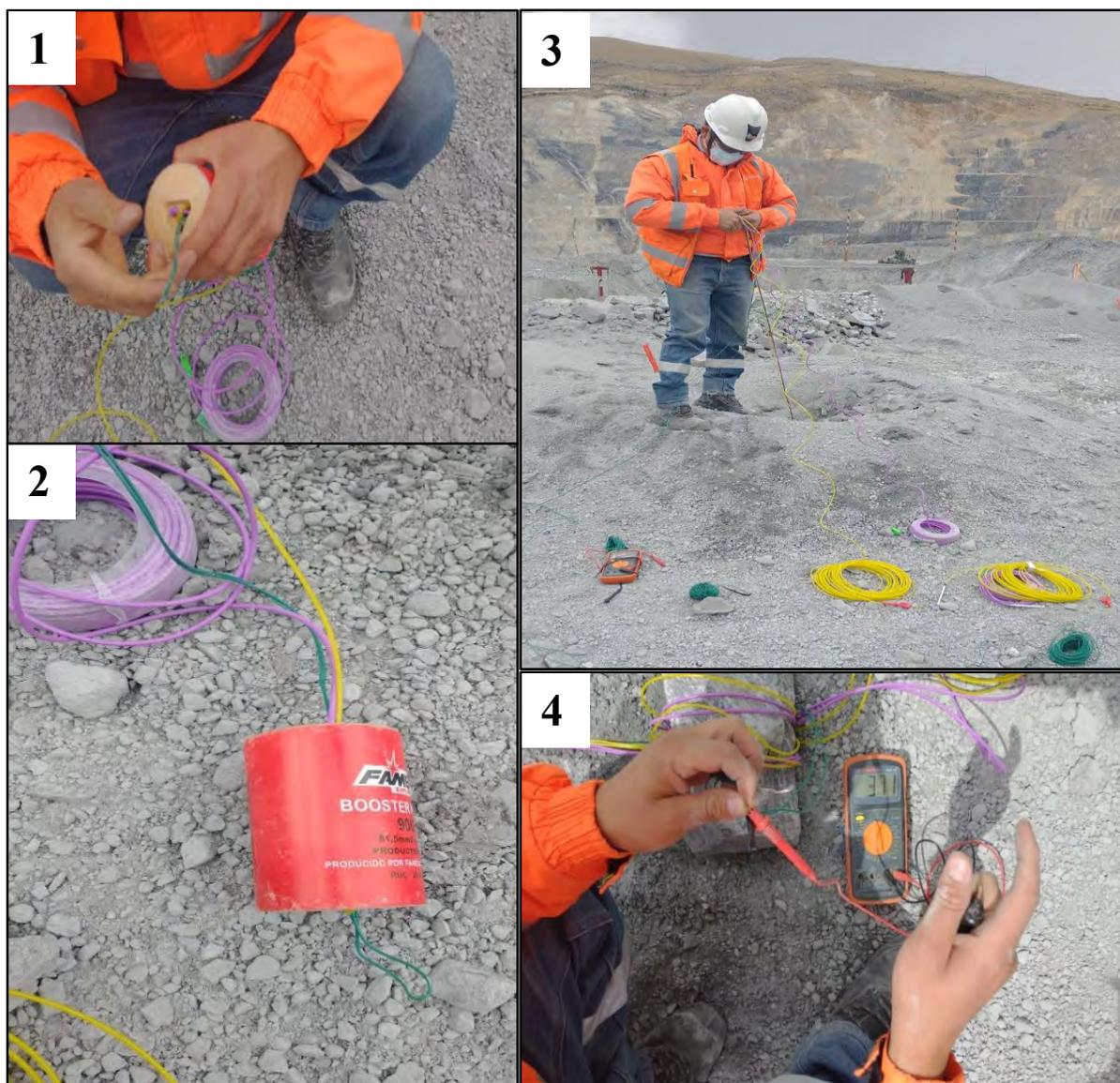
4.3.1.2. Medición de VOD (Velocidad de Detonación)

Para la determinación de VOD del Flexigel Extra-100 se colocó cable resistivo junto a la prima y se introdujo en el taladro, el cual se cargó en un proyecto cercano en el mismo nivel de la prueba para tener una carga representativa (06 m de Flexigel Extra-100), se cargó y tapo normalmente dejando cable resistivo libre en la parte superior para ser conectado al microtrap (Equipo de medición de VOD).

En todo momento el cable resistivo se testeó para verificar que el cable está en buen estado.

Figura 16

Conexión de cable resistivo junto a la prima en el taladro



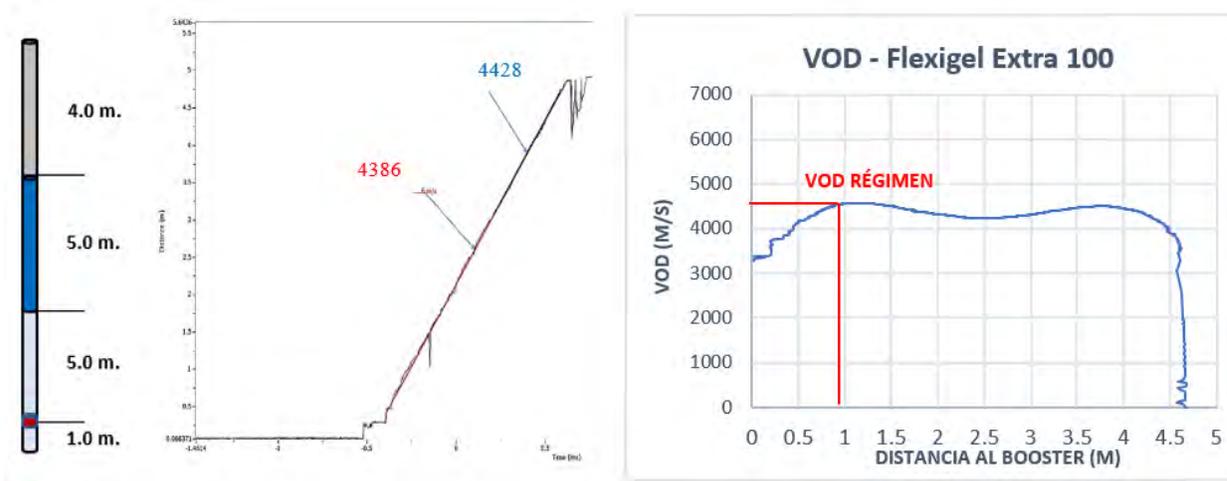
Nota: Elaboración Propia

La información registrada en el microtrap se descargó y analizó en el software Data Acquisition Suite obteniendo de resultado el VOD del Flexigel Extra-100 igual a **4407 m/s**.

Según especificaciones en la ficha técnica del Flexigel Extra la VOD es de 4800 m/s.

Gráfico 3

Resultados de Velocidad de Detonación



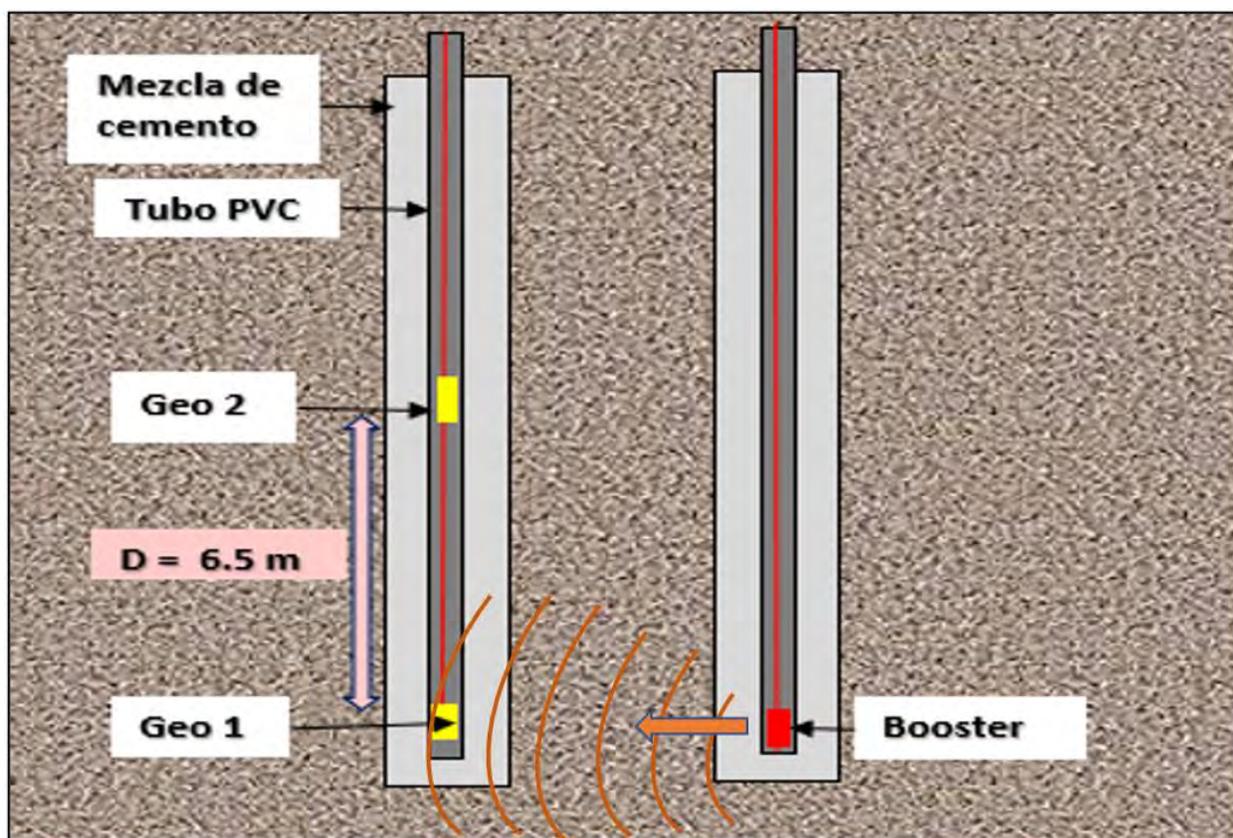
Nota: Obtenido de Registro del Microtrap

4.4. Prueba de Vibraciones de Campo Cercano.

La vibración del terreno está influenciada por las propiedades inherentes de la roca. Para medir este fenómeno, se emplean geófonos triaxiales enterrados. Los resultados obtenidos en las pruebas establecieron una relación cuadrática por medio de la carga detonante y la distancia desde el sitio de detonación.

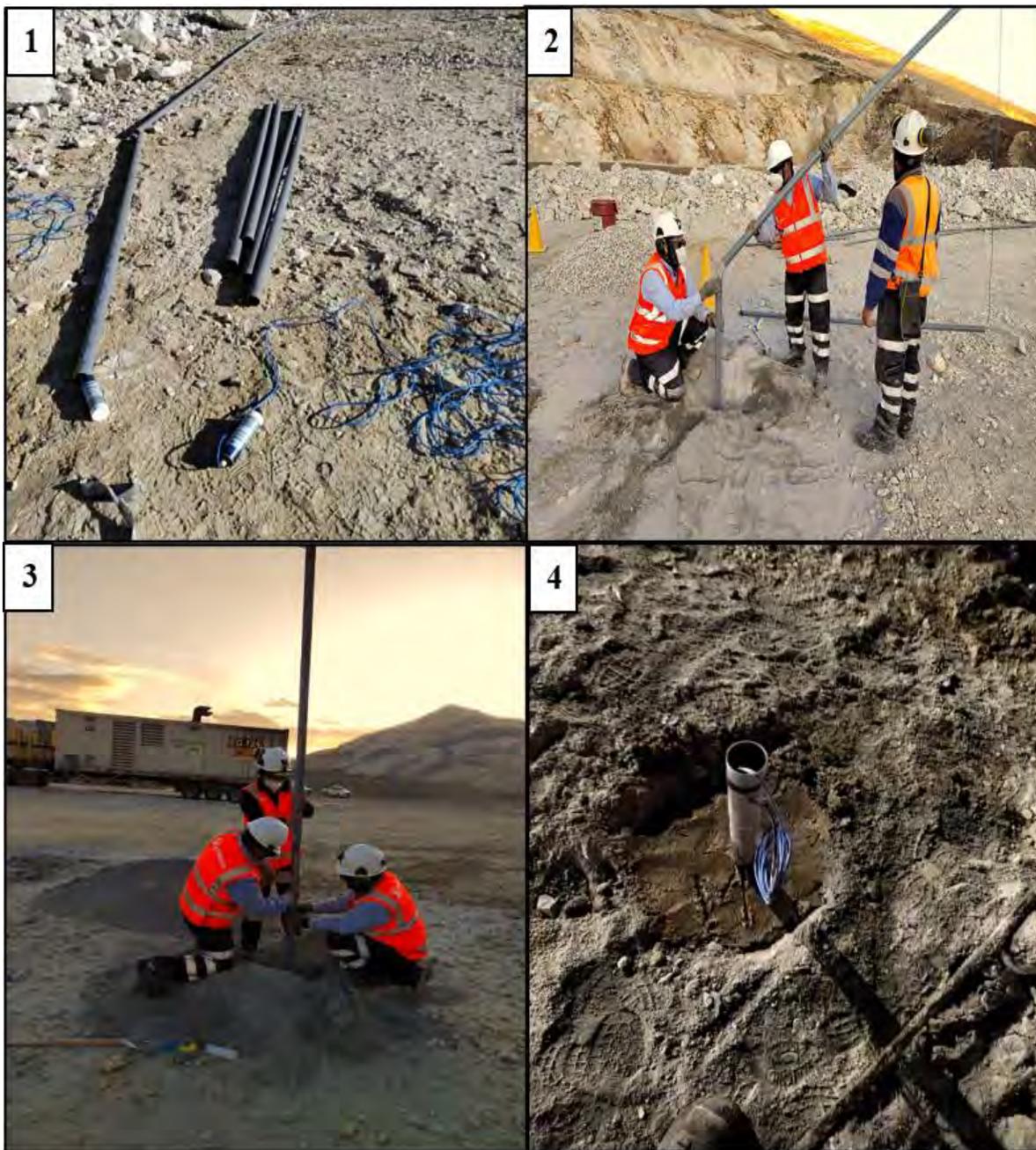
La instalación de instrumentos implica la colocación de 2 geófonos triaxiales de 28 Hz, empotrados en cemento. Estos geófonos se disponen linealmente en el primer conjunto de taladros de 12 1/4" pulgadas, con una separación de 6.5 metros entre cada uno. La disposición lineal sigue el diseño indicado en la figura 17, que muestra los detalles de la instrumentación, incluyendo el tamaño de las perforaciones en las que se origina la fuente de explosión. Estos taladros generan perturbaciones u ondas que son captadas por los sensores del conjunto de geófonos.

La cantidad de explosivos que se utilizan es de dos libras, lo que permitirá el análisis de los impulsos, como se aprecia en la figura 17.

Figura 17*Instrumentación y arreglo de Geófonos*

Nota: Elaboración Propia.

La instrumentación de geófonos triaxiales se realizó de forma manual, considerando los parámetros determinados previos a la perforación, donde se toma las medidas de aseguramiento adecuado de los geófonos con el concreto a las alturas correspondientes, el fraguado adecuado considera 48 horas para el fijado de los sensores al macizo rocoso, siendo este proceso el más importante para obtener el monitoreo de vibraciones de manera precisa para un análisis adecuado, como figura en la ilustración 18.

Figura 18*Instrumentación de Geófonos en Campo*

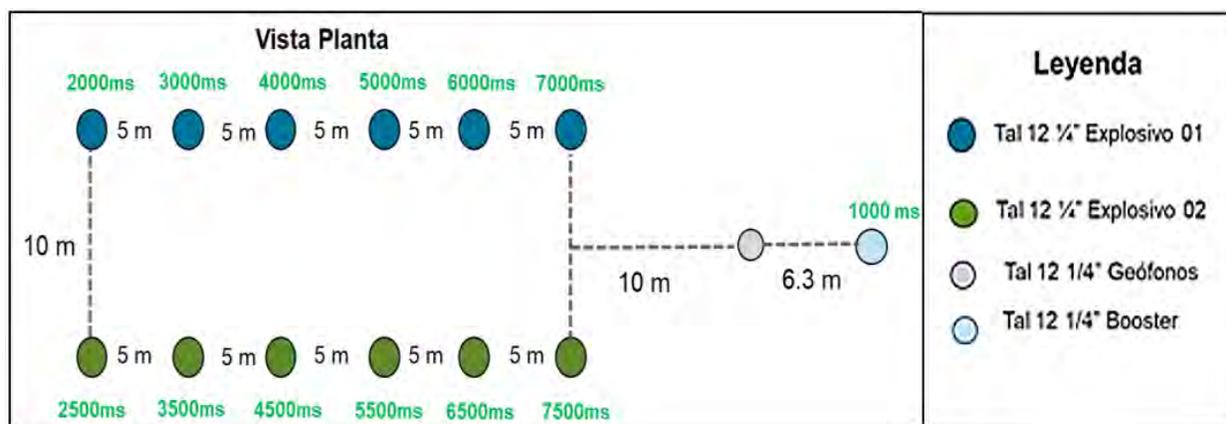
Nota: Elaboración Propia

Los taladros que se emplean para la medición se colocaron en una disposición ortogonal con respecto a las barrenas que contienen las cargas detonantes regulares de la voladura. Para los

exámenes que miden la velocidad máxima de las partículas generadas por el movimiento en el lugar cercano, se detonó un conjunto de 12 taladros con el mismo esquema de carga explosiva. Se utilizaron secuencias de detonación que tengan un retraso de 500 ms para dividir y descifrar correctamente la onda generada por cada carga, como se muestra en la figura siguiente.

Figura 19

Tiempos de retardo de prueba



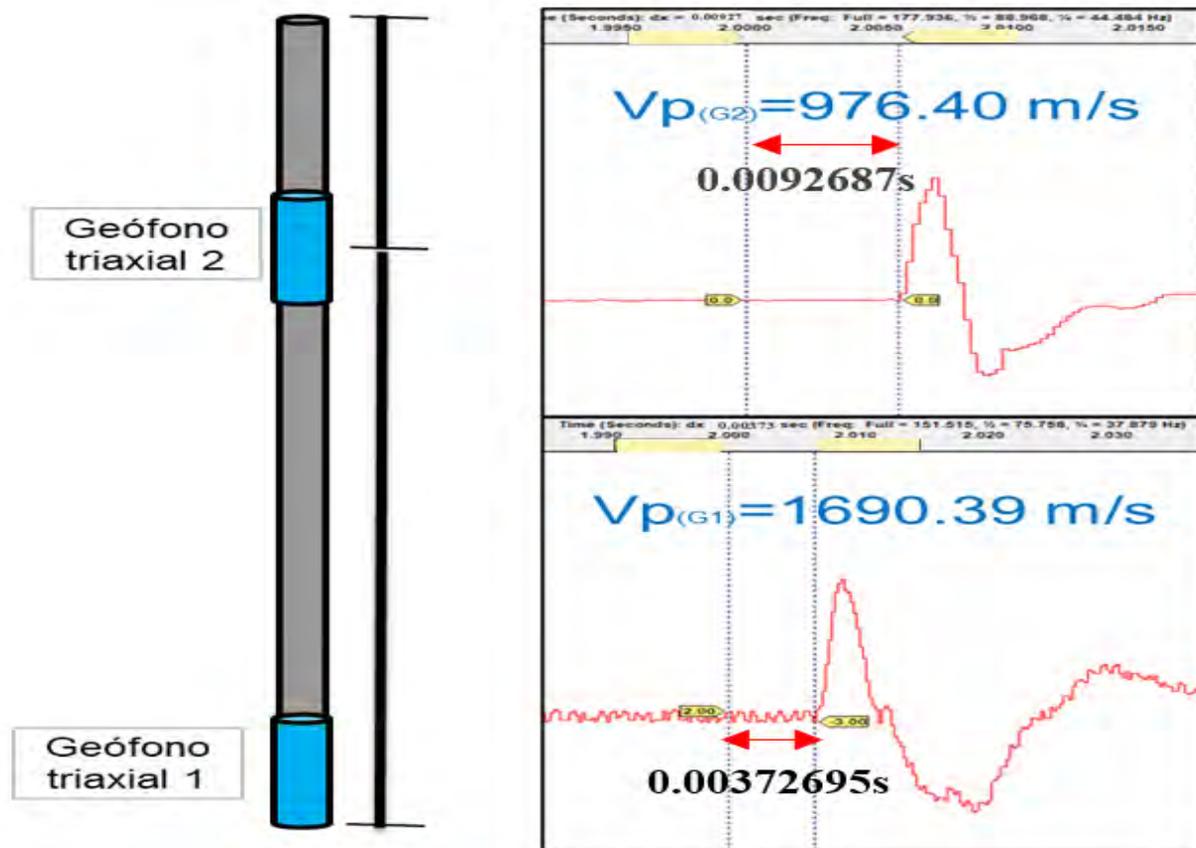
5. *Nota:* Elaboración Propia

4.4.1. Determinación de la Velocidad de Propagación (Cross Hole)

El procedimiento empleado con el propósito de calcular la velocidad de la onda de presión en la mina consiste en realizar la prueba de Cross Hole en la litología del deslizamiento. Para llevar a cabo el ensayo, se utilizó la forma de cortar el cable, que permitió crear el disparo necesario para iniciar la grabación de los terremotos por los sismógrafos en el momento cero, tal como se muestra en la figura 20. De esta manera, se obtuvieron valores de velocidad de onda P en cada explosión de los perforadores de prueba.

Tabla 9*Coordenadas de la Ubicación de los Geófonos*

ID	Coordenadas UTM		
	Este	Norte	Elevación
Geófono 1 (Geo1)	793122.83	8440494.83	3765.62
Geófono 2 (Geo 2)	793122.83	8440494.83	3759.12
Carga (Booster)	793118.90	8440489.89	3765.52

*Nota: Datos Obtenidos de GPS***Figura 20***Registro de llegada de la Onda**Nota: Adaptado de registro de geófonos.*

Para determinar la velocidad de propagación usamos la ecuación 6, teniendo los datos: distancia geófono 01 en campo igual a 6.3 metros, y el tiempo de llegada de la onda primaria de 0.00372695 s segundos resulta que la velocidad de propagación es de 1690.39 m/s.

Ecuación 6: Velocidad de Propagación

$$V_p = \frac{D}{\Delta T}$$

Donde:

D = Distancia de la fuente al geofono

▲T = Variación de tiempo de llegada

Utilizando los conceptos de la prueba de Cross Hole y su empleo en la determinación de los valores de frecuencia de onda (P) en la industria minera a cielo abierto, se establece la diferencia entre el valor de onda P y el de un bloque de roca. Estos valores se obtienen in situ en la mina, y se observa que el nivel menos degradado geotécnicamente presenta el mismo valor de velocidad de onda P. Esto pone de manifiesto la discrepancia entre los valores de matriz calculados y el valor a partir del cual se calcula la impedancia litológica se define la distancia a la cual está asociada. Con este cálculo, se determina el nivel de afectación causado por el artefacto, que está ligado con la disminución en la velocidad de la onda P.

Entonces, se observa la variación de V_p en el G2 con respecto al G1, teniendo una degradación del 57.7% de V_p , de esta manera se podría determinar que la zona del taco tiene un mayor fracturamiento, siendo una incidencia de la afectación de las voladuras anteriores en el nivel superior, por lo que para análisis se usará la V_p del geófono 01 de roca de macizo más representada.

Tabla 10*Cálculo de VP para G 1 y G2*

$$V_p = \frac{D}{\Delta T}$$



Pozos ID	Distancia (m)	Tiempo de Variación (s)	VP (m/s)
Geófono 1	6.3	0.00372695	1690.39
Geófono 2	9.5	0.0092687	976.4

Nota: Información obtenida de Blasware

Para el caso del deslizamiento 104, se obtienen una serie de valores que indican una baja velocidad de expansión de la onda compresional en la roca, lo cual indica una calidad muy pobre de la misma. Es importante tener en cuenta que la liberación de energía en las cercanías de los taludes debe originarse un proceso de fractura óptimo en su área de influencia, evitando una fracturación excesiva por las propiedades de la roca. Por lo tanto, es esencial precisar la distancia y la distribución de carga de manera correcta en los taladros de compresión.

Tabla 11*Clasificación de ingeniería para roca Insitu*

RQD (%)	Indice de velocidad	de Velocidad Sismica (m/s)	Descripción	Descripción Sísmica
0-25	0.00 - 020	2400	Muy Pobre	Baja velocidad
25-50	0.20-040	2400 - 3500	pobre	Baja velocidad
50-75	040 - 060	3500- 4300	Moderada	Velocidad Intermedia
75-90	060-080	4300 - 4900	Buena	Alta Velocdad
90-100	0.80- 1 00	4900-6700	Excelente	Alta Velocidad

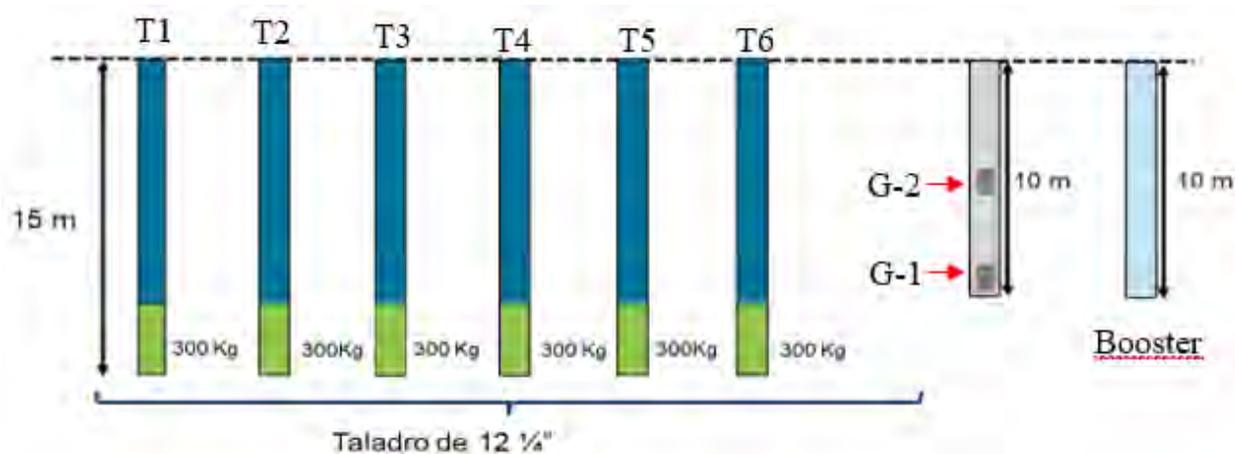
Nota: Obtenido de "Predicting In-situ Modulus of deformation using Rock Quality Indexes" (Coon, R.F. y Merritt, A.H. 1970, en Bieniawski 1984) y "Determination of the in-situ modulus rock", ASTM STP 477

4.4.2. Determinación del Modelo de Vibraciones

El modelo se origina a partir de la explicación de las ondas creadas por la explosión de la broca de grabación T1, T2, T3, T4, T5, T6, en dirección a los geófonos G1-G2, estando el taladro T6 el menos alejado a los geófonos con 10 m. Ver Figura 21, fueron detonados en un retraso de 500 milisegundos para evitar la necesidad de acoplamientos o pausas.

Figura 21

Configuración de Taladros de Prueba



Nota: Elaboración Propia

4.4.2.1. Modelo predictivo Holmberg & Persson

Las Tabla 12,13,14 y 15, establece una relación entre el diseño de la voladura, que incluye aspectos como la longitud del enchufe, carga lineal y extensión de la carga, así como el diseño del instrumento utilizado, la capacidad del sensor y la separación entre sí desde la fuente o el orificio. Mediante el estudio de la onda generada y la forma de la voladura, se funda una muestra de vibraciones para el campo próximo. Este modelo permite relacionar el factor H&P (altura de la carga explosiva y distancia entre la fuente y el sensor) con las vibraciones resultantes, identificando así los parámetros relevantes para el estudio K y α .

Viendo la ecuación 1 de Holmberg & Pearson obtenemos los valores de K y α .

$$PPV = K \left[\left(\frac{\gamma}{Ro} \right) \left(\arctan \left(\frac{H + Xs - Xo}{Ro} \right) + \arctan \left(\frac{Xo - Xs}{Ro} \right) \right) \right]^{\alpha}$$

Las Tabla 12,13,14 y 15 evidencia la correlación entre el sonido registrado durante la voladura y el peso explosivo, de donde se generan los modelos de campo cercano para cada geófono y explosivo comparado, de donde se usará los modelos del G1 para desarrollar el criterio de daño y las propuestas de diseño para el Flexigel Extra.

En la tabla 12 muestra la información de taco de longitud, peso lineal, cantidad de tacos y distancia a los taladros, con la configuración de los instrumentos, el alcance del sensor y su ubicación con respecto a los taladros T1, T2, T3, T4, T5, y T6 que son los taladros cargados con emulsión Advantage con referencia al geófono 1.

Con la fórmula de Holmberg and Pearson se calcula el Factor HP, la PPV medida son los pulsos registrados por el sismógrafo en la voladura de prueba.

Tabla 12

Datos para el modelo de Fortis Advantage 70 en el G1

Pozos proyecto	Carga	Longitud de Pozo	PPV Medida	Longitud Carga	Carga Lineal	Taco Real	Densidad	Prof. Geo	Distancia Hz.	Factor H&P	Log (HP)	Log (PPV)	
ID	Iniciación (ms)	(kg)	(m)	(mm/s)	[m]	[kg/m]	[m]	(gr/cm ³)	[m]	Ro [m]			
T1	2000	304	17.10	110.1	3.2	95.0	13.9	1.25	10.0	35.4	0.2	-0.6	2.0
T2	3000	305	17.70	323.6	3.3	92.4	14.4	1.22	10.0	30.4	0.3	-0.5	2.5
T3	4000	302	18.20	241.5	3.3	91.5	14.9	1.20	10.0	25.5	0.4	-0.4	2.4
T4	5000	304	18.00	452.5	3.3	90.9	14.7	1.20	10.0	20.6	0.6	-0.2	2.7
T5	6000	306	17.70	671.8	3.2	93.8	14.5	1.23	10.0	15.8	1.0	0.0	2.8
T6	7000	300	17.50	1006.0	3.5	85.7	14	1.13	10.0	11.2	1.9	0.3	3.0
Booster	1000		10.00										

Nota: Elaboracion propia

Para el análisis de regresión lineal se aplicó el programa de Excel que utiliza diagramas de dispersión de Logaritmo del factor H&P en el eje X y el logaritmo de PPV medido en el eje Y.

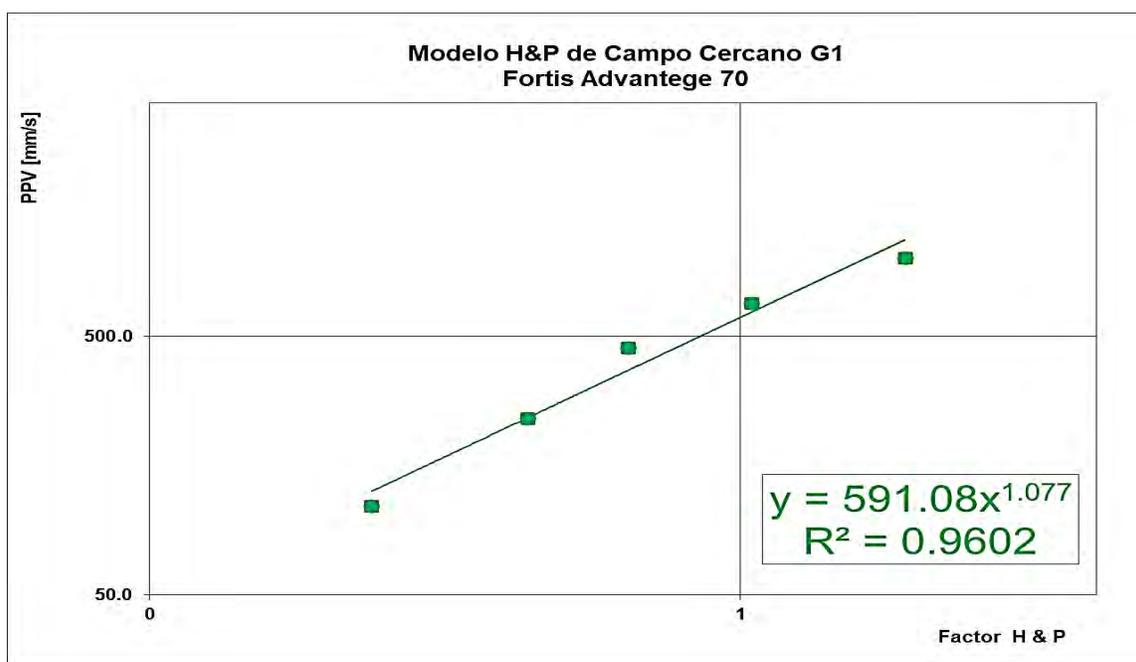
A estos números se les suma posibles líneas de tendencia y opciones para trazar la ecuación ajustada y el coeficiente de correlación R^2 .

En el diagrama 4 se simboliza el modelo de vibraciones para el explosivo base que es el Fortis Advantage 70 con el Geófono 1 con una confiabilidad del 96%.

La ecuación de este modelo es $Y = 591.08 X^{1.07}$ de donde se extrae las constantes $K = 591.08$ y $\alpha = 1.077$.

Gráfico 4

Modelo de Campo cercano del Fortis Advantage 70 para G1



Nota: Grafico de Dispersión de Puntos

La tabla 13 contiene los datos de extensión de taco, carga lineal, extensión de carga, información de calibre, hondura del sensor y distancia del sensor a los agujeros. T7, T8, T9, T10, T11, y T12 que son los taladros cargados con Flexigel Extra con referencia al geófono 1.

Con la fórmula de Holmberg and Pearson se calcula el Factor HP, la PPV medida son los pulsos registrados por el sismógrafo en la voladura de prueba.

Tabla 13

Datos para el modelo de Flexigel Extra-100 en el G1

Pozos		Carga	Longitud de Pozo	PPV Medida	Longitud Carga	Carga Lineal	Taco	Densidad	Prof. Geo	Distancia Hz. Ro	Factor H&P	Log (HP)	Log (PPV)
ID	Iniciación (ms)	(kg)	(m)	(mm/s)	[m]	[kg/m]	Real	(gr/cm ³)	[m]	[m]			
T7	7500	307	17.5	577.2	4.0	76.8	13.5	1.0	10.0	11.2	2.0	0.3	2.8
T8	6500	302	17.5	353.2	4.1	73.7	13.4	1.0	10.0	15.8	1.1	0.0	2.5
T9	5500	306	17.8	225.4	4.3	71.2	13.5	0.9	10.0	20.6	0.7	-0.2	2.4
T10	4500	309	18.1	149.4	3.9	79.2	14.2	1.0	10.0	25.5	0.4	-0.3	2.2
T11	3500	307	18.0	108.3	4.0	76.8	14.0	1.0	10.0	30.4	0.3	-0.5	2.0
T12	2500	300	18.0	77.4	4.0	75.0	14.0	1.0	10.0	35.4	0.2	-0.6	1.9
Booster	1000		10.0										

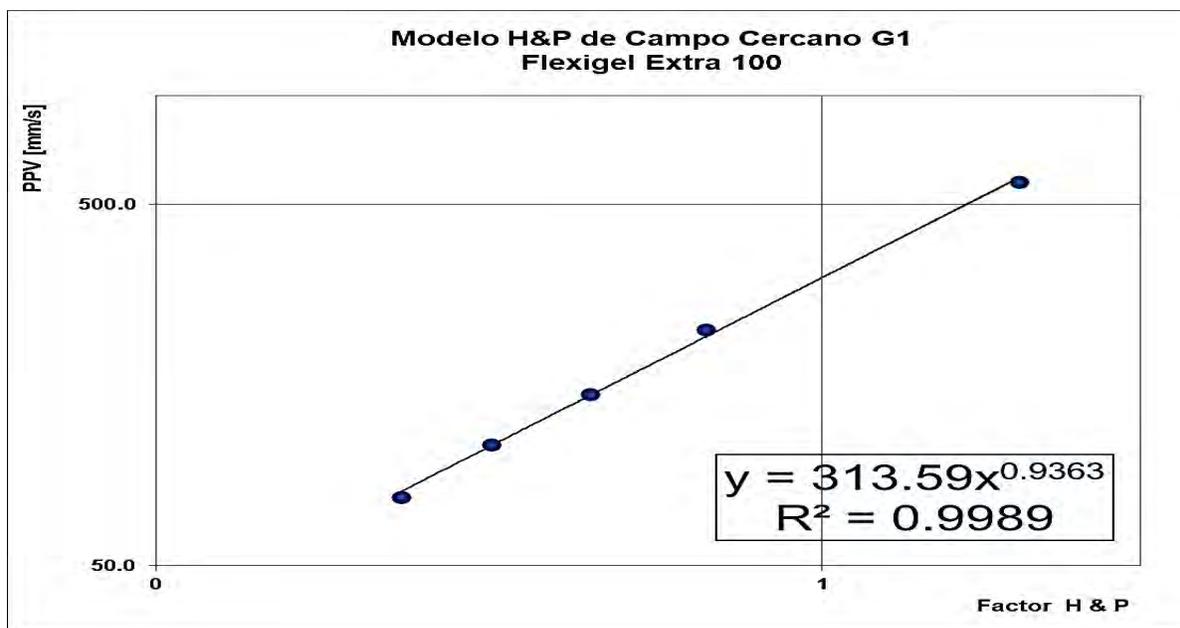
Nota: Elaboración propia

Mediante análisis de regresión lineal y con el mismo procedimiento al caso anterior se representó el grafico 5, que nos muestra el modelo de vibraciones para el explosivo propuesto que es el Flexigel Extra-100 con una confiabilidad de 99 %.

La ecuación de este modelo es $Y = 313.59 X^{0.9363}$ de donde se obtiene las constantes $K = 313.59$ y $\alpha = 0.9363$.

Gráfico 5

Modelo de Campo cercano del Flexigel Extra-100 para G1



Nota: Grafico de Dispersión de Puntos

En la tabla 14 muestra la información de taco de longitud, peso lineal, cantidad de tacos y distancia a los taladros, con la configuración de los instrumentos, la profundidad del sensor y su ubicación con respecto a los taladros T1, T2, T3, T4, T5, y T6 que son los taladros cargados con emulsión Advantage con referencia al geófono 2.

Con la fórmula de Holmberg and Pearson se calcula el Factor HP, la PPV medida son los pulsos registrados por el sismógrafo en la voladura de prueba.

Tabla 14

Datos para el modelo de Fortis Advantage 70 en el G2

Pozos proyecto	Carga	Longitud de Pozo	PPV Medida	Longitud Carga	Carga Lineal	Taco Real	Densidad Explosivo	Prof. Geo	Distancia Hz.	Factor H&P	Log (HP)	Log (PPV)	
ID	Iniciación (ms)	(kg)	(m)	(mm/s)	(m)	(kg/m)	(gr/cm3)	[m]	Ro [m]				
T1	2000	304	17.1	169.5	3.2	95.0	13.9	1.25	4.5	35.4	0.2	-0.7	2.2
T2	3000	305	17.7	139.4	3.3	92.4	14.4	1.22	4.5	30.4	0.3	-0.5	2.1
T3	4000	302	18.2	185.5	3.3	91.5	14.9	1.20	4.5	25.5	0.4	-0.4	2.3
T4	5000	304	18.0	227.4	3.3	92.1	14.7	1.21	4.5	20.6	0.5	-0.3	2.4
T5	6000	306	17.7	588.8	3.2	95.6	14.5	1.26	4.5	15.8	0.8	-0.1	2.8
T6	7000	300	17.5	589.0	3.5	85.7	14	1.13	4.5	11.2	1.2	0.1	2.8
Booster	1000		10.0										

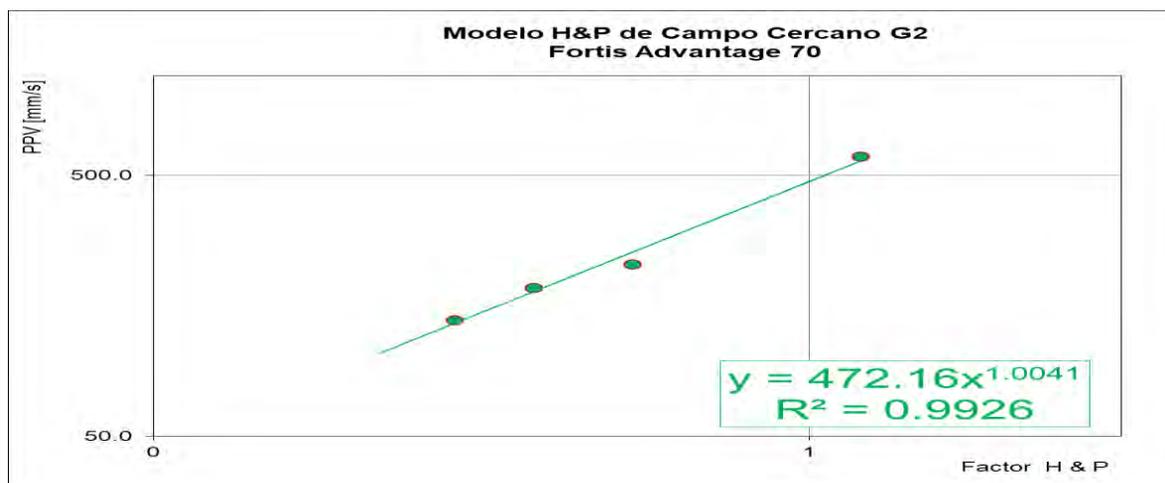
Nota: Elaboración Propia

Similar a los casos anteriores y con ayuda del programa Excel tenemos el grafico 6 que representa el modelo de vibraciones con el explosivo base Fortis Advantage 70 para el Geófono 2.

La ecuación de este modelo es $Y = 472.16 X^{0.9926}$ de donde se obtiene las constantes $K = 472.16$ y $\alpha = 1.0041$ con una confiabilidad del 99%.

Gráfico 6

Modelo de Campo cercano del Fortis Advantage 70 para G2



Nota: Grafico de Dispersión de Puntos

La tabla 15 contiene los datos de extensión de taco, carga lineal, extensión de carga, información de calibre, hondura del sensor y distancia del sensor a los taladros T7, T8, T9, T10, T11, y T12 que son los taladros cargados con Flexigel Extra con referencia al geófono 2.

Con la fórmula de Holmberg and Pearson se calcula el Factor HP, la PPV medida son los pulsos registrados por el sismógrafo en la voladura de prueba.

Tabla 15

Datos para el modelo de Flexigel Extra-100 en el G2

Pozos proyecto	Carga	Longitud de Pozo	PPV Medida	Longitud Carga	Carga Lineal	Taco	Densidad Explosivo	Prof. Geo	Distancia Hz.	Factor H&P	Log (HP)	Log (PPV)	
ID	Iniciación (ms)	(kg)	(m)	(mm/s)	[m]	[kg/m]	Real	(gr/cm3)	[m]	Ro [m]			
T7	7500	307	17.5	339.7	4.0	76.8	13.5	1.0	4.5	11.2	1.3	0.1	2.5
T8	6500	302	17.5	213.9	4.1	73.7	13.4	1.0	4.5	15.8	0.8	-0.1	2.3
T9	5500	306	17.8	156.0	4.3	71.2	13.5	0.9	4.5	20.6	0.6	-0.3	2.2
T10	4500	309	18.1	111.2	3.9	79.2	14.2	1.0	4.5	25.5	0.4	-0.4	2.0
T11	3500	307	18.0	90.3	4.0	76.8	14.0	1.0	4.5	30.4	0.3	-0.5	2.0
T12	2500	300	18.0	83.5	4.0	75.0	14.0	1.0	4.5	35.4	0.2	-0.7	1.9
Booster	1000		10.0										

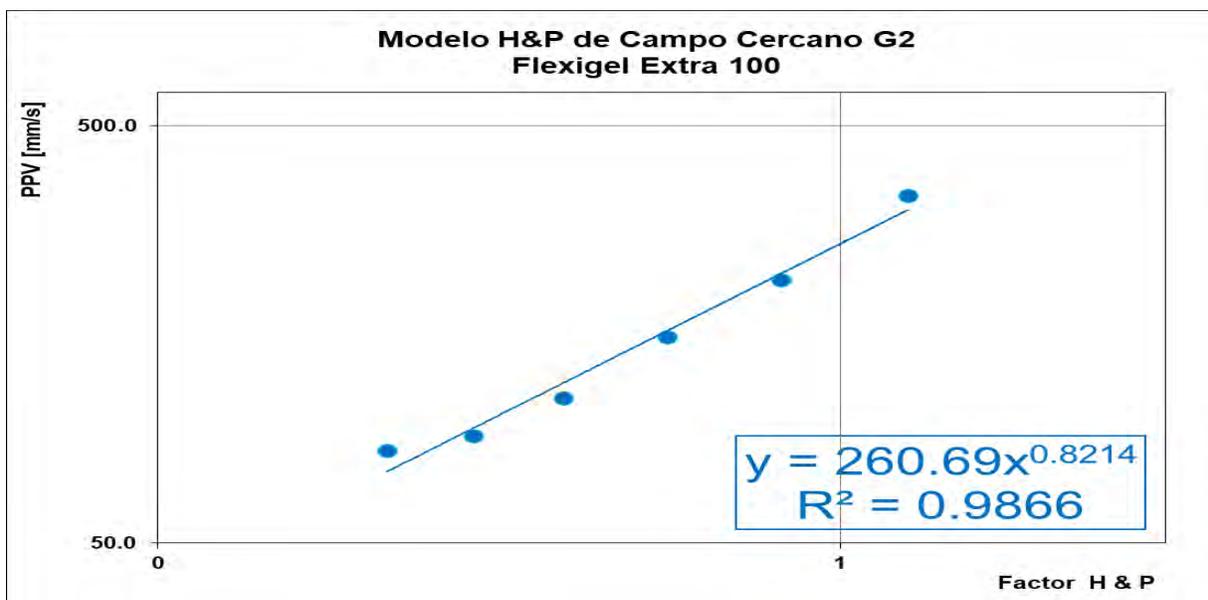
Nota: Elaboración Propia

El grafico 7 representa el modelo de vibraciones con el explosivo propuesto Flexigel Extra-100 con referencia al Geófono 2.

La ecuación de este modelo es $Y = 260.69 X^{0.8214}$ de donde se obtiene las constantes $K = 260.69$ y $\alpha = 0.8214$ con una confiabilidad del 98%.

Gráfico 7

Modelo de Campo cercano del Flexigel Extra-100 para G2



Nota: Grafico de Dispersión de Puntos

Luego de realizar las predicciones por el modelo de Holmberg & Pearson, obtenemos las ecuaciones para cada explosivo comparado y para cada geófono monitoreado.

De los cuales se hace un análisis de variación de impacto por vibraciones con la constante K obtenida como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 16

Análisis de impacto por vibraciones del Fortis Advantage 70 vs Flexigel Extra-100

Explosivo	Modelo		Variación en Vibraciones
	K	α	
Fortis Advantage 70 - G1	591.08	1.07	47%
Flexigel Extra-100 - G1	313.59	0.94	
Fortis Advantage 70 - G2	472.16	1.00	45%
Flexigel Extra-100 - G2	260.69	0.82	

Nota: Elaboración Propia

Se determina la variación de impacto por vibraciones en comparación de los explosivos Fortis Advantage 70 vs el Flexigel Extra-100 con cada geófono, donde se tiene una variación hasta del 47%, donde de acuerdo con la práctica se determinó una aproximación al 50%, por lo que se puede concluir que el Flexigel Extra-100 genera menos impacto por vibraciones en un 46% en promedio con respecto al Fortis Advantage en este presente estudio.

El análisis del modelo de vibraciones Holmberg & Pearson nos permite definir el comportamiento del impacto por fracturas y expansión de gases producto de la mezcla explosiva asociado a las constantes (K & α), siendo para el caso del Flexigel Extra-100 una variación porcentual de la constante (K) en porcentaje entre los geófonos G1-G2 del (17%), Adicionalmente se considera la disminución del valor de la Velocidad primaria de onda (V_p) siendo menor en la zona superior donde se ubica el G2.

En la tabla 17 se observa la variación de vibraciones para el Fortis Advantage 70 y para el Flexigel Extra-100 teniendo en promedio una variación de vibraciones de 18.5 % entre G1 y G2.

Para el cálculo de variación de vibración se usa la siguiente formula.

$$\% \text{ Variacion} = \frac{K1 - K2}{K1} * 100$$

Análisis de comportamiento de impacto por fracturas en G1 y G2 con Fortis Advantage 70.

$$\frac{591.08 - 472.16}{591.08} = 20\%$$

Análisis de comportamiento de impacto por fracturas en G1 y G2 con Flexigel Extra-100

$$\frac{313.59 - 260.69}{313.59} = 17\%$$

Tabla 17

Análisis del comportamiento de impacto por fracturas en G1 y G2

	K (modelos)		Variación en Vibraciones
	K1 G1	K2 G2	
Explosivo			
Fortis Advantage 70	591.08	472.16	20%
Flexigel Extra-100	313.59	260.69	17%
			18.5%

Nota: Elaboración Propia

De los Modelos obtenidos y analizados se usarán los modelos del Geófono 01 (G1) tanto para el Fortis Advantage 70 y Flexigel Extra-100, ya que nos dan resultados en terreno menos atenuado en comparación al G2, de esta manera los siguientes pasos se desarrollarán con los siguientes modelos.

Modelo de Campo cercano para Fortis Advantage 70.

$$PPV_{(50\%)} = 591.08 (FH\&P)^{1.07}$$

Modelo de Campo cercano para Flexigel Extra-100.

$$PPV_{(50\%)} = 313.59 (FH\&P)^{0.94}$$

Estas ecuaciones representan al gráfico 4 y gráfico 5 que corresponden a la magnitud de la constante y el coeficiente en la interacción entre el explosivo y la roca representan el comportamiento del macizo rocoso y nos ayudan a determinar el nivel de impacto y daño causado por las etapas de estallido y explosión en los puntos de gravedad analizados en este estudio. Estos parámetros nos permiten evaluar el efecto y la intensidad de las vibraciones formadas, así como la capacidad del macizo para resistir y soportar dichas cargas explosivas.

4.5. Cálculo de Parámetros del Macizo Rocos.

El Tipo de roca en la zona de prueba es caliza Margosa, los parámetros del macizo rocoso se obtuvieron del área de Geotecnia de la U.M. Las Bambas.

Tabla 18

Datos Geotécnicos de la U.M. Las Bambas

	RMR			UCS			Em.: Modulo de Young (GPa) Macizo rocoso			Modulo Poisson			Resistencia a la Traccion Indirecta (Mpa)			Densidad de roca Ton/m ³
	Min	Men	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	
Skam	43.07	60.96	78.85	49.5	111.92	174.34	6.71	21.92	57.7	0.12	0.18	0.24	8.5	12.8	17.1	2.7
Caliza Margosa	50.6	55.1	60.4	36	45	68	6.2	16	40.9	0.21	0.27	0.31	5.5	6	8.1	2.7
Mármol con Calcosicatos	45.58	60.07	74.56	54.17	113.07	171.97	7.75	20.14	49.12	0.32			5.2	7.6	9.4	2.7
Endo Skam	43.31	59.3	75.29	106.36	189.61	272.86	6.8	18.6	50.58				11.4	12.6	14.5	2.85
Contacto Brecha	22.94	37.89	52.89	25.39	46.36	67.33	2.11	4.98	5.68							2.7
Monzonita Biotita	39.59	55.03	70.47	144.85	207.9	271.11	5.49	10.06	40.94	0.28			12.3	13.1	14.1	2.85
Monzonita Horblendica	37.82	54.26	70.7	112.09	171.16	230.23	4.96	8.52	41.4	0.19			9.7	11.1	12.6	2.85
Monzonta Mafica	36.27	53.41	70.55	117.62	190.05	262.48	4.54	6.82	41.1	0.32			11.8	13.2	15.2	2.85
Monzonita Quarcifera	41.27	56.51	71.75	119.36	191	262.64	6.05	13.02	43.5	0.13	0.21	0.29	10.7	125	13.6	2.85
Monzonta Biotitita Fina	40.42	55.35	70.28	140.28	198.69	257.1	5.76	10.7	403				11.4	11.7	11.8	2.85

Nota: Oficina de Geotecnia-MMG

De la tabla anterior obtenemos los datos que corresponden a la litología de la zona de prueba y con los que calcularemos la PPVc.

Tabla 19*Datos Geotécnicos para Caliza Margosa*

UNIDAD GEOTÉCNICA	UCS (Mpa)	σ (Mpa)	E (Gpa)	ρ (g/cm ³)	RMR	M Poisson
Caliza Margosa	45	6.00	16.00	2.7	55	0.27

Nota: Elaboración propia

Igualando la ecuación 4 y 5 tenemos la resistencia a la tracción y el módulo de Young del macizo rocoso usando el RMR.

$$PPV_{cmr} = \left(\frac{\sigma_t * e^{\left(\frac{RMR-100}{27}\right)} * Vp(Cross - hole)}{E * e^{\left(\frac{RMR-100}{36}\right)}} \right) = \frac{\sigma_{tmr} - V_{pmr}}{Emr}$$

Calculamos el aguante a la tracción del bloque de roca usando RMR.

$$\sigma_{tmr} = \sigma_t * \exp\left(\frac{RMR-100}{27}\right) \quad \sigma_{tmr} = 6 * \exp\left(\frac{55-100}{27}\right) = 1.13 \text{ Mpa}$$

Calculando el módulo de Young del macizo rocoso usando RMR.

$$E(GPa) = E_L * \exp\left(\frac{RMR-100}{36}\right) \quad \sigma_{tmr} = 16 * \exp\left(\frac{55-100}{36}\right) = 4.58 \text{ Gpa}$$

4.6. Criterio de daño y Abaco de diseño

La Velocidad de Partículas Peak (PPV) asume una conexión directa con un comportamiento lineal y elástico exclusivamente y relaciona los valores Módulo de Young, Torsión a la tracción y Velocidad de partícula de onda P (Vp). Esta información se obtiene a través de exámenes en laboratorios para representar de la mejor manera las condiciones de roca intacta.

Usando la Ley de Hooke y considerando que la roca tiene un comportamiento elástico, es posible calcular la velocidad de partícula crítica (PPVc), que representa la máxima la velocidad de rotación

de la roca que puede aguantar previo de que suceda fisura por tensión. Este cálculo se realiza utilizando la resistencia a la tensión (σ_t), el módulo de Young (E) y la velocidad de expansión de las ondas P (V_p), aplicando la ecuación 3 de la velocidad crítica de la partícula:

$$PPV_c = \frac{\sigma_t * V_p}{E} \qquad PPV_c = \frac{6 * 1690.39}{16} = 633.90 \text{ mm/s}$$

En donde σ_t , V_p y E son obtenidos a partir de ensayos de laboratorio.

En la práctica existe una adaptación del criterio “PPVc”, en donde los valores de dispersión σ_t y E son conseguidos a por medio de pruebas en laboratorio, mientras que la velocidad de propagación del sonido V_p se obtiene por medio del método Cross Hole, que se practica en el campo.

Este modelo combina componentes tanto de bloques sólidos como de montañas. El modelo es generalmente utilizado en el terreno por la facilidad de obtención de la V_p a través de la técnica crosshole. La problemática que presenta la utilización de este modelo radica en que no es correcto utilizar en un mismo modelo variables considerando la roca intacta (σ_t y E) y las variables de roca sólida (V_p crosshole).

El modelo propuesto de PPV_{cmr} (Vergara, J., 2014) para los análisis de mediciones de vibraciones, se establece para dar contestación a una necesidad de ascender la elasticidad de la roca intacta a la de un bloque de roca con el fin de calcular con mayor exactitud la magnitud de las vibraciones que presenta cada tipo de roca pueden soportar, teniendo en cuenta su competencia geotécnica.

El criterio entonces queda de la forma según la ecuación 6 Ecuación para velocidad peak de partícula para macizo rocoso, nuevo modelo propuesto.

$$PPV_{cmr} = \left(\frac{\sigma_t * e^{\left(\frac{RMR-100}{27}\right)} * V_p(\text{Cross - hole})}{E * e^{\left(\frac{RMR-100}{36}\right)}} \right) = \left(\frac{\sigma_{t_{mr}} * V_{p_{mr}}}{E_{mr}} \right)$$

Teniendo los valores calculados de σ_{tmr} , E_{mr} y V_{pmr} en los puntos anteriores podemos calcular la PPV_{cmr} .

$$PPV_{cmr} = \frac{\left(\frac{\sigma_{tmr} * V_{pmr}}{E_{mr}} \right)}{4.58} = \frac{1.13 * 1690.39}{4.58} = 417.89 \text{ mm/s}$$

Haciendo uso de estas ecuaciones y los parámetros geotécnicos y al realizar el escalamiento de los rasgos de roca sin modificar de E_i y σ_t y considerando la clasificación de macizo rocoso RMR, se obtuvo los valores de PPV_c y PPV_{cmr} .

Con estos tenemos el criterio de daño adaptado según J. Vergara para la zona de inestabilidad.

Los valores de PPV_c y PPV_{cmr} han sido redondeado a valores enteros para mayor facilidad y por no afectar al análisis.

Tabla 20

Criterio de Daño para Caliza margosa en zona de inestabilidad 104

Criterio de Daño	Criterio de Daño Caliza Margosa	Descripción de Daño Inducido
Zona 1 > PPV_c	Zona 1 > 634 mm/s	Al prevalecer la resistencia que genera la tensión en la roca compacta, se produce la rotura de matriz de la roca y se abren nuevas grietas.
$PPV_c > \text{Zona 2} > PPV_{cmr}$	634mm/s > Zona 2 > 418 mm/s	Cuando la tensión en el macizo rocoso es mayor que su resistencia, se produce la rotura del macizo rocoso (puentes de roca) y además de abren estructuras preexistentes.
Zona 3 < PPV_{cmr}	Zona 3 < 418 mm/s	No se provoca daño en el bloque de piedra a causa de la explosión.

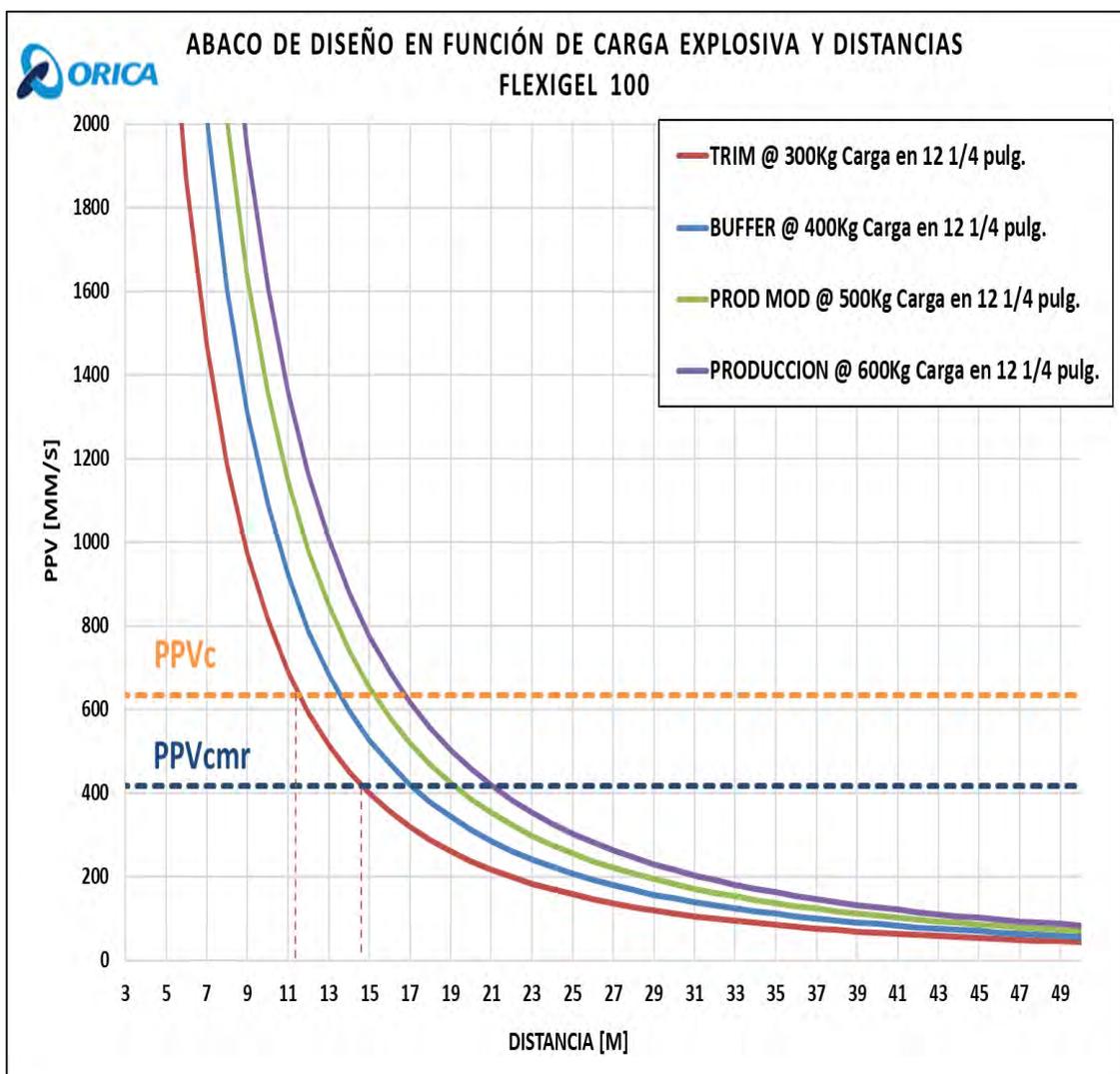
Nota: *Adaptado de Criterio de daño PPV_{cmr} J. Vergara 2014.*

A continuación, se muestra la manera en que se propagan las vibraciones de una barrena con 300kg de peso, 400Kg, 500Kg, y 700Kg de carga con el empleo de Flexigel Extra-100. Tomando en cuenta 100 kg de explosivo/m, encaminado la PPV en dirección del geófono (G1) con una confiabilidad del 50%.

$$PPV_{(50\%)} = 313.59 (FH\&P)^{0.94}$$

Gráfico 8

Abaco distancia vs cargas explosiva



Nota: Elaboración Propia.

Al interceptar la línea punteada que representa el valor del PPV_{cmr} (418 mm/s) con alguna de las curvas presentadas, se puede calcular la distancia más corta que se debe recorrer con una carga explosiva en relación a un punto o área que se busca proteger. Por ejemplo, si se desea evitar superar el límite del perjuicio en la montaña, es posible detonar una carga de 300 kg de Flexigel a una distancia aproximada de 14.8 metros del taladro donde se produce el daño por voladura. De esta manera, se toman precauciones para evitar que las vibraciones generadas excedan el nivel crítico y causen daños indeseados.

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSION

En el capítulo anterior se analizó los registros de la prueba de campo cercano donde determinamos modelos de campo cercano para la U.G Caliza margosa y teniendo la PPV critica utilizaremos herramientas tecnológicas para poder establecer los diseños de perforación y voladura idóneos para poder controlar los niveles de vibración que generan daño.

Analizando los contornos de vibración y daño de las figuras de halos de energía se verifica determinadamente la influencia que tiene el posicionamiento de la primera, segunda y tercera línea de perforación respecto a la cresta del futuro banco inferior.

5.1.Diseños de Carga

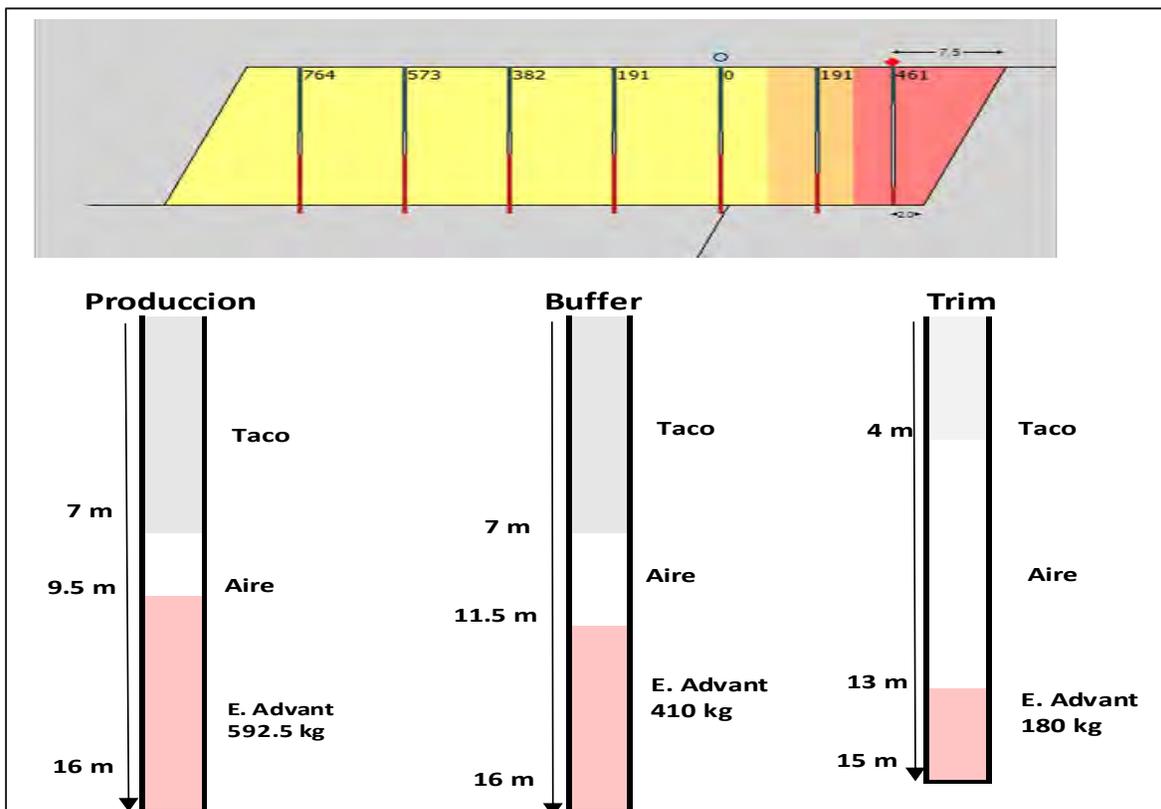
5.1.1. Diseño de Carga Línea Base

El diseño de carga para las líneas de buffer y producción son con explosivo Fortis Advantage 70, son usados en la zona de inestabilidad donde se realizó el presente estudio y se muestra en la figura 23 (simulación de halos de vibraciones BDA, Blast Design Assistant) donde se observa el impacto por efectos de vibraciones a las zonas del talud y futura cresta, generando de esta manera

la pérdida de ancho de banco, cresta y toe, que no favorecen a formar el ángulo interno de talud, generando pérdidas de estabilidad de talud y toneladas en producción.

Figura 22

Diseño de carga con Fortis Advantage (buffer y producción)

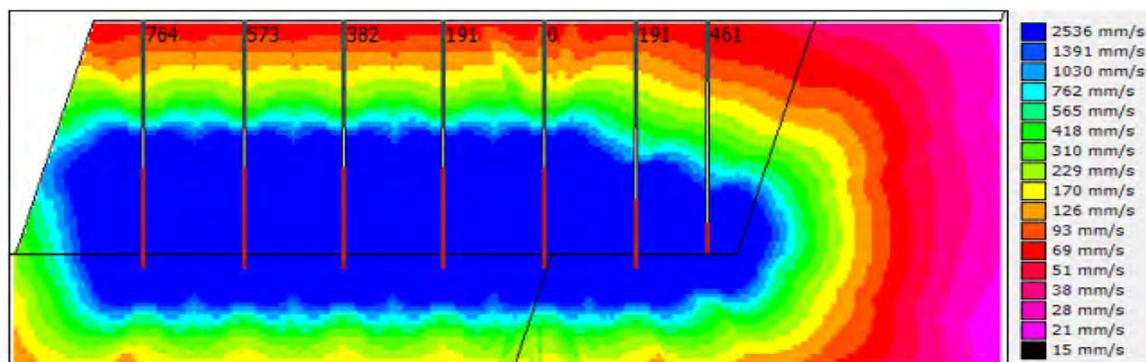


Nota: Elaboración Propia

En la figura 23 se observa la simulación de vibraciones con el BDA, donde la zona azul representa la zona de mayor daño generado con el explosivo base que es el Fortis Advantage 70.

Figura 23

Halos de contorno de vibraciones con Fortis Advantage (buffer y producción)



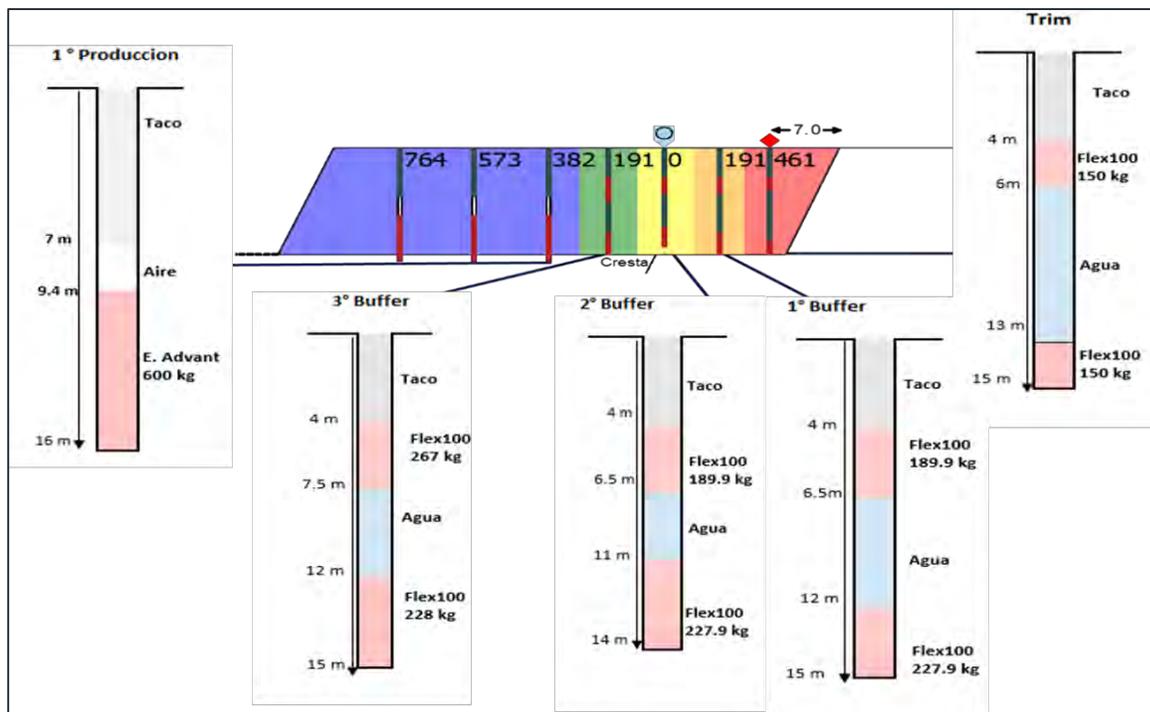
Nota: Elaboración Propia

5.1.2. Propuesta de Diseño de Voladura para el Control de Vibraciones

La distribución de la carga explosiva (Flexigel Extra-100) y el diseño de perforación propuesta, son simulados con el software BDA (figura 24), con información obtenida en el capítulo anterior (información geotécnica, modelos de H&P, PPVc, caracterización del macizo rocoso), para lograr una distribución energética que permita un mejor resultado en función a nuestros objetivos de equilibrar el control, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 24

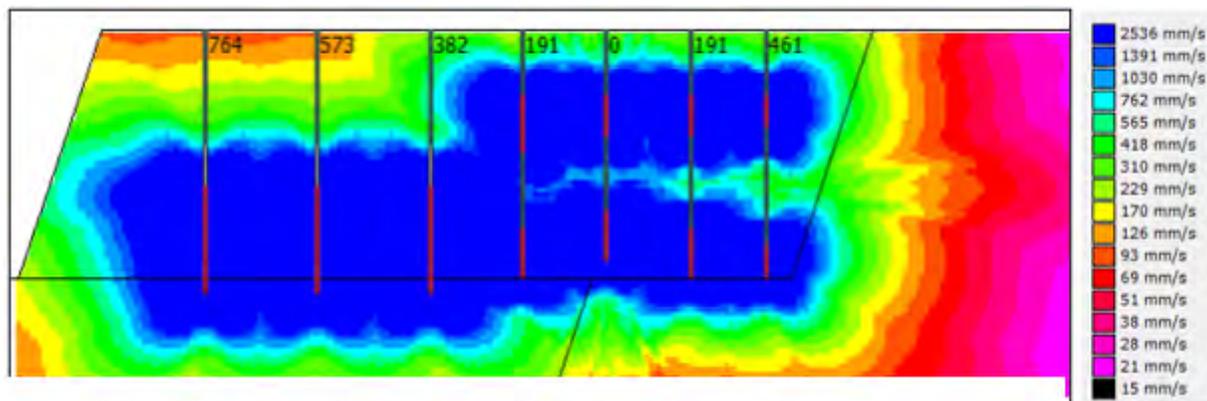
Diseño de Carga Propuesto



6. Nota: Tomada de informe de Voladura

Figura 25

Simulación de Halos de Vibraciones con BDA- diseño propuesto



Nota: Tomada de Simulador BDA

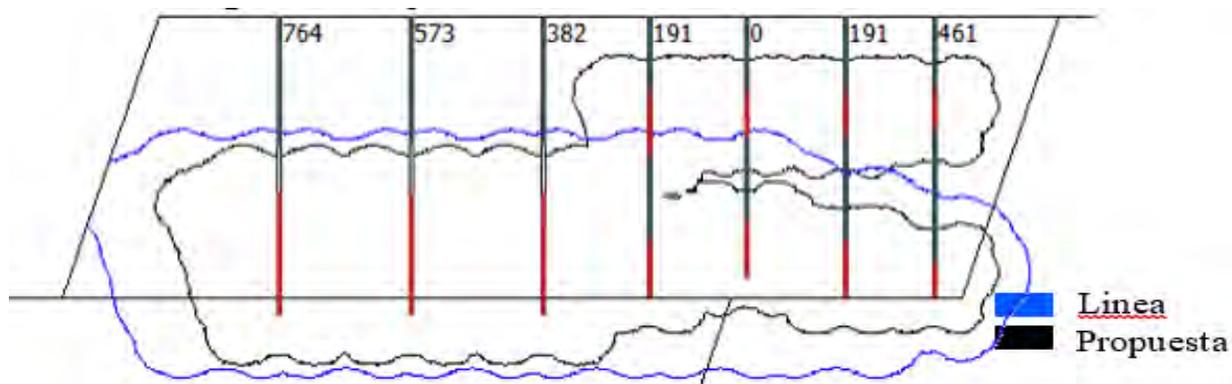
La figura 25 es la simulación de vibraciones con el BDA del diseño propuesto con el uso del explosivo Flexigel en la zona de control y Advantage en la zona de producción, se observa que la zona de mayor daño (zona azul) disminuye con respecto a la figura 24, esto porque se tiene una mejor distribución de cargas.

5.1.3. Comparación de Contorno de Vibraciones Diseño Línea Base con Diseño Propuesta.

Se realiza un comparativo de los 02 escenarios presentes en el diseño de perforación y voladura antes y después, donde en la gráfica de comparativo de contorno de vibraciones se observa el caso, Línea Base Advantage, el cual muestra un contorno de vibraciones de mayor amplitud hacia la zona de futura cresta y toe, claramente siendo el diseño de mayor daño al talud, en conclusión la Propuesta la que reduce el nivel de vibraciones a las zonas de control más críticas del talud, los niveles de vibraciones en porcentaje se observan en la tabla comparativa.

Figura 26

Comparación contorno de vibración en 02 escenarios



Nota: Tomada de Simulador BDA

La comparación de contorno de vibraciones en la fase de creación de nuevas fracturas se tiene una reducción de vibraciones porcentual, donde se observa en las tablas los puntos críticos de un

diseño de talud, viendo una reducción del 50 al 30 % aproximadamente como se observa en la tabla 21.

Tabla 21

Comparación de reducción de Vibraciones

Estimación de Reducción de vibración			
Diseño del talud	Línea Base Advantage	Propuesta Actual Flexigel	Reducción
Cresta	100%	70.40%	29.60%
Berma	100%	55.50%	44.50%
Cara del talud	100%	70.40%	29.60%

Nota: Propia

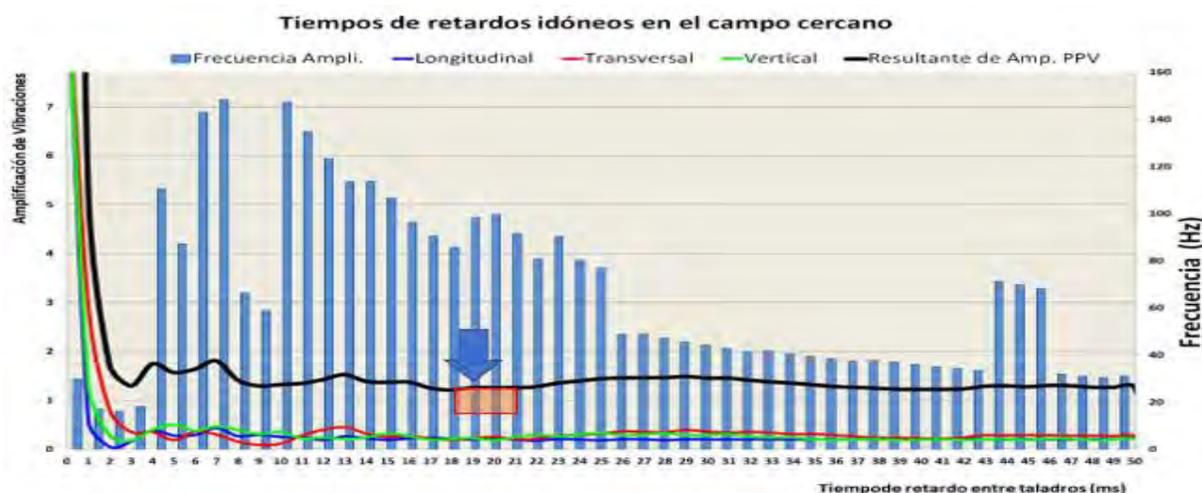
5.2. Tiempo Entre Taladros y Filas

5.2.1. Onda Elemental

Mediante la metodología de modelamiento de onda elemental se determinó el tiempo de acoplamiento de retardo entre taladros y filas, para la aplicación del Flexigel Extra-100.

Gráfico 9

Determinación de Tiempo en entre taladros



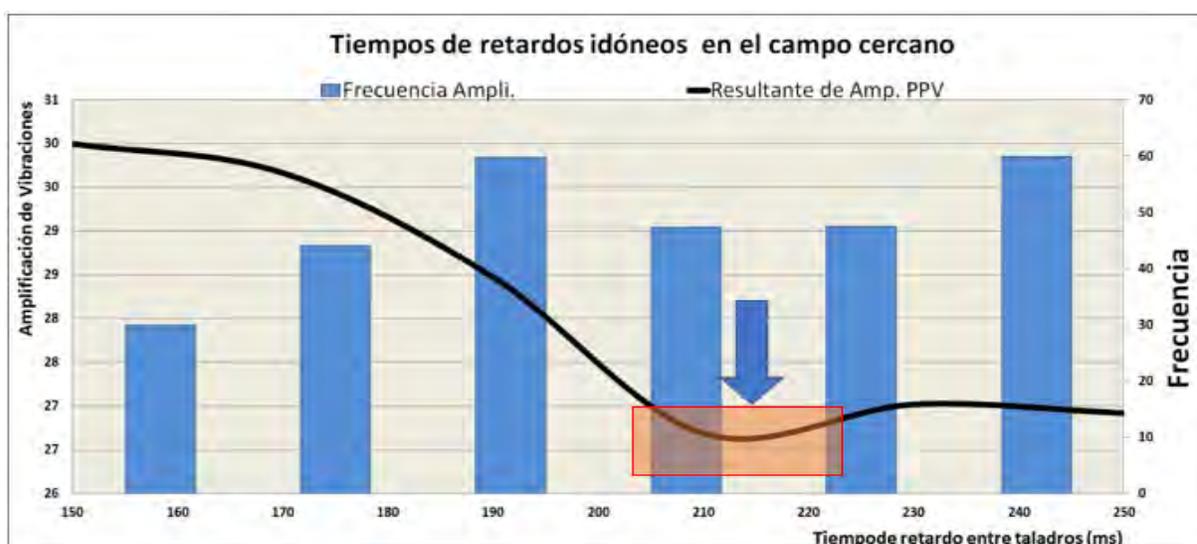
Nota: Tomada de Hoja de Cálculo de Onda Elemental

Como se observa en el gráfico anterior el rango de tiempos de 17 ms a 22 ms es donde se obtiene la menor amplificación de vibraciones, en este caso recomendamos usar 19ms de tiempo entre taladros.

Para el tiempo entre filas se determinó usar 210 ms, como se observa en el siguiente gráfico es donde menor amplitud de vibraciones se obtiene.

Gráfico 10

Determinación de tiempo entre filas



Nota: Tomada de Hoja de Cálculo de Onda Elemental

Haciendo uso del Software Blastware se determina el análisis de onda elemental de los pulsos de vibraciones de los taladros aislados del ensayo de campo cercano, los resultados del análisis son considerados dentro de un rango (19 a 21 ms entre taladro), el cual serán usados en campo para ser evaluados en función al resultado del límite de vibraciones establecido por el criterio de daño.

5.2.2. Secuencia de Salida

Se recomienda emplear una secuencia de detonación que impacten menos al talud, la secuencia de espina de pescado genera un filtro en la troncal (de la 4ta o 5ta fila) que minimiza el impacto en las vibraciones de los taladros

También se puede usar la secuencia en diagonales tipo “V” que es más abierta a la espina de pescado esto para evitar que se acoplen las cargas operantes, la salida siempre debe ser perpendicular a las estructuras mayores.

El inicio debe ser en cara libre (cresta o material volado) para evitar que al iniciar en confinado genere más vibraciones y genere material grueso en el inicio.

5.3. Impacto al Talud

De la ecuación de Holmberg and Pearson se obtuvo los valores de K (Factor de velocidad de la onda) y Alfa (Factor de atenuación), para el explosivo propuesto que es el Flexigel Extra-100 y se compara con los valores de la línea base explosivo Advantage 70.

A continuación, se presenta el detalle:

Tabla

22

Variación en vibraciones - diseño línea base y diseño propuesto

Explosivo	Modelo		Variación en
	K	α	Vibraciones
Fortis Advantage 70 - G1	591.08	1.07	47%
Flexigel Extra-100 - G1	313.59	0.94	

Nota: Elaboración Propia

La diferencia energética orientada al talud en la zona de inestabilidad 104 entre uno y otro diseño es del 47.0 % lo cual permite distribuir de manera favorable una variedad mayor en la implementación de los diseños a ejecutarse.

Además, con la simulación del BDA se pudo comparar los niveles de vibración entre la línea base y la Propuesta estimando la reducción de vibraciones que impactan al talud, tal como se observa en la ilustración 26 (comparación de contorno de vibraciones de 2 escenarios).

A continuación, el detalle.

Tabla 23

Reducción del Impacto al Talud

Diseño del Talud	Linea Base	Propuesta Flexigel
	Advantage	
Cresta	100%	70.4%
Berma	100%	55.5%
Toe	100%	70.4%

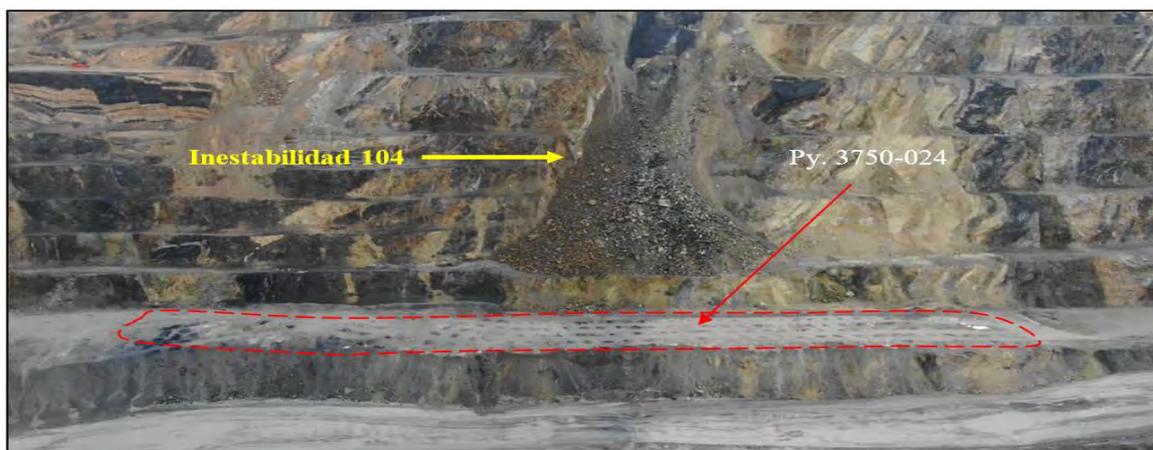
Nota: Elaboración Propia

5.4. Aplicación de Propuesta en Campo (Fase 03 Py 3750_024)

Posterior al estudio y a las simulaciones hechas se hizo la voladura con el diseño propuesto en el nivel 3750-024 en el piso de la inestabilidad 104 que ha sido el objetivo de este estudio.

Foto 5

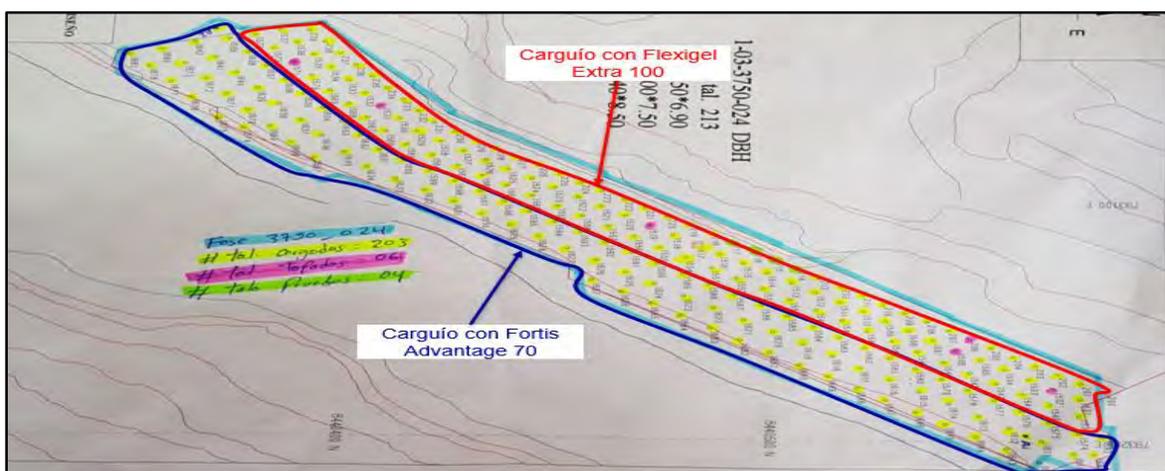
Malla 3750-24



Nota: Elaboración Propia.

Figura 27

Seccionamiento de malla por tipo de carga



Nota: Tomado de informe de Orica Mining Services

La voladura se hizo en una zona de desmonte y los taladros fueron cargados con emulsión Advantage mezcla 70 y 3 filas de control las que se encuentran hacia el talud se cargaron con Flexigel Extra-100.

5.5. Resultados de Voladura

Se dispararon 203 taladros de producción con detonadores electrónicos ikon III extreme en zona de desmonte con secuencia de salida “Diagonales en V” y tiempo entre taladros de 21 milisegundos.

Se tuvo elevada presencia de agua y cambios de material en la zona superficial del proyecto de la voladura.

Los taladros fueron cargados con emulsión Fortis Advantage 70/30 y Flexigel Extra-100.

No se tuvo presencia de Back Up.

Se observo ligera presencia de humos amarillos. Escala Visual = 1 (01 taladro).

Se realizó monitoreo de gases Post-Disparo, todos los gases se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles según normativa DS. 024-2016-EM.

Se observó regular esponjamiento y regular fragmentación en la zona superficial.

No se observó sobre quiebre hacia el talud.

Explosivo consumido 51 732 kg en 203 taladros de producción en zona de desmonte.

En la foto 6 se observa la malla Post Voladura donde se puede observar que el deslizamiento de la inestabilidad 104 no cae al nivel de la voladura.

Foto 6*Malla Post Voladura**Nota:* Fotografía tomada Después de la voladura

En la foto 7 se observa una buena fragmentación, por ser una malla se desmorte no se exige un material muy fino.

En la Foto 08 se observa un buen esponjamiento de material

Foto 7*Esponjamiento de material**Nota:* Foto tomada PostVoladura**Foto 8***Regular fragmentación**Nota:* Foto tomada PostVoladura

5.5.1. Monitoreo de Gases Post Voladura

En la siguiente foto se observa ligera presencia de humos amarillos en la zona de la cresta. En la zona del buffer que fue la zona donde se cargó con Flexigel Extra-100 no se observa presencia de humos, debido a que esta mezcla no contiene nitrato.

Foto 8

Ligera presencia de humos



Nota: Foto tomada Post Voladura

En la tabla 23 se tiene los límites máximo-permisibles según el D.S. N° 024-2016-EM y su modificatoria.

Tabla 24

Limites máximo Permisibles según D.S. N° 024-2016-EM

GAS	LIMITE MÁXIMO PERMISIBLE D.S. N°024-2016 EM
Dioxido de carbono (CO ₂)	5000ppm
Monóxido de carbono (CO)	25ppm
Gases nitrosos (NO ₂)	5ppm
Oxígeno (O ₂)	19.50%

Nota: Adaptado de Reglamento de seguridad y Salud ocupacional

En la tabla 24 se muestra el registro del monitoreo de gases de la voladura, se observa que el average (Avg) representa el promedio de los registros durante el tiempo de monitoreo y el Max indica el registro máximo que se tuvo durante el monitoreo, ambos datos se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles antes mencionados.

Tabla 25

Resultados de Monitoreo de Gases

Gas(FullScale)	CH ₄ (100%LEL)	O ₂ (40.0%)	H ₂ S(100.0ppm)	CO(500ppm)	CO ₂ (10000ppm)	NO ₂ (20.00ppm)
Avg	0 %LEL	22.8 %	0.0 ppm	0 ppm	240 ppm	0.00 ppm
Max	0 %LEL	23.4 %	0.0 ppm	8 ppm	1620 ppm	0.05 ppm
Max Date/Time	03/30 06:59:15	03/30 07:13:56	03/30 06:59:15	03/30 07:20:14	03/30 07:23:23	03/30 07:04:25
Min	****	22.4 %	****	****	****	****
Min Date/Time	****	03/30 07:22:58	****	****	****	****
Warning	10 %LEL	19.5 %	5.0 ppm	25 ppm	5000 ppm	3.00 ppm
Alarm	50 %LEL	23.5 %	30.0 ppm	50 ppm	****	6.00 ppm

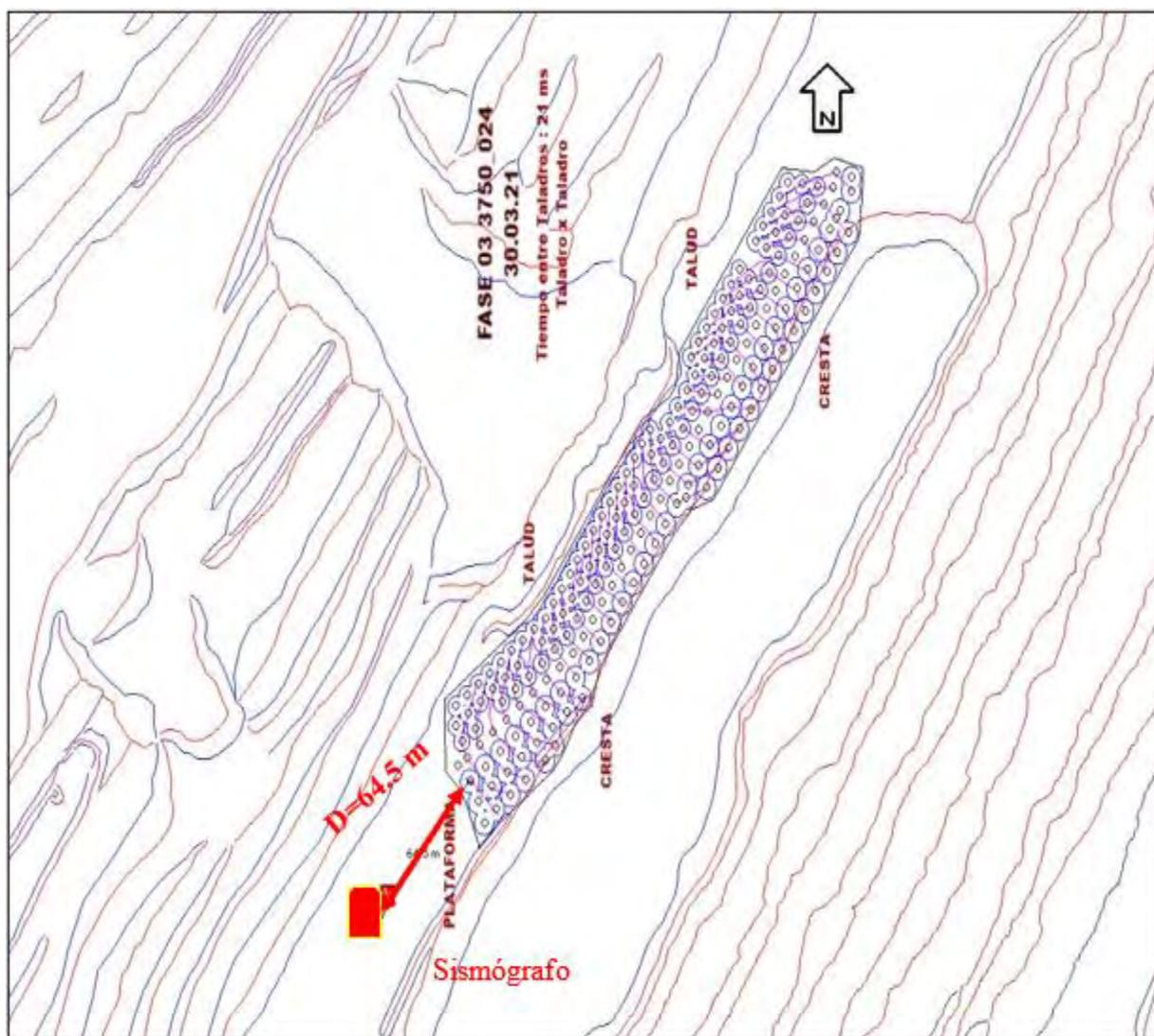
Nota: Registro de Monitor de Gases

5.5.2. Reporte de Vibraciones

Se instaló el sismógrafo a 64.5 metros del disparo, en dirección suroeste del proyecto de voladura en el nivel 3765.

Figura 28

Ubicación del Sismógrafo

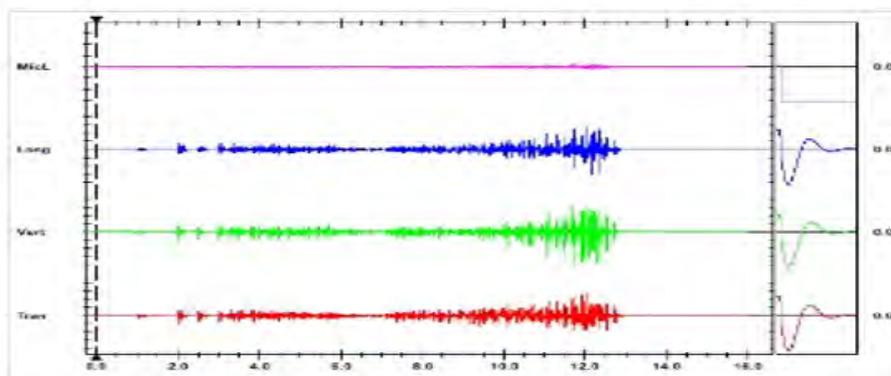
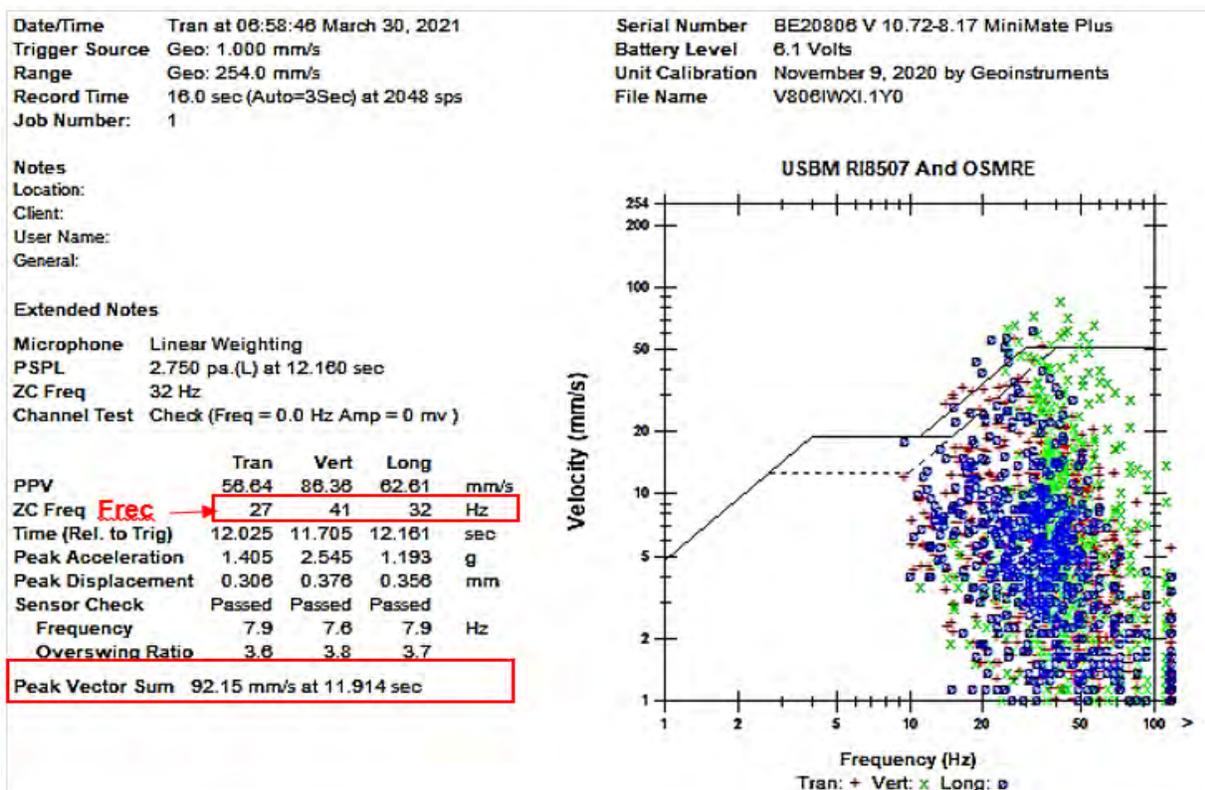


Nota: Tomada de ShotPlus

En la figura 29 se tiene el registró del sismógrafo donde se observa una PPV de 92.15 mm/s; y Frecuencias = [27 – 41 – 32] Hz. en el punto de monitoreo ubicado a 64.5 m del disparo, en dirección suroeste del proyecto de voladura nivel 3765.

Figura 29

Resultado de Sismógrafo



Nota: Tomada de Sismógrafo Orica

5.6. Situación del Antes y Después de la Aplicación

Se solicitó información de conciliación de taludes al área de Geotecnia para verificar la coincidencia entre el diseño de taludes planificado y el realmente obtenido.

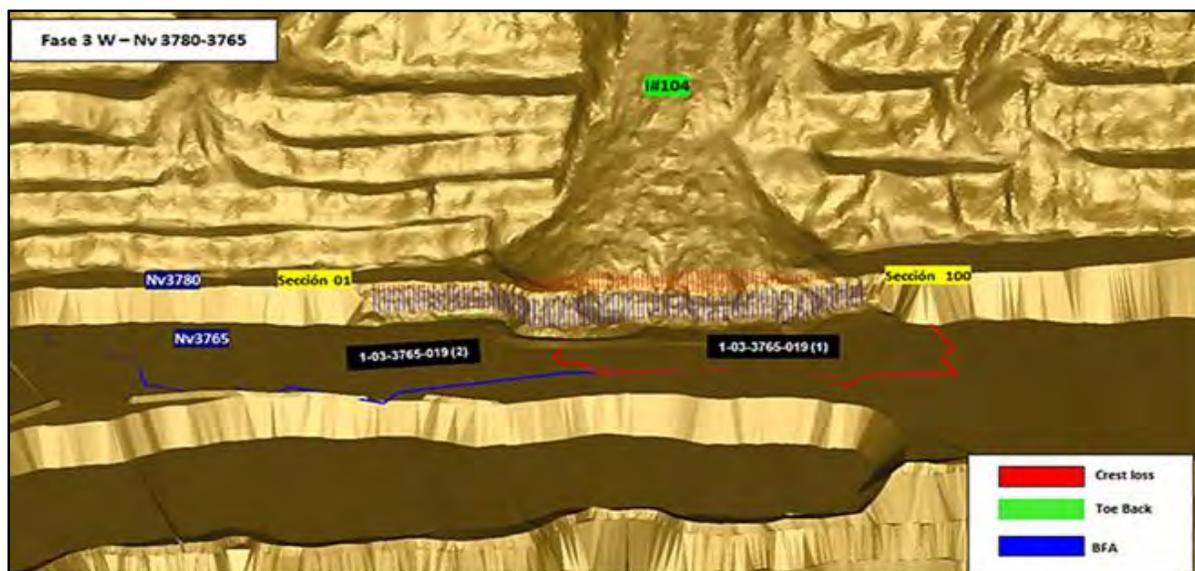
Esta conciliación evalúa la metodología técnica / operativa aplicada descritas en los capítulos anteriores, en comparación con la línea base.

5.6.1. Conciliación Línea Base Nv3765 (Fortis Advantage)

Se observa en el análisis de conciliación realizado en el banco superior 3765 con el uso del explosivo Fortis Advantage una deficiencia en el promedio del cumplimiento para la distancia hacia la cresta generando una **pérdida de cresta de -5.45m**, igualmente se aprecia un promedio en la distancia hacia el toe del talud en un **sobre dimensionamiento + 9.66m**, lo cual genera una condición ineficiente en la distribución de esfuerzos para la geometría asociada al talud, finalmente la condición de la calidad pared se encuentra en un 75% de respecto a su valor base.

Figura 30

Conciliación del diseño nivel 3765 en la fase 03 inestabilidad 104



Nota: Tomado de Informe de Orica Mining Services

Tabla 26

KPI de cumplimiento de condición y diseño nivel 3765

PHILOSOPH OF OPERATION	KPI	TARGET	Proyecto	Proyecto
			3765-019 (2)	3765-019 (1)
Cumplimiento de condición y diseño	Perdida de Cresta (3780)	+2m	4.9	6
	Posicion de Toe (3750)	+2m	7.72	11.6
	Condicion del Talud	>0.7	0.55	0.52

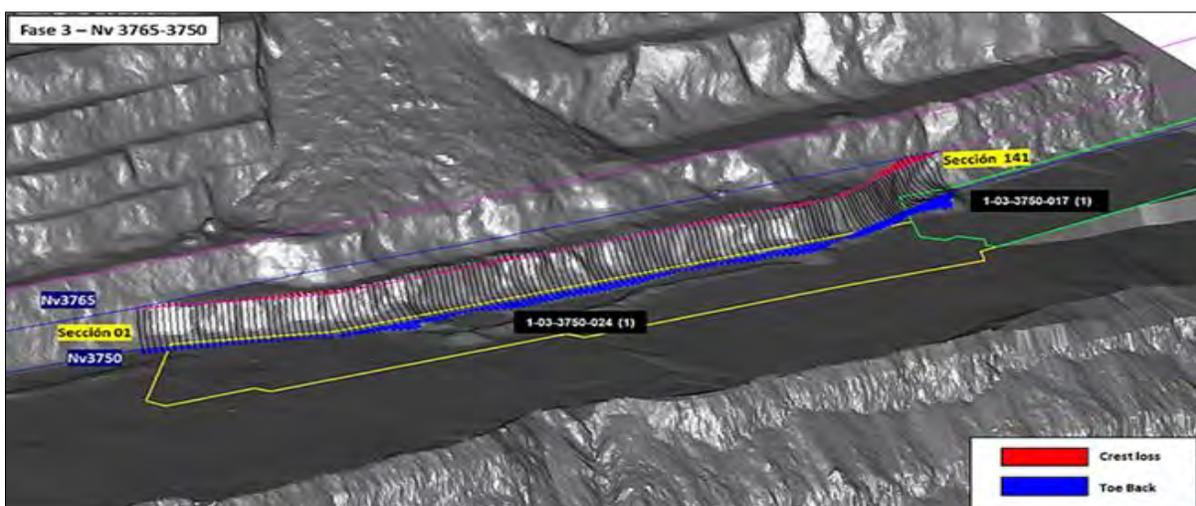
Nota: Tomado de Orica Mining Services

5.6.2. Conciliación Resultado Nv3750 (Flexigel Extra-100)

Se observa la conciliación del proyecto en la fase 03 nivel 3750 desarrollado con el explosivo Flexigel Extra en el cual se aprecia un valor promedio de **sobre dimensionamiento en la cresta de +1.4m** el cual se encuentra dentro del rango, así mismo se aprecia hacia el toe del banco un valor promedio también de **sobre dimensionamiento de +3.45m** con lo cual podría generarse como aporte en el diseño implementado acercar hacia el talud la línea de trim o aumentar la carga.

Figura 31

Conciliación del diseño nivel 3750 en la fase 03 inestabilidad 104



Nota: Tomado de Informe de Orica Mining Services

explosiva, a fin de obtener un mejor resultado para esta zona, finalmente la condición de la cara del talud se encuentra en un 75% de eficiencia respecto al valor base.

Los resultados reales de la conciliación de diseño y condición, según lo indicado por el área de geotecnia de Las Bambas indican que se mejoró en la cresta en 74% y en el toe 64%, teniendo un % de variación del 68 % por el uso del diseño propuesto con el explosivo Flexigel Extra-100.

Tabla 27

Cuadro de cumplimiento de condición y diseño nivel 3750

PHILOSOPH OF OPERATION	KPI	TARGET	Proyecto de Voladura
			3750-024
Cumplimiento de condición y diseño	Perdida de Cresta (3765)	+2m	1.4
	Posicion de Toe (3750)	+ - 2m	3.45
	Condicion del Talud	> 0.7	0.53

Nota: Obtenido de informe de Orica Mining Services

Tabla 28

Resultados de conciliación

	FLEXIGEL	ADVANTAGE	% de desviación
Cresta	1.4 m	5.45 m	74%
Berma	3.5 m	9.66m	64%
Toe	75%	75.0%	No representa
Suma (Cresta +Toe)	4.9 m	15.11 m	
% variación	68%		

Nota: Obtenido de informe de Orica Mining Services

A continuación, se presenta el detalle:

5.7. Deformación Crítica

A partir de la ley de Hooke y considerando la actuación elástica de la roca, se puede estimar la Velocidad de Partícula Crítica (PPVc), que representa la máxima gravedad y la tensión superficial la arrastren hacia abajo experimentar un fallo por tensión. Esta estimación se realiza teniendo en cuenta la Resistencia a la Tracción (σ_t), el Módulo de Young (E) y la Velocidad de propagación de la Onda P (VP). La relación entre estos parámetros se establece mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 7: Deformación crítica

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma}{E}$$

Teniendo la información geotécnica con la que determinamos los valores de criterio de daño, podemos determinar la deformación inducida en el macizo rocoso.

Tabla 29

Información de valores geotécnicos escalados al macizo rocoso.

UG	RMR	Emr (Gpa)	σ_{mr} (Mpa)	VPt (m/s)	PPVc (mm/s)
Caliza Margosa	55	4.6	1.1	1690.39	418.

Nota: Elaboración Propio

Donde obtenemos un valor de deformación crítica o inducida de 0.25mm/m. siendo un parámetro indicativo de la creación de nuevas fracturas al llegar superar la velocidad pico partícula crítica obtenida en este estudio.

Minera las Bambas establece un parámetro dinámico para determinar la deformación crítica calculada con los registros en sus monitoreos permanentes en el tajo Ferrobamba. Donde establece un parámetro de 0.34 mm/m la creación de fracturas. Siendo el valor obtenido por nuestro estudio un aproximado entre el rango de creación de nuevas fracturas e incremento de la persistencia de fracturas, del cual debemos tener en consideración también que es un análisis en campo lejano establecido por la minera.

Gráfico 11

Parámetros de deformación crítica establecido por las Bambas

Dynamic Strain and velocity			
104 mm/s	50.94%	0.044220 mm/m	Incremento en la apertura de Fracturas
358 mm/s	30.19%	0.152155 mm/m	Incremento en la persistencia de Fracturas
800 mm/s	13.21%	0.340114 mm/m	Creacion de nuevas Fracturas
1368 mm/s	5.66%	0.580951 mm/m	Intenso Fracturamiento

Nota: Tomado de Oficina de Geotecnia,MMG

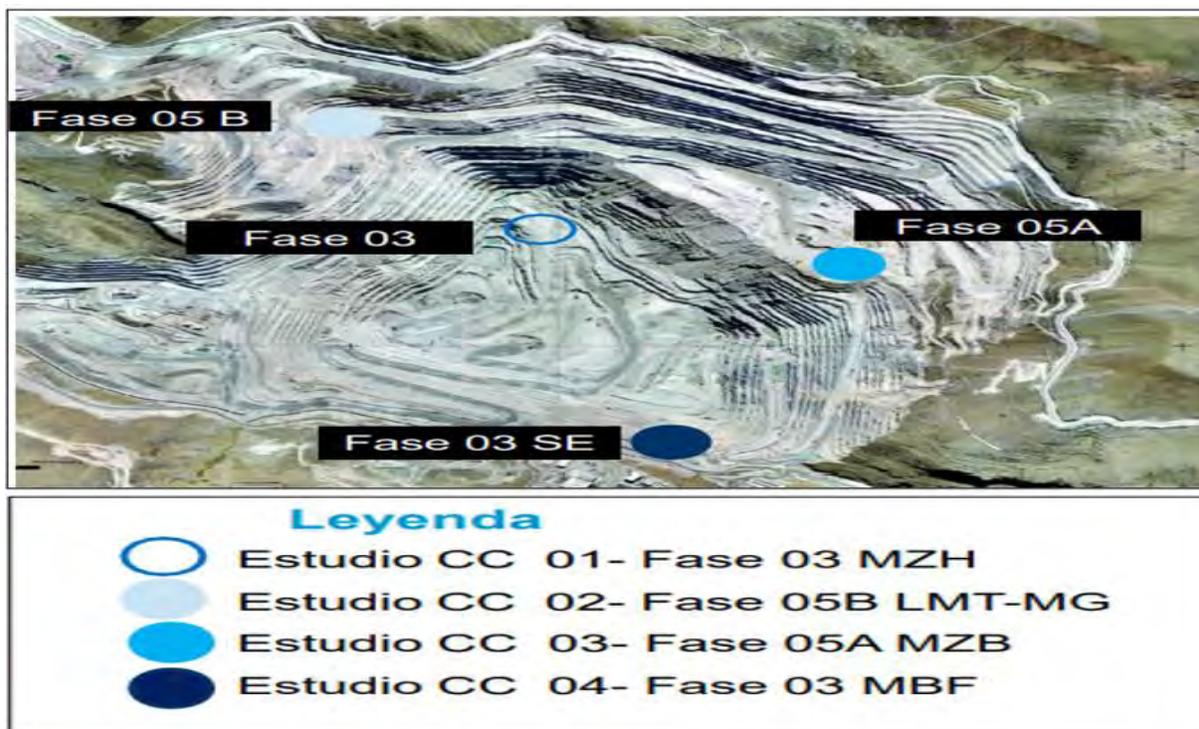
5.8. Estudios Posteriores

Debido a que esta investigación tuvo por objetivo controlar las vibraciones por efectos de voladura en una zona específica en la zona de inestabilidad 104 del nivel 3750 por ser una voladura crítica con alta probabilidad de deslizamiento.

A fines del año 2022 se zonificó el tajo eligiendo 4 puntos críticos donde se están haciendo estudios de campo cercano para seguir controlando las vibraciones por efecto de la voladura y reducir el impacto al talud.

Figura 32

Plano de Ubicación de estudios posteriores a realizar



Nota: Extraído de informe de Orica Mining Services Perú S.A

CONCLUSIONES

1. Mediante el estudio en campo cercano se controló y se redujo en un 47% el impacto por vibraciones a la pared del talud en la zona de inestabilidad 104 de la fase 3 del Tajo Ferrobamba. Se mejoró en la cresta en 74% y en el toe 64%.

Esto fue validado por el área de geotecnia de minera Las Bambas lo cual cumple el objetivo planteado.
2. El análisis del criterio de daño escalonado al macizo rocoso en el lugar de estudio determino la velocidad pico partícula (PPV) que resulto 418 mm/s y con el modelo de campo cercano para el Flexigel Extra-100 con el Geo1 tenemos un K de 313.59 y un α (alfa) de 0.9363 con estos datos se elaboró el diseño de P&V que permitió reducir el daño por vibraciones en la inestabilidad 104.
3. Con un diseño de voladura más adecuado, con el uso del Flexigel Extra-100 que es un explosivo menos energético, con una distribución de tiempos entre taladros de buffer de 19 ms y entre filas de 210 ms y con una secuencia de salida de diagonales en “V” e inicio en la cresta se logró controlar el impacto de las vibraciones al talud, disminuyendo los riesgos en seguridad por la inestabilidad de taludes

RECOMENDACIONES

1. Los cálculos realizados son aplicables al sector de estudio por lo cual se recomienda sectorizar las zonas críticas en el tajo y hacer otros estudios para determinar el criterio de daño en estas zonas.
 2. Para voladuras en zonas críticas se recomienda utilizar el criterio de daño escalado a macizo rocoso (PPV_{cmr}) ya que esto permite obtener una cuantificación más precisa del nivel de vibraciones que los distintos macizos rocosos pueden soportar, es necesario considerar su competencia geotécnica.
 3. Se recomienda continuar con los trabajos de implementar mezclas explosivas menos energéticas en las voladuras de contorno, a fin de evitar el desarrollo de nuevo fracturamiento asociado a impacto por voladura en el campo cercano.
- .

BIBLIOGRAFIA

3er EIA de la Unidad Minera Las Bambas. (2016). En S. Lavalin.

Aguilar Maritza, C. F. (2018). “*Estimacion de presiones dinamicas inducidas por voladura para definir distancias criticas para detoadores electronicos DAVEYTRONIC en tajo La QUINUA YANACOCCHA*”. Lima: Universidad Privada del Norte.

Alejano, P. R. (2004). *Mecanica de Rocas: Fundamentos e Ingenieria de Taludes*. Madrid.

Aragon Gil, N. (2019). *Aplicacion de voladura controlada para estabilizar taludes de banquetas en el sector de Senseccalla, del tramo VII proyecto de la carretera Ayacucho Abancay Div. Kishuara*. Cusco.

Becerra, V. (2020). *Evaluacion comparativa sismica del pabellon de ingenieria de la UAC, sin y con aisladores de base y amortiguadores de fluido viscoso sometidos a vibraciones aleatorias*. Cusco.: Universidad Andina del Cusco.

Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Bravo, I. (2018). *Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en Minera Spence*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Cano Mucha, J. (2019). *Estudio de Vibraciones para la seleccion de explosivo optimo en la Unidad Operativa Selene-Minera Ares*. Cerro de Pasco.

Carrasco. (2007). *tipos de investigacion* . Mexico: planeta.

CINTEX. (2005). *Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento*. Blasttechnology. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/manual-de-vibraciones-cintexpdf-pdf-free.html>

- Cornejo, P., & Huaman, P. (2022). *Estimacion de un modelo predictivo de vibraciones inducidas por voladura en campo medio y campo lejano para el cuidado de las estructuras en una mina superficial en proceso de cierre*. Lima.
- Diaz Leiva, M. A. (2021). *Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en Minera Los Pelambres*. Santiago de Chile.
- Dueñas, G. W. (2018). “*Reduccion de daño inducido mediante monitoreo, Modelamiento y Analisis de vibraciones por voladura en el BYPASS 179. COMPAÑÍA MINERA KOLPA S.A.*”. Puno: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.
- Eliza, P. L. (2021). *Optimizacion de costos en la voladura de precorte en la mina Cuajone-Moquegua*. Cusco.
- EXSA. (2020). *Metodología para el control de vibraciones en campo cercano*. Lima: Lima, Perú.
- GEOBLAST. (2019). *Criterios de Daño por Vibraciones en Campo Cercano y Campo Lejano*. Lima, Perú.: Capacitación Asistencia Técnica.
- GUTIERREZ, J. W. (2018). “*Reduccion del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y analisis de vibraciones por las voladuras en el BYPASS 179. COMPAÑÍA MINERA KOLPA S.A.*”. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Hernandez, R. (2014). *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill.
- Huaracco Anampa, R., & Quintanilla Monzon, W. (2019). *Diseño de Carga y amarre para optimizar la voladura y su impacto economico en el Tajo Ferrobamba*. Abancay.
- Minas, M. d. (2015). *Glosario técnico minero*. Colombia: la republica.
- MINAS, M. D. (setiembre de 2019). *Guia ambiental para la perforacion y voladura en operaciones mineras*. Lima, Perú: MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS. Obtenido de

GUIA AMBIENTAL PARA LA PERFORACION Y VOLADURAS EN OPERACIONES
MINERAS.

Minería Las Bambas. (2021). Obtenido de <http://www.lasbambas.com/inicio/>

Minero, T. (2022). Inversión de Las Bambas para ampliar producción será de US\$527 millones en los próximos 5 años.

Ministerio de minas y energía. (2015). *Glosario técnico minero*. Bogotá: República de Colombia.

MMG. (2017). *LAS BAMBAS*. Obtenido de <https://www.lasbambas.com/conociendo-las-bambas>

MMG. (03 de FEBRERO de 2022). *LAS BAMBAS*. Obtenido de CONOCE EL APORTE DE LAS BAMBAS: <https://www.lasbambas.com/>

MMG LAS BAMBAS. (30 de enero de 2022). *MMG LAS BAMBAS*. Obtenido de Historia: <https://www.lasbambas.com/inicio/>

Orihuela Castillo , S., & Dapello Vizcarra , J. (2009). *Diseño de un modelo predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una mina modelo*. Lima.

PEÑA, M. S. (2019). “*Análisis de los efectos de vibraciones en macizos rocosos generados por las voladuras , para la estabilización de taludes finales y de trabajo en el tajo FERROBAMBA – CIA. MINERA LAS BAMBAS – APURÍMAC - 2017*”. Cusco: Universidad San Antonio Abad del Cusco.

Perez Cosio, J. (2019). *Utilización de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental*. Cartagena.

Pérez Cosío, J. (2019). *Utilización de la Medida de Vibraciones en Voladuras para el Conocimiento de los Daños al Macizo de Roca Ornamental*. Cartagena, España.: Universidad Politécnica de Cartagena.

- Pérez-Cosío, J. D. (2019). *Utilizacion de la medida de vibraciones en voladuras para el conocimiento de los daños al macizo de roca ornamental*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Pernia , J. M., Lopez, C., Lopez, E., & Ortiz. (1987). *Manual de Perforacion y voladura de rocas*. Madrid.
- Pernia, J. M., Ortiz, F., Lopez, C., & Lopez, E. (1987). *Manual de perforación*. España: Instituto geológico y minero de España.
- Ricardi. (2017). *Implementacion de Teoria de la conminucion en diseño de Mallas de Perforacion y Voladura en compania minera* . Huancayo.
- Sampieri, H. (2014). *Metodologia de la investigacion*. Mexico: EDITORES, S.A. DE C.V.
- Sanchez. (2018). *Estudio de Vibraciones Inducidas por Tronadura en Minera Spence*. Santiago: Universidad de Chile.
- Sánchez, I. L. (2018). “*Estudio de vibraciones inducida por tronadura en mineria Spence*” *MINERA SPENCE*”. Santiago: Universidad de Chile.
- Ysabel, t. (2014). *Análisis Vibracional*. Lima: el planeta.

ANEXOS

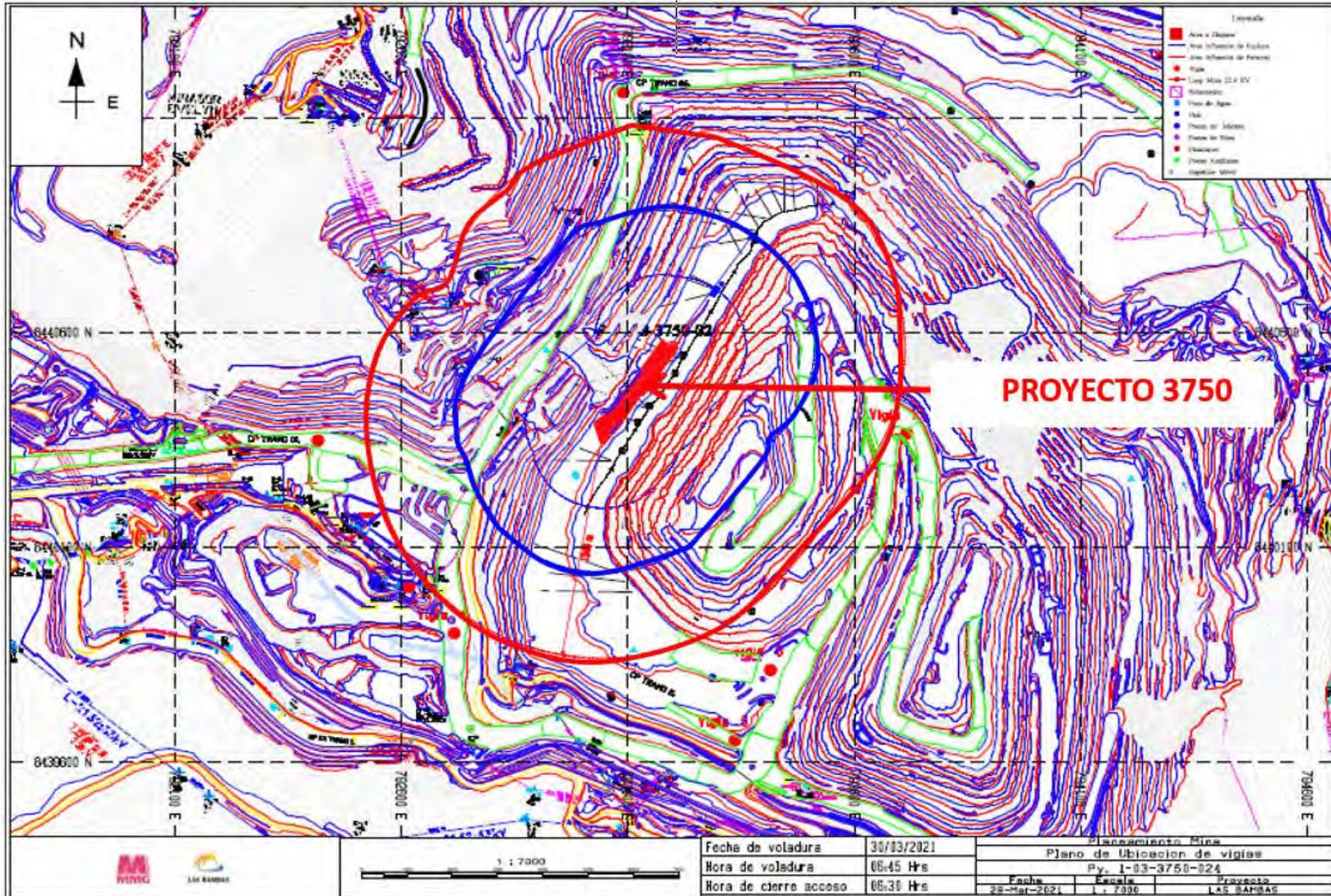
ANEXO N° 01

Mapa del Tajo Ferrobamba – M.M.G. Las Bambas



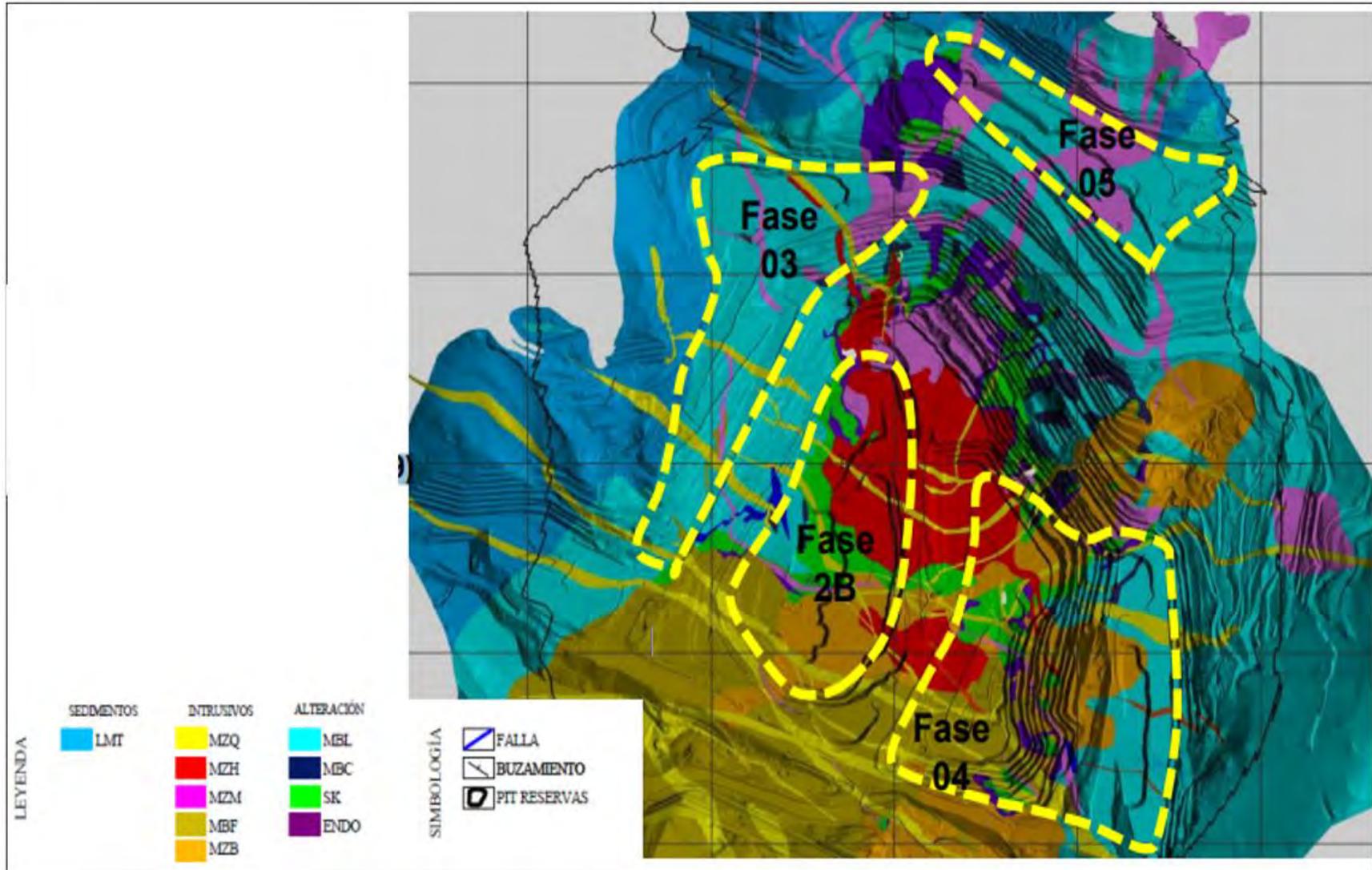
ANEXO N° 02

Plano de Evacuación de Voladura Proyecto: Fase 03-3750-024



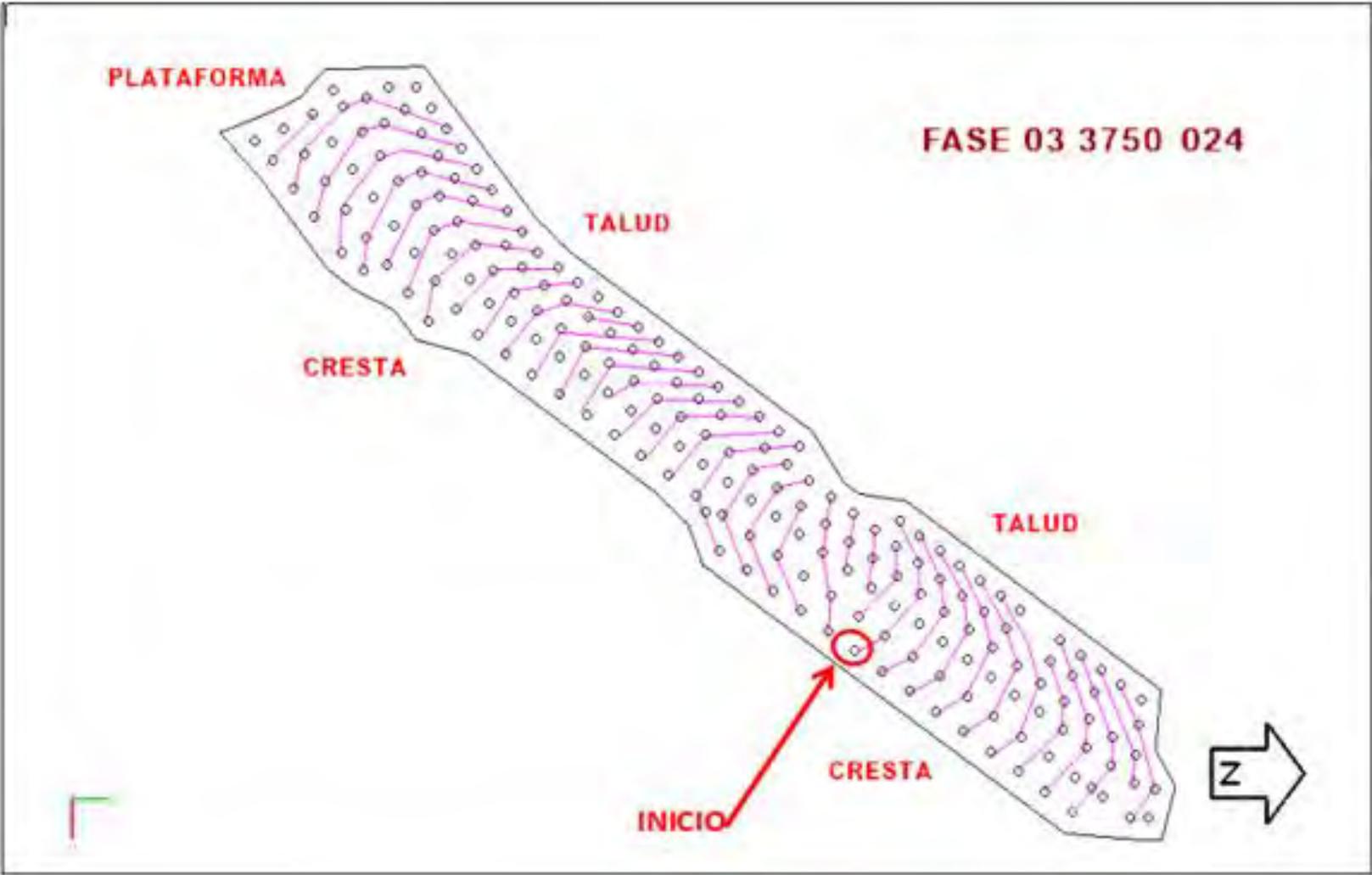
ANEXO N° 03

Plano Geológico del Tajo Ferrobamba



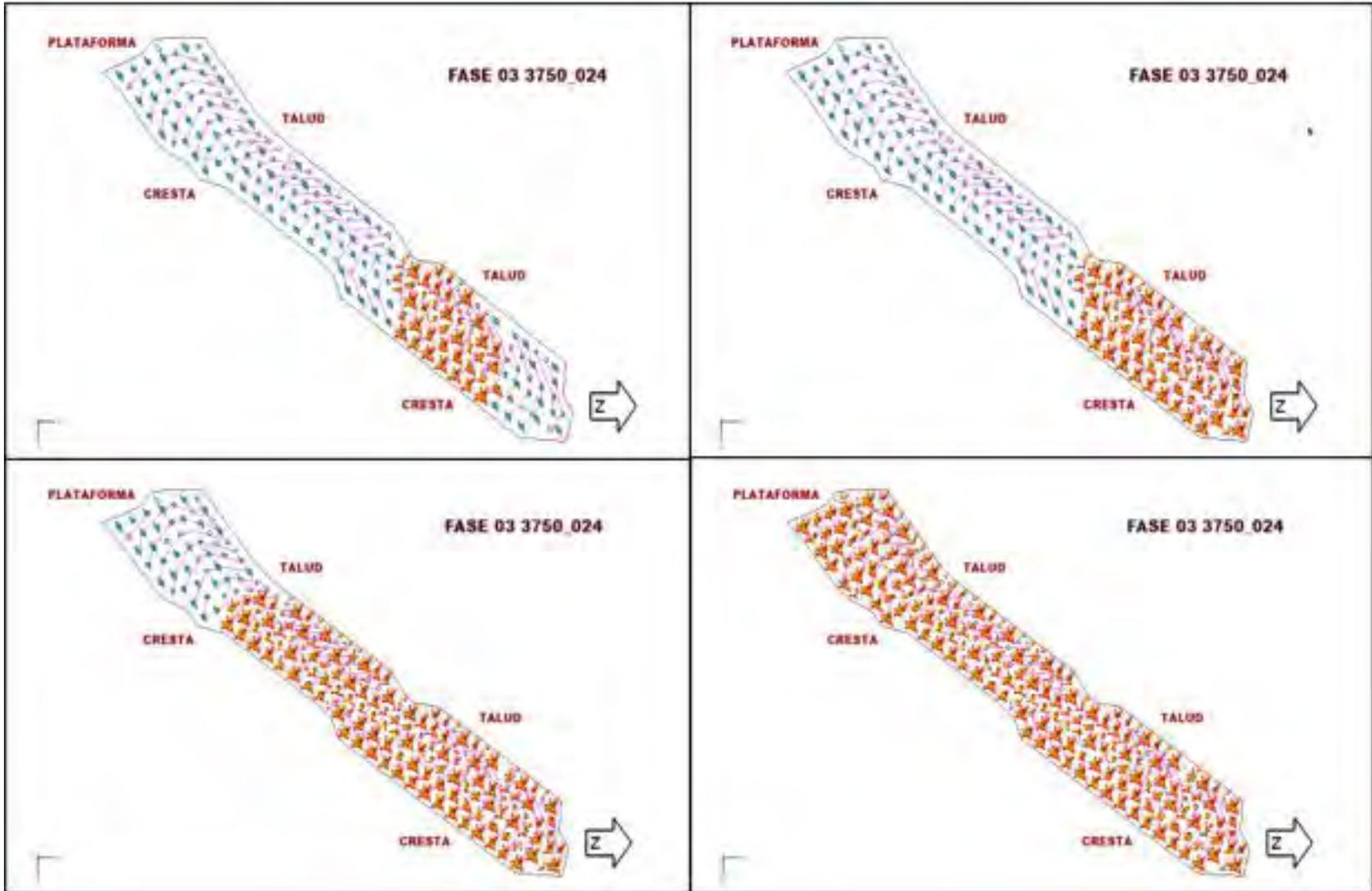
ANEXO N° 04

Diseño de Voladura: Fase 03-3750-024



ANEXO N° 05

Secuencia de Salida: Fase 03-3750-024



ANEXO N° 06
Panel Fotográfico

Foto 9

Instrumentación de Geófonos



Foto 10

Cimentación de Geófonos con mezcla



Foto 11.

Medición y carguío de taladros

**Foto 12**

Disparo de proyecto de Voladura



Foto 13

Zona de Inestabilidad 104 antes de la voladura – Nov 2021



Foto 14

Zona de estudio en Inestabilidad 104



Foto 15

Zona de estudio en Inestabilidad 104



Foto 16

Post Voladura de malla 3570-024



Foto 17

Zona de Inestabilidad 104 – diciembre 2022

