



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

REVISIÓN Y AJUSTE DEL DIAGRAMA DE DISPARO EN  
COMPAÑÍA MINERA LOMAS BAYAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

DUILIO EZIO PARESCHI PASTÉN

PROFESOR GUÍA

JAIME CHACÓN FERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

HANS GÖPFERT HIELBIG

GONZALO MONTES ATENAS

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil de minas

POR: Duilio Ezio Pareschi Pastén

FECHA: 05/03/2018

PROFESOR GUÍA: Hans Göpfert Hielbig

Esta memoria da cuenta de un diagnóstico técnico enfocado en evaluar los resultados y la configuración de los parámetros actuales de las tronaduras realizadas en la mina a cielo abierto Lomas Bayas. Este trabajo se desarrolla en la empresa Orica para prestar asesoría a Compañía minera Lomas Bayas con el fin de mejorar el proceso de perforación y tronadura actual.

En la operación actual de perforación y tronadura se observa en la Fase 3 un P80 de 4.8 pulgadas según el ajuste de Rossin-Rammler, lo que está por encima del P80 objetivo definido por la empresa que explota actualmente el rajo Lomas Bayas. Esto es la principal motivación de este estudio, el cual busca como objetivo principal, generar una propuesta técnica-económica que mejore los resultados de la tronadura actual y que permita alcanzar una fragmentación de un P80 entre 3 y 4 pulgadas. Además, se plantea un objetivo secundario, en el sentido de proponer la utilización de un explosivo más energético para mejorar la productividad.

Para llevar a cabo este trabajo y cumplir con los objetivos antes señalados, primero se realizó un diagnóstico técnico de las actuales prácticas del proceso de perforación y tronadura. Esto incluyó un análisis granulométrico, mediciones de velocidad de detonación, rendimiento de equipos de carguío, la cantidad de explosivo utilizado (factor de carga) y un análisis económico de la tronadura. Posteriormente se realizó un análisis teórico de los distintos parámetros de perforación, para identificar los más importantes y conocer cual o cuales hay que variar para obtener los resultados que permitan cumplir los requerimientos de fragmentación.

Con el mismo propósito se elaboró un modelo de fragmentación el cual permitió variar el burden y espaciamiento, así como también el taco, y predecir la fragmentación que se generó ante las nuevas condiciones introducidas por la modificación de los parámetros de perforación y tronadura.

Luego se realizaron pruebas con distintas configuraciones y se pudo identificar una configuración (malla de 9.6 x 11 m) que logró los resultados de fragmentación requeridos junto con mejorar la tasa de excavación y mantener las condición de los pisos. Además, estas pruebas permitieron validar el modelo.

Finalmente, se realizó un estudio de expansión de la malla con el explosivo Fortan Extra 50, logrando la ampliación de un 6.8% con una fragmentación dentro del rango objetivo y un pequeño ahorro de 0.001 USD/ton.

## Abstract

All around, this work is a technical diagnosis focused on evaluating the results and the configuration of the current parameters of the blasting carried out in Lomas Bayas mine. Orica is a service company dedicated to drilling and blasting, the following work seeks to provide technical advice to Lomas Bayas Mining Company, in order to improve the current drilling and blasting process

In the current drilling and blasting operation we observed a P80 of 4.8 inches in phase 3, according to the Rossin-Rammler adjustment, which is above the target P80 defined by the company. This lack of good fragmentation is the main motivation for this study, which seeks to generate a technical-economic proposal that improves the results of the current blasting, achieving a fragmentation of a P80 between 3 and 4 inches. In addition, a secondary objective is proposed, is to generate a technical-economic proposal with a more energetic explosive to improve productivity.

In order to carry out this work and achieve the objectives previously imposed, a technical diagnosis of the current practices of the drilling and blasting process were first performed. This includes a granulometric analysis, measurements of detonation velocity, performance of the loading equipment, the amount of explosive used (load factor) and an economic analysis of blasting. Subsequently, a theoretical analysis of the different parameters used for drilling is carried out, to define the most important ones and to know which are the ones needed to be adjusted in order to obtain the necessary results to comply with the fragmentation.

With the same objective of improving fragmentation, a fragmentation model is made, which allows to vary the burden and spacing, as well as the stemming, and predicting the fragmentation generated by the new conditions presented after the modification of the parameters of drilling and blasting.

Trial cases with different configurations were carried out. A configuration that achieved the necessary fragmentation results, improving the excavation rate and maintaining the condition of the floors, was found with a blast design of 9.6m by 11m. In addition, these trial cases allowed to validate the model.

Finally, an expansion of the blast design was made with the Fortan Extra 50 explosive, achieving an expansion of 6.8% with a fragmentation within the target range and a small saving of 0.001 USD / ton.

## Tabla de contenido

Abstract .....	ii
Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.2.1 Objetivos generales .....	1
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcances .....	2
1.4 Metodología .....	3
Capítulo 2: Antecedentes .....	5
2.1 Ubicación .....	5
2.2 Geología .....	6
2.3 La Empresa.....	8
2.4 Operaciones unitarias .....	8
2.4.1 Perforación .....	8
2.4.2 Tronadura .....	9
2.4.3 Carguío y transporte .....	11
Capítulo 3: Marco teórico .....	12
3.1 Características de los explosivos .....	12
3.1.1 Características rompedoras .....	12
a) Presión de detonación .....	12
b) Velocidad de detonación .....	13
c) Densidad.....	13
3.1.2 Características energéticas.....	14
a) Trabajo Máximo disponible.....	14
b) Volumen de gases .....	14
c) Presión de los gases.....	14
3.1.3 Características prácticas.....	14
a) Fuerza o potencia.....	14
b) Gases tóxicos .....	15
c) Resistencia al agua.....	15
d) Diámetro crítico .....	15
3.1.4 Ficha técnica de los explosivos.....	16

3.2 Mecanismos de fractura de la roca .....	16
3.2.1 Trituración de Roca .....	16
3.2.2 Agrietamiento radial .....	17
3.2.3 Reflexión de la Onda de Choque .....	18
3.2.4 Extensión y apertura de las grietas radiales.....	19
3.2.5 Fractura por descompresión .....	19
3.2.6 Fractura por cizallamiento.....	20
3.2.7 Rotura por flexión.....	20
3.2.8 Rotura por colisión .....	21
3.3 Modelos de fragmentación .....	21
3.3.1 Modelo Kuz-Ram .....	21
3.3.2 Modelo KCO.....	23
3.4 Criterio de daño por vibraciones .....	25
3.5 Modelo de vibraciones .....	26
Capítulo 4: Desarrollo del estudio .....	29
4.1 Identificación de parámetros .....	29
4.2 Línea base .....	29
4.2.1 Factor de carga.....	31
4.2.2 Granulometría .....	32
4.2.3 Costo tronadura .....	36
4.2.4 Velocidad de detonación.....	37
4.2.5 Rendimiento equipos de carguío .....	38
4.2.6 Análisis de pisos .....	38
4.3 Análisis teórico de parámetros de perforación y tronadura .....	39
4.3.1 Taco.....	39
4.3.2 Burden y espaciamiento .....	41
4.3.3 Pasadura .....	42
4.4 Modelos .....	43
4.4.1 Modelo de fragmentación .....	43
4.4.2 Modelo de Vibraciones .....	47
a) Estudio Vibraciones de Campo Cercano .....	47
b) Simulación de vibraciones .....	52
4.5 Pruebas en terreno y resultados .....	56

4.6 Análisis de resultados .....	58
4.7 Propuesta expansión malla .....	65
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones .....	69
5.1 Conclusiones.....	69
5.2 Recomendaciones .....	70
Capítulo 6: Bibliografía .....	71

## Índice de Tablas

Tabla 1 - Litologías y Alteraciones Principales .....	7
Tabla 2 - Ficha técnica de los explosivos utilizados .....	16
Tabla 3 - Factor de Roca.....	22
Tabla 4 - Criterio de Daño de McKenzie .....	26
Tabla 5 - Parámetros de diseño en fase 3 .....	31
Tabla 6 - Factor de Carga Mensual en Fase 3.....	32
Tabla 7 - Costo Tronadura por Pozo .....	36
Tabla 8 - Costo Tronadura Mensual en Fase 3.....	36
Tabla 9 - Mediciones de VoD en Fase 3 .....	37
Tabla 10 - Rendimiento Mensual. Tasa de Excavación Equipos de Carguío en Fase 3	38
Tabla 11a - Estadísticas piso Banco 1890.....	38
Tabla 11b – Estadísticas piso banco 1875.....	38
Tabla 12 . Resumen linea base.....	39
Tabla 13 - Calculo de Taco .....	41
Tabla 14 - Cálculo de SD .....	41
Tabla 15 - Influencia de los parámetros en la fragmentación.....	42
Tabla 16 - Pasadura Calculada según Lopez Jimeno para grandes diámetros .....	42
Tabla 17 - Pasadura Calculada según ASH.....	42
Tabla 18 - Calculo de pasadura según ángulo de interacción.....	43
Tabla 19 - Propiedades de la Roca .....	44
Tabla 20- Granulometría para distintas configuraciones de malla.....	45
Tabla 21 - Resultados Granulometría con variación de taco para distintas mallas .....	46
Tabla 22 - Fragmentación según burden y taco, y el costo asociado.....	47
Tabla 23 - Velocidad de Onda “p” obtenida en terreno. ....	50
Tabla 24 - Propiedades de roca intacta para el cálculo de PPVc.....	50
Tabla 25 - Criterio de Daño PPVc .....	51
Tabla 26 - Paámetros de perforación y tronadura de las propuestas de reducción de pasadura. ....	54
Tabla 27 - Parámetros de perforación y tronadura pruebas .....	57
Tabla 28 - Resultados para las pruebas de fragmentación y costos reales .....	58
Tabla 29 - Comparación resultados reales vs teóricos.....	58
Tabla 30- malla y pasadura por banco .....	59

Tabla 31 - Pasadura para los distintos casos.....	62
Tabla 32 - Resumen resultados malla 9.6x11m .....	63
Tabla 33 - Resultados evaluación económica Fortan Extra. ....	64
Tabla 34 - Parámetros prueba 2.....	65
Tabla 35 - Expansión Malla Fortan Extra .....	66
Tabla 36 - Porcentajes pasantes Fortan Extra 50 .....	67
Tabla 37 - Evaluación económica casos Fortan Extra .....	67
Tabla 38 - Propuesta con Fortan Extra 50 .....	68

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 - Ubicación Geográfica de la Faena.....	5
Ilustración 2 - Vista Isometrica Pit Fortuna y Planta Orica .....	5
Ilustración 3 - Esquema de Evolución de los procesos de Alteración. ....	6
Ilustración 4 - imagen camión fábrica.....	10
Ilustración 5 - Pala P&H 2800 .....	11
Ilustración 6 – Agretamiento Radial.....	17
Ilustración 7 - Agrietamiento radial y rotura por flexión de la onda de choque. ....	18
Ilustración 8 - Reflexión de una onda sobre una cavidad cilíndrica. ....	19
Ilustración 9 - Fractura por descompresión. ....	20
Ilustración 10 - Fractura por Cizallamiento.....	20
Ilustración 11 - Rotura por Flexión .....	21
Ilustración 12 -Representación tridimensional de una ley de propagación de vibraciones .....	27
Ilustración 13 –parámetros ajuste Holmberg & Persson .....	28
Ilustración 14 - Esquema Diseño Perforación y Tronadura .....	30
Ilustración 15 – Fotografía fragmentación Fase 3 .....	33
Ilustración 16 - Muestreo tipo zig-zag (manual Orica Powersieve3).....	33
Ilustración 17 - Calibración de Imagen .....	34
Ilustración 18 - Procesamiento de Imagen .....	34
Ilustración 19 - fragmentos pasantes por tamiz.....	35
Ilustración 20 – Gráfico y parámetros distribución Rosin-Rammler.....	35
Ilustración 21 - Gráfico Agregado Fase 3 y Parámetros distribución R-R. ....	36
Ilustración 22 - Histograma pisos 1875-1890 .....	39
Ilustración 23 - Categorización según el SD.....	40
Ilustración 24 – Pasadura.....	43
Ilustración 25 - Curva granulométrica base, ajuste Swebrec.....	44
Ilustración 26 - distribución granulométrica para distintas mallas.....	45
Ilustración 27 - Tendencia Burden vs P80.....	46
Ilustración 28 - Esquema de Metodología Cross-Hole .....	48
Ilustración 29 - Plano de Tronadura F3_1860-11 con ID de pozos y retardos .....	49
Ilustración 30 - Modelo de Vibraciones de Campo Cercano Obtenido en Terreno.....	52
Ilustración 31 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 3 m (Burden) .....	53

Ilustración 32 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 3m (Espaciamiento) .....	53
Ilustración 33 – Resultado Modelo Vibraciones BDA caso pasadura 2.5m (Burden) .....	54
Ilustración 34 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 2.5m (Espaciamiento) ..	55
Ilustración 35 – Halo vibraciones caso pasadura 2 mts. ....	55
Ilustración 36 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 2m (Espaciamiento) .....	55
Ilustración 37 - Comparación Contorno 4PPVc de los distintos casos. (burden).....	56
Ilustración 38 - Comparación contorno 4PPVc de los distintos casos (Espaciamiento) .	56
Ilustración 39 - Histograma logro de pisos bancos 1890 al 1830 .....	60
Ilustración 40 - Simulación PPV malla 9.6x11 m perfil burden .....	61
Ilustración 41 - Limite PPV critico malla 9.6x11m perfil burden (casos superpuestos)...	61
Ilustración 42 - Limite PPV critico malla 9.6x11m perfil espaciamento (casos superpuestos).....	62
Ilustración 43 - Halo vibracion real a 2400 mm/s perfil espaciamento (casos superpuestos).....	62
Ilustración 44 - Resultados Configuración Optima .....	63
Ilustración 45 - resultados vibraciones malla 9.8x11.3 perfil burden .....	64
Ilustración 46 - resultados vibraciones malla 9.8x11.3 perfil espaciamento .....	65
Ilustración 47 - Curvas de fragmentación para Fortan Extra 50 .....	67



## Capítulo 1: Introducción

Hoy en día, Lomas Bayas pasa por una etapa de optimización de procesos, dado el escenario de bajos precios y leyes cada vez más bajas. Este yacimiento presenta una de las menores leyes a nivel mundial, su ley de corte para mineral de alta ley es de 0.27% de Cobre Total, y para pilas ROM es de 0.07%, por esto es muy importante conocer cómo se están desarrollando los procesos y los resultados de estos mismos.

Uno de los procesos u operaciones unitarias de la minería más importantes son la perforación y tronadura, debido a que es la primera y por lo tanto afecta de manera directa a todas las operaciones que la siguen, como lo es el carguío y transporte del mineral, así como también afecta aguas abajo en el procesamiento del mineral por lixiviación.

Dentro del marco presentado anteriormente, en el área de perforación y tronadura, la Compañía Minera Lomas Bayas busca hacer todas las mejoras posibles, reduciendo costos y/o mejorando los procesos operativos, beneficiando a los equipos de carguío y de molienda, o por lo menos mantener las condiciones a menor costo.

Hoy en día, en la minería se utilizan agentes explosivos a granel en base a materias primas para la extracción de la roca que son mezcladas en terreno para generar el explosivo. Los explosivos más utilizados son el ANFO, el cual está compuesto por nitrato de amonio y petróleo diésel, y el ANFO pesado, que está compuesto por ANFO más una emulsión matriz.

El presente informe tiene como fin explicar de manera detallada el desarrollo de una propuesta Técnica-Económica la cual mejore los resultados de la tronadura actual, resolviendo los problemas que presenta la minera.

### 1.1 Motivación

La principal motivación de este estudio es que la tronadura actual no alcanza el P80 requerido por Lomas Bayas. Este P80 objetivo es entre 3 y 4 pulgadas, el cual se definió en el contrato establecido entre Compañía Minera Lomas Bayas (Lomas Bayas de ahora en adelante) y Orica Chile S.A. A raíz de esto, se genera este estudio con la finalidad de responder ante este problema que surge en la operación de perforación y tronadura.

Por otro lado, existe una motivación secundaria, la cual es que Lomas Bayas presenta una baja disponibilidad en las perforadoras; por lo tanto, esto se traduce en un bajo inventario de material tronado. Esto, sumado a la solicitud de Lomas Bayas de realizar diseños que permitan una mayor productividad (mayor cantidad de toneladas por metro perforado), da origen a la última parte de este trabajo.

### 1.2 Objetivos

Los objetivos de esta memoria son:

#### 1.2.1 Objetivos generales

- Generar una propuesta técnica-económica la cual mejore los resultados de la tronadura actual, logrando el objetivo de fragmentación comprometido.

- Generar una propuesta técnica-económica con un explosivo más energético para mejorar la productividad.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar un monitoreo de fragmentación
- Elaborar un modelo de fragmentación
- Mejorar los resultados de la tronadura en cuanto a la fragmentación.
- Alcanzar el P80 comprometido (3-4[pulg])
- Realizar una propuesta de diseño de malla con Fortan advantage 50.
- Realizar un monitoreo de vibraciones
- Elaborar un modelo de campo cercano
- Realizar una propuesta de diseño de malla con Fortan Extra 50, la cual aumente la productividad de las perforadoras y con ello el inventario de material tronado.

### 1.3 Alcances

Se analiza sólo pit Fortuna, específicamente la fase 3.

La altura de banco es de 15 m.

Se considera como caso base el siguiente diseño:

- una malla de 10x11.5 m
- diámetro de perforación 12 ¼ pulgadas
- pasadura de 3 metros
- taco de 8.5 metros
- Explosivo Fortan Advantage 50

No se analizan los costos de perforación debido a que no fueron proporcionados por Lomas Bayas.

Se asume un costo de perforación de 14 USD/m, incluyendo costos de aceros.

Para una última etapa se considera variar los parámetros de diseño de la tronadura en base a un explosivo de mayor energía (Fortan Extra), pero no se incluye la implementación y control de esta propuesta.

No se analiza la incidencia de la tronadura en el chancador primario.

No se analiza la incidencia de la tronadura en equipos auxiliares en botaderos.

Este trabajo es válido solo para diámetro de 12 ¼ pulgadas.

Se asume que la geología de la fase no es una variable importante, dado que se supone que toda la fase se comporta como granodiorita.

La relación espaciamento burden se mantiene en 1.15, dispuesta en configuración triangular, la que permite una mejor distribución de la energía.

Se evaluará el resultado de la tronadura en relación a la fragmentación y costos asociados.

Al calcular las toneladas tronadas, no se realiza una estimación real, se realiza un cálculo teórico de las toneladas tronadas.

#### 1.4 Metodología

Para llevar a cabo este trabajo es importante identificar previamente los parámetros claves para el mejoramiento de la tronadura y la optimización del diagrama de disparo. Por otro lado, para realizar el diagnóstico de la tronadura actual en la faena Lomas Bayas se requiere un monitoreo de estas a través de mediciones en terreno. La metodología consiste en:

- i. Identificar en forma previa los parámetros que inciden en el desempeño de la tronadura.
- ii. Realizar mediciones en terreno de los resultados obtenidos con los diseños actuales. Establecer línea base.
- iii. Estudiar cuales de los parámetros antes identificados se pueden modificar para obtener un mejor resultado.
- iv. Elaborar un modelo que represente la tronadura actual, con el propósito de realizar simulaciones y generar una propuesta de mejoras.
- v. Implementar modificaciones aceptadas por la empresa y efectuar mediciones en terreno de las prácticas y resultados de los diseños mejorados con la finalidad de realizar comparaciones con la línea base y evaluar el resultado
- vi. Generar una propuesta de diagrama de disparo utilizando el explosivo actual
- vii. Generar una propuesta técnica económica de utilización de explosivo de alta energía.

Este trabajo tiene cinco hitos principales, los cuales se presentan a continuación junto a los controles y acciones asociados:

- a) Identificación de parámetros
- b) Línea Base
  - Consolidar Información disponible
  - Control de fragmentación
  - Control costos de tronadura
  - Control rendimiento equipos de carguío
  - Control de pisos
  - Control VOD
  - Estudio de Campo Cercano

- c) Propuesta de diagrama de disparo con explosivo actual (Fortan Advantage)
  - Diseño teórico según bibliografía en base a fragmentación y costo.
  - Simulación, en el software BDA, de fragmentación esperada y daño generado por vibraciones
  
- d) Implementar mejoras y establecer resultados
  - Control de fragmentación
  - Control costos de tronadura
  - Control rendimiento equipos de carguío
  - Control de pisos
  
- e) Propuesta de diagrama de disparo con explosivo energético (Fortan Extra)
  - Diseño teórico según bibliografía en base a fragmentación y costo
  - Simulación, en el software BDA, de fragmentación esperada y daño generado por vibraciones

## Capítulo 2: Antecedentes

### 2.1 Ubicación

La mina Lomas Bayas es una mina a cielo abierto, perteneciente a la empresa internacional Glencore y ubicada en el desierto de Atacama, segunda región de Antofagasta en la comuna de Sierra Gorda a unos 115 kms al este de la ciudad de Antofagasta, a una altitud de aproximadamente de 1500 msnm. El principal acceso es a través de la localidad de Baquedano, tomando el camino Minsal o conocido como B-385, ubicado hacia el Este, es un camino de bischofita de 35 km. Esta Faena minera cuenta con 2 rajos, pit Lomas 1 y el pit Fortuna. Este trabajo se centra en el pit Fortuna.

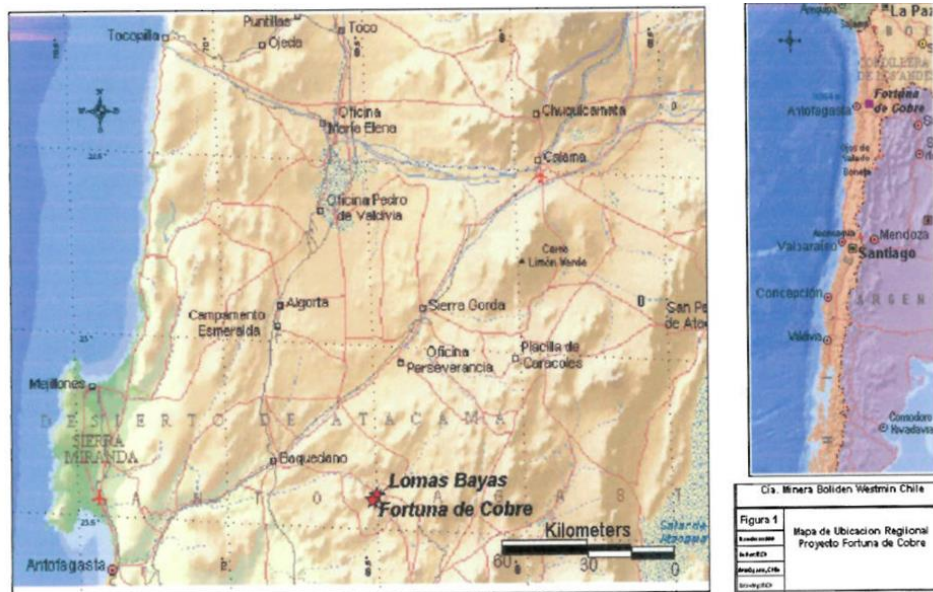


Ilustración 1 - Ubicación Geográfica de la Faena

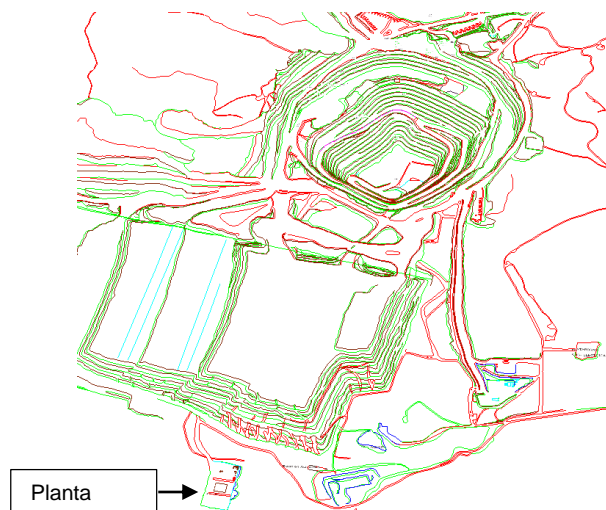


Ilustración 2 - Vista Isométrica Pit Fortuna y Planta Orca

## 2.2 Geología

El pit Fortuna o también conocido como Lomas 2, está inmerso en un importante sistema plutónico, constituido principalmente por un batolito granodiorítico y cuerpos porfídicos menores de composición diorítica a tonalítica. La fuerte influencia tectónica, asociada a un importante sistema hidrotermal, generó la presencia de abundantes cuerpos de brechas cuyo aporte de cuarzo, turmalina y sulfuros de hierro y cobre fue fundamental en el desarrollo del yacimiento. Se definieron 5 litologías principales, brecha blanca, brecha cuarzo turmalina, brecha Fortuna, granodiorita y pórfido.

El yacimiento presenta alteraciones que coinciden con el típico modelo de pórfido cuprífero el cual se muestra esquemáticamente en la ilustración 3. Sin embargo, es posible distinguir ciertas características propias de este yacimiento tales como la alteración potásica remanente y actualmente solo marginal, gran dominio de la alteración clorítica, fuerte sobreimposición de alteración filica (cuarzo – sericítica) e importante presencia de diferentes fases de turmalina. En la tabla 1 se exponen las litologías, sus alteraciones principales y el código con el cual se trabaja para cada combinación.

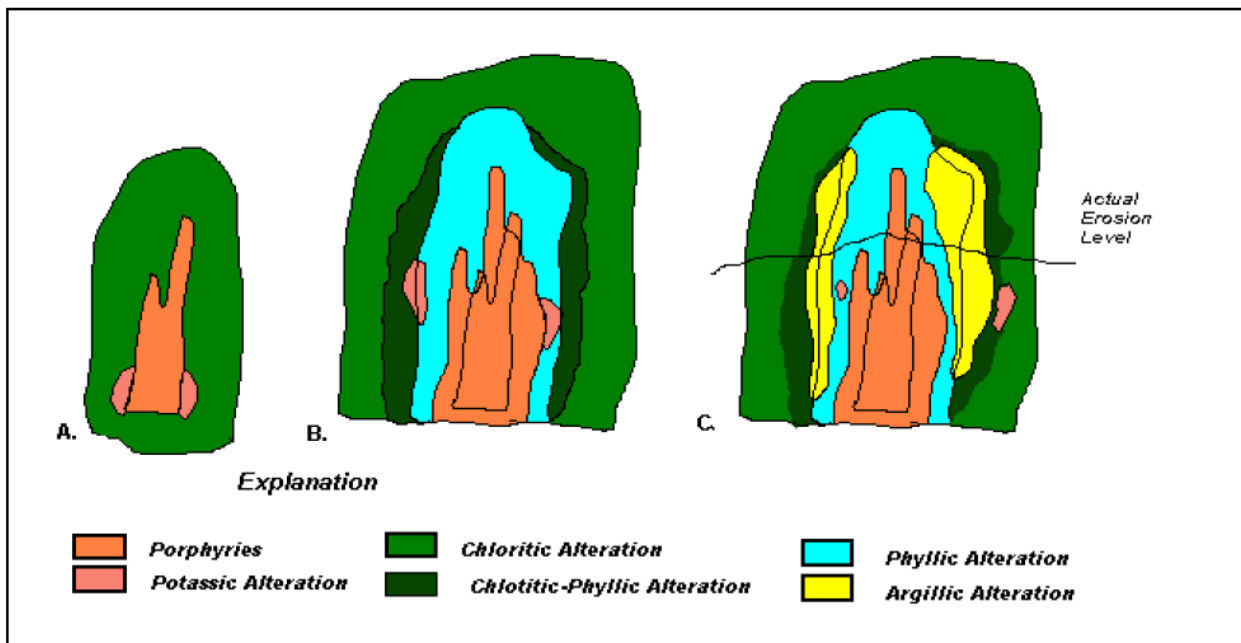


Ilustración 3 - Esquema de Evolución de los procesos de Alteración.

Tabla 1 - Litologías y Alteraciones Principales

<b>Litología</b>	<b>Alteración Principal</b>	<b>Código</b>	<b>GSI</b>
<b>Brecha blanca</b>	Silicificación moderada y fuerte	BxB-Sil	50 a 70
	Clorítica, potásica, biotita	BxB-Clo	30 a 60
	Cuarzo sericita moderada y fuerte, argílica	BxB-QS	20 a 50
<b>Brecha cuarzo turmalina</b>	Cuarzo sericita moderada y fuerte,	Bxqt-QS-Turm	50 a 70
	Cuarzo sericita moderada y fuerte, potásica	Bxqt-QS-Clo	50 a 70
<b>Brecha Fortuna</b>	Clorítica, potásica	BxF-Clo	30 a 60
	Cuarzo sericita moderada y fuerte, argílica	BxF-QS	20 a 40
<b>Granodiorita</b>	Silicificación moderada y fuerte	Gn-Sil	50 a 70
	Clorítica moderada y fuerte, potásica	Gn-Clo	30 a 60
	Cuarzo sericita moderada y fuerte	Gn-QS	20 a 50
	Argílica moderada y fuerte	Gn-Arg	20 a 40
<b>Pórfido</b>	Silicificación moderada y fuerte	Porf-Sil	50 a 70
	Clorítica moderada y fuerte, potásica	Porf-Clo	30 a 60
	Cuarzo sericita moderada y fuerte	Porf-QS	20 a 50
	Argílica moderada y fuerte	Porf-Arg	20 a 40

## 2.3 La Empresa

Compañía Minera Lomas Bayas es una compañía perteneciente a Glencore, la cual explota el yacimiento cuprífero Fortuna de Cobre.

Glencore Plc es una empresa líder en producción y mercadeo de commodities, que tiene operaciones en todo el mundo. Su modelo de negocios alberga diversos productos, actividades y lugares, todo dentro del negocio de los commodity. La empresa trabaja alrededor de 90 tipos distintos de productos, entre ellos están metales y minerales, energía y productos agrícolas, así como también productos asociados a las actividades de marketing y logística.

Glencore en su negocio de metales incluye la producción y mercadeo de minerales de cobre, zinc y plomo, níquel, aleaciones ferrosas, alúmina y aluminio y hierro. También tiene interés en activos industriales controlados y no controlados, dentro de las que enmarcan operaciones de minería, fundición, refinación y bodegaje. Con respecto al cobre Glencore es la empresa más grande del mundo en suministro y la tercera en cuanto a producción.

Dentro de su operación, Compañía Minera Lomas Bayas tiene como proveedor de servicios de tronadura y explosivos a Orica.

Esta empresa es la más grande proveedora de explosivos comerciales y sistemas innovadores de tronadura para la minería, canteras, petróleo, gas y construcción. Además, es una empresa líder en suministrar cianuro de sodio para la extracción de oro y una especialista en proveer servicios en terreno en minería y construcción de túneles. Orica fue fundada en 1874, por lo que tiene más de 140 años de experiencia e inversión en innovación. Es la empresa líder en servicios en minería y construcción, con una fuerza de trabajo muy diversa con más de 11500 empleados y con clientes en más de 100 países.

## 2.4 Operaciones unitarias

### 2.4.1 Perforación

La perforación de rocas con fines de voladuras es la primera operación que se realiza [2] y tiene como objetivo, en palabras simples, “Generar un espacio físico definido dentro de la roca que será removida (tiros de perforación), para luego colocar en ellos el explosivo que más tarde será detonado”. [15]

Para materializar esta actividad es necesario seguir la siguiente secuencia:

- Programación de la ubicación de los pozos a perforar
- Selección de los aceros a utilizar
- Preparación de la zona de trabajo (topografía y limpieza)
- Posicionamiento de equipos (en cada tiro)
- Perforación (de cada tiro)
- Muestreo de detritus
- Verificación de la calidad y cantidad de tiros perforados



- Retiro del equipo del sector [15]

En Lomas Bayas la programación de la ubicación de los pozos (diseño de mallas de perforación) la realiza el jefe de perforación y tronadura. Es importante señalar que al realizar este diseño el ingeniero a cargo de esta tarea no tiene información disponible en que sector se encuentra el mineral de alta ley, mineral ROM o estéril. Por esta razón, se realiza un diseño estándar para Fase 3, sin distinguir entre mineral de alta ley, mineral ROM o estéril. Este diseño (caso base) y, como se dijo en los alcances, este corresponde a una malla de 10 m de burden y 11.5 m de espaciamiento, además considera una pasadura de 3 m y un diámetro de perforación de 12 ¼ pulgadas.

Los equipos utilizados para realizar la perforación son 2 perforadoras CAT MD6540, con un diámetro de perforación de 12 ¼ pulgadas. Estas perforadoras son del tipo rotativas, donde la penetración es efectuada mediante trituración utilizando triconos. El tricono utilizado es un Varel RB 53 para roca media a dura. Por otro lado, el diámetro de barras a utilizar es de 10 ¾ pulgadas. La trituración de la roca se produce básicamente por compresión, corte o por la acción combinada de ambos. Las dos variables que definen la perforación rotativa son la fuerza de empuje sobre la herramienta de perforación que supere la resistencia a la compresión de la roca y el torque de rotación que origina el corte por cizalle. [16]

#### 2.4.2 Tronadura

El objetivo de este proceso es “fracturar y remover el material requerido por el programa de producción a una granulometría adecuada para su posterior manejo (carguío, transporte, chancado o botaderos)”, lo cual se puede resumir en la siguiente secuencia:

- Preparación de la zona de trabajo (incluye el aislamiento del sector),
- Posicionamiento de equipos de carguío de explosivos,
- Introducción del explosivo y los accesorios necesarios,
- Control de calidad del explosivo (en ciertos casos),
- Entacado del pozo,
- Amarre según secuencia especificada,
- Revisiones de seguridad en el sector (y otros sectores involucrados),
- Primer aviso,
- Aviso posterior y último.
- Polvorazo (tronadura),
- Ventilación o limpieza del sector (hasta que la zona quede limpia),
- Revisión de seguridad (tiros quedados, bloques colgados),
- Quema de tiros quedados, descolgado de bloques, reducción secundaria. [15]

En Lomas Bayas todo el proceso de tronadura está asignado a la empresa contratista Orica. El contrato respectivo incluye la administración de los polvorines, carguío y transporte de explosivos y la iniciación del disparo. Para esta operación Orica cuenta en terreno con 3 camiones fábrica Mack modelo Granite y 2 minicargadores frontales CAT,

además de todos los implementos necesarios para la administración y manejo de los polvorines y la planta de explosivos.

La operación de tronadura se inicia cuando el área de perforación entrega el sector. La primera tarea que realiza Orica es delimitar el polígono a cargar con explosivos, luego el personal de piso comienza a medir los pozos con el fin de acotar (si el pozo mide más, se rellena con detritus) o se deben registrar si es que son más cortos. Posteriormente se inicia el primado de los pozos, el cual consiste en introducir dentro del pozo un amplificador que consiste en un Pentex de 450 grs junto a un detonador ikon Rx (detonador electrónico) y un detonador Exel de 500 ms (detonador nonel). Ya con el pozo primado se procede a la carga del pozo con explosivo Fortan Advantage 50, mediante un camión fábrica. Este camión se posiciona cerca del pozo y comienza a fabricar explosivo que vierte dentro del pozo, con la ayuda de un operador que con una huincha mide el taco que se debe dejar (8.5 metros). Para la fabricación del explosivo el camión debe abastecerse de emulsión de la serie Fortan, nitrato de amonio y diésel.



*Ilustración 4 - imagen camión fábrica*

Luego de cargar el explosivo el personal de Orica comienza el taqueado del pozo que generalmente se lleva a cabo con el mismo detritus de la perforación; pero en ocasiones y si el supervisor de Orica así lo estima se solicita material especial para esta labor. Una vez que los pozos están cargados y tapados se inicia el amarre de los pozos utilizando un equipo llamado logger, esta tarea consiste en conectar cada detonador instalado en cada pozo a la línea de conexión para que el equipo logger asigne la secuencia de retardo al detonador. Después, el logger es conectado al equipo SURBB (Surface Remote Blaster Box) a una distancia segura y se evacúa el área establecida por el radio de seguridad de 500 metros definido por el jefe de perforación y tronadura. Finalmente, se acude al punto de quema y se procede a la detonación mediante el equipo remoto Blaster 2400R, y se realiza un chequeo de que el Blaster haya energizado a todos los detonadores junto con

un control visual del área donde se llevó a cabo el proceso para descartar posibles tiros quedados para así determinar que el área es segura y se puede hacer entrega del sector.

#### 2.4.3 Carguío y transporte

El objetivo del proceso es “Retirar el material tronado de la frente y transportarlo adecuadamente a su lugar de destino”, lo cual se puede resumir en la siguiente secuencia:

- Preparación de la zona de trabajo,
- Posicionamiento de equipos,
- Retiro del material tronado desde la frente de trabajo (carguío),
- Traspaso del material al equipo de transporte dispuesto para el traslado,
- Transporte del material a su lugar de destino (planta, acopio, botaderos, etc.),
- Descarga del material,
- Retorno del equipo de transporte al punto de carguío (si es que se requiere su retorno).

Lomas Bayas cuenta con la siguiente flota de carguío:

- 2 palas P&H 2800 de 44 m<sup>3</sup>
- 2 palas P&H 4100 de 56 m<sup>3</sup>
- 5 Cargadores frontales CAT 994 de 23 m<sup>3</sup>



*Ilustración 5 - Pala P&H 2800*

y para el transporte cuenta con los siguientes camiones:

- 21 camiones Komatsu 730E de 173 toneladas
- 10 camiones CAT 789C de 173 toneladas
- 6 camiones CAT 793F de 215 toneladas
- 4 camiones Komatsu 730E de 150 toneladas

## Capítulo 3: Marco teórico

### 3.1 Características de los explosivos

La realización de este estudio requiere conocer y definir las características de los explosivos utilizados con el fin de darles una correcta utilización y realizar comparaciones entre ellos. Con este objetivo se definen dos tipos de características: las características físico-químicas y las características prácticas. Las primeras están asociadas al proceso de detonación de un explosivo confinado o inserto en un medio. Las segundas se refieren en general a ciertos aspectos que describen el comportamiento de los explosivos en relación a sus condiciones reales de aplicación.

Cuando un explosivo detona inserto en un medio sólido se pueden observar básicamente dos efectos: primero, un efecto de fracturamiento preliminar asociado al violento impacto de la onda de choque que caracteriza al fenómeno de la detonación, y segundo un efecto de empuje asociado al proceso de expansión de los gases generados por la reacción química [1]. Los mecanismos de fractura de la roca se explicarán en mayor profundidad en el punto 3.2.

Considerando los dos efectos anteriores se definen dos tipos de características físico-químicas: características rompedoras asociadas al primer efecto, el cual depende de los parámetros del estado de detonación del explosivo; y características energéticas asociadas al segundo efecto, el cual depende de los parámetros termoquímicos del estado de explosión, principalmente de la energía en forma de calor contenida en los gases y de las leyes que gobiernan su expansión. Cabe mencionar que estos efectos dependen a su vez de las propiedades físico-mecánicas de la roca [1].

Además, es importante definir los distintos estados del explosivo durante el proceso de detonación. La teoría o modelo de Chapman-Jouguet distingue tres estados: explosivo sin reaccionar (1), estado de detonación (2) y estado de explosión (3).

#### 3.1.1 Características rompedoras

##### a) Presión de detonación

La presión de detonación es la característica más importante en relación a lo que se acostumbra llamar poder rompedor de un explosivo. Desde un punto de vista práctico de un usuario de explosivos una buena aproximación para la estimación de  $P_2$  (presión de detonación), suficiente para fines comparativos, es:

$$P_2 \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{\gamma \cdot D^2}{G \cdot 10^4} \left[ \frac{kg}{cm^2} \right] \quad (1)$$

Donde:

$\gamma$  = peso específico del explosivo [gr/cm<sup>3</sup>]

D= velocidad de detonación [m/s]

G= aceleración de gravedad [cm/s<sup>2</sup>]

La presión de detonación corresponde a la de la onda de choque que se propaga conjuntamente con la reacción química medida justo en el frente de reacción.

#### b) Velocidad de detonación

Se define como la velocidad de propagación estable o constante que alcanza la reacción química en una columna explosiva durante el proceso de detonación, además define el ritmo de liberación de la energía.

La VOD en la práctica depende de la composición del explosivo, del diámetro del tiro, de la densidad del explosivo, grado de confinamiento de la carga, y la energía de iniciación.

Como reglas prácticas generales se tiene que:

- Si el diámetro y el confinamiento aumentan, la VOD también aumenta.
- Si la densidad aumenta, la VOD también crece aunque se llega a un punto (densidad crítica) en que el explosivo comienza a insensibilizarse y la VOD a disminuir.
- Si se quiere fracturar roca muy competente se debe utilizar un explosivo de alta VOD de modo que su alta energía de choque genere gran fracturamiento. Por el contrario, para roca poco competente, es conveniente utilizar explosivos que privilegien más bien sus características energéticas.

Para evaluar el desempeño del explosivo en la práctica, lo más conveniente es medir la VOD y utilizar la fórmula 1 para estimar la presión de detonación. Para medir la velocidad de detonación existen diferentes métodos, entre ellos están el método de Kodowimeter, que consiste en colocar un cable sonda que atraviesa axialmente la columna explosiva, con una resistencia por unidad de longitud conocida. Este cable va conectado a un instrumento que mediante un osciloscopio, es capaz de medir la variación de tensión, manteniendo una intensidad de corriente en el circuito constante. A la vez que avanza la detonación, disminuye el largo del cable sonda y con ello la resistencia eléctrica. Esta disminución permite determinar la velocidad de detonación a partir de la tensión registrada en el tiempo. En palabras simples se puede determinar cuántos metros de cable se consumen en un determinado periodo, lo que se ve reflejado en el aumento del voltaje o tensión en ese mismo periodo. [17]

#### c) Densidad

En la fórmula 1, la presión de detonación es directamente proporcional a la densidad. Es por esto que la densidad será influyente en la capacidad rompedora del explosivo.

La densidad de los explosivos es un dato proporcionado por los fabricantes, que incluyen esta información en sus manuales y catálogos. Es preciso distinguir, no obstante, entre la densidad de la materia explosiva propiamente tal y la densidad de carguío, vale decir la densidad real que adquiere el explosivo al ser cargado en el interior de los tiros.



### 3.1.2 Características energéticas

Como se dijo anteriormente, estas características determinan la capacidad del explosivo para fragmentar o remover un volumen de roca por efecto de la acción expansiva de los gases generada por la reacción química.

#### a) Trabajo Máximo disponible

Se define como el trabajo termodinámico teórico que realizan los gases al expandirse adiabáticamente desde su condición inicial correspondiente al estado de explosión, hasta un estado final correspondiente a las condiciones ambientales de presión (presión atmosférica). Se le designa  $A_o$  y se expresa generalmente en kilocalorías por kilo de explosivo.

$$A_o = - \int_{v_i}^{v_f} P dv \frac{[Kcal]}{[Kg]} \quad (2)$$

Este trabajo se realiza a expensas del calor contenido en los gases en estado de explosión. Desde el punto de vista práctico y con fines de comparación, para un usuario de explosivos, es razonablemente suficiente la aproximación:

$$A_o \approx Q_3 \frac{[MJ]}{[Kg]} \quad (3)$$

donde  $Q_3$  es el calor contenido de los gases en el estado de explosión (3).

#### b) Volumen de gases

Se define en términos del *volumen específico*, como el volumen que ocupan los gases producidos por la detonación de 1 [kg] de explosivo referido a las condiciones normales de presión y temperatura (1 [Atm] y 0 [°C]). Se expresa en [lt/kg].

#### c) Presión de los gases

Se refiere a la presión que alcanzan los gases en el estado de explosión, vale decir la presión en la cámara de explosión antes de iniciarse el desplazamiento o deformación de la roca circundante. Esta presión representa la capacidad del explosivo para inducir en la roca circundante esfuerzos de compresión, tracción y cizalle, que actúan sobre los planos de debilidad del macizo rocoso, provocando el fracturamiento y remoción del material afectado.

### 3.1.3 Características prácticas

Se refieren a ciertos aspectos que describen el comportamiento de los explosivos en relación a sus condiciones reales de manejo operacional, sus aplicaciones técnicas y las restricciones de seguridad.

#### a) Fuerza o potencia

En la práctica se define como una medida relativa del trabajo máximo disponible con respecto a un explosivo de referencia, y se expresa en porcentaje.

Langefors define la siguiente fórmula empírica para determinar la Potencia Relativa en peso:

$$S = \frac{5}{6} \cdot \frac{Q}{Q_0} + \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{V_0} \quad [\%](4)$$

donde,

Q =Calor de explosión a volumen constante por Kg de explosivo.

Q0 =Calor de explosión a volumen constante por Kg del explosivo de referencia.

VG =Volumen de gases por Kg de explosivo.

VG0 =Volumen de gases por Kg del explosivo de referencia.

El explosivo de referencia utilizado en Chile es el ANFO, cuyo calor de explosión es del orden de 900 [Kcal/kg] con un volumen de gases de 970 [lt/kg].

#### b) Gases tóxicos

La detonación de todos los explosivos industriales produce una gran cantidad de gases como también pequeñas cantidades de residuos sólidos. Entre los gases que se forman siempre existe una proporción variable de gases tóxicos, tales como el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

Entre los principales factores que contribuyen a generar gases tóxicos se pueden mencionar las siguientes: energía de iniciación insuficiente, mezclas explosivas defectuosas, explosivo alterado en su composición original por manejo descuidado y presencia de agentes extraños al explosivo mismo tales como aceite, agua, papel o plásticos.

#### c) Resistencia al agua

Es una medida de la mayor o menor capacidad del explosivo para conservar sus propiedades en presencia de agua. En los explosivos granulados y en dinamitas, esta capacidad depende de su composición, específicamente de la proporción de nitrato de amonio presente en la mezcla. También influye el envoltorio en caso de explosivos encartuchados.

Se acostumbra expresarla en términos del número de horas que el material explosivo puede estar sumergido en agua sin que resulten afectadas sus propiedades detonantes. [1]

#### d) Diámetro crítico

Es el diámetro mínimo que debe tener la columna explosiva para que la reacción de detonación se propague en forma estable, es decir para que un explosivo detone en forma correcta su diámetro debe ser mayor que su diámetro crítico, condición que limita la elección del explosivo.

Este parámetro depende del grado de confinamiento, la presencia de agua, la presión que ejerce la columna de explosivo, el desacoplamiento de la carga y en algunos casos de la temperatura ambiente.

Dentro de las consideraciones prácticas para este ítem se pueden mencionar que, para el caso de explosivos a granel, se utiliza el término Diámetro Mínimo Recomendado, que es aquel en el cual el explosivo detona en forma consistente con las propiedades descritas teóricamente.

### 3.1.4 Ficha técnica de los explosivos

En la tabla siguiente se presentan las características principales de los explosivos utilizados para la realización de este trabajo, Fortan Advantage 50 y Fortan extra 50.

Tabla 2 - Ficha técnica de los explosivos utilizados

	Fortan Advantage 50	Fortan Extra 50	Unidad
<b>Densidad</b>	1.24	1.24	gr/cc
<b>RWS</b>	1.19	1.28	-
<b>RBS</b>	1.79	1.91	-
<b>Energía ef.</b>	2.737	2.944	MJ/Kg
<b>Vol. Gases</b>	995	984	lt/kg
<b>Ø Crítico</b>	150	150	mm
<b>VOD típica</b>	3.2 – 6.4	3.3 – 6.7	Km/s
<b>Largo máximo de carga</b>	25	75	m
<b>Profundidad máxima del pozo</b>	30	80	m
<b>Tipo de pozo</b>	Seco/desaguado	Seco/desaguado	-
<b>Amplificador recomendado</b>	Pentex de 450 gr	Pentex de 450 gr	-
<b>Emisión de CO<sub>2</sub></b>	149	160	Kg/ton
<b>Sleep Time</b>	7	42	días

## 3.2 Mecanismos de fractura de la roca

En la fragmentación de materiales rocosos con explosivos intervienen al menos ocho mecanismos de rotura, con mayor o menor responsabilidad, influyendo todos en los resultados de las tronaduras.

Físicamente el proceso de fragmentación corresponde a un impacto dinámico, relacionado con la reacción termoquímica de descomposición del explosivo, y cuya acción en el entorno es la transmisión de una onda de compresión al macizo rocoso y la presión o empuje posterior de los gases.

### 3.2.1 Trituración de Roca

En los primeros instantes de la detonación, la presión en el frente de la onda de choque que se expande de forma cónica alcanza valores que superan ampliamente la resistencia dinámica a la compresión de la roca, provocando la destrucción de su estructura



intercristalina e intergranular. El tamaño del anillo de roca triturada aumenta con la presión de detonación del explosivo y con el acoplamiento de la carga a las paredes del pozo.

Según Hagan (1977) este mecanismo de rotura consume casi el 30 % de la energía asociada a la onda de choque, colaborando en la fragmentación de la roca con un volumen muy pequeño, del orden del 0.1 % del volumen total que corresponde al arranque normal de un pozo.

### 3.2.2 Agrietamiento radial

Durante la propagación de la onda de compresión provocada por la detonación, la roca circundante al pozo es sometida a una intensa compresión radial, que induce componentes de tracción en los planos tangenciales del frente de dicha onda. Cuando las tensiones superan la resistencia dinámica a tracción de la roca, se inicia la formación de una densa zona de grietas radiales alrededor de la zona triturada que rodea al pozo. Ilustración 6

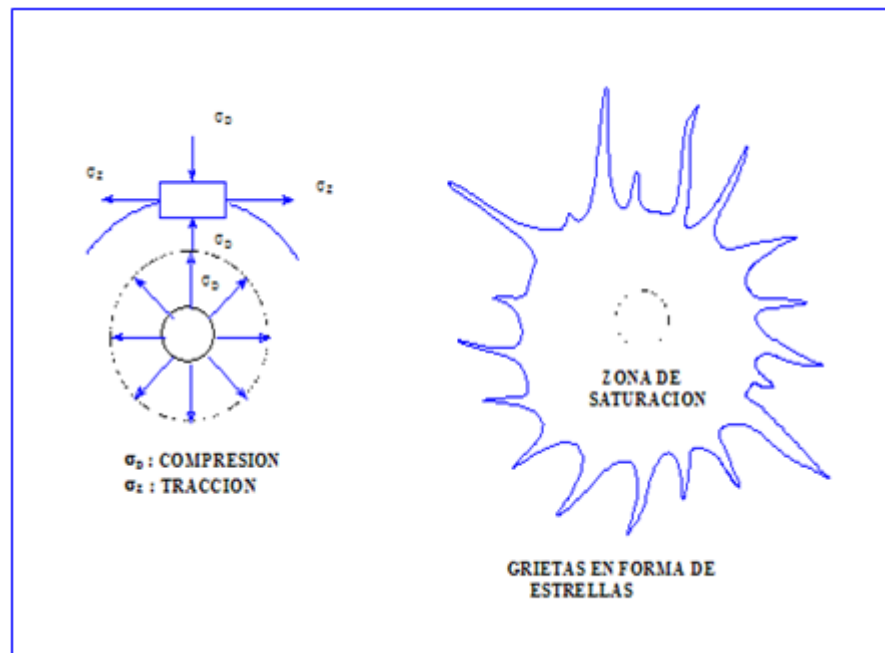


Ilustración 6 – Agrietamiento Radial

El número y longitud de esas grietas radiales aumenta con:

- La intensidad de la onda de compresión en el límite exterior del anillo de roca triturada.
- La disminución de la resistencia dinámica a la tracción de la roca y el factor de atenuación de la Energía de Tensión.

Detrás de esa zona interior de intenso agrietamiento, algunas fracturas progresan de forma importante distribuidas aleatoriamente alrededor del pozo. La velocidad de

propagación de las grietas es de 0.15 a 0.40 veces la de la onda de compresión, aunque las primeras microfisuras se desarrollan en un tiempo muy pequeño del orden de 2 ms.

Cuando la roca presenta fracturas naturales la extensión de las grietas guarda una estrecha relación con éstas. Si las columnas de explosivo son interceptadas longitudinalmente por fracturas pre-existentes, éstas se abrirán por efecto de la onda de choque y se limitará el desarrollo de las grietas radiales en otras direcciones. Las fracturas paralelas a los pozos, pero a alguna distancia de estos, interrumpirán la propagación de las grietas radiales. Ilustración 7.

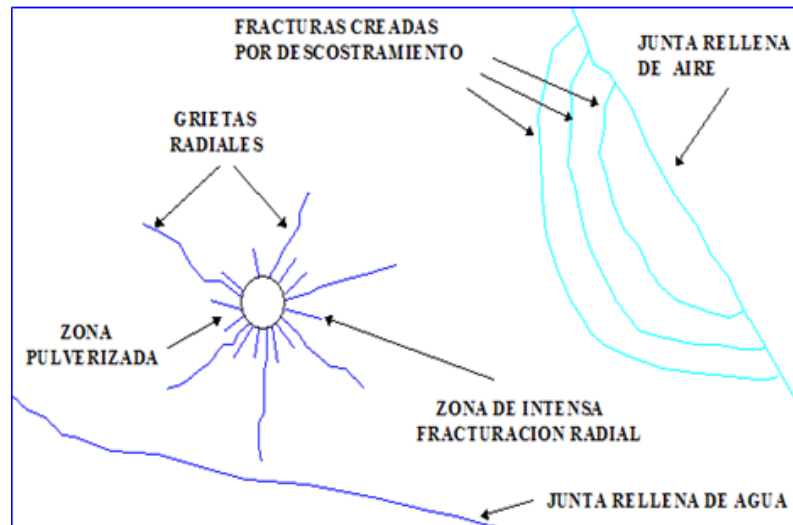
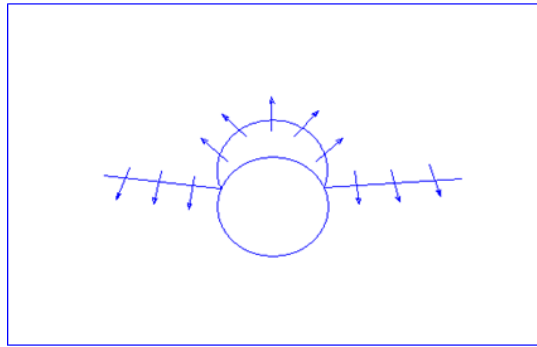


Ilustración 7 - Agrietamiento radial y rotura por flexión de la onda de choque.

### 3.2.3 Reflexión de la Onda de Choque

Cuando la onda de compresión alcanza una superficie libre se generan dos ondas, una de tracción y la otra de cizallamiento. Esto sucederá cuando las grietas radiales no se hayan propagado más que una distancia equivalente a un tercio de la que existe desde la carga a esa superficie libre. Aunque la magnitud relativa de las energías asociadas a las dos ondas depende del ángulo de incidencia de la onda primaria, la fracturación es causada generalmente por la onda de tracción reflejada. Si las tensiones de tracción superan la resistencia dinámica de la roca se producirá hacia el interior el fenómeno conocido por descostramiento o "Spalling". En las rocas las resistencias a la tracción alcanzan valores entre un 5 y un 15 % de la resistencia a la compresión.

El frente de la onda reflejada es más convexo que el de la onda incidente, por lo que el índice de dispersión de la energía de la onda de tracción es mucho mayor cuando la superficie es cilíndrica como la del pozo central de la rainura, que cuando se dispone de un plano como sucede en una tronadura. Ilustración 8.



*Ilustración 8 - Reflexión de una onda sobre una cavidad cilíndrica.*

Este mecanismo contribuye relativamente poco al proceso global de fragmentación, estimándose que la carga de explosivo necesaria para producir la rotura de la roca por la acción exclusiva de la reflexión de la onda sería ocho veces mayor que la carga normal. Sin embargo, en las discontinuidades internas del macizo rocoso que está próximo a la carga (distancias menores de  $15D$ ) y que no se encuentran rellenas con material de meteorización, el efecto de esta reflexión de las ondas es mucho más significativo por la diferencia de impedancias.

#### 3.2.4 Extensión y apertura de las grietas radiales

Después del paso de la onda la presión de los gases provoca un campo de tensiones cuasi-estático alrededor del pozo. Durante o después de la formación de las grietas radiales por la componente tangencial de tracción de la onda, los gases comienzan a expandirse y penetrar en las fracturas. Las grietas radiales se prolongan bajo la influencia de la concentración de las tensiones en los extremos de las mismas. El número y longitud de las grietas abiertas y desarrolladas depende fuertemente de la presión de los gases, por lo que un escape prematuro de éstos por un taco insuficiente o por la presencia de alguna zona débil del frente libre, puede conducir a un menor aprovechamiento de la energía del explosivo.

#### 3.2.5 Fractura por descompresión

Antes de que la onda de choque alcance el frente libre efectivo, la energía total transferida a la roca por la compresión inicial varía entre el 60 y el 70% de la energía de la tronadura (Cook et al 1966). Después del paso de la onda de compresión se produce un estado de equilibrio cuasi-estático, seguido de una caída súbita de presión en el pozo debido al escape de los gases a través del taco, de las fracturas radiales y el desplazamiento de la roca. La energía de tensión almacenada se libera violentamente generando sollicitaciones de tracción y cizallamiento que provocan la rotura del macizo. Esto afecta a un gran volumen de roca, no sólo por delante de los pozos, sino incluso por detrás de la línea de corte de la tronadura, habiéndose llegado a identificar daños a distancias de varias decenas de metros. La Ilustración 9 muestra lo explicado anteriormente.

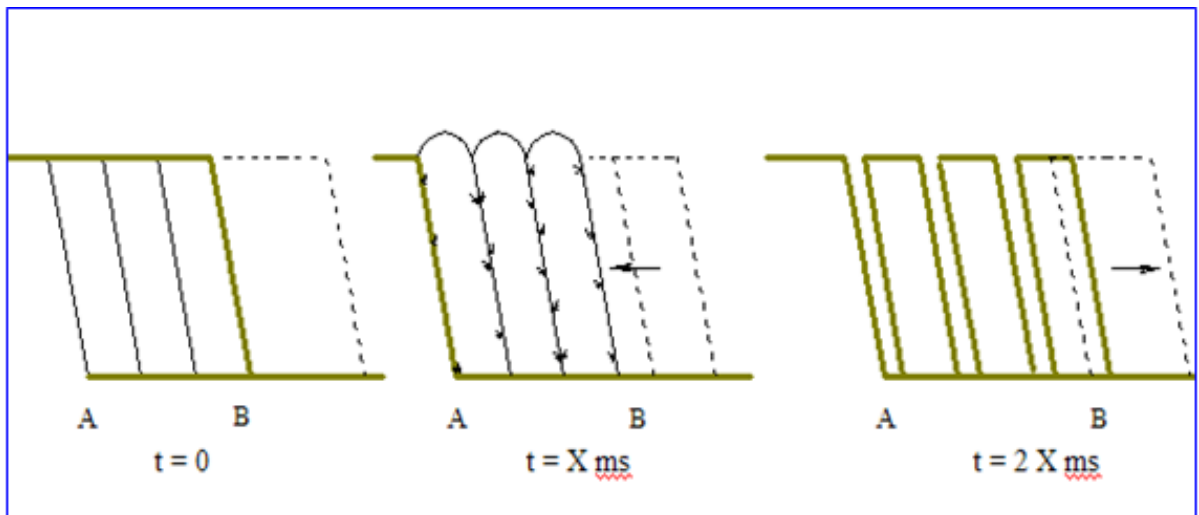


Ilustración 9 - Fractura por descompresión.

### 3.2.6 Fractura por cizallamiento.

En formaciones rocosas sedimentarias, cuando los estratos presentan distintos módulos de elasticidad, se produce la rotura en los planos de separación al paso de la onda de choque por las tensiones diferenciales o cortantes en dichos puntos. Ilustración 10.

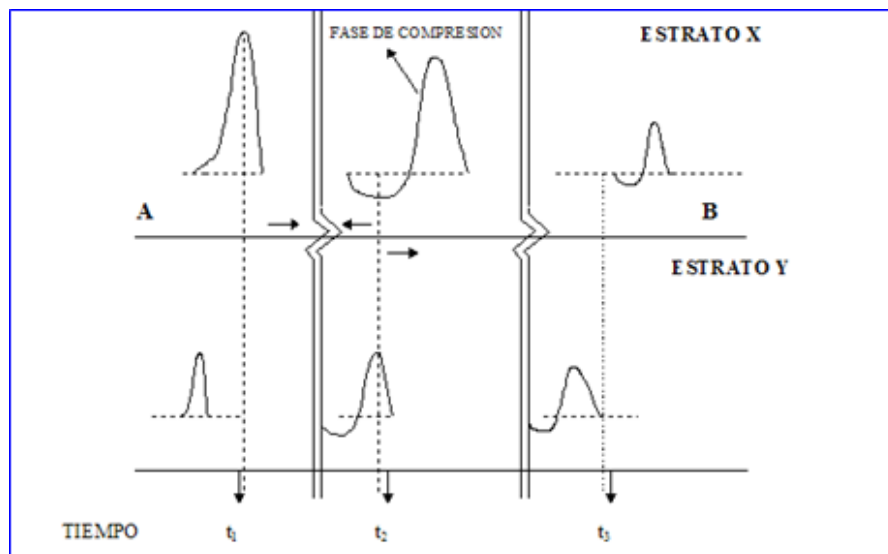


Ilustración 10 - Fractura por Cizallamiento.

### 3.2.7 Rotura por flexión

Durante y después de los mecanismos de agrietamiento radial y descostramiento, la presión ejercida por los gases de explosión sobre el material situado frente a la columna de explosivo hace que la roca actúe como una viga doblemente empotrada en el fondo del pozo y en la zona de taco, produciéndose la deformación y el agrietamiento de la misma por los fenómenos de flexión. Ilustración 11.

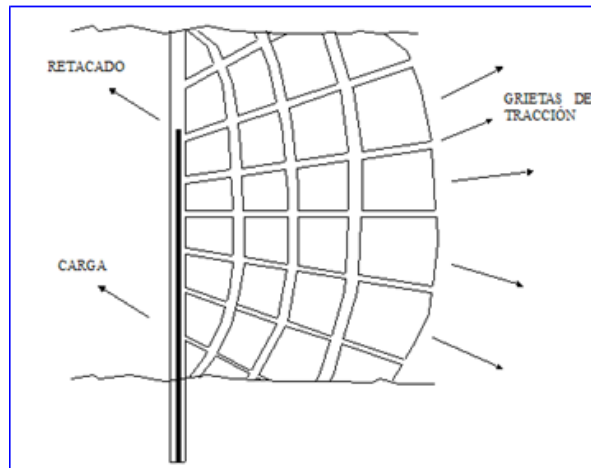


Ilustración 11 - Rotura por Flexión

### 3.2.8 Rotura por colisión

Los fragmentos de la roca creados por los mecanismos anteriores y acelerados por los gases son proyectados hacia la superficie libre, colisionando entre sí y dando lugar a una fragmentación adicional, que se ha puesto de manifiesto en estudios con fotografías ultrarrápidas. (Hino, 1959; Petkof, 1961).

### 3.3 Modelos de fragmentación

Existen varios modelos para la predicción de la distribución de fragmentación producto de la tronadura, el más usado es el modelo Kuz-Ram propuesto por Cunningham. Este se basa en la relación empírica desarrollada por Kuznetsov entre el tamaño medio de los fragmentos y la energía aplicada en la tronadura por unidad de volumen de roca, en función del tipo de roca y la curva de distribución granulométrica propuesta por Rosin-Rammler.

#### 3.3.1 Modelo Kuz-Ram

De la ecuación propuesta por Kuznetsov se desprende la siguiente expresión:

$$X_{50}[cm] = A \cdot \frac{(B^2 \cdot SBR \cdot H)^{0.8}}{Q^{0.633}} \cdot \left(\frac{115}{E}\right)^{0.633} \quad (5)$$

Donde:

$X_{50}$ : tamaño medio de los fragmentos [cm]

A: Factor de roca

B: Burden [m]

SBR: Razón espaciamento/burden

H: altura de banco [m]

Q: Cantidad de explosivo por pozo [kg]

E: potencia relativa en peso del explosivo

La relación anterior entrega el tamaño de tamiz por el cual pasa el cincuenta por ciento de los fragmentos. Para determinar el factor de roca, el cual fue introducido por Lilly y ha sido adaptado para el modelo de Kuznetsov, se debe utilizar la tabla 3 y la ecuación 6.

Tabla 3 - Factor de Roca

RMD	Rock mass description	
Powdery/friable	10	
Vertically jointed	JF*	
Massive	50	
JPS	Vertical joint spacing	
<0.1 m	10	
0.1 m to MS	20	
MS* to DP*	50	
JPA	Joint plane angle	
Dip out of face	20	
Strike perpendicular to face	30	
Dip into face	40	
RDI	Rock density influence	
$RDI = 25 RD^* - 50$	<b>RD</b> ; rock density (t/m <sup>3</sup> )	
HF	Hardness factor (GPa)	
Y/3	If Y < 50	
UCS*/5	If Y > 50	
*	Meaning	Unit
MS	Oversize	m
DP	Drilling pattern size	m
Y	Young's modulus	GPa
UCS	Uniaxial compressive strength	MPa
<b>JF = JPS+JPA</b>		

$$A = 0.06 \cdot (RMD + JF + RDI + HF) \quad (6)$$

Luego de obtener el tamaño bajo el cual está el cincuenta por ciento de los fragmentos se utiliza la formula de Rosin-Rammler para predecir la distribución de tamaño de los fragmentos.

$$R_m = 1 - e^{-\left(\frac{X}{X_c}\right)^n} \quad (7)$$

Donde:

R<sub>m</sub>: Porcentaje de fragmentos bajo el tamiz X

X: tamaño del tamiz [cm]

X<sub>c</sub>: tamaño característico (tamaño de tamiz al cual pasa el 63.2%) [cm]

n: índice de uniformidad

Despejando  $X_c$  de la ecuación 7 y utilizando la relación de Kutnetzov (para  $X_m$ ,  $R_m=0.5$ ) se llega a que:

$$X_c = \frac{X_m}{\sqrt[n]{0.693}} \quad (8)$$

Para determinar el índice de uniformidad Cunningham se basa en la ecuación de Kuznetzov, usando la relación entre fragmentación y el patrón de perforación para calcular este parámetro. Se estima el índice de uniformidad con la siguiente ecuación:

$$n = \left(2.2 - 14 \cdot \frac{B}{D}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2B}\right)^{0.5} \cdot \left(1 - \frac{W}{B}\right) \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \quad (9)$$

Donde:

B: Burden [m]

S: Espaciamiento [m]

D: diámetro de perforación [mm]

W: desviación estandar de la desviación en la perforación de pozos [m]

L: largo total de la columna explosiva [m]

H: altura de banco [m]

Cuando hay dos cargas diferentes en la columna explosiva, la ecuación anterior se modifica a:

$$n = \left(2.2 - 14 \cdot \frac{B}{D}\right) \cdot \left(1 - \frac{W}{B}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2B}\right)^{0.5} \cdot \left(0.1 + \text{abs}\left(\frac{BCL - CCL}{L}\right)\right)^{0.1} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \quad (10)$$

Donde la nomenclatura es la misma de la ecuación 9 y:

BCL: Largo de la carga de fondo [m]

CCL: Largo de la carga del segundo explosivo [m]

### 3.3.2 Modelo KCO

Este modelo, al igual que el modelo Kuz-Ram, se basa en la ecuación de Kuznetzov, pero reemplaza la función de Rossin-Rammler para predecir la distribución de la fragmentación por la función de Swebrec. Esta función de 3 parámetros fue propuesta por Ouchterlony (2005b), para corregir el problema que tiene la función de Rossin-Rammler la cual subestima la proporción de finos. La función es la siguiente:

$$R_m = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\ln\left(\frac{X_{bmax}}{X}\right)}{\ln\left(\frac{X_{bmax}}{X_{b50}}\right)} \right]^b} \quad (11)$$

Donde:

$X_{b50}$ : Tamaño del tamiz que permite pasar al 50% del peso de los fragmentos [cm]

$X_{bmax}$ : Tamaño máximo de los fragmentos [cm]

$X$ : Tamaño del tamiz [cm]

$R_m$ : Porcentaje en peso de fragmentos bajo el tamiz  $X$

$b$ : Parámetro de ondulación de la curva

Esta ecuación se basa en el parámetro central  $X_{b50}$ , pero además introduce el tamaño máximo de fragmento  $X_{bmax}$ . Este parámetro se obtiene según la siguiente función:

$$\min(\sqrt{B \cdot S}, \text{tamaño máximo de bloques in situ}) \quad (12)$$

Además introduce un tercer parámetro, el parámetro de ondulación de la curva, para obtener el parámetro  $b$ , Ouchterlony propone lo siguiente:

$$b = \left[ 2 \cdot \ln(2) \cdot \ln\left(\frac{X_{bmax}}{X_{b50}}\right) \right] \cdot n \quad (13)$$

donde:

$X_{b50}$ : Tamaño del tamiz que permite pasar al 50% del peso de los fragmentos [cm]

$X_{bmax}$ : Tamaño máximo de los fragmentos [cm]

$n$ : índice de uniformidad de Rossin-Rammler

Por otro lado, Spathis modifica la ecuación de Kuznetzov a:

$$X_{b50}[m] = g(n) \cdot 0.01 \cdot A \cdot \frac{(B^2 \cdot SBR \cdot H)^{0.8}}{Q^{0.633}} \cdot \left(\frac{115}{E}\right)^{0.633} \quad (14)$$

donde



$$g(n) \begin{cases} 1 & \text{si } n = 1 \\ \frac{(\ln 2)^{\frac{1}{n}}}{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right)} & \text{si no} \end{cases} \quad (15)$$

Esta corrección se debe a que había una sobre estimación del tamaño al cual pasa el 50 por ciento del peso de los fragmentos, lo que indica que hay una subestimación de las fracciones pasantes de finos cuando el índice de uniformidad está entre 0.8 y 2.2. [11][14]

### 3.4 Criterio de daño por vibraciones

La velocidad vibracional de las partículas está relacionada con su disposición para inducir nuevo fracturamiento en la roca. Existe una relación entre la velocidad de partícula y la deformación dinámica, válida para una condición de roca confinada en la vecindad inmediata a las cargas explosivas, donde el impacto de la tronadura es más intenso y los niveles de esfuerzos inducidos son similares a los esfuerzos necesarios para la fragmentación de la roca. Dada esta relación, el análisis de velocidad de partícula tiene la cualidad de ser un adecuado método para estimar el grado de fracturamiento inducido por la tronadura. De acuerdo a lo indicado se tiene:

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} \quad (16)$$

Esta ecuación representa la relación entre la Velocidad de Partícula PPV y la deformación inducida  $\varepsilon$ , para una roca con una Velocidad de la Onda de Compresión  $V_p$ . Esta ecuación supone una elasticidad lineal del material a través del cual la vibración se está propagando y permite una estimación razonable para la relación entre la roca fracturada y la vibración inducida. De la Ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico, la Velocidad de Partícula crítica (PPVc) que puede ser soportada por la roca antes de que ocurra la falla por tracción, puede ser estimada en función de la resistencia a la Tracción ( $\sigma_t$ ), el Modulo de Young Dinámico (E) y la Velocidad de propagación de la Onda "p" ( $V_p$ ), usando la siguiente ecuación:

$$PPVc = \frac{\sigma_t \cdot V_p}{E} \quad (17)$$

Donde,

PPVc = Velocidad de partícula crítica [mm/s].

$\sigma_t$  = Resistencia a la tracción [Mpa].

$V_p$  = Velocidad de propagación de la onda [m/s].

E = Módulo de Young dinámico [Gpa].

Esta expresión es válida sólo suponiendo que la Ley de Hooke se cumple en el macizo rocoso en cuestión y que las ondas son de tipo armónicas planas.

El criterio de daño esperado supone lo siguiente:

Tabla 4 - Criterio de Daño de McKenzie

DAÑO	RANGO
<b>INTENSO FRACTURAMIENTO</b>	> 4 PPV <sub>c</sub>
<b>CREACIÓN DE NUEVAS FRACTURAS</b>	> PPV <sub>c</sub>
<b>EXTENSIÓN DE FRACTURAS EXISTENTES</b>	> 1/4 PPV <sub>c</sub>
<b>NO SUFRE DAÑO</b>	< 1/4 PPV <sub>c</sub>

Si bien se ha considerado a la velocidad peak de partícula como uno de los mejores indicadores del potencial daño a la roca, se han determinado nuevas variables relevantes tales como la frecuencia dominante, aceleración de partícula, desplazamiento máximo y duración del evento. Existe una gran variedad de criterios de daño basados principalmente en el estudio vibracional de estructuras civiles en superficie y, en menor medida, en ensayos realizados en minería subterránea. La selección de un criterio de daño debe considerar el objetivo del estudio y las condiciones del sector en que se realizarán las mediciones vibratorias. Además, es importante validar el criterio escogido a través de un reconocimiento visual del entorno, antes y después de la tronadura.

El criterio anteriormente descrito, así como otros criterios aplicables en minería subterránea, son sólo aproximaciones al daño inducido y constituyen más que nada una herramienta de ingeniería de tronadura. [6]

### 3.5 Modelo de vibraciones

En la literatura se presentan distintas formas de modelar la atenuación de las ondas según su propagación. Para ello, si se utilizan cargas de explosivo cilíndricas, se ha visto por análisis dimensional que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la carga, (Devine (1962), Devine y Duvall (1963)), llegándose a definir la siguiente ley de propagación. Ilustración 12:

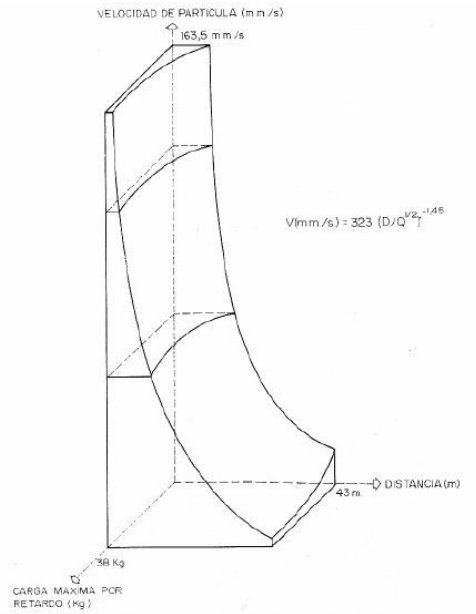


Ilustración 12 -Representación tridimensional de una ley de propagación de vibraciones

$$V = K \cdot \left[ \frac{DS}{Q^2} \right]^{-\alpha} \quad (18)$$

Otros autores como Atewel et al (1965), Holmberg y Persson (1978), Shoop y Daemen (1983) no consideran una simetría de carga particular y utilizan la siguiente expresión general:

$$V = K \cdot Q^a \cdot DS^b \quad (19)$$

donde «K, a y b» son constantes empíricas estimadas para un lugar determinado mediante un análisis de regresión múltiple. [2]

El mejor ajuste de curva para la predicción de vibración en el campo cercano, es el propuesto por Holmberg & Persson (1979), el cual considera los parámetros de la ilustración 13.



## Capítulo 4: Desarrollo del estudio

En esta sección se expone el desarrollo del trabajo realizado en Lomas Bayas entre los meses de Marzo a Noviembre de 2017. La primera etapa de este proyecto, consistió en definir los parámetros más relevantes para la tronadura, luego se caracterizaron estas tronaduras mediante el levantamiento de la línea base, la cual sirvió de punto de comparación para las posteriores propuestas que se generaron.

A modo de recordatorio y para entender de mejor forma el desarrollo de este trabajo se expone la metodología que se utilizó, esta consiste en:

- i. Identificar en forma previa los parámetros que inciden en el desempeño de la tronadura.
- ii. Realizar mediciones en terreno de los resultados obtenidos con los diseños actuales. Establecer línea base.
- iii. Estudiar cuales de los parámetros antes identificados se pueden modificar para obtener un mejor resultado.
- iv. Elaborar un modelo que represente la tronadura actual, con el propósito de realizar simulaciones y generar una propuesta de mejoras.
- v. Implementar modificaciones aceptadas por la empresa y efectuar mediciones en terreno de las prácticas y resultados de los diseños mejorados con la finalidad de realizar comparaciones con la línea base y evaluar el resultado
- vi. Generar una propuesta de diagrama de disparo utilizando el explosivo actual
- vii. Generar una propuesta técnica económica de utilización de explosivo de alta energía.

### 4.1 Identificación de parámetros

Como se indicó en la metodología de este trabajo, primero se definieron los parámetros más influyentes en el desempeño de la tronadura, para esto se realizó un trabajo teórico, llegando a la identificación de los siguientes parámetros.

- Pasadura
- Taco
- Burden
- Espaciamiento
- Longitud de carga
- Tipo de explosivo

### 4.2 Línea base

Para la caracterización de la actual configuración de P&T se realizaron mediciones y observaciones en terreno de las prácticas aplicadas en estas operaciones, además se realizó una recopilación de la información disponible. Con esta información se define la línea base, que como se expuso anteriormente en los alcances, se considera como Caso Base a:

- Sector: Pit Fortuna, Fase 3
- Malla: 10m de burden por 11.5m de espaciamento
- malla triangular
- sólo pozos de producción
- diámetro de perforación: 12 ¼ pulgadas
- pasadura: 3 metros
- taco: 8.5 metros
- explosivo: Fortan Advantage 50

Esta configuración de perforación y tronadura se ilustra en el diagrama que se presenta en la figura siguiente.

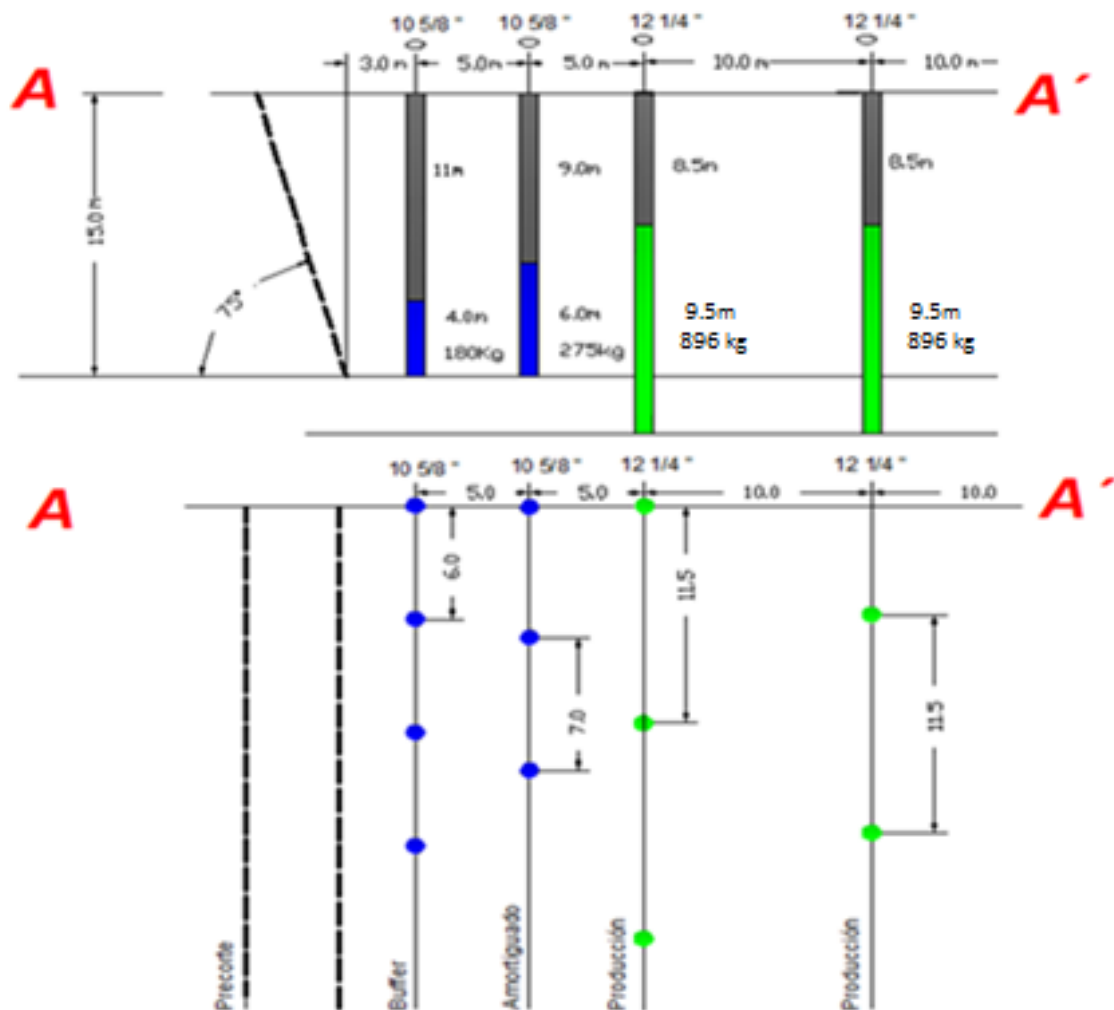


Ilustración 14 - Esquema Diseño Perforación y Tronadura

En la tabla siguiente se exponen los datos más relevantes para el diseño de perforación y tronadura.

Tabla 5 - Parámetros de diseño en fase 3

Diseño para Fase III		
DISEÑO DE MALLA	Altura de Banco	15 m
	Densidad de Roca	2.6 gr/cc
	Diámetro	12 ¼ in
	Burden	10 m
	Espaciamiento	11.5 m
	Relación (E/B)	1.15
	Pasadura	3 m
	Toneladas por pozo	4485
	IP	249 ton/m
	Taco	8.5 m
DISEÑO DE CARGUÍO DE EXPLOSIVOS	Explosivo	Fortan Advantage 50
	Densidad de explosivo	1.24 gr/cc
	Densidad lineal	94 kg/m
	Longitud de carga	9.5 m
	Carga por pozo	896 kg
	Energía efectiva del explosivo	2.75 MJ/kg
	Energía efectiva por pozo	2464 MJ
	Energía efectiva por tonelada	0.55 MJ/ton
	Factor de carga total	200 gr/ton

#### 4.2.1 Factor de carga

El factor de carga es la cantidad necesaria de explosivos para fragmentar 1 tonelada de roca. Por lo que el factor de carga teórico para fase 3 se calculó con la siguiente fórmula.

$$FC = \frac{\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot (H + J - T) \cdot \rho_{\text{explosivo}}}{B \cdot S \cdot H \cdot \rho_{\text{roca}}}$$

Donde

B: Burden

S: Espaciamiento

H: Altura de Banco

$\rho_{\text{roca}}$ : Densidad de la roca

D: diámetro de perforación

J: Pasadura

T: Taco

$\rho_{\text{explosivo}}$ : Densidad del explosivo

Como se dijo anteriormente, Lomas Bayas en sus operaciones de perforación y tronadura en fase 3 utiliza un diámetro de perforación de 12 ¼ pulgadas y una malla de 10 m x 11.5 m, con pasadura de 3 m y taco de 8.5 m. En adición a lo anterior, el diseño de la mina contempla una altura de banco de 15 metros, obteniéndose así un largo de 18 metros para los pozos.

Como el área de geología de Lomas Bayas no tiene sectorizadas las litologías y alteraciones de la mina, se supone por simplicidad una densidad de 2.6 ton/m<sup>3</sup>. Es importante mencionar que Geología sí tiene definidas las litologías y alteraciones, las cuales se indicaron en la tabla 1 en el Capítulo 2 de antecedentes sección 2.1.2.

El último parámetro necesario es la densidad del explosivo, que corresponde a 1.24 ton/m<sup>3</sup> para el explosivo utilizado Fortan Advantage 50. Por lo tanto, el factor de carga teórico para Fase 3 es de 199 gr/ton.

Además, es necesario comparar el explosivo en cuanto a su potencia relativa en peso con respecto al ANFO. Así el feactor de carga equivalente (FC EQ) es de 238 [gr/ton].

Siguiendo con esta caracterización, se obtuvo el cálculo del factor de carga para todas las tronaduras en fase 3 comprendidas entre Marzo y Junio de 2017. En la tabla siguiente se entregan el factor de carga promedio por mes.

Tabla 6 - Factor de Carga Mensual en Fase 3

	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
<b>Explosivo</b>	613,984	692,166	401,577	449,088	2,156,815
<b>Tronado</b>	2,852,460	3,579,599	2,107,950	2,300,805	10,840,814
<b>Factor de Carga</b>	215	193	191	195	199
<b>Factor de Carga Eq.</b>	256	230	227	232	237

El factor de carga promedio para el período comprendido entre marzo a Junio fue de 199 gr/ton. Al comparar este resultado se observa que el factor de carga teórico que se consideró no concuerda con el obtenido en terreno. Además, se obtuvo una gran variación mes a mes esto se debió a variaciones en cotas y en la longitud de los tiros por diversos factores.

#### 4.2.2 Granulometría

Uno de los aspectos más importantes del comportamiento del explosivo es la fragmentación. Por esto, y continuando la caracterización de la línea base, se controló la fragmentación en las frentes de carguío de las palas de extracción. Para llevar a cabo esta tarea fue necesario contar con los siguientes elementos:

- Escala (Balón)
- Cámara fotográfica digital
- Radio de comunicaciones



- EPP (chaleco reflectante, casco, lentes, respirador)

Para estimar la granulometría se tomaron fotografías en la frente de carguío utilizando una escala de referencia, en este caso se usó un balón de basquetbol con diámetro de 25 cm. En la ilustración 15 se presenta un ejemplo de fotografía capturada en la fase 3. Como recomendación se debe hacer un barrido de la frente en forma de zig-zag como se indica en la ilustración 16 y se deben sacar al menos 5 fotografías del sector.



Ilustración 15 – Fotografía fragmentación Fase 3



Ilustración 16 - Muestreo tipo zig-zag (manual Orica Powersieve3)

Posteriormente las fotografías fueron procesadas con el software Power Sieve3 para obtener la curva de distribución granulométrica y con ello el P80. En el software se debió hacer en pre procesamiento definiendo el tamaño de tamiz (se utilizó 1 pulgada) y la ubicación de la escala y el tamaño de esta para calibrar la imagen.



Ilustración 17 - Calibración de Imagen

Una vez definidos estos parámetros se continuó con el procesamiento de la imagen, donde se debe jugar con el contraste y la luz para que el programa defina de mejor manera los fragmentos. Como las condiciones cuando se obtienen las fotografías no siempre son las óptimas y el programa no es perfecto, se debe procesar manualmente e indicar que es roca y que no, o separar los fragmentos que el programa interpretó como uno. Para esto se utilizó una imagen en blanco y negro (binaria) para definir en blanco a la roca y en negro lo que no es y sus límites. En la ilustración 18 se muestra la imagen original a la izquierda y la imagen binaria a la derecha.

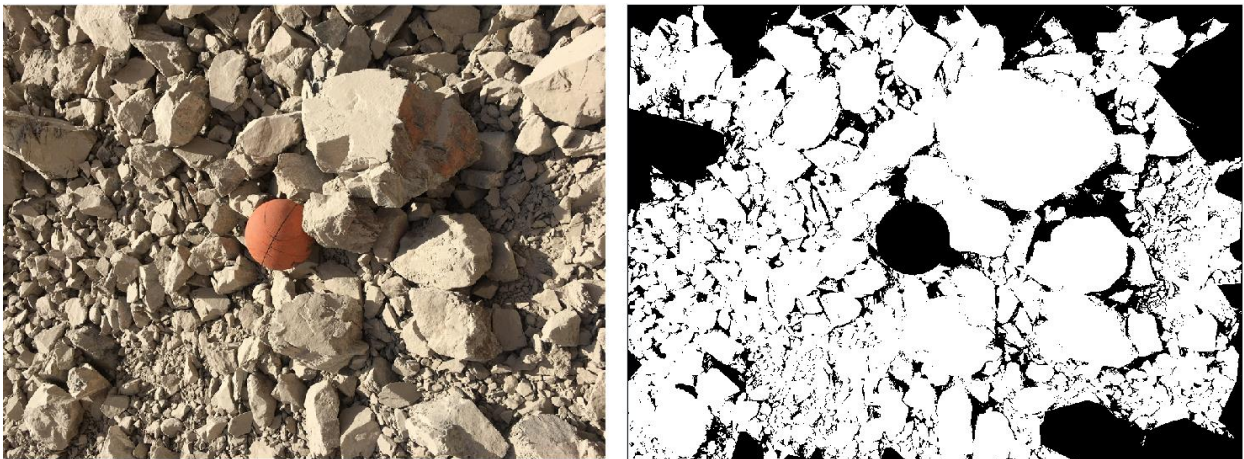


Ilustración 18 - Procesamiento de Imagen

Una vez lista la imagen el programan procesa y define los fragmentos y los clasifica según su tamaño. En la ilustración 19 se pueden apreciar los fragmentos de distintos tamaños, de izquierda a derecha aumenta en 1 pulgada, por lo tanto, la primera imagen representa los fragmentos entre 0 a 1' pulgada, las siguientes son de 1' a 2', 2' a 3', 3' a 4', 4' a 5', 6' a 7', 9' a 10' y 15' a 16'.



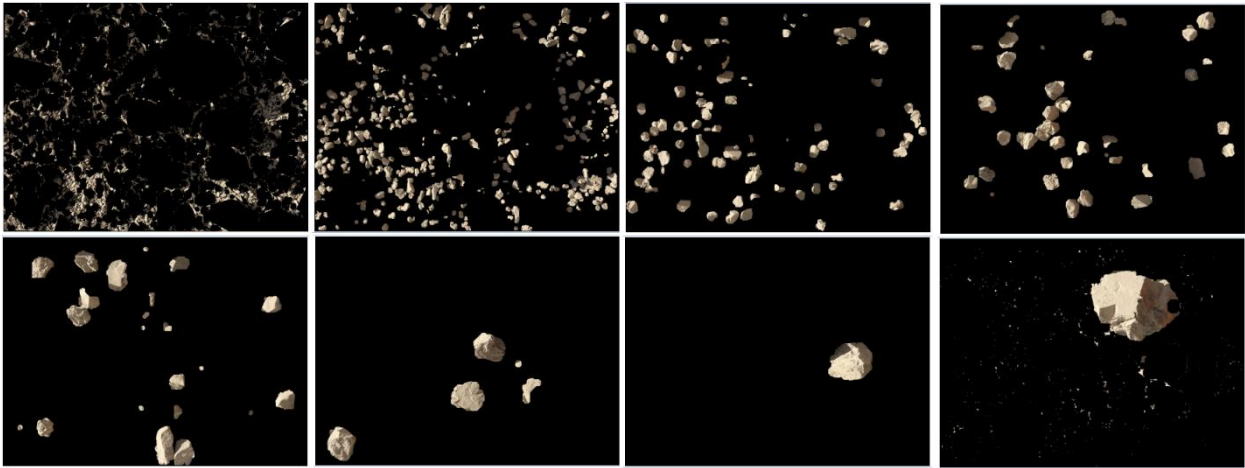


Ilustración 19 - fragmentos pasantes por tamiz

Como resultado el programa entrega las imágenes de la ilustración 19 y la distribución granulométrica Rosin-Rammler con sus parámetros. En la ilustración 20 se presenta el gráfico con los porcentajes pasantes de los tamices y la distribución R-R.

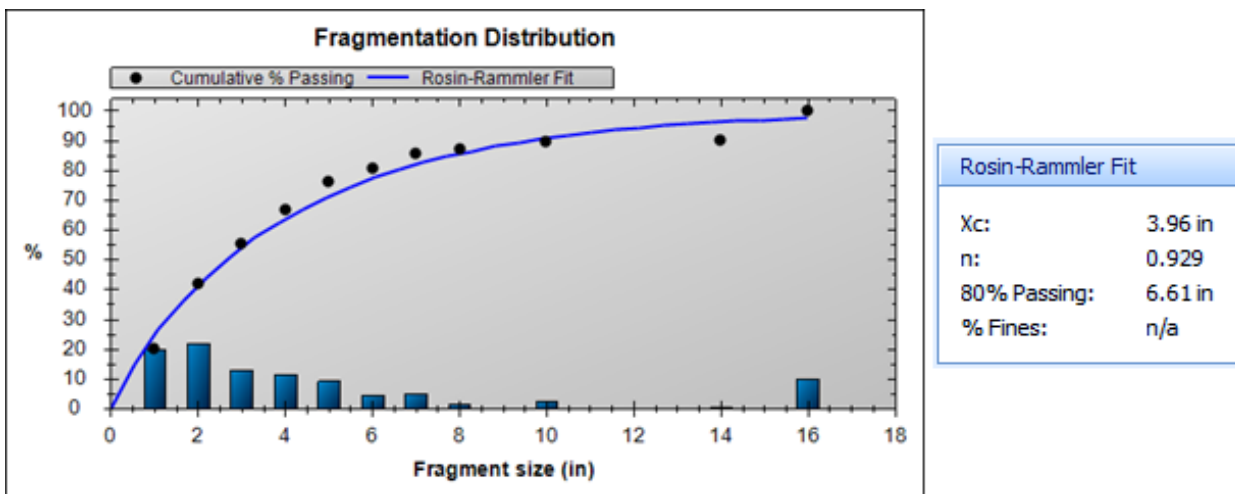


Ilustración 20 – Gráfico y parámetros distribución Rosin-Rammler.

La metodología antes descrita del procesamiento de imágenes se realizó en 120 fotos en los meses de Marzo a Junio. Los resultados obtenidos para la fase 3 se presentan en la ilustración 21 respectivamente en un gráfico agregado de todas las fotografías capturadas en el mes, además se incluyen los parámetros de la distribución Rosin-Rammler y el P80 obtenido.

Es importante señalar que el P80 se refiere al tamaño de tamiz al cual pasa el 80% en peso de los fragmentos. En este caso, como son imágenes en 2D, se considera cuando pasa el 80% del área analizada.

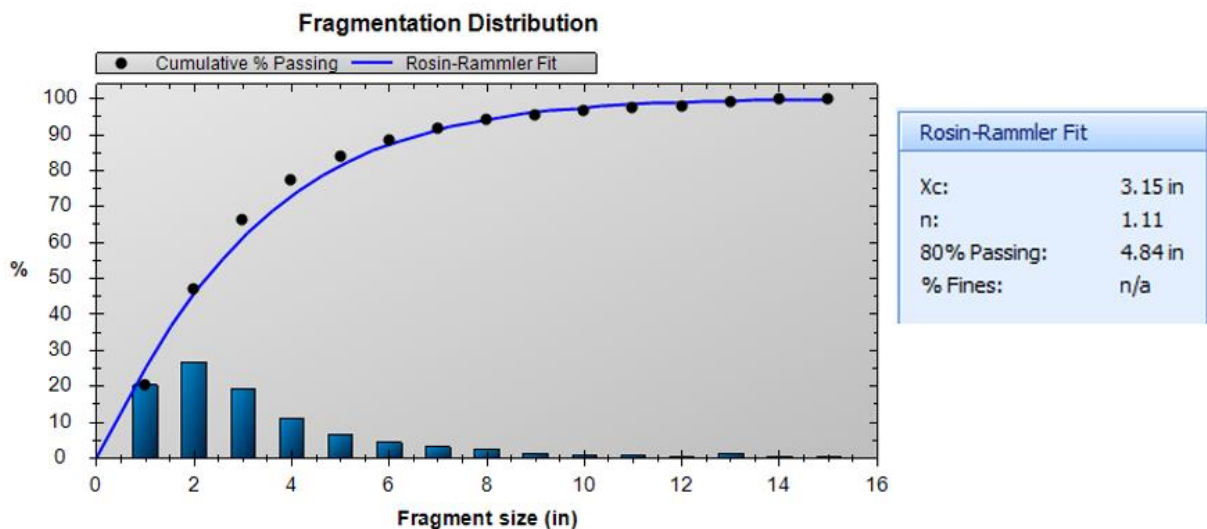


Ilustración 21 - Gráfico Agregado Fase 3 y Parámetros distribución R-R.

#### 4.2.3 Costo tronadura

Para estimar los costos de la línea base, primero se realizó un análisis del costo teórico por pozo. En la tabla siguiente se muestra el costo asociado en dólares por tonelada correspondiente a cada pozo de producción.

Tabla 7 - Costo Tronadura por Pozo

Costo por Pozo		
<b>Explosivo</b>	896	Kg
<b>Tronado</b>	4485	ton
<b>Costo Accesorios</b>	30	USD
<b>Costo Explosivo</b>	419	USD
<b>Costo Total</b>	0.100	USD/ton

Posteriormente se efectuó un análisis de los costos de tronadura en los pozos de producción tronados en el periodo comprendido en la realización de este estudio. En la tabla siguiente se incluyen los resultados obtenidos por mes y el promedio total de los pozos tronados en fase 3.

Tabla 8 - Costo Tronadura Mensual en Fase 3

		Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
<b>Explosivo</b>	Kg	613,984	692,166	401,577	449,088	2,156,815
<b>Tronado</b>	ton	2,852,460	3,579,599	2,107,950	2,300,805	10,840,814
<b>Pozos</b>	un	636	894	470	588	2588
<b>Costo Accesorios</b>	USD	19042	26766	14072	17605	77485
<b>Costo Explosivo</b>	USD	287,486	324,093	188,030	210,276	1,009,885
<b>Costo Total</b>	USD/ton	0.107	0.098	0.096	0.099	0.100

Es importante señalar que el material tronado presentado en la tabla, corresponde sólo a pozos de producción. Al comparar el resultado teórico con el resultado práctico o real, se

puede apreciar que en promedio coinciden ambos resultados, lo que indica que se está realizando un correcto carguío de los pozos. Es importante señalar que en la práctica algunos pozos son cebados con doble prima por razones de seguridad, lo cual no se ve reflejado aquí dado que no fueron consideradas estas primas extra.

#### 4.2.4 Velocidad de detonación

Como se dijo anteriormente, la VOD tiene directa relación con las características rompedoras del explosivo, por lo que la medición de VOD (velocidad de detonación) entrega una aproximación práctica del desempeño de la tronadura. Para la realización de esta tarea es necesario contar con los siguientes elementos:

- Equipo de Registro (DataTrap II o MicroTrap)
- Cable VOD PROBECABLE "GREEN"
- Cable coaxial
- Huincha aislante
- Pelacables

La medición consistió en instalar el cable de prueba para VOD en el cebo o prima, que consiste en un detonador no eléctrico o pirotécnico de 500 ms y 18.2 mt de tubo de choque, un detonador electrónico Ikon II con 20 m de cable y un amplificador pentex de 450 gramos. El cable de prueba se dejó cortocircuitado en la punta ubicada en el pozo y se pegó a la prima mediante huincha aislante. Después se realizó el primado del pozo, es decir, se bajó el amplificador al fondo del pozo junto a los detonadores. Luego se esperó a que el pozo fuese cargado con explosivo Fortan Advantage 50, un ANFO pesado. Posterior a esto, se conectó el cable de prueba al cable coaxial, y este a su vez se conectó con el equipo de registro (DataTrap II).

Además fue necesario conectar un “gatillante” al equipo de registro Datatrap que cumple la función de dar la señal para que el equipo comience a grabar. El gatillo consiste en un detonador ikon y un cable de amarre cortocircuitado que, al activarse el detonador ikon, su detonación corta el cable cortocircuitado y el equipo comienza a grabar. Por lo tanto, este detonador debió tener un retardo menor al retardo del pozo a medir.

En la tabla a continuación se presentan las mediciones de VoD realizadas en terreno

Tabla 9 - Mediciones de VoD en Fase 3

Fecha	VoD [m/s]	Diametro [in]	Explosivo	Densidad [g/cc]
22-02-2017	5,289	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.24
23-02-2017	5,550	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.23
24-04-2017	5,286	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.23
24-04-2017	5,217	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.23
22-05-2017	4,981	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.23
20-06-2017	5,303	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.24
23-06-2017	5,259	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.25
26-06-2017	5,306	12 1/4	Fortan Advantage 50	1.24
<b>Promedio</b>	5,274			

En promedio la VoD para el explosivo utilizado es de 5,274 m/s, resultado que indica que el explosivo tiene un buen desempeño en cuanto a detonación.

#### 4.2.5 Rendimiento equipos de carguío

Otro de los factores más importantes del comportamiento del desempeño del explosivo es la tasa de excavación de los equipos de carguío. Para llevar el control del rendimiento de las palas 2 y 3, que son las que trabajan en fase 3, se debe pedir la información en el despacho mina. En la tabla siguiente, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 10 - Rendimiento Mensual. Tasa de Excavación Equipos de Carguío en Fase 3

	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Promedio
<b>Pala 3</b>	9,797	8,152	8,775	9,020	8,936
<b>Pala 2</b>	7,132	5,838	7,152	6,902	6,756

Los resultados muestran que la pala 3 tiene una mayor tasa de excavación en comparación a la pala 2, esto se debe a que la pala 3 tiene una mayor capacidad, puesto que la pala 3 es de 56 m<sup>3</sup> y la pala 2 es de 44 m<sup>3</sup>.

#### 4.2.6 Análisis de pisos

Se analizaron los pisos de los bancos 1890 y 1875 en fase 3, donde se tomaron 1577 puntos para el banco 1890 y 1043 puntos para el banco 1875 y se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 11a - Estadísticas piso Banco 1890

Banco 1890	
<b>Mean</b>	1890.33
<b>Standard Error</b>	0.02
<b>Standard Deviation</b>	0.80
<b>Sample Variance</b>	0.65
<b>Minimum</b>	1888.14
<b>Maximum</b>	1893.05
<b>Count</b>	1577

Tabla 11b – Estadísticas piso banco 1875

Banco 1875	
<b>Mean</b>	1875.49
<b>Standard Error</b>	0.03
<b>Standard Deviation</b>	0.94
<b>Sample Variance</b>	0.89
<b>Minimum</b>	1873.3
<b>Maximum</b>	1878.32
<b>Count</b>	1038

Al analizar los resultados se puede observar que los pisos en promedio están algunos centímetros altos, pero lo que llama la atención es que presentan una alta desviación. Esto es un indicador de que no se obtuvo un buen logro de pisos. Para graficar de mejor forma el estado de los pisos se incluyó un histograma que se presenta a continuación.

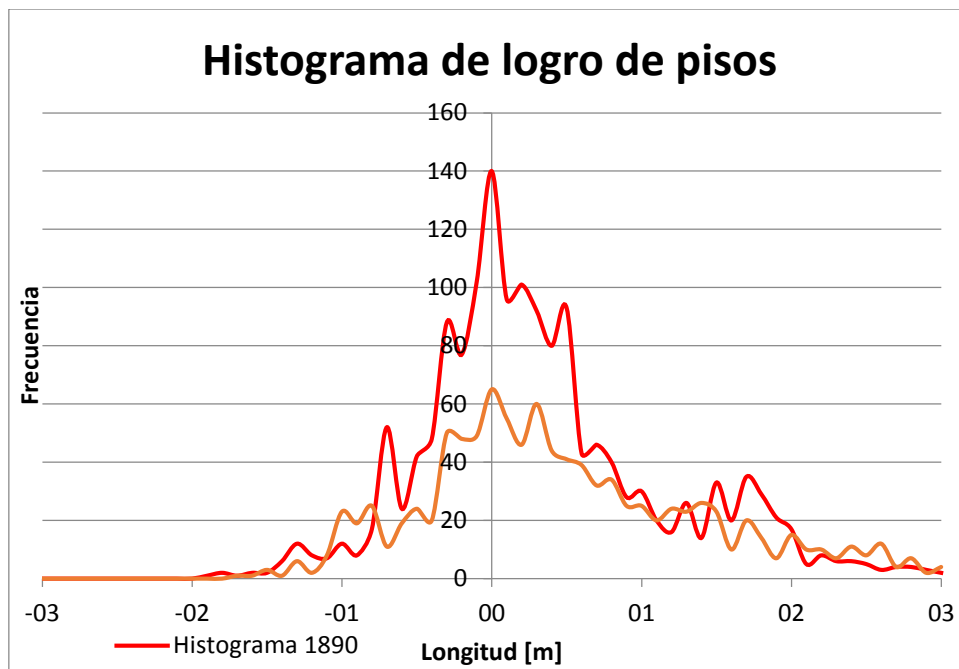


Ilustración 22 - Histograma pisos 1875-1890

En resumen para la línea base se tiene:

Tabla 12 . Resumen línea base

Resumen	
<b>Burden</b>	10 [m]
<b>Espaciamiento</b>	11.5 [m]
<b>Pasadura</b>	3 [m]
<b>Taco</b>	8.5 [m]
<b>Explosivo</b>	Fortan Advantage 50
<b>Diámetro</b>	12 ¼ [pulg]
<b>Factor de Carga</b>	199 [gr/ton]
<b>Granulometría P80</b>	4.24 [pulg]
<b>Rendimiento Pala 56 m3</b>	8,903 [ton/hr excv]
<b>Pisos</b>	Desviados*

#### 4.3 Análisis teórico de parámetros de perforación y tronadura

En este apartado se realizó un análisis teórico de los principales parámetros de perforación y tronadura con el propósito de proponer algunos cambios en la situación actual. Para ello se efectuó primero un análisis del taco, luego del burden y finalmente un análisis de la pasadura.

##### 4.3.1 Taco

Para determinar el taco se realizó un análisis bibliográfico, el cual es definido según el criterio de Frank Chiappetta, donde propone la siguiente fórmula:



$$SD = \frac{D}{W^{\frac{1}{3}}}$$

Donde:

D: distancia entre la superficie y el centro de la carga, definida en 10 diámetros.

W: Peso del explosivo en la parte superior de la columna explosiva, definido por un largo de 10 diámetros.

Este criterio nos indica que el SD debe presentar valores entre 0.92 a 1.40 para ser apropiado, es decir, que el taco genere baja cantidad de flyrock y ruido, una buena fragmentación y vibraciones moderadas esto se puede apreciar en la imagen 23.

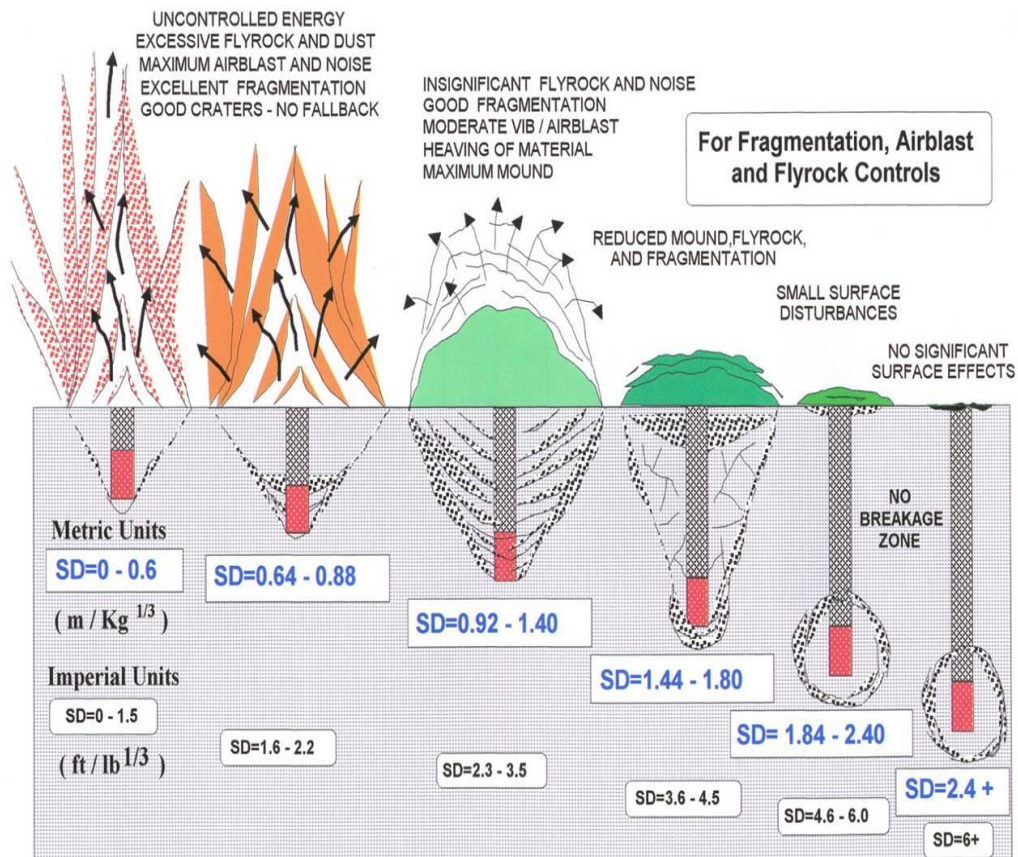


Ilustración 23 - Categorización según el SD

Dado lo anterior, se calculó el rango de valores en el cual se debe encontrar el taco para la configuración actual de Lomas Bayas.



Tabla 13 - Calculo de Taco

Fase 3	
<b>Diámetro</b>	12 1/4
<b>Taco Actual</b>	8.5
<b>Taco Máximo</b>	7.7
<b>Taco Mínimo</b>	4.6

Al observar la tabla anterior, el taco actual no está en el rango de valores apropiados ([4.6 a 7.7]), por lo que se está produciendo una baja fragmentación en la parte superior del banco. Dado lo anterior se propone un diseño de taco adecuado para los parámetros actuales de la operación, el cual es presentado a continuación:

Tabla 14 - Cálculo de SD

Fase 3	
<b>Diámetro</b>	12 1/4
<b>Densidad del explosivo</b>	1.24
<b>Kg/m</b>	94.3
<b>w (kg)</b>	293.4
<b>lw (m)</b>	3.1
<b>SD</b>	<b>1.21</b>
<b>Taco</b>	6.5

Por lo tanto, el taco recomendado teóricamente según lo recomendado por Chiappetta es 6.5 metros.

#### 4.3.2 Burden y espaciamiento

Como se dijo anteriormente, se utilizó una razón E/B de 1.15 y una malla de configuración triangular donde se obtiene una mejor distribución de energía en la malla. En consecuencia, se tendrá la siguiente relación:

$$E = 1.15 \cdot B$$

donde:

E: Espaciamiento [m]

B: Burden [m]

Además, como el objetivo final de este trabajo es obtener una granulometría ideal entre tres y cuatro pulgadas, se analizó teóricamente la siguiente ecuación:

$$X_{50}[cm] = A \cdot \frac{(B^2 \cdot SBR \cdot H)^{0.8}}{Q^{0.633}} \cdot \left(\frac{115}{E}\right)^{0.633} \quad (5)$$

De la ecuación 5, presentada anteriormente en el capítulo 3, se desprende que al utilizar el mismo explosivo se tendrán dos variables que afectan a la fragmentación de la roca, el burden y la cantidad de explosivo utilizada en cada pozo, esta última variará con el taco y pasadura utilizados ya que no se realizó ninguna otra modificación. Por lo tanto, a un menor burden tendremos una mejor fragmentación.

Tabla 15 - Influencia de los parámetros en la fragmentación

Variable	Acción	Resultado en Fragmentación
<b>Taco</b>	Disminuye	Mejora
<b>Burden</b>	Disminuye	Mejora

La pasadura debiera tener una incidencia en el resultado de la tronadura, pero esta será posterior, ya que pre-acondicionará al banco siguiente, pero en el banco actual no tendrá una incidencia directa, por lo que no se consideró como una variable influyente en la fragmentación.

En la sección 4.4 se realizó un modelo predictivo de la fragmentación para obtener el burden más apropiado.

#### 4.3.3 Pasadura

Para la pasadura se realizó un análisis bibliográfico según postulados de dos autores. En primera instancia se utilizó lo planteado por López Jimeno y luego la metodología de Ash. En la tabla 16 se presenta la propuesta por López Jimeno para grandes diámetros, mientras que en la tabla 17, la propuesta por Ash.

Tabla 16 - Pasadura Calculada según Lopez Jimeno para grandes diámetros

Díámetro	Rango	
<b>12 1/4</b>	1.56 m	1.87 m

Tabla 17 - Pasadura Calculada según ASH

Burden	Fract Bajo	Fract Medio	Fract Alto
<b>10</b>	4 m	3 m	2 m

Analizando desde otro punto de vista, López Jimeno indica que el ángulo  $\alpha$  de la ilustración 24 está entre 10 y 30 grados, por lo que la pasadura debiera estar en el rango de 1 metro (10° para del ángulo de interacción) a 3.3 metros (30° para el ángulo de interacción).

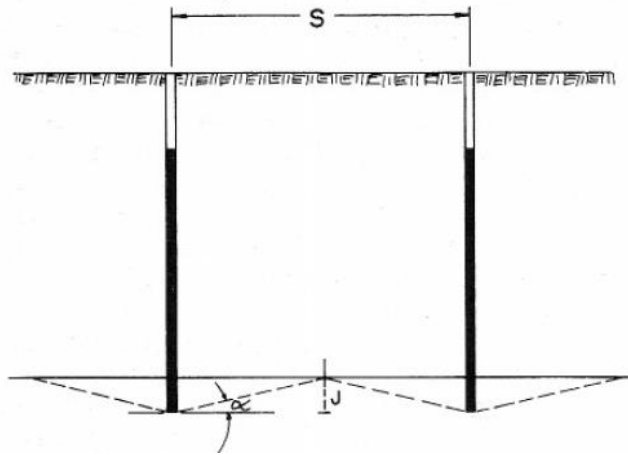


Ilustración 24 – Pasadura

Tabla 18 - Cálculo de pasadura según ángulo de interacción

Espaciamiento	Pasadura	$\alpha$
11.5 m	1 m	10 °
11.5 m	3.32 m	30 °

El análisis anterior deja un rango muy amplio para los valores de pasadura, pero sí indica que es posible reducir la pasadura, aunque no cuánto. Por esto se decidió realizar una simulación con los datos obtenidos del estudio de vibraciones y así verificar en qué situación se encuentra. En la sección 4.5.2 se utilizó el programa Blast Design Assistant (BDA) perteneciente a Orica para definir esta situación.

#### 4.4 Modelos

En esta sección se elaboraron dos modelos uno de fragmentación y el segundo de vibraciones. El primero fue utilizado para simular distintas configuraciones de burden, espaciamento y taco. Mientras que el segundo fue utilizado para definir la pasadura que mejor se ajusta a los parámetros de burden y espaciamento.

##### 4.4.1 Modelo de fragmentación

El modelo de fragmentación aplicado intenta predecir el P80 que se obtendrá al variar ciertos parámetros de perforación y tronadura. En esencia con este modelo se buscó encontrar el mejor burden y espaciamento, así como también el taco apropiado que permitió alcanzar la fragmentación deseada.

El modelo utilizado es del tipo KCO o Kutnetzov-Cunningham-Ouchterlony, basado en lo expuesto en la sección 3.3.2 y los cálculos se realizaron con el software BDA o Blast Design Assistant de la compañía Orica. En este programa vienen pre cargadas todas las fórmulas y parámetros de los explosivos, por lo que solo resta ingresar al programa las

propiedades de la roca, una curva de fragmentación base y los parámetros de perforación y tronadura.

A continuación se presentan los parámetros ingresados al programa para la aplicación del modelo. Las propiedades de la roca consideradas se presentan en la tabla 19. La curva de fragmentación ingresada es la curva obtenida en terreno para la línea base mostrada en la ilustración 21 y los parámetros de la curva de ajuste de swebrec en la ilustración 25. Por último, los parámetros de perforación y tronadura corresponden al caso base.

Tabla 19 - Propiedades de la Roca

Unidad Geológica-Geotécnica	$\gamma$ (ton/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$E_i$ (GPa)	$\nu_i$	$\sigma_{ti}$ (MPa)
Gn-QS	2.72	83.47	33.99	0.15	10.85

donde:

Gn-Qs: granodiorita con alteración cuarzo sericita moderada y fuerte

$\gamma$ : densidad de la roca

$\sigma_{ci}$ : resistencia en compresión uniaxial de la roca intacta.

$E_i$ : módulo de Elasticidad de la roca intacta.

$\nu_i$ : razón de Poisson de la Roca intacta.

$\sigma_{ti}$ : resistencia a la tracción de la roca intacta.

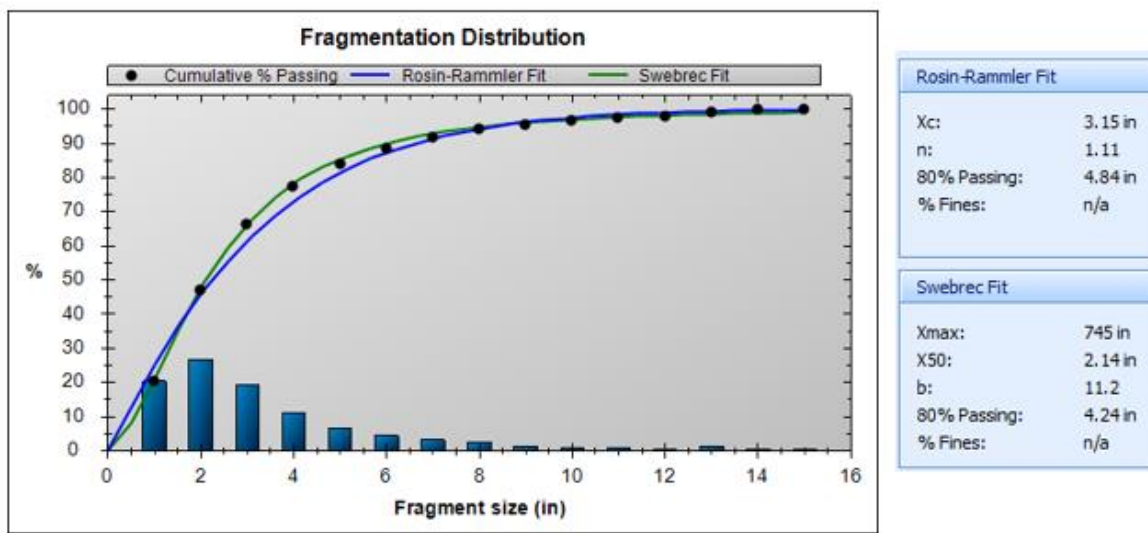


Ilustración 25 - Curva granulométrica base, ajuste Swebrec

Utilizando toda la información antes señalada se realizó una estimación de la granulometría para distintas configuraciones de malla, manteniendo los parámetros de la carga explosiva (taco 8.5 m y 3 m de pasadura), obteniendo como resultado las curvas de distribución granulométrica de la ilustración 26 y la tabla 20. Adicionalmente, se graficaron los resultados de P80 versus el burden, obteniéndose una tendencia lineal presentada en la ilustración 27. Estos resultados confirman lo expuesto en el análisis teórico de la sección 4.3.2; es decir, al disminuir el burden se obtiene una mejor fragmentación. Cabe mencionar que como la distribución de Rosin-Rammler entrega un P80 mayor que la distribución de Swebrec frente a las mismas condiciones, por lo que al trabajar con Swebrec es necesario apuntar a un P80 menor, para que así el objetivo de fragmentación también se cumpla utilizando la distribución de Rosin-Rammler (menor a 4 pulgadas), debido a que debe cumplir en el peor escenario. Por lo tanto el modelo KCO al trabajar con la distribución Swebrec, el P80 objetivo será de 3.6 pulgadas. Con esto en cuenta la configuración 9x10.5 m sería la más apropiada (con un taco 8.5 y pasadura 3).

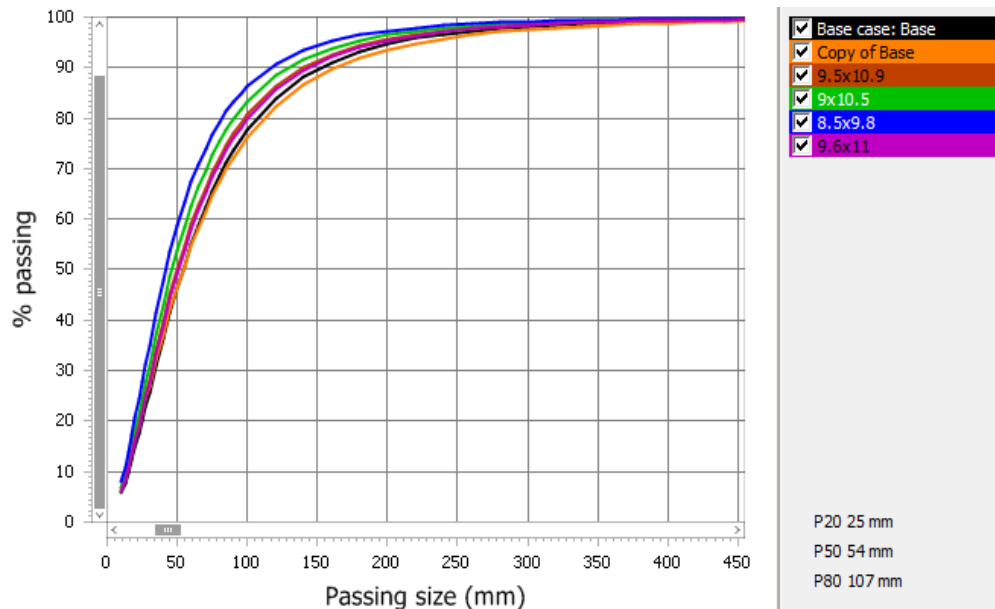


Ilustración 26 - distribución granulométrica para distintas mallas

Tabla 20- Granulometría para distintas configuraciones de malla

	P20 [in]	P50 [in]	P80 [in]
<b>Base</b>	0.98	2.13	4.21
<b>9.6x11</b>	0.91	2	3.94
<b>9.5x10.9</b>	0.91	1.97	3.86
<b>9x10.5</b>	0.83	1.81	3.50
<b>8.5x9.8</b>	0.75	1.65	3.23

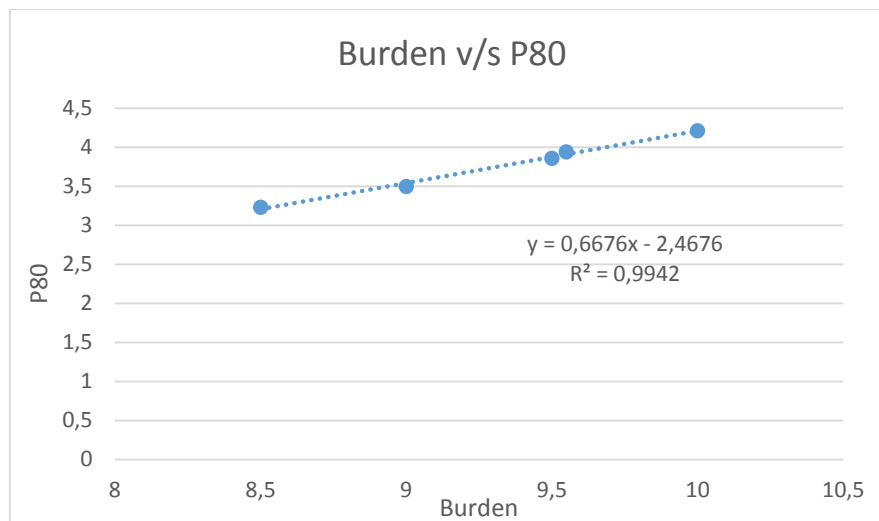


Ilustración 27 - Tendencia Burden vs P80

Continuando en la línea de encontrar la mejor configuración se decidió variar el taco, ya que en la sección anterior se evidenció que el taco que se utilizó en el caso base no genera los mejores resultados según la bibliografía. Por lo tanto, se varió el taco para las distintas mallas antes evaluadas. Los resultados se presentan en la tabla 21.

Tabla 21 - Resultados Granulometría con variación de taco para distintas mallas

	Taco [m]	P80 [in] Swebrec
<b>Base 10x11.5</b>	8.5	4.2
<b>10x11.5</b>	8	3.8
<b>10x11.5</b>	7.5	3.5
<b>9.6x11</b>	8.5	3.9
<b>9.6x11</b>	8	3.6
<b>9.6x11</b>	7.5	3.4
<b>9.6x11</b>	7	3.1
<b>9x10.5</b>	8.5	3.5
<b>9x10.5</b>	8	3.3
<b>9x10.5</b>	7.5	3.0
<b>9x10.5</b>	7	2.8
<b>8.5x9.8</b>	8.5	3.2

Al observar la tabla 21 se desprende lo ya antes mencionado en la sección 4.3.2, en el sentido que se presentan dos variables para mejorar la fragmentación: el taco y el burden. Pero para adoptar una decisión de cuál es la mejor combinación se decidió incorporar una tercera variable, el costo. Para ello se realizó una evaluación teórica del costo de perforación y tronadura, cuyos resultados se muestran en la tabla 22 a continuación.

Tabla 22 - Fragmentación según burden y taco, y el costo asociado

	Taco [m]	P80 [in] Swebrec	Costo Tron. [USD/ton]	Costo P&T [USD/ton]
<b>Base 10x11.5</b>	8.5	4.2	0.100	0.156
<b>10x11.5</b>	8	3.8	0.106	0.162
<b>10x11.5</b>	7.5	3.5	0.111	0.167
<b>9.6x11</b>	8.5	3.9	0.110	0.172
<b>9.6x11</b>	8	3.6	0.116	0.177
<b>9.6x11</b>	7.5	3.4	0.121	0.183
<b>9.6x11</b>	7	3.1	0.127	0.188
<b>9x10.5</b>	8.5	3.5	0.123	0.191
<b>9x10.5</b>	8	3.3	0.129	0.197
<b>9x10.5</b>	7.5	3.0	0.135	0.203
<b>9x10.5</b>	7	2.8	0.141	0.209
<b>8.5x9.8</b>	8.5	3.2	0.139	0.217

Con los resultados de la tabla 22 se acordó con el área de perforación y tronadura realizar pruebas con las mallas de 9.6x11 con taco 8.5 y 8 metros, y 9x10.5 con taco de 8 metros. Los resultados de estas pruebas se presentarán en la sección 4.6 Pruebas en terreno y resultados.

Lo anterior se debió a que en las pruebas también se incorporaron distintas pasaduras, es por esto que a continuación se incluye el estudio realizado para determinar estas pasaduras.

#### 4.4.2 Modelo de Vibraciones

Como se vió en secciones anteriores las metodologías para la estimación de la pasadura llegan a resultados muy diferentes. Para resolver este tema se decidió realizar un modelo de vibraciones de campo cercano, y con este modelo más el criterio de daño de Mckenzie, decidir cuál será la pasadura más conveniente para la configuración del caso base y las configuraciones seleccionadas según el modelo de fragmentación. En consecuencia, para elaborar este modelo primero se debió realizar un estudio de vibraciones de campo cercano el cual se presenta en la siguiente sección.

##### a) Estudio Vibraciones de Campo Cercano

Luego de definida la línea base se realizó una medición de vibraciones, principalmente con dos objetivos. El primero es el de obtener la velocidad de las ondas p para poder estimar la velocidad máxima de partícula crítica. La finalidad de esto es poder establecer un criterio de daño definido en la sección 3.4. El segundo es elaborar un modelo de campo cercano para modelar el comportamiento de la roca y simular cambios en el diseño a través del uso del programa Blast Design Assistant.

Como se vió en la sección 3.4 la velocidad máxima de partículas (PPV) supone una relación directa para un comportamiento lineal y elástico exclusivamente, y se relaciona

con los parámetros Módulo de Young, esfuerzo a la tracción y velocidad de la onda “p” ( $V_p$ ). Esta información es obtenida en pruebas de laboratorio para representar de la mejor manera las condiciones de roca intacta. Dado que no se cuenta con información de laboratorio para la velocidad de la onda “p”, en la práctica existe una adaptación del criterio “PPVc”, donde los parámetros  $\sigma_t$  y E son obtenidos a partir de ensayos de laboratorio y  $V_p$  es obtenida a través de la técnica cross-hole la cual es realizada en terreno [Informe geotécnico Orica].

Primero se ejecutó la técnica de cross-hole para obtener la velocidad de las ondas p, esta medición requirió utilizar:

- 2 geófonos triaxiales.
- 1 geófono uniaxial.
- Equipo Datatrap II

Para implementar la técnica se realizaron 4 perforaciones verticales de 12 metros de profundidad, dos de ellas (extremos) se utilizaron como fuentes sísmicas que se cargaron con un iniciador Booster de 450 gr (Cargas Puntuales CP1 y CP2), mientras que en las 2 perforaciones restantes se ubicaron los geófonos que registraron la información (Geófono Uniaxial GU y Geófono Traxial 2 (GT2)).

Como se ve en la ilustración siguiente, mediante estos dos geófonos se determinó la velocidad de propagación, conociendo la diferencia de tiempos de arribo de cada onda y la distancia de separación entre ellos. Luego se realizó esto mismo pero con el geófono instalado dentro de la malla (GT1) y conociendo la diferencia de tiempos de arribo de cada onda y la distancia de separación entre las cargas CP1 y CP2 hacia el GT1.

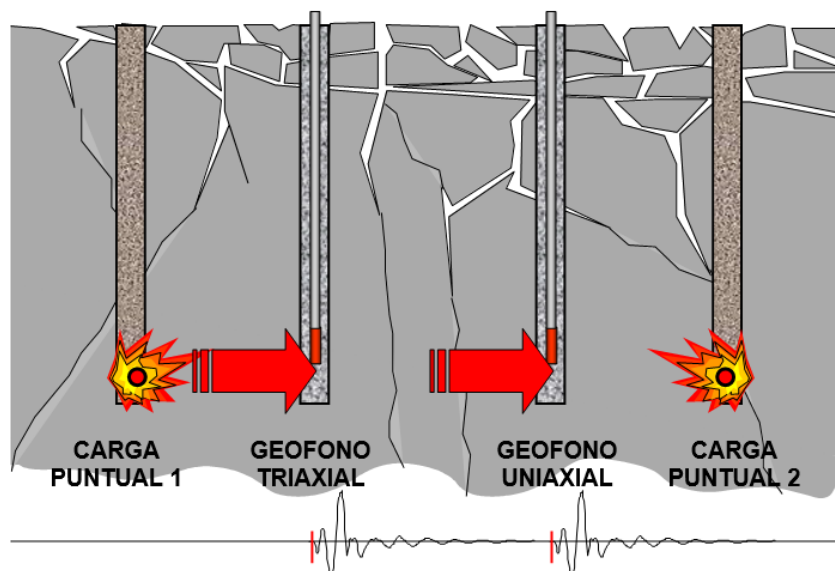


Ilustración 28 - Esquema de Metodología Cross-Hole



La medición se realizó en una voladura de la Fase 3, banco 1860, disparo 11 del día 27 de Julio. La malla constaba de pozos de producción, amortiguados, buffer y precorte. Para esta medición se instalaron los sensores (geófonos) tras la línea de precorte en la proximidad del talud.

Se recopiló la información correspondiente a ubicación georreferenciada de instrumentos de medición, registros sismográficos, configuración de cargas explosivas, secuencia de disparo e información geológica del sector (litología y alteración).

Siguiendo la misma lógica del método de cross-hole se realizó una medición de vibraciones de campo cercano con el propósito de registrar el paso de las ondas generadas por los pozos de producción en los geófonos. Este estudio se realizó en la misma malla ya que así se aprovechan los geófonos ya instalados pero además se instaló un geófono dentro de la malla (geófono triaxial 1 (GT1)). En la ilustración siguiente se muestran la posición de los geófonos y las cargas puntuales, así como también la malla y la secuencia de salida de cada pozo identificado con su ID.

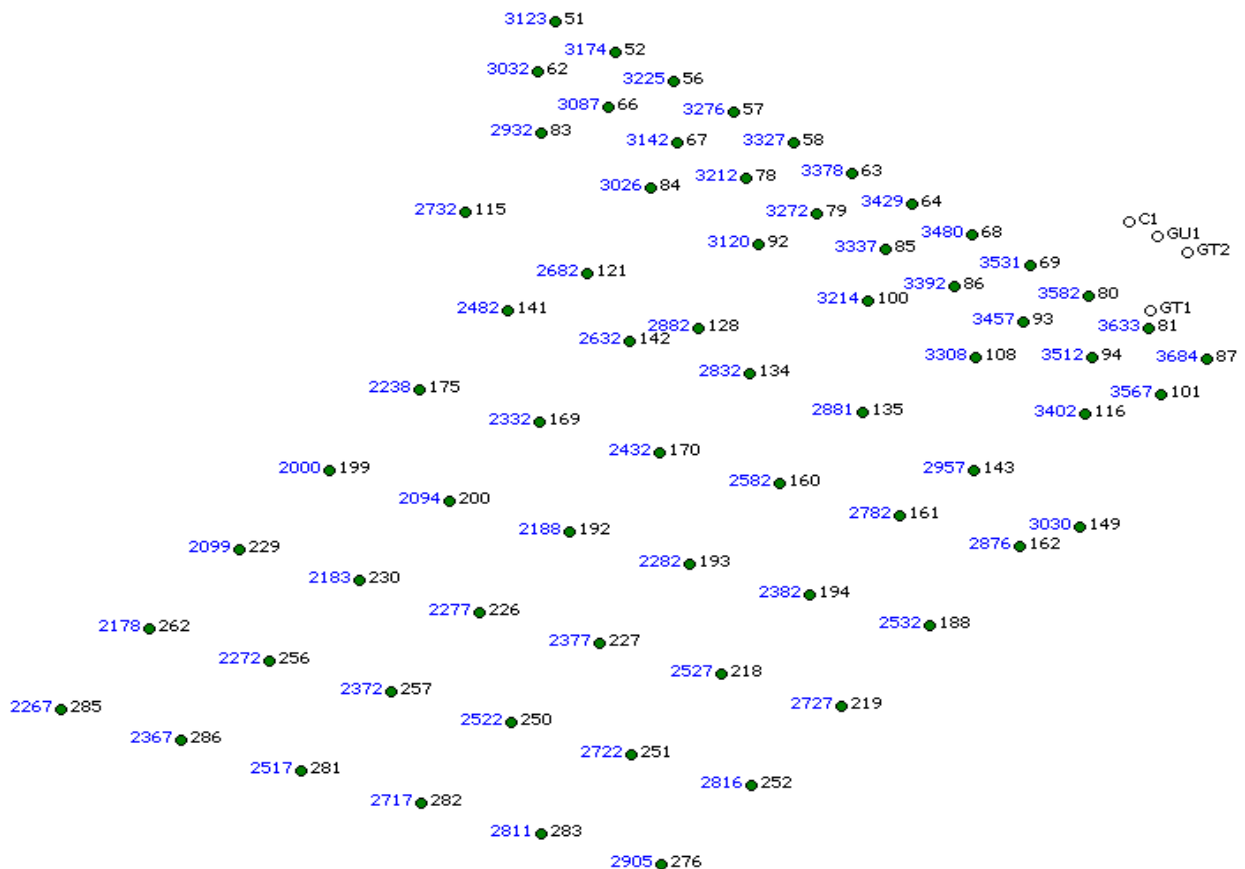


Ilustración 29 - Plano de Tronadura F3\_1860-11 con ID de pozos y retardos

La medición en terreno de la velocidad de onda “p” arrojó los resultados indicados en la tabla 23.

Tabla 23 - Velocidad de Onda "p" obtenida en terreno.

Pozo	Velocidad de Onda "p" [m/s]
P199	2332.4
P200	2657.1
P192	2051.9
P193	1970.8
P194	1933.3
P188	3000.0
Promedio	2324.3m/s

Por lo tanto, utilizando el promedio de la Vp obtenida en terreno, junto con los datos proporcionados por el área de Geología de CM Lomas Bayas de las características de la roca (tabla 24) se puede calcular el PPV crítico.

Tabla 24 - Propiedades de roca intacta para el cálculo de PPVc

Unidad Geológica-Geotécnica	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$E_i$ (GPa)	$\sigma_{ti}$
Gn-QS	83.47	33.99	10.85

donde:

$\sigma_{ci}$  : Resistencia en compresión uniaxial de la roca intacta.

$E_i$ : Módulo de Elasticidad de la roca intacta.

$\sigma_{ti}$  : Resistencia a la tracción de la roca intacta.

Para el cálculo de la velocidad de partícula crítica se utilizaron las propiedades de la roca Granodiorita con alteración Cuarzo-Sericítica moderada y fuerte, obtenidas del departamento de geología de Lomas Bayas (Tabla 24), junto con la velocidad de onda "p" determinada anteriormente. Utilizando la fórmula 15 se procede a calcular el PPVc.

$$PPV_c = \frac{10.85 \cdot 2324.3}{33.9} = 744 \left[ \frac{mm}{s} \right]$$

Con este resultado se determinó el criterio de daño de McKenzie según la tabla 3, donde se obtienen rangos para el daño generado en la roca circundante, los cuales se incluyen en la tabla 25.

Tabla 25 - Criterio de Daño PPVc

DAÑO	RANGO
<b>INTENSO FRACTURAMIENTO</b>	> 2976 mm/s
<b>CREACIÓN DE NUEVAS FRACTURAS</b>	> 744 mm/s
<b>EXTENSIÓN DE FRACTURAS EXISTENTES</b>	> 186 mm/s
<b>NO SUFRE DAÑO</b>	< 186 mm/s

La tabla 25 indica que para una vibración mayor a 2,976 mm/s se generaría un intenso fracturamiento y para vibraciones mayores a 744 mm/s hay creación de nuevas fracturas.

En cuanto al estudio de campo cercano, con los resultados obtenidos de los peacks de vibración que generó la detonación de cada pozo sobre el geófono, junto con los datos de la tronadura tales como carga de los pozos y la distancia de los pozos al geófono, se realizó una regresión lineal, donde x representa a FH&P, determinado con los datos de la tronadura, el cual se define en la siguiente ecuación:

$$FH\&P = \left( \arctan\left(\frac{H + X_s - X_o}{R_o}\right) + \arctan\left(\frac{X_o - X_s}{R_o}\right) \right) \quad (20)$$

donde:

H: Longitud de la carga [m]

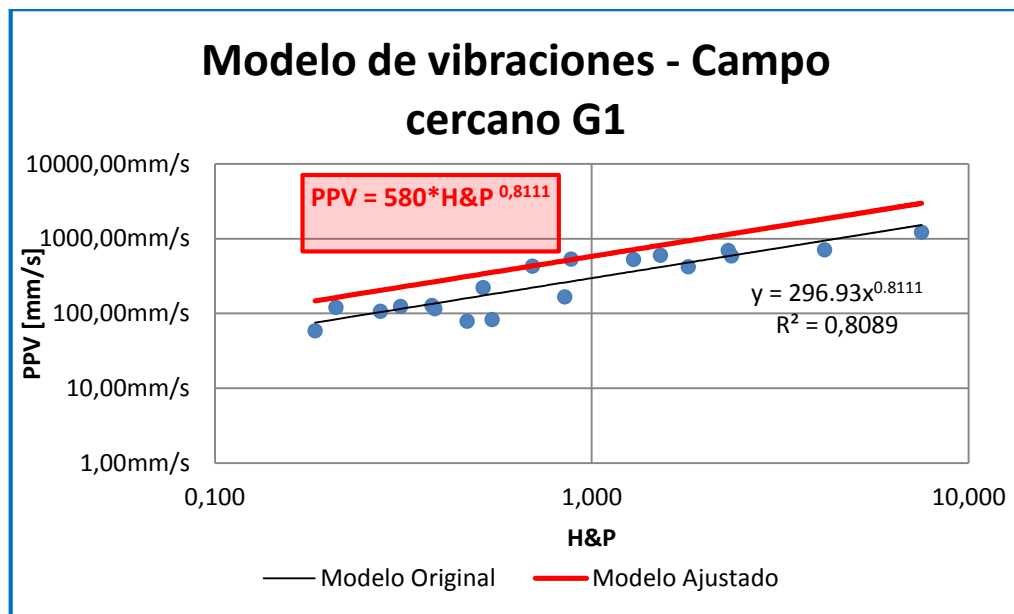
X<sub>s</sub>: Longitud del taco [m]

X<sub>o</sub>: Profundidad de la medición [m]

R<sub>o</sub>: Distancia desde la carga al punto de medición [m]

Los resultados obtenidos se presentan en el gráfico de la ilustración 30. La regresión lineal define el modelo de vibraciones de Holmberg & Persson, por lo tanto el modelo que predice las vibraciones en el campo cercano para fase 3 es:

$$PPV = 296.93 \cdot [FH\&P]^{0.8111}$$



*Ilustración 30 - Modelo de Vibraciones de Campo Cercano Obtenido en Terreno*

#### b) Simulación de vibraciones

La simulación de vibraciones tiene como objetivo determinar el halo de daño que produce la detonación de los pozos, con lo que se puede estimar cuál será la pasadura apropiada para una determinada configuración.

Para llevar a cabo la simulación de las vibraciones generadas en el campo cercano por la detonación de los pozos, es necesario utilizar el programa BDA o BLast Design Assistant de Orica. A este programa se le deben ingresar las propiedades de la roca y el modelo de vibraciones generado en la sección anterior, luego se debe incorporar la configuración de la perforación y tronadura que se desea simular. Ingresando los datos antes mencionados para el caso base, el programa nos entrega como resultado lo presentado en la ilustración 31 y 32. Para comprender este resultado es necesario tener presente el criterio de daño definido en la sección anterior.

En la ilustración 31 se puede observar que hay una zona de intenso fracturamiento en toda el área circundante al pozo, representada en color azul. Al observar esta área se desprende que el explosivo está realizando el trabajo de fragmentar la roca en todo el sector de la pasadura. Con esta información y el análisis bibliográfico realizado, es factible plantear una propuesta para la reducción de la pasadura para el caso base.

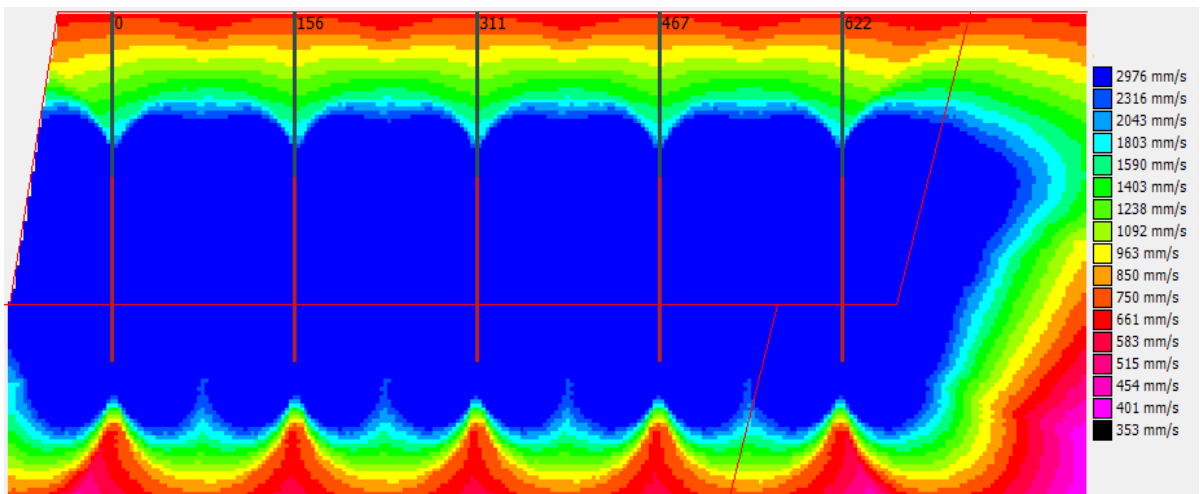


Ilustración 31 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 3 m (Burden)

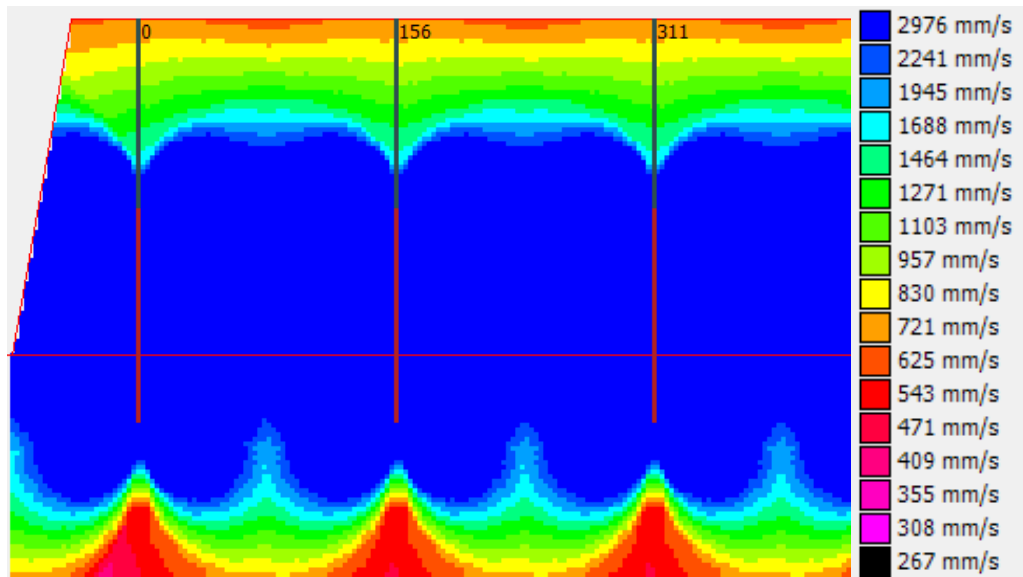


Ilustración 32 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 3m (Espaciamiento)

Considerando que la simulación anterior sugiere que es posible la reducción de la pasadura, se realiza una simulación con los mismos parámetros de diseño y carguío del caso base, pero con una pasadura de 2.5 m y también con una pasadura de 2 m. En la tabla 26 se presentan los parámetros de diseño de perforación y tronadura para estas 2 propuestas.

Los resultados de las simulaciones antes señaladas, son presentados en las ilustraciones 33 y 34 para pasadura de 2.5 metros y en las ilustraciones 35 y 36 para el caso de pasadura de 2 metros.

Tabla 26 - Paámetros de perforación y tronadura de las propuestas de reducción de pasadura.

PRODUCCIÓN			Propuesta 1 2.5 m Pasadura	Propuesta 2 2 m Pasadura
		<b>Unidad</b>		
	<b>Pasadura</b>	m	2.5 m	2.0 m
<b>DISEÑO DE CARGUÍO</b>	<b>Taco</b>	m	8.5 m	8.5 m
	<b>Aire</b>	m	0.0 m	0.0 m
	<b>Explosivo</b>	tipo	Fortan Advantage 50	Fortan Advantage 50
	<b>Densidad de Explosivo</b>		1.24 g/cc	1.24 g/cc
	<b>Densidad Lineal</b>		94 kg/m	94 kg/m
	<b>Longitud de Carga</b>		9.5 m	9 m
	<b>Carga por Pozo</b>		849 kg/pozo	802 kg/pozo
	<b>Energía Efectiva del Explosivo</b>		2.74 MJ/kg	2.74 MJ/kg
	<b>Energía Efectiva por pozo</b>		2324 MJ/pozo	2195 MJ/pozo
	<b>Energía Efectiva por tonelada</b>		0.52 MJ/ton.	0.49 MJ/ton.
	<b>Factor de Carga Total</b>		189 gr/ton.	179 gr/ton.

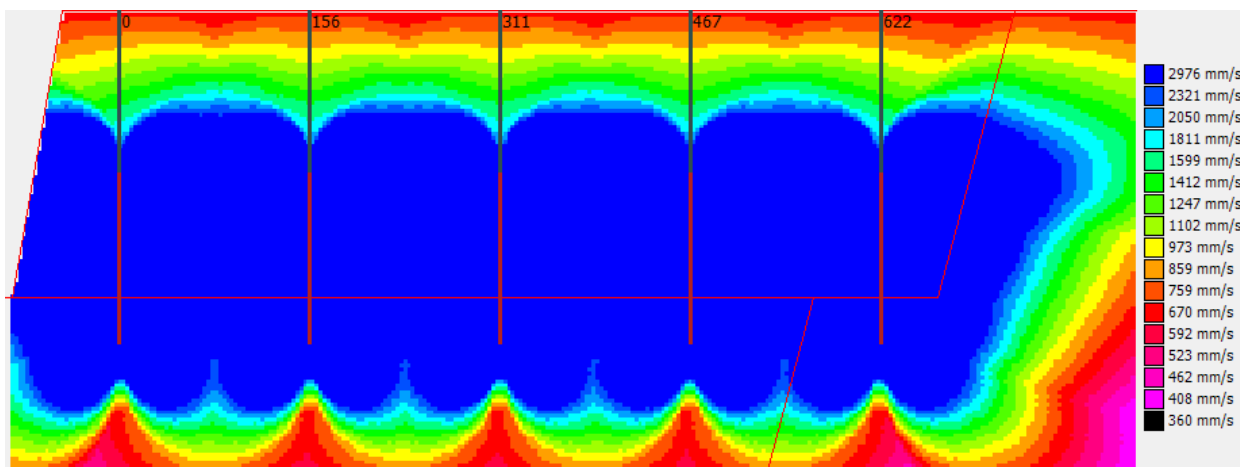


Ilustración 33 – Resultado Modelo Vibraciones BDA caso pasadura 2.5m (Burden)

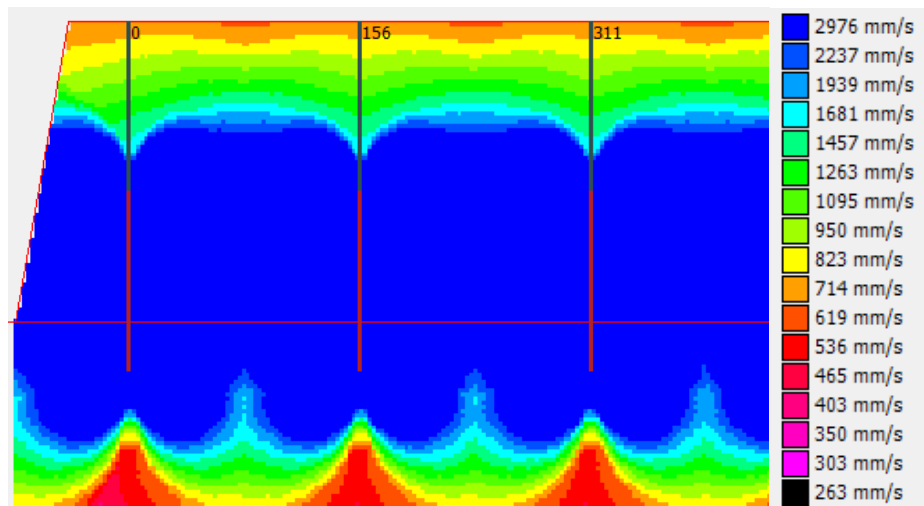


Ilustración 34 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 2.5m (Espaciamiento)

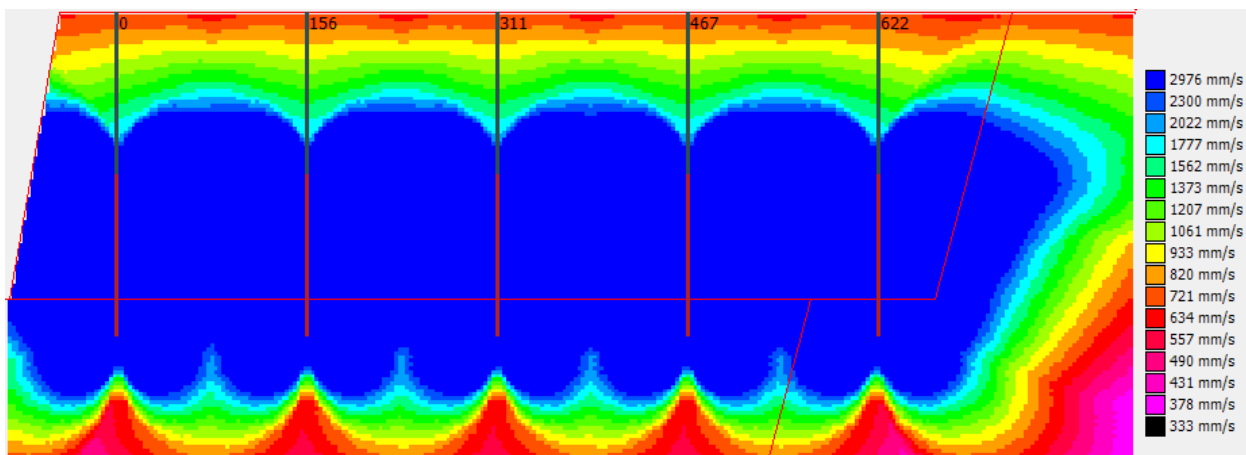


Ilustración 35 – Halo vibraciones caso pasadura 2 mts.

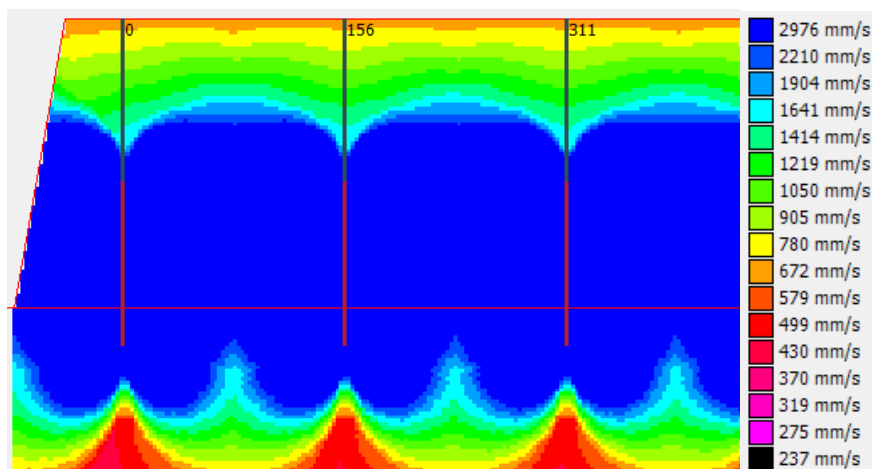


Ilustración 36 - Resultado Modelo Vibraciones BDA pasadura 2m (Espaciamiento)

En las ilustraciones siguientes (ilustración 37 y 38) se comparan los límites del rango mayor a 4 PPVc (2,976 mm/s), donde se puede ver a simple vista que a medida que

disminuye la pasadura, y con ello la cantidad de explosivo, se va reduciendo el área de intenso fracturamiento. En la sección correspondiente al burden se puede observar que el punto donde se intersecta el límite de las vibraciones generadas por los pozos que producen el daño necesario para fragmenta la roca se encuentra bajo la cota del piso. Se concluye así que con una reducción de la pasadura de 0.5 metros y 1 metro, aún se lograría de buena forma la fragmentación deseada para alcanzar la cota sin la presencia de cayos o patas. A diferencia, para la sección correspondiente al espaciamiento, se observa que con una pasadura de 2 metros la intersección de los límites de la vibración se genera por sobre el piso (cota de llegada). Por lo que la pasadura más apropiada para el caso base es de 2.5 metros.

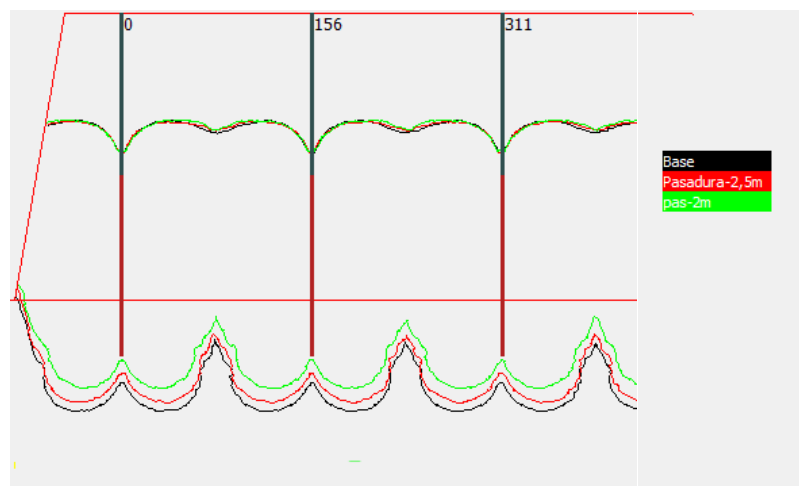


Ilustración 37 - Comparación Contorno 4PPVc de los distintos casos. (burden).

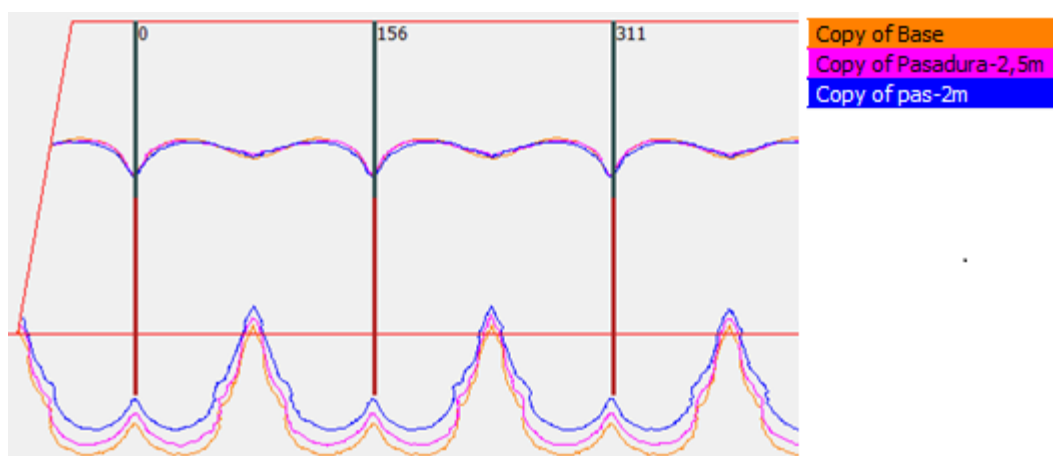


Ilustración 38 - Comparación contorno 4PPVc de los distintos casos (Espaciamiento)

#### 4.5 Pruebas en terreno y resultados

Entre septiembre y noviembre de 2017 se realizaron pruebas en la fase 3, incorporando cambios en los parámetros de perforación y tronadura. En la tabla siguiente se muestra las distintas configuraciones para las pruebas realizadas.



Tabla 27 - Parámetros de perforación y tronadura pruebas

PRODUCCIÓN		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
DISEÑO DE MALLA	Altura de Banco	15 m	15 m	15 m
	Densidad de Roca	2.60 g/cc	2.60 g/cc	2.60 g/cc
	Diámetro	12 1/4 in	12 1/4 in	12 1/4 in
	Buden	9.6 m	9.6 m	9 m
	Espaciamiento	11 m	11 m	10.5 m
	Relación (E/B)	1.15	1.15	1.15
	Pasadura	3 m	2.5 m	2.5 m
	Área	105 m <sup>2</sup>	105 m <sup>2</sup>	96 m <sup>2</sup>
	Volumen por pozo	1576 m <sup>3</sup>	1576 m <sup>3</sup>	1433 m <sup>3</sup>
	Toneladas por pozo	4097 ton	4097 ton	3726 ton
	IP	228 ton/m	228 ton/m	213 ton/m
DISEÑO DE CARGUÍO	Taco	8.5 m	8 m	8 m
	Explosivo	Fortan Advantage 50	Fortan Advantage 50	Fortan Advantage 50
	Densidad de Explosivo	1.24 g/cc	1.24 g/cc	1.24 g/cc
	Longitud de Carga	9.5 m	9.5 m	9.5 m
	Carga por Pozo	896 kg/pozo	896 kg/pozo	896 kg/pozo
	Energía Efectiva por pozo	2453 MJ/pozo	2453 MJ/pozo	2453 MJ/pozo
	Energía Efectiva por tonelada	0.60 MJ/ton	0.60 MJ/ton	0.66 MJ/ton
Factor de Carga Total	219 gr/ton	219 gr/ton	241 gr/ton	

En estas pruebas se le realizaron las mismas mediciones que para el caso base, excepto que no se midió la velocidad de detonación, debido a que se utilizó el mismo explosivo y los mismos camiones fábricas ya calibrados. Es importante mencionar que para obtener resultados confiables es necesario verificar que se esté cargando de buena manera la malla a tronar, ya que se pudo apreciar en terreno que puede haber diferencias entre lo que se propone como área de diseño y lo que realmente se realiza en operaciones. En la tabla 28 se presentan los resultados obtenidos de costos reales de tronadura y la fragmentación monitoreada para estos casos.

Tabla 28 - Resultados para las pruebas de fragmentación y costos reales

	Taco [m]	P80 [in] Swebrec	P80 [in] R-R	Costo Tron [USD/ton]	Costo P&T [USD/ton]
<b>Base 10x11.5</b>	8.5	4.2	4.8	0.100	0.156
<b>(1)9.6x11</b>	8.5	3.9	4.3	0.115	0.176
<b>(2)9.6x11</b>	8	3.5	4	0.108	0.169
<b>(3)9x10.5</b>	8	3.4	3.8	0.124	0.190

Al observar los resultados de la tabla 28 se puede apreciar que las pruebas 2 y 3 cumplen con el requisito de fragmentación solicitado por Lomas bayas; por el contrario, la prueba uno no cumple con la fragmentación. Por otro lado, la prueba dos posee un costo de tronadura y un costo de perforación y tronadura menor que el de la prueba tres, por lo que la configuración de la prueba dos es la más apropiada de las tres. Considerando lo anterior, se propone que la configuración de la prueba dos sea el nuevo estándar de comparación, ya que es la configuración que cumple con la fragmentación requerida al menor costo, por lo cual en la sección siguiente se realizará el estudio de pasadura para esta configuración (9.6x11).

#### 4.6 Análisis de resultados

En esta sección se analizaron los resultados obtenidos en las secciones anteriores, así como también los estudios asociados a estos resultados. Como se dijo anteriormente, al analizar los parámetros de perforación y tronadura, se concluye que se debe variar el burden o el taco para obtener una mejor fragmentación. Basado en esto se realizaron pruebas variando estos parámetros con el objetivo de mejorar la fragmentación en la Fase 3. Los resultados de las pruebas antes señaladas se compararon con los resultados del modelo predictivo de fragmentación y se presentan en la tabla 29. Para comprender mejor la tabla se asignó el tamaño de la malla asociado al número de la prueba entre paréntesis y finalmente si son resultados de terreno (real) o del modelo (teórico (teo)).

Tabla 29 - Comparación resultados reales vs teóricos

	Taco [m]	Pasadura [m]	P80 [in] Swebrec	Costo Tron. [USD/ton]	Costo P&T [USD/ton]
<b>Base 10x11.5</b>	8.5	3	4.2	0.100	0.156
<b>(1) 9.6x11 real</b>	8.5	3	3.9	0.115	0.176
<b>(1) 9.6x11 teo</b>	8.5	3	3.9	0.110	0.172
<b>(2) 9.6x11 real</b>	8	2.5	3.5	0.108	0.169
<b>(2) 9.6x11 teo</b>	8	2.5	3.6	0.110	0.170
<b>(3) 9x10.5 real</b>	8	2.5	3.4	0.124	0.190
<b>(3) 9x10.5 teo</b>	8	2.5	3.3	0.123	0.189

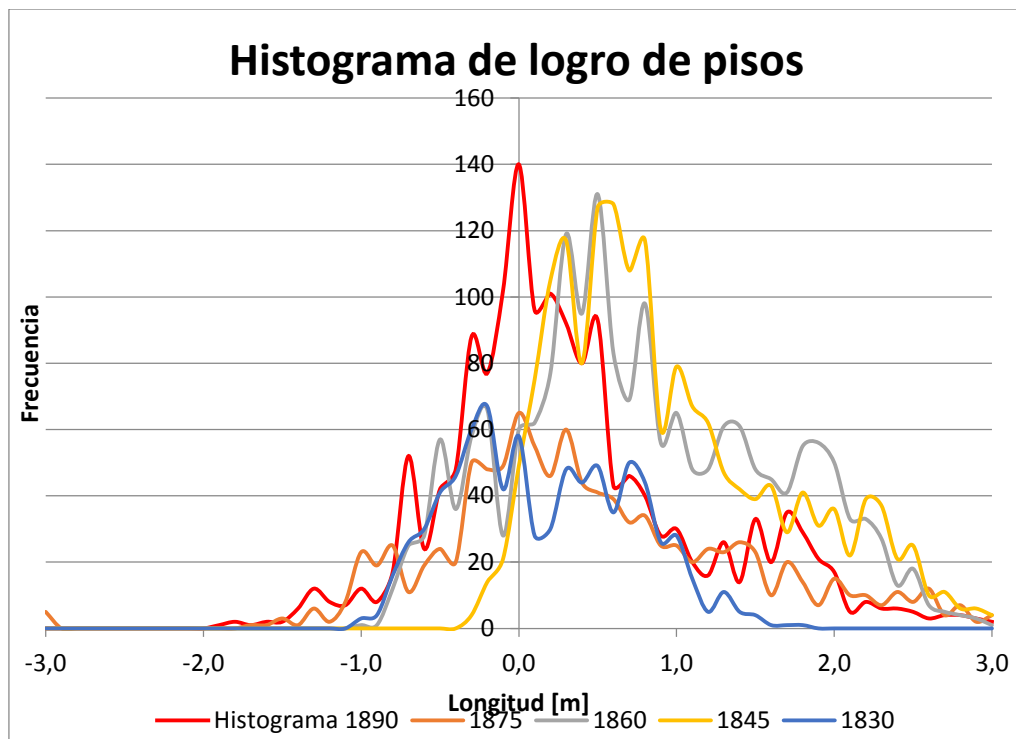
De la tabla anterior se desprende que el modelo entregó una buena aproximación del P80. Con estos resultados se pueden modificar las variables del modelo para buscar la mejor configuración para el explosivo Fortan Advantage 50, análisis que se incluye al final de esta sección. Continuando con el análisis de la tabla, se puede apreciar que hay una desviación en los costos, esto se puede asociar a lo ya antes mencionado, en relación a que los pisos presentan una alta desviación al momento de extraer el banco y dejar los pisos finales. Por lo que en ocasiones se debe cargar más explosivo y en otras ocasiones menos, si es que los pisos quedaron altos o bajos respectivamente, esto se realiza para mantener el taco que se programó para el polígono a tronar. Lo anterior genera que se tenga una mayor cantidad de explosivo (pisos altos) para las toneladas calculadas teóricamente. Por otro lado, está el error que existe al cargar los pozos donde se puede tener una desviación de centímetros al momento de dejar el taco. Es decir que al cargar el pozo el operador deje menos taco del programado. Lo anterior también genera que se tenga más o menos explosivo en el pozo y con ello un mayor o menor costo por tonelada.

En la sección 4.2.6 se analizaron los pisos que se dejan en Lomas Bayas y el resultado fue que se obtienen pisos desviados en ambas direcciones (sectores altos y bajos), pero en promedio están un poco altos. Siguiendo la metodología anterior se realizó el mismo estudio para los bancos 1860, 1845 y la mitad del 1830. En la tabla 30 se presentan la configuración de la malla y pasadura para cada banco estudiado.

*Tabla 30- malla y pasadura por banco*

<b>Banco</b>	<b>Malla</b>	<b>Pasadura</b>
<b>1890</b>	10x11.5	3 m
<b>1875</b>	10x11.5	3 m
<b>1860</b>	9.6x11	3 m
<b>1845</b>	9x10.5	2.5 m
<b>1830</b>	9x10.5	2.5 m

Se realizó un histograma para los pisos de los bancos presentados anteriormente, que se muestra en la ilustración 39.



*Ilustración 39 - Histograma logro de pisos bancos 1890 al 1830*

Al analizar el histograma anterior y comparar los pisos de los bancos 1890 y 1875 con el banco 1860 se observa que los pisos se encuentran más altos que los bancos 1890 y 1875, lo que no tiene relación con la disminución del tamaño de la malla, ya que al disminuir la malla y mantener la pasadura en 3 metros debiese presentarse mejores pisos. Por otro lado, al comparar el banco 1860 con el banco 1845 no se aprecian diferencias significativas al estrechar la malla y reducir la pasadura a 2.5 m, por lo que es posible concluir que se puede realizar este cambio sin generar impactos negativos en los pisos. Lo anterior se confirma al analizar el banco 1830, ya que posee la misma configuración que el banco 1845 y presenta un mejor logro de pisos. Por todo lo anterior, es posible concluir que no hay una correlación entre la configuración de los parámetros de perforación y tronadura con el logro de los pisos. Lo anterior es posible explicarlo debido a que al extraer el banco no hay un control de pisos por parte de topografía y se prioriza la producción y los operadores de palas dejan de lado el logro de los pisos.

Dicho lo anterior, en el sentido que no existe una correlación entre el logro de pisos y la configuración de los parámetros de perforación y tronadura, y que la diferencia de pisos obedece más bien a problemas operacionales, se analizó la posibilidad de una reducción de la pasadura, pero sólo de la malla que sí logra los objetivos de fragmentación, o sea la malla de 9.6x11 metros.

Para realizar este análisis se utilizó el modelo de vibraciones generado en la sección 4.5 y se consideró una malla de 9.6x11 con 2.5 m de pasadura y 8m de taco. Al simular con el programa este escenario se obtuvo el resultado que se observa en la ilustración 40 siguiente para la sección correspondiente al burden.

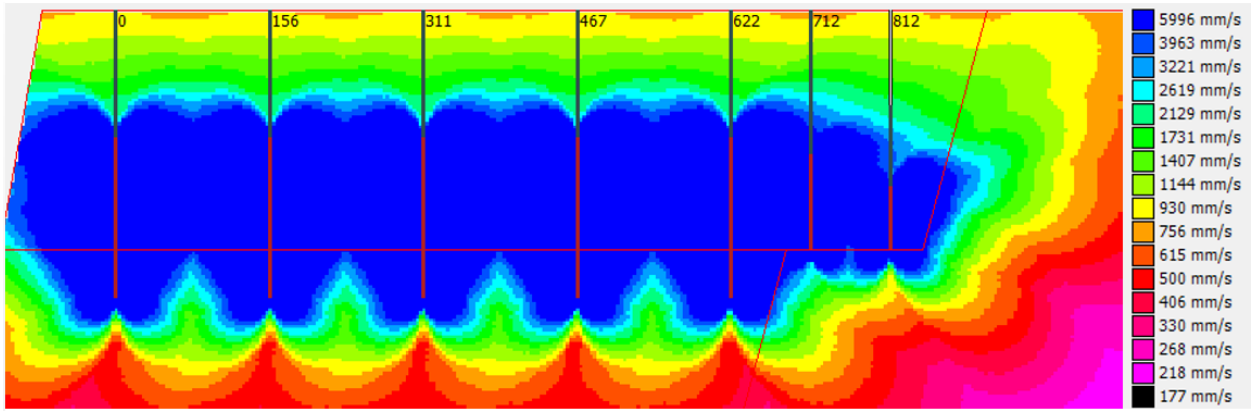


Ilustración 40 - Simulación PPV malla 9.6x11 m perfil burden

Se realizó además la simulación para cuatro casos de pasadura: 3, 2.5, 2 y 1.5 metros (tabla 31). Una vez efectuada la simulación con resultados similares al de la ilustración 40, se procedió a superponer los límites de cuatro veces el PPV crítico, obteniéndose como resultado la ilustración 41 para el perfil burden y la ilustración 42 para el perfil espaciamiento. Nuevamente el perfil que define la pasadura es el de espaciamiento, dado que presenta una mayor distancia entre los pozos.

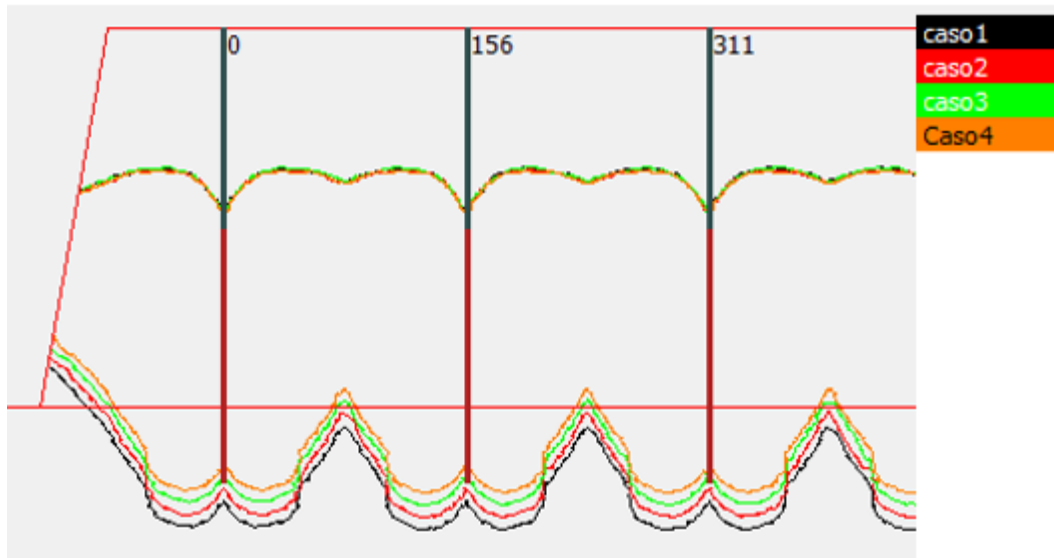


Ilustración 41 - Limite PPV critico malla 9.6x11m perfil burden (casos superpuestos)

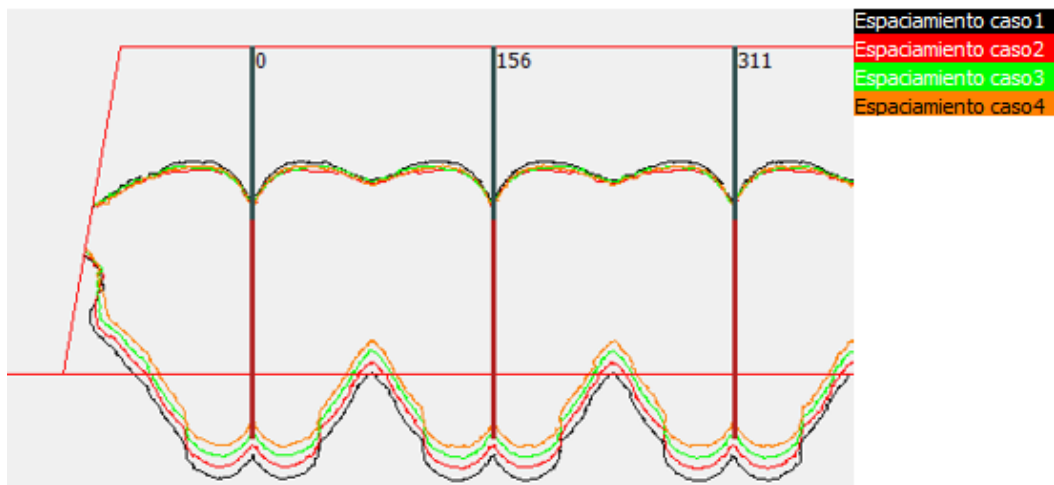


Ilustración 42 - Limite PPV critico malla 9.6x11m perfil espaciamiento (casos superpuestos)

Como se ve en las ilustraciones anteriores la pasadura más adecuada sería la de 2.5 metros, pero como es el resultado de un modelo este se debe calibrar, para lo cual se propuso utilizar el daño real provocado en la pared al momento que se efectuó la medición de vibraciones. Esto se realizó de manera manual buscando el límite de vibraciones que genera el daño real. En la ilustración 43 se presenta el daño real (en morado) en comparación con el banco de diseño (mostaza) y el halo de vibraciones asociado a el daño real producido en la pared el cual corresponde a 2400 mm/s. Por lo tanto de esta imagen se puede concluir que el daño real que se está produciendo se genera a las 2400 mm/s, debido a esto, la pasadura para el caso de un burden de 9.6 m y espaciamiento de 11 m será de 2 metros.

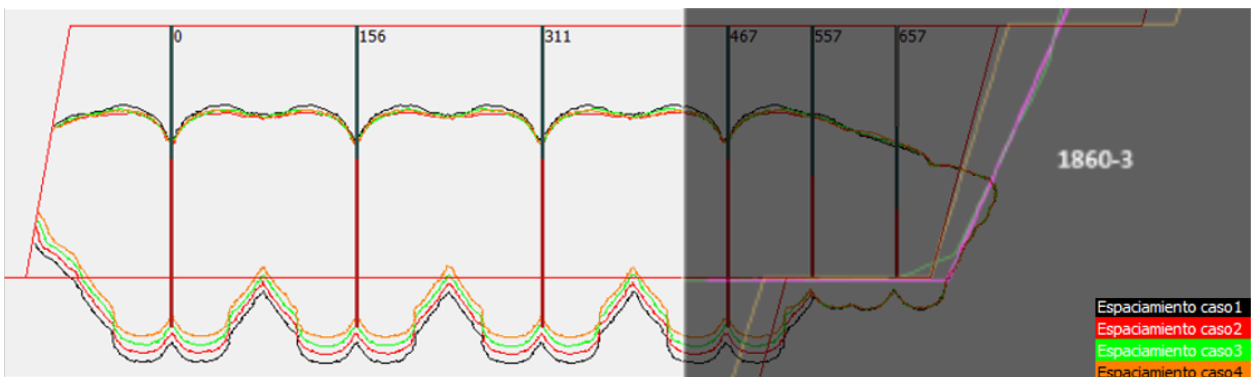


Ilustración 43 - Halo vibracion real a 2400 mm/s perfil espaciamiento (casos superpuestos)

Tabla 31 - Pasadura para los distintos casos

Caso	Pasadura [m]
1	3
2	2.5
3	2
4	1.5

Para resumir los resultados antes obtenidos se presenta una tabla con los resultados de la malla 9.6x11 m.

Tabla 32 - Resumen resultados malla 9.6x11m

Caso	Pasadura [m]
<b>Burden</b>	9.6 [m]
<b>Espaciamento</b>	11 [m]
<b>Pasadura</b>	2.5 [m]
<b>Taco</b>	8 [m]
<b>Explosivo</b>	Fortan Advantage 50
<b>Diámetro</b>	12 ¼ [pulg]
<b>Factor de Carga</b>	212.5 [gr/ton]
<b>Granulometría P80</b>	3.5 [pulg]
<b>Rendimiento Pala 56 m3</b>	9,299
<b>Pisos</b>	Desviados*

La tabla anterior nos muestra que se alcanza el objetivo de fragmentación deseado junto con que se mejora el rendimiento de la pala con una tasa de excavación de 9300 ton/hr de excavación. Es decir las palas están moviendo una mayor cantidad de material que antes.

Finalmente, se utilizó el modelo de fragmentación ya validado para encontrar la mejor configuración de burden, espaciamento y taco para el explosivo Fortan Advantage 50, siguiendo la misma metodología anterior obteniendo como resultado la siguiente ilustración:

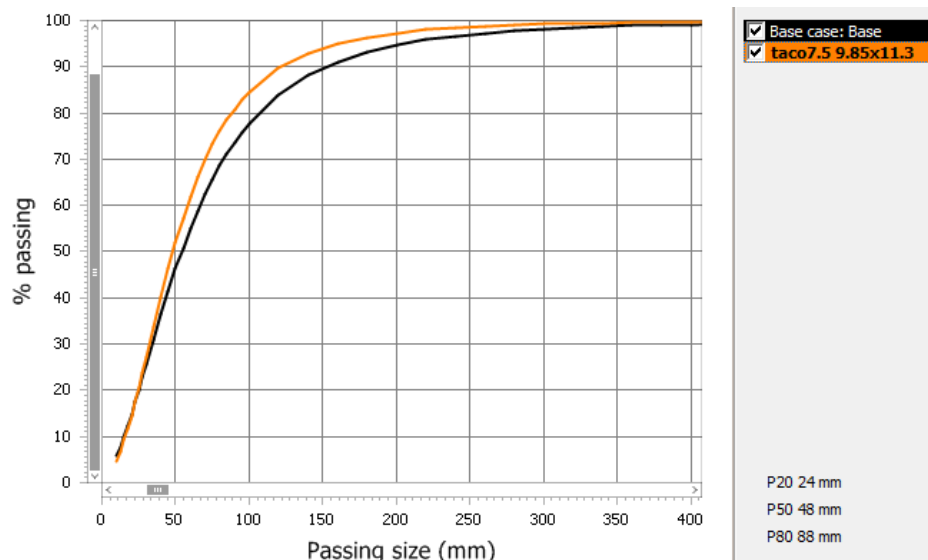


Ilustración 44 - Resultados Configuración Óptima

En la siguiente tabla se comparan los resultados de fragmentación y la evaluación económica de las configuraciones principales:

Tabla 33 - Resultados evaluación económica Fortan Extra.

	Taco [m]	P80 [in]	Costo Tron [USD/ton]	Costo P&T [USD/ton]
<b>10x11.5</b>	8.5	4.2	0.100	0.156
<b>9.6x11</b>	8	3.6	0.111	0.171
<b>9.8x11.3</b>	7.5	3.3	0.111	0.167

Dado los resultados anteriores se recomienda utilizar una malla de dimensiones de 9.8 metros de burden y 11.3 metros de espaciamento, manteniendo la relación  $E/B=1.15$ , junto con un taco de 7.5 metros y 2.5 metros de pasadura. Esta configuración, según el modelo validado anteriormente, genera mejores resultados de fragmentación y adicionalmente respeta lo calculado teóricamente en la sección 4.3.1, donde se concluye que el taco para el diámetro utilizado debiese ser entre 7.7 y 4.6 metros. Por otro lado, esta nueva configuración genera ahorros con respecto a la malla 9.6x11 puesto que con mismo costo de tronadura se obtiene el ahorro en el costo de perforación de aproximadamente 0.004 USD/ton.

Siguiendo la misma lógica anterior se realiza una simulación de vibraciones para determinar la pasadura más adecuada para esta nueva malla (9.8x11.3), dando como resultado las siguientes ilustraciones:

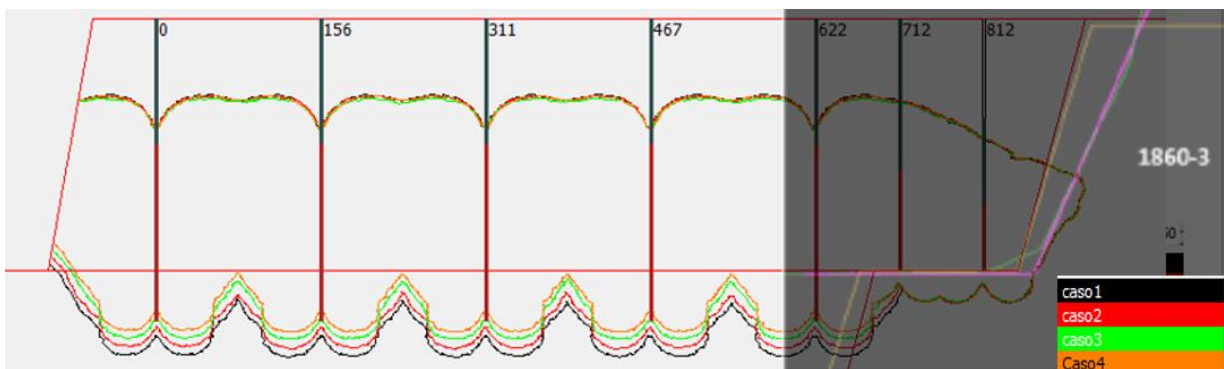


Ilustración 45 - resultados vibraciones malla 9.8x11.3 perfil burden



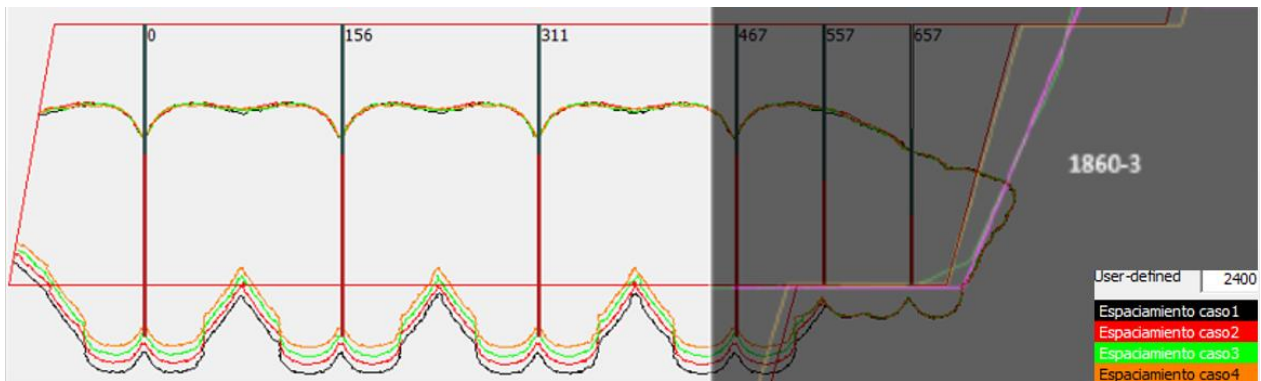


Ilustración 46 - resultados vibraciones malla 9.8x11.3 perfil espaciamiento

De las ilustraciones anteriores se concluye que la pasadura más apropiada para esta configuración es 2.5 m. Dado lo anterior, se recomienda realizar pruebas con una malla de 9.8x11.3, con 7.5 metros de taco y 2.5 metros de pasadura.

#### 4.7 Propuesta expansión malla

Como se dijo al inicio de este trabajo, el segundo objetivo es generar una propuesta técnica-económica con un explosivo de mayor energía para mejorar la productividad, sin ver afectados los resultados del proceso. Además, como el caso base (malla de 10x11.5) no cumple con el objetivo de fragmentación requerido por Lomas Bayas, se tomó ahora como punto de comparación la malla de 9.6x11 m, ya que esta es hasta el momento la única que cumple con el objetivo antes mencionado (probado en terreno). En la tabla 33 se muestra la configuración de comparación o de inicio para esta parte del estudio.

Tabla 34 - Parámetros prueba 2

Parámetro		Prueba 2	Parámetro		Prueba 2
<b>DISEÑO DE MALLA</b>	<b>Altura de Banco</b>	15 m	<b>DISEÑO DE CARGUÍO</b>	<b>Taco</b>	8 m
	<b>Densidad de Roca</b>	2.60 g/cc		<b>Explosivo</b>	Fortan Advantage 50
	<b>Diámetro Buden</b>	12 1/4 in		<b>Densidad de Explosivo</b>	1.24 g/cc
	<b>Espaciamiento</b>	11 m		<b>Longitud de Carga</b>	9.5 m
	<b>Relación (E/B)</b>	1.15		<b>Carga por Pozo</b>	896 kg/pozo
	<b>Pasadura</b>	2.5 m		<b>Energía Efectiva por pozo</b>	2453 MJ/pozo
	<b>IP</b>	234 ton/m		<b>Energía Efectiva por tonelada</b>	0.60 MJ/ton
				<b>Factor de Carga Total</b>	219 gr/ton

A continuación se aplica la metodología de McKenzie para el rediseño de mallas utilizando un explosivo diferente, en este caso se utilizará el explosivo Fortan Extra 50. Esta metodología utiliza la siguiente ecuación para definir la expansión de la malla.

$$FE = \left(\frac{RBS_2}{RBS_1}\right)^\alpha \quad (20)$$

donde:

FE: Factor de escalamiento

RBS<sub>1</sub>: Potencia relativa en volumen del explosivo actual

RBS<sub>2</sub>: Potencia relativa en volumen del nuevo explosivo

α: factor entre 0.6 y 0.7 inicialmente, con un máximo de 1

La ecuación anterior entrega el factor de escalamiento, con este factor se calcula directamente el nuevo burden y espaciamento. Es importante mencionar que, según McKenzie, el factor alfa debe ser entre 0.6 a 1, si fuera posible utilizar un alfa mayor a uno quiere decir que la malla con el explosivo anterior no era la óptima. Por lo tanto utilizando la ecuación 20 se obtiene el siguiente resultado para alfa igual a 0.7 y 1 respectivamente:

$$FE = \left(\frac{1.91}{1.79}\right)^{0.7} = 1.047$$

$$FE = \left(\frac{1.91}{1.79}\right)^1 = 1.067$$

Tabla 35 - Expansión Malla Fortan Extra

Malla	alfa	FE	Nuevo Burden	Nuevo Espaciamento
<b>9.6x11</b>	0.7	1.047	10	11.5
<b>9.6x11</b>	1	1.067	10.2	11.7

Posteriormente, el resultado anterior se ingresa al modelo de fragmentación obtenido y validado para el explosivo Fortan Advantage 50. A este modelo se le ingresa el nuevo explosivo Fortan Extra y se realiza la misma metodología que se utilizó para el explosivo Fortan Advantage 50, es decir, se varía el taco para las distintas mallas obtenidas. Al realizar este ejercicio el programa entrega las posibles curvas de fragmentación con este nuevo explosivo. Estas se presentan en la ilustración 44 y los porcentajes pasantes más representativos en la tabla 35.

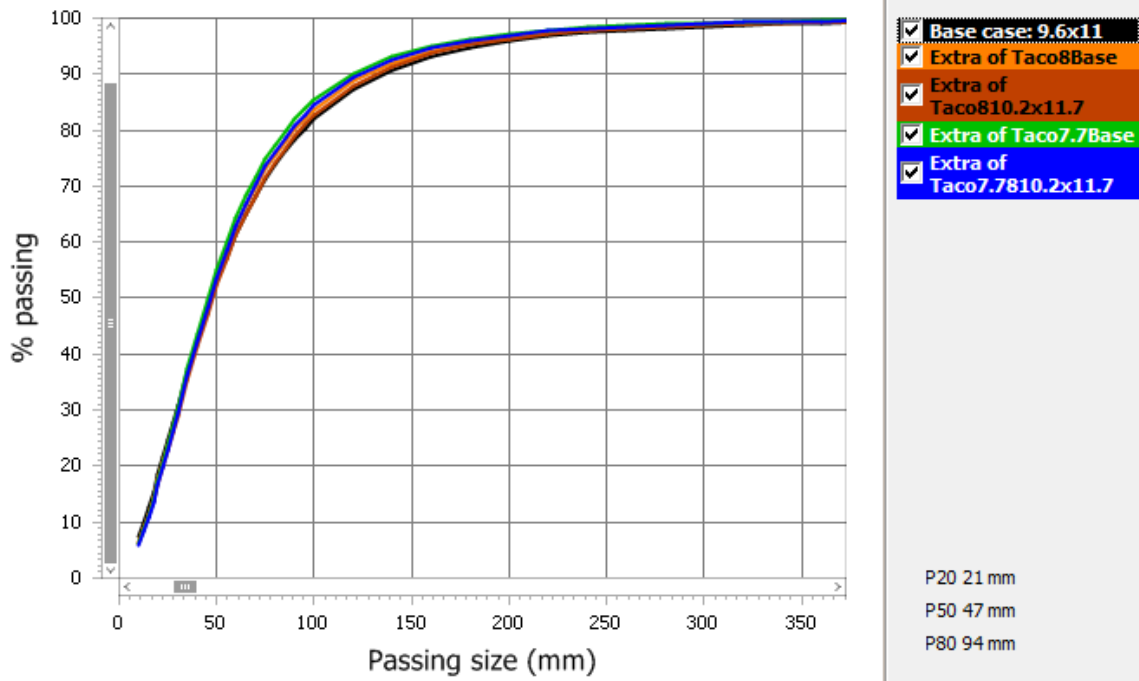


Ilustración 47 - Curvas de fragmentación para Fortan Extra 50

Tabla 36 - Porcentajes pasantes Fortan Extra 50

Malla	Taco [m]	P50 [in]	P80 [in]
<b>9.6x11</b>	8	1.9	3.7
<b>10x11.5</b>	8	1.8	3.5
<b>10x11.5</b>	7.7	1.8	3.4
<b>10.2x11.7</b>	8	1.9	3.6
<b>10.2x11.7</b>	7.7	1.9	3.5

Al igual que para Fortan Advantage 50, se realizó una evaluación económica de los distintos casos que se generaron al variar la malla y el taco, esto con el objetivo de poder seleccionar de mejor forma la configuración más adecuada de los parámetros de perforación y tronadura. La evaluación económica realizada se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 37 - Evaluación económica casos Fortan Extra

	Taco [m]	Pasadura [m]	P80 [in]	Costo Tron [USD/ton]	Costo P&T [USD/ton]
<b>9.6x11</b>	8	2.5	3.5	0.111	0.171
<b>(1) 10x11.5</b>	8	2.5	3.5	0.118	0.172
<b>(2) 10x11.5</b>	7.7	2.5	3.4	0.125	0.180
<b>(3) 10.2x11.7</b>	8	2.5	3.6	0.117	0.170
<b>(4) 10.2x11.7</b>	7.7	2.5	3.5	0.121	0.173

De la tabla anterior se desprende que la única configuración que genera un beneficio económico es la configuración 3, la cual contempla una malla de 10.2x11.7 y un taco de 8 m. Por lo tanto se recomienda hacer este cambio, ya que se obtendrán resultados de fragmentación similar con un pequeño ahorro, pero sobre todo con un mejor índice de perforación. Esto trae como consecuencia que para la misma cantidad de pozos realizados por las perforadoras actuales, se tendrá una mayor cantidad de toneladas removidas con resultados de fragmentación similar. Es importante mencionar que el modelo se validó con el explosivo Fortan advantage 50, por lo que es recomendable realizar pruebas para validar el modelo con el nuevo explosivo Fortan Extra 50.

Además, se debe realizar un estudio detallado de la pasadura para este nuevo explosivo, ya que el modelo de vibraciones está asociado al explosivo Fortan Advantage 50 no se realizó para el nuevo explosivo.

En la siguiente tabla se exponen los parámetros de perforación y tronadura para la propuesta con el explosivo Fortan Extra 50

Tabla 38 - Propuesta con Fortan Extra 50

Parámetro		Prueba 2	Parámetro		Prueba 2
<b>DISEÑO DE MALLA</b>	<b>Altura de Banco</b>	15 m	<b>DISEÑO DE CARGUÍO</b>	<b>Taco</b>	8 m
	<b>Densidad de Roca</b>	2.60 g/cc		<b>Explosivo</b>	Fortan Extra 50
	<b>Diámetro</b>	12 1/4 in		<b>Densidad de Explosivo</b>	1.24 g/cc
	<b>Buden</b>	10.2 m		<b>Longitud de Carga</b>	9.5 m
	<b>Espaciamiento</b>	11.7 m		<b>Carga por Pozo</b>	896 kg/pozo
	<b>Relación (E/B)</b>	1.15		<b>Energía Efectiva por pozo</b>	2639 MJ/pozo
	<b>Pasadura</b>	2.5 m		<b>Energía Efectiva por tonelada</b>	0.57 MJ/ton.
	<b>IP</b>	266 ton/m		<b>Factor de Carga Total</b>	139 gr/ton.

## Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

Al revisar y analizar el caso base se pudo observar que presentaba un taco demasiado largo, la metodología de Chiappeta indica que para lograr el objetivo de fragmentación se debe reducir el largo del taco. Por otro lado, el análisis teórico indica que se debe disminuir la malla para obtener la fragmentación deseada.

Continuando con el caso base, se determinó que la pasadura que se estaba utilizando era también demasiado larga, por lo que el proceso de perforación resulta poco eficiente. Además, el logro de pisos no se alcanza por un tema operacional y no tiene relación con el largo de la pasadura.

Al realizar las pruebas con distintas configuraciones se identificó una configuración que logra los resultados de fragmentación requeridos junto con mejorar la tasa de excavación y mantener las condición de los pisos: malla de 9.6 m de burden por 11 m de espaciamento 8 m de taco y 2.5 m de pasadura. Por otro lado, al probar la malla de 9x10.5 con taco 8 y pasadura 2.5 m, esta también cumple con los resultados esperados de fragmentación.

Las pruebas antes mencionadas permitieron validar el modelo utilizado para predecir la fragmentación de las distintas configuraciones utilizadas, ya que se ajusta con buena aproximación a los resultados obtenidos, con diferencias menores a 0.1 pulgadas. Además, ya que el modelo se validó y responde de buena manera a los cambios realizados, este modelo puede ser utilizado para encontrar una mejor configuración de burden, espaciamento y taco manteniendo los resultados de fragmentación.

Por otra parte, al realizar un análisis detallado de los pisos obtenidos con las distintas configuraciones, se observa que su comportamiento no tiene una relación con la configuración de perforación y tronadura, si no que más bien está determinado por la operación de carguío realizada por las palas. Esto se concluye debido a que no se observa una mejora al mantener la pasadura y disminuir la malla, así como también que a igualdad de condiciones un piso queda mejor que otro.

Además del estudio teórico y pruebas realizadas, junto con el modelo de vibraciones elaborado, se puede concluir que la reducción de la pasadura incluso es posible para la malla de 9.6x11 metros, ya que la pasadura de 2.5 metros no genera resultados negativos respecto al logro de pisos, más bien esta configuración genera mejores resultados en cuanto a rendimientos de equipos de carguío.

Posteriormente, se realizó un estudio de expansión de mallas con un nuevo explosivo llamado Fortan Extra 50, el cual tiene una mayor energía por volumen y por peso que el explosivo actual. Lo anterior permite que sea posible una expansión de la malla. Al utilizar la metodología de McKenzie se obtiene una malla de 10x11.5 metros en primera instancia, pero, al utilizar un alfa igual a 1 se obtiene una malla de 10.2x11.7.

Finalmente, se utilizó el modelo de fragmentación antes validado, obteniendo buenos resultados de fragmentación para ambos casos, por lo cual se decidió realizar la simulación de fragmentación para distintas configuraciones de las dos mallas antes mencionadas, es decir variando el taco. Finalmente, se complementó con una evaluación económica donde se concluye que la configuración óptima para la expansión de la malla de 9.6x11 m es a una malla de 10.2x11.7 m, con 2.5 metros de pasadura y 8 metros de taco. Esta malla, según el modelo, genera una fragmentación similar a la obtenida por el caso inicial de comparación (malla 9.6x11 m) y se obtiene un pequeño ahorro de 0.001 USD/ton.

## 5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones que se dan para continuar este trabajo en Lomas Bayas son las siguientes:

Buscar una mejor configuración de burden, espaciamiento y taco para el explosivo inicial Fortan Advantage 50, esto se realizó con el modelo antes señalado y validado, dando como resultado una malla de dimensiones de 9.8 metros de burden y 11.3 metros de espaciamiento, manteniendo la relación  $E/B=1.15$ , junto con un taco de 7.5 metros y 2.5 metros de pasadura, esta configuración según el modelo validado anteriormente, genera mejores resultados de fragmentación y adicionalmente respeta lo calculado teóricamente para el taco. Por otro lado, esta nueva configuración genera ahorros con respecto a la malla 9.6x11 debido a que se tiene el mismo costo de tronadura, generando el ahorro en el costo de perforación de aproximadamente 0.004 USD/ton.

Dado lo desarrollado, junto con un análisis de la pasadura, se recomienda realizar pruebas con una malla de 9.8x11.3, con 7.5 metros de taco y 2.5 metros de pasadura, además de probar 2 metros de pasadura.

Por último se recomienda modificar la configuración de la malla 9.6x11 con 8 metros de taco y 2.5 metros de pasadura, reduciendo la pasadura a 2 metros y a 1.5 metros, en etapas progresivas, realizando un estudio de pisos para determinar si es posible o no la reducción de la pasadura.

## Capítulo 6: Bibliografía

- [1] Chacón J. “Apuntes de Perforación y Tronadura” Capítulo II, Tronadura. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- [2] López y Jimeno. “Manual de Perforación y voladura de rocas”. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- [3] Martínez P. 2006 “Optimización y mejoramiento de la tronadura en Mina Lomas Bayas”
- [4] Chavarría R. 2000. “Informe Geológico Proyecto Fortuna de Cobre”
- [5] Sauter F. 1989. “Introducción a la sismología”
- [6] Music A. 2007. “Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal, mina El Teniente”
- [7] Cunningham, C. 1983. “The Kuz-Ram model for the prediction of fragmentation from blasting”. Proc. 1st Intl. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, August 22–26.
- [8] Cunningham, C. 1987. “Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model—four years on”. Proc. 2nd Intl. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, August 23–26.
- [9] Cunningham, C. 2005. “The Kuz-Ram fragmentation model—20 years on”. Proceedings 3rd EFEE world conference on explosives and blasting, England, pp 201–210.
- [10] Ouchterlony, F. 2005. The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing. Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A), 114, A1–A16.
- [11] Spathis, A. 2012. “A three parameter rock fragmentation distribution. In Measurement and Analysis of Blast Fragmentation” Workshop hosted by 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, New Delhi, India, November 25-29.
- [12] Spathis, A. 2009. “Formulae and techniques for assessing features of blast-induced fragmentation distributions”. Proc. 9th Intl. Symp. Rock Fragmentation by Blasting, Granada, September 13–17.
- [13] Poulakidas E. “Procedimiento de operación. Medición Sísmica Cross Hole”.
- [14] Gheibie S. 2009. “Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine” International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 46. pp 967–973
- [15] Le-Feaux R. “Apunte preliminar diseño y operaciones de minas a cielo abierto”.
- [16] Bernaola J. 2013 “Perforación y Voladura de Rocas en Minería”.
- [17] Linares N. 2013 “Estudio sobre la medida de la velocidad de detonación”