

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor patrocinante
Sr. René Gómez Puigpinos

**APLICACIÓN DE CÁMARAS DE AIRE EN TRONADURA DE
PRODUCCION DE UNA MINA DE HIERRO**



CRISTHIAN GARRIDO ROJAS

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

Mayo 2020

Agradecimientos

A mis padres, por todo su sacrificio y apoyo.

A mi pareja, por todo su amor, comprensión y por estar siempre a mi lado.

A Dios, por guiarme, enseñarme y acompañarme.

A mis amigos, por toda su ayuda y por cada gran momento que me han hecho pasar.



Resumen

La tronadura es una operación sumamente importante debido a todo lo que implica que se realice de buena manera, ya que esta afecta directamente a los procesos posteriores, de modo que una mala tronadura genera costos, sin mencionar los riesgos asociados. Día a día se hace más complicado compatibilizar la extracción de los recursos con la sustentabilidad desde el punto de vista de la economía, medio ambiente y comunidades. En caso de no cumplir con las exigencias de la actualidad, al menos en Chile, pueden paralizarse o cerrarse operaciones, como el cierre de Mina Invierno, región de Magallanes y Antártica chilena. Por este motivo se hace imperativo controlar la operación para no tener problemas como el mencionado anteriormente, pero esto puede resultar costoso. La idea de este trabajo es sentar bases para estudios posteriores y demostrar la factibilidad de la utilización de cámaras de aire en tronaduras de producción para mejorar los resultados de fragmentación y disminuir las eyecciones de taco, vibraciones y emanación de polvo, a medida que se disminuye el costo en utilización de explosivos. Para esto se plantea demostrar cuantitativamente que la velocidad de detonación y presión cambian a lo largo de este espacio, incluyendo mediciones de estas variables además de resultados de fragmentación, eyecciones y vibraciones. Para lograrlo se realiza una tronadura en una mina de hierro en Chile, dividiendo la malla en una zona con cámaras de aire y otra sin cámaras de aire. Para generar estos espacios se utiliza un producto innovador, el PARAPLUG®, comercializado por la empresa FERRADA BLAST SpA.

Finalmente se demuestra una disminución en los parámetros velocidad y presión, a medida que se sube por la cámara de aire, es decir, la velocidad y presión finales en el pozo son menores que para una tronadura convencional. La fragmentación se reduce en la zona con cámara de aire respecto a la zona sin cámara de aire, lo que reduce el P_{80} de la malla general en un 3.7%. Los resultados de vibraciones en la zona con cámara de aire son 36% menores y a través de imágenes se puede ver una disminución en las eyecciones de taco y emanación de polvo.

A modo de conclusión, se refuerzan algunas teorías propuestas gracias a las mediciones de los parámetros velocidad y presión. Se demuestra la factibilidad de la aplicación (al menos en minería de hierro) de cámaras de aire en los pozos de tronadura, en base a los resultados obtenidos.

Abstract

Blasting is an extremely important process due to all that implies that it is performed in a good way, since this operation directly affects subsequent processes, so that a bad blasting generates costs, including the associated risks. Day by day it becomes more difficult to reconcile the extraction of resources with sustainability from the point of view of the economy, environment and communities. In case of not achieve the current requirements, at least in Chile, operations may be paralyzed or closed, such as the closure of Mina Invierno, Region of Magallanes and Chilean Antarctica. For this reason it becomes imperative to control the operation to avoid problems like the one mentioned above, but this can be expensive. The idea of this work is to put information for post studies and demonstrate the feasibility of using air-deck in production blasting to improve fragmentation results and decrease plug ejections, vibrations and dust emanation, as the cost is decreased. For this, it is proposed to demonstrate quantitatively that the detonation speed and pressure change throughout this space, including measurements of these variables in addition to results of fragmentation, ejections and vibrations. To achieve this, blasting is carried out in an iron mine in Chile, dividing the blast zone into an area with air-decks and another without air-decks. To generate these spaces, an innovative product is used, PARAPLUG®, marketed by the company FERRADA BLAST SpA.

Finally, detonation speed and pressure parameters decrease through the air-deck, it means, the final velocity and pressure are lower than for a conventional blasting. Fragmentation is reduced (P_{80} by 3.7%). The results of vibrations in air -deck zone are 36% lower and through images you can see a decrease in plug ejections and dust emanation.

As a conclusion, some proposed theories are reinforced thanks to the measurements of the detonation velocity and pressure parameters. The feasibility of applying air-deck in production blasting is demonstrated (at least to iron mines), based on the results obtained.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1. Presentación del tema.....	1
2. Planteamiento del problema.....	3
3. Propuesta de trabajo	3
3.1 Hipótesis	3
3.2 Objetivos	3
3.2.1 Generales.....	3
3.2.2 Específicos	4
3.2.3 Operacionales	4
4. Metodología general.....	4
4.1 Medición de presión.....	5
4.2 Medición de VOD.....	6
4.3 Medición de fragmentación.....	6
4.4 Evaluación económica.....	6
4.5 Alcances y limitaciones	6
CAPITULO II: ANTECEDENTES TEORICOS.....	8
1. Conceptos básicos	8
2. Mecanismos de fragmentación de roca	11
3. Estado del arte.....	16
3.1 Historia	16
3.2 Teorías del mecanismo de acción de la cámara de aire	18
3.3 Estudios de laboratorio	19
3.4 Estudios y resultados en terreno.....	22
3.5 Estudios con cámara de aire en Chile	25
3.5.1 Mina ubicada en Iquique	25

3.5.2 Mina ubicada en Coquimbo	27
3.6 Generalidades y observaciones de la técnica	29
CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL	30
1. Equipamiento experimental	30
2. Condiciones experimentales.....	31
2.1 Malla y características de la tronadura	31
2.2 Propiedades del explosivo	35
3. Montaje experimental	35
4. Plan de trabajo.....	40
4.1 Primeras consideraciones.....	40
4.2 Capacitación del personal.....	40
4.3 Instrumentación en terreno.....	41
4.4 Día de la tronadura	41
CAPITULO IV: RESULTADOS	43
1. Velocidad de detonación.....	43
1.1 Pozo 1	44
1.2 Pozo 2	45
1.3 Pozo 3	46
2. Presión al interior de la cámara de aire	47
3. Fragmentación	51
4. Vibraciones.....	52
5. Evaluación económica	53
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
1. Conclusiones.....	54
2. Recomendaciones.....	56
Bibliografía.....	57

Anexos	59
Anexo 1: Herramientas a utilizar	59
Anexo 2: Calibración equipo <i>ShotTrack</i> , para un cable de longitud 305 m.....	62
Anexo 3: Calibración equipo <i>ShotTrack</i> , para un cable de longitud menor o igual a 305 m (mínimo 50 m).....	62
Anexo 4: Gráficos de datos DataTrapII	64
Anexo 5: Curvas granulométricas con el método de Rosin-Rammler	66



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Disposición de cámara de aire en un pozo [6]	2
Figura 2: Diagrama de metodología general	5
Figura 3: PARAPLUG® [6].....	8
Figura 4: Estado de detonación en un pozo. Vista de perfil [11]	12
Figura 5: Propagación de ondas de choque en un pozo. Vista de perfil [11]	13
Figura 6: Estado de fracturamiento en un pozo. Vista en planta [11]	14
Figura 7: Proceso de expansión de gases al macizo. Vista de perfil [11].....	15
Figura 8: Estado de desplazamiento del material. Vista de perfil [11]	16
Figura 9: Perfiles de carga y su influencia en la forma de fracturar el macizo. Vista de perfil [14]	17
Figura 10: Oscilograma que muestra el efecto de una carga continua [17]	20
Figura 11: Oscilograma que muestra el efecto de una carga con una cámara de aire entre medio [17]	20
Figura 12: Presión vs tiempo para una columna de explosivo continua [16].....	21
Figura 13: presión vs tiempo para un pozo con cámara de aire [16]	22
Figura 14: Perfil de carga mina de Iquique para las pruebas [6].....	26
Figura 15: Malla de tronadura para las 3 pruebas de la mina en Iquique [6]	26
Figura 16: Tronadura de las 3 pruebas [6]	27
Figura 17: Perfil de carga para la prueba mina en la región de Coquimbo [6]....	28
Figura 18: Tronadura de la prueba [6].....	28
Figura 19: Malla tronadura faena y pozos seleccionados.....	32
Figura 20: Perfil de carguío de los pozos de la malla, sección sin cámara de aire	33
Figura 21: Perfil de carguío de los pozos de la malla, sección con cámara de aire	34
Figura 22: Tiempos de retardo y primer movimiento de cada pozo en la malla..	35
Figura 23: Configuración de la estructura del cable coaxial necesaria	36
Figura 24: Cable y conector unidos.....	36
Figura 25: Cable conectado al equipo ShotTrack	37
Figura 26: Vista lateral de pozos listos para realizar la prueba. Perfil de carga de los pozos seleccionados para la prueba	39
Figura 27: Montaje experimental terminado en terreno	39
Figura 28: Cronograma de trabajo preliminar	40

Figura 29: Tronadura sección con cámara de aire.....	41
Figura 30: Tronadura sección sin cámara de aire.....	42
Figura 31: Gráfico ShotTrack para la detonación del pozo 1	43
Figura 32: Perfil de pozo a partir del gráfico ShotTrack para el pozo 1 y valores de VOD por zona	44
Figura 33: Gráfico ShotTrack para la detonación del pozo 2.....	45
Figura 34: Perfil de pozo a partir del gráfico ShotTrack para el pozo 2 y valores de VOD por zona	45
Figura 35: Gráfico ShotTrack para la detonación del pozo 3.....	46
Figura 36: Perfil de pozo a partir del gráfico ShotTrack para el pozo 3 y valores de VOD por zona	46
Figura 37: Gráfica entregada por el equipo DataTrapII, resistencia vs tiempo. Canal 2, sensor de abajo, pozo 3.....	48
Figura 38: Gráfico de la zona de interés. Canal 2, resistencia de abajo, pozo 3 .	49
Figura 39: Curva granulométrica de ambos sectores.....	52
Figura 40: Gráfico de vibraciones	52
Figura 41: Sensor de presión con resistencia de carbón terminado	59
Figura 42: Equipo ShotTrack, monitor de VOD	59
Figura 43: DataTrapII.....	59
Figura 44: Rollo 305 metros cable coaxial RG6	60
Figura 45: Cable UTP de 8 hebras	60
Figura 46: Conector BNC macho	60
Figura 47: Multímetro digital	61
Figura 48: Tenaza crimpeadora BNC a presión	61
Figura 49: Stripper de cable coaxial.....	61
Figura 50: Regleta eléctrica de conexión	62
Figura 51: Ventana Device del software ShotTrack VOD monitor	63
Figura 52: Gráfico de la zona de interés. Canal 3, resistencia de arriba, pozo 3.	64
Figura 53: Gráfico de la zona de interés. Canal 4, resistencia de abajo, pozo 2 .	64
Figura 54: Gráfico de la zona de interés. Canal 5, resistencia de arriba, pozo 2 .	65
Figura 55: Gráfico de la zona de interés. Canal 6, resistencia de abajo, pozo 1 .	65
Figura 56: Gráfico de la zona de interés. Canal 7, resistencia de arriba, pozo 1 .	66
Figura 57: Curva granulométrica sector sin cámaras de aire	66

Figura 58: Curva granulométrica malla completa.....	66
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factibilidad de la técnica respecto al tipo de roca [19].....	25
Tabla 2: Rango de largos de la cámara de aire en función de RMR [19].....	25
Tabla 3: Resumen parámetros tronadura sin cámara de aire	32
Tabla 4: Resumen parámetros tronadura sin cámara de aire	33
Tabla 5: Resumen datos VOD y presión de gases calculada	47
Tabla 6: Resultados medición sensor de presión.....	50
Tabla 7: Evaluación económica	53

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	9
Ecuación 2	9
Ecuación 3	10
Ecuación 4	10
Ecuación 5	23
Ecuación 6	23
Ecuación 7	49

Nomenclatura

m	Unidad de medida de longitud, metro
d	Diámetro
VOD	Velocidad de detonación
W	Fuerza peso
T	Fuerza tensión
w	Componente vertical fuerza peso derivada de la tensión
F	Fuerza de roce
P	Presión
g/cc	Unidad de medida de densidad, gramos por centímetro cúbico
m/s	Unidad de medida de velocidad, metros por segundo
g/ton	Unidad de medida de factor de carga, gramos de explosivo por tonelada de roca
kJ/kg	Unidad de medida de energía, kilo joules por kilogramo
MPa	Unidad de medida de presión, mega pascales
s	Unidad de medida de tiempo, segundos
ms	Unidad de medida de tiempo, milisegundos
kbar	Unidad de medida de presión, kilo bar
Ohm	Unidad de medida de resistencia eléctrica
Pulg	Pulgadas
CRG	Sensor de resistencia de carbón (Carbon Resistance Gauge)
TDR	Reflectómetro de dominio de tiempo (Time-Domain Reflectometer)
USD	Dólares
USD/año	Dólares por año
ρ_e	Densidad del explosivo
FC	Factor de Carga
ADL	Air-Deck Length (se expresa en función de una parte del largo original del pozo)
ADP	Air-Deck Presplitting
RMR	Rock Mass Rating

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. Presentación del tema

La tronadura es la operación que tiene por finalidad el arranque del mineral desde el macizo rocoso, aprovechando de la mejor manera posible la energía liberada por el explosivo colocado en los pozos realizados en la etapa de perforación. El mejor resultado se obtiene al aplicar la energía justa y necesaria para generar una buena fragmentación del mineral, evitando daños en el resto del macizo [1].

La calidad de la tronadura depende en gran medida del tipo de roca y la calidad de la perforación, pero también de la secuencia de detonación, un buen primado y carguío de explosivos. Una tronadura eficiente se traduce en una granulometría adecuada para los procesos posteriores. Algunos de sus beneficios son la disminución o eliminación de los costos de tronadura secundaria o cachorro. Para la etapa de carguío y transporte significa mayor vida útil de los dientes de las palas, menor daño a las tolvas de los camiones y un mejor llenado y utilización de estos equipos. En la etapa de procesamiento una buena tronadura tiene un valor gigantesco, ya que mejora la eficiencia de todos los procesos aumentando la capacidad de tratamiento y ahorrando en costos de energía. Finalmente, se obtienen mejores recuperaciones de metal, debido a la buena liberación o separación de la mena desde la ganga [2].

Una mala tronadura no solo afecta a los procesos anteriormente mencionados, sino que también produce riesgos y costos. Algunos de estos son la presencia de bolones, sobre-quebre, proyección de rocas, emanación de polvo y vibraciones en exceso [3]. Para mitigar estos efectos existen 3 tipos de tronadura, las llamadas tronaduras controladas (pre-corte, recorte y tronadura amortiguada). Además, para cada una de las consecuencias mencionadas anteriormente, se ha estudiado y/o tratado de implementar algún método enfocado especialmente en eso, como la tronadura doble capa (para control de polvo) [3] o la disposición de tacos intermedios (para evitar la proyección de rocas). Debido a la búsqueda de mejores técnicas de tronadura es que se ha estudiado una técnica de tronadura muy eficiente que en teoría ayuda a eliminar la sobre-perforación, disminuir las vibraciones en terreno, mejorar la fragmentación y reducir el consumo de explosivos, la aplicación de cámaras de aire en

los pozos de tronadura [4]. Pruebas a escala total y pozo por pozo han sido realizadas por algunos autores. Los resultados han mostrado una reducción o eliminación de la pasadura en la perforación, reducciones en las vibraciones hasta en un 33%, reducción del consumo de explosivos entre 16 y 25%, y mejoramiento de la fragmentación hasta en un 25% [5]. Estos resultados también los ha corroborado la empresa FERRADA BLAST SpA en 3 minas distintas de Chile, notando también que la columna de polvo y la eyección de taco es menor utilizando esta técnica [4-6].

Una cámara de aire en un pozo de voladura es un espacio de aire en el cual no hay carga explosiva ni booster. La distribución de este espacio dentro del pozo depende del resultado que se quiera obtener, por ejemplo, si que quiere mejorar la fragmentación la mejor ubicación sería entre el taco y la columna de explosivos [5]. Por lo tanto, este espacio o cámara de aire, puede ir ubicado en cualquier parte del pozo cargado. La figura 1 muestra algunos ejemplos de pozos de tronadura y la ubicación de la cámara de aire.



Figura 1: Disposición de cámara de aire en un pozo [6]

El uso de las cámaras de aire se basa en el efecto del "cañón obstruido" lo cual, en minería es lo que se desea, que se fragmente el "cañón" o barreno en lugar de que salga el "proyectil" (*flyrock*) aprovechando al máximo la energía del explosivo en la fragmentación de roca [7].

2. Planteamiento del problema

Reducir costos y obtener buenos resultados es esencial en la minería, además de garantizar la seguridad y bienestar de los trabajadores en condiciones adversas. Por eso es que la utilización de una cámara de aire en los pozos de tronadura podría ser una buena alternativa para faenas que tengan problemas como los mencionados anteriormente (Capítulo I, sección 1), sin embargo, la teoría existente sobre esta metodología es incompleta y hay fenómenos que deben ser estudiados en mayor profundidad.

3. Propuesta de trabajo

La propuesta de trabajo consiste en investigar el efecto de la cámara de aire (por medio de un caso de estudio) referente a parámetros y variables de la detonación tales como la velocidad de detonación y la presión en la cámara de aire y evaluar si estos tienen relación con los resultados que se han obtenido en experiencias ya realizadas. El propósito de esto es relacionar la variación de estos parámetros con los resultados obtenidos, y dado esto, sentar una base de investigación para el futuro.

3.1 Hipótesis

El trabajo se basa en asumir que:

Los resultados de las tronaduras con pozos diseñados con una cámara de aire tienen relación con el cambio de velocidad y presión de detonación que ocurra dentro de la misma.

3.2 Objetivos

3.2.1 Generales

- Mostrar cuantitativamente la variación en los parámetros de la detonación (velocidad y presión de detonación) producto de la presencia de una cámara de aire en el pozo
- Mostrar la eficiencia de la técnica para masificar su uso en tronaduras de producción
- Sentar bases para estudios posteriores

3.2.2 Específicos

- Conocer más detalles sobre la influencia que tiene la técnica del uso de la cámara de aire en el proceso de detonación
- Evaluar el efecto de la utilización de la cámara de aire sobre la operación mina

3.2.3 Operacionales

- Medir la velocidad de detonación y la presión de detonación dentro de la cámara de aire
- Medir el efecto de la utilización de la cámara de aire sobre la fragmentación
- Medir el efecto de la utilización de la cámara de aire sobre las vibraciones
- Estimar la generación de nubes de polvo y eyección de taco utilizando cámaras de aire
- Evaluar económicamente la diferencia de costo de explosivos entre una tronadura con cámara de aire vs una tronadura convencional

4. Metodología general

La metodología del proyecto consta de 4 etapas cíclicas, las cuales son: planificar, ejecutar, analizar y evaluar (figura 2). La idea es realizar una tronadura en una faena minera ubicada en la región de Atacama en conjunto con la empresa de servicios FERRADA BLAST SpA y su mecanismo propio para implementar a un pozo una cámara de aire: el PARAPLUG®. A continuación se detalla cada una de las etapas de la estrategia:

Planificar: se planifican los pasos a seguir para que la realización de la prueba sea exitosa. Se parte pensando cómo, cuándo y dónde se llevará a cabo la experiencia. El primer paso para esto es la construcción de un cronograma, detallando las actividades a realizar y la cantidad de tiempo estimada que cada una tomará. De esta manera se tiene un control sobre los contratiempos que podrían surgir, además de contribuir al orden en la ejecución de estas. Posteriormente se define de qué manera se lleva a cabo la prueba y en qué lugar. Esta etapa también se utiliza para darle estructura al presente trabajo y se aprovecha para recabar la información necesaria junto con la revisión bibliográfica.

Ejecutar: esta etapa tiene como finalidad implementar la prueba propuesta en la etapa anterior y ejecutar la prueba para la obtención de resultados.

Analizar: análisis de los datos. Una vez obtenidos se buscará dilucidar si los beneficios que produce la cámara de aire en la tronadura se deben a un cambio en VOD o presión. Para medir el impacto que tiene la utilización de una cámara de aire en el proceso de tronadura, se mide fragmentación con la herramienta "análisis de imágenes" para obtener una curva granulométrica (aporte ORICA). Para finalizar, se evalúa el beneficio que entrega una tronadura con cámara de aire vs una tronadura convencional en base a la cantidad de explosivo ahorrado (%).

Evaluar: se realiza una evaluación de la prueba con el objetivo de encontrar oportunidades de mejora para recomendaciones y otras aplicaciones además de estudios posteriores que se puedan llevar a cabo. Se usa también esa retroalimentación para mejorar el análisis de los resultados y acercarlos a los objetivos del presente trabajo.

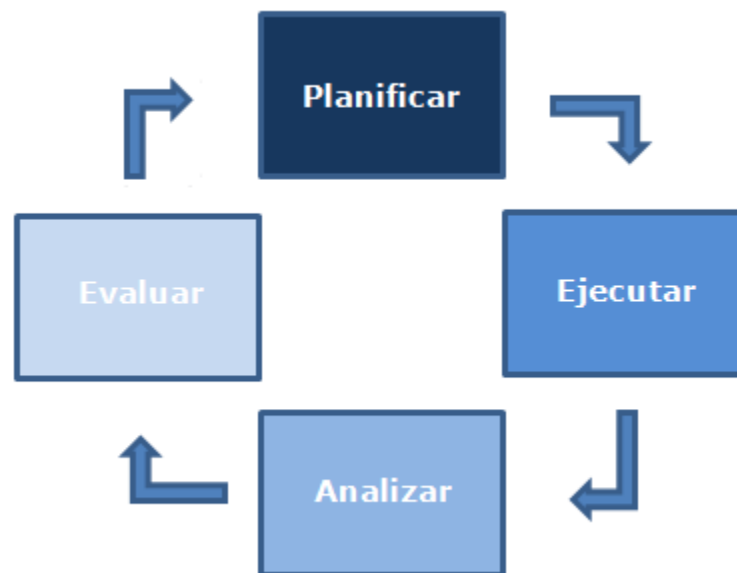


Figura 2: Diagrama de metodología general

4.1 Medición de presión

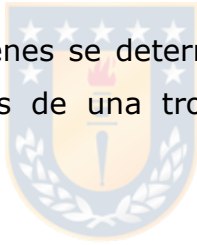
Para medir la presión generada al interior de la cámara de aire, se utilizará la técnica con sensores resistivos de carbón, ampliamente utilizados entre los investigadores para este proceso. Se ubicarán 2 de estos sensores en el tope y en el fondo de la cámara de aire, conectados a un DataTrapII mediante un cable UTP.

4.2 Medición de VOD

El *ShotTrack VOD Mini305* es un monitor digital de velocidad de detonación que utiliza tecnología TDR (*Time-domain reflectometer*) de alta precisión y bajo costo, ya que utiliza cable coaxial estándar. Es simple de usar, se puede conectar fácilmente a un computador y además incluye el software *ShotTrack VOD Monitor* para poder realizar todo el análisis de los datos. Antes de realizar una medición, se debe calibrar el cable que se utilizará, para que el instrumento lea exactamente el largo de este y poder entregar mejor información (por ejemplo, poder identificar exactamente donde comienza la cámara de aire y relacionarla así con la medición de VOD). La mayor cantidad de errores asociados a mediciones de VOD ocurren en el paso de calibración, de ahí su importancia [9]. La otra punta del cable coaxial se ubica dentro del pozo. Luego de efectuada la tronadura, el instrumento guardará toda la información, la que puede ser visualizada con la ayuda del software mencionado anteriormente.

4.3 Medición de fragmentación

A través de análisis de imágenes se determinará la distribución granulométrica. Se busca comparar los resultados de una tronadura con cámara de aire vs una tronadura tradicional.



4.4 Evaluación económica

La evaluación considerará básicamente el ahorro que se genera en explosivos, debido a la presencia de una cámara de aire, ya que como se ha mencionado anteriormente, se presume que se pueden obtener mejores resultados de fragmentación con una cantidad menor de explosivos. Se escalará a nivel de USD/año, suponiendo que se pasa de un sistema con pozos de tronadura de producción sin cámara de aire a uno con pozos con cámara de aire, considerando también el costo en el que se incurre al adquirir el PARAPLUG®.

4.5 Alcances y limitaciones

Queda fuera del alcance de este estudio entregar o estandarizar una longitud o ubicación de cámara de aire que optimice los resultados, ya que como se ve en este trabajo, esto puede variar de acuerdo a las características de cada mina. La experiencia se realiza en una mina de hierro en el norte de Chile. La roca en la que se lleva a cabo la prueba es metandesita, con una calidad geotécnica regular-buena (RMR

54-72). Se debe tener presente que los resultados obtenidos son en base a esta litología, por lo tanto, estos no pueden ser utilizados para asegurar el funcionamiento de la técnica en minas con otra litología, nuevamente, el propósito del estudio es dar cuenta de los resultados para sentar una base de investigación a futuro. Otras limitaciones vienen dadas por la obtención de los datos, ya que no se tienen los recursos para realizar mediciones de VOD y presión en todos los pozos, de ahí que se elija realizar la prueba en 3 pozos y escalar los resultados a nivel de malla completa. Si bien esto implica una pérdida de representatividad, esta se considera dentro de las conclusiones y además va de la mano con los objetivos generales del estudio.



CAPITULO II: ANTECEDENTES TEORICOS

Dado que la investigación se centra en la dinámica de la detonación al interior de una cámara de aire, los conceptos principales que se abordan son la velocidad y presión de detonación. Se debe entender y plantear el alcance de estos parámetros en el proceso de tronadura completo para sentar bases sólidas que permitan un buen análisis de los resultados obtenidos luego de realizada la prueba del caso de estudio.

1. Conceptos básicos

PARAPLUG®: es un tapón plástico con forma cónica especialmente diseñado para la generación de una cámara de aire en un pozo de tronadura a cielo abierto. De fácil armado, fácil instalación (ya que no requiere de más herramientas para este fin), auto soportable, muy versátil (ya que incluso funciona en pozos con agua) y además es recuperable en caso de algún inconveniente. La figura 3 muestra un PARAPLUG® listo para ser introducido en un pozo.



Figura 3: PARAPLUG® [6]

Velocidad de detonación (VOD): es una medida de la razón a la que la reacción de la detonación se desarrolla a lo largo de la columna del explosivo. Depende del tipo de explosivo, densidad de carga, diámetro del pozo, grado de confinamiento, reactividad de la roca con los componentes del explosivo o bien presencia de "terrenos calientes", y se mide principalmente en m/s o km/s. Los valores comunes de velocidad de detonación van desde los 3000 m/s para ANFO en

pozos de diámetro pequeño a 6000 m/s para emulsiones y acuagés en pozos de diámetros grandes [10-12].

La velocidad de detonación se considera como el mejor indicador para definir el desempeño del explosivo y la consistencia de la formulación, aunque no es en sí mismo, una medida de la energía total disponible del explosivo [10-12].

Presión de detonación (PD): la presión de detonación se entiende como la presión que se genera en el frente de detonación a lo largo del eje de la columna del explosivo y teóricamente en el centro del cilindro, que acompaña a la onda de choque y se alcanza inmediatamente después de la reacción, en el plano de Chapman-Jouguet¹. Es posible medirla, pero usualmente se calcula con la ecuación 1.

$$PD \text{ (kbar)} = \frac{4.5 * 10^{-6} * VOD^2 * \rho_e}{1 + 0.8 * \rho_e} \quad \mathbf{1}$$

ρ_e : densidad del explosivo en gramos por centímetro cúbico.

VOD: velocidad de detonación en m/s.

Esta presión de detonación se considera la responsable del fracturamiento de la roca circundante al pozo de tronadura. Las rocas masivas de alta resistencia requieren de una presión de detonación alta para lograr la fragmentación [10-12].

Ahora bien, no se puede calcular la presión de detonación dentro de la cámara de aire con esta fórmula, ya que dentro de la cámara de aire, la presión no es una presión del frente de choque, sino que pasa a ser una presión de gases, los cuales se expanden y es eso lo que provoca una disminución en la presión a lo largo de la cámara de aire [13]. Esto se puede explicar con la siguiente ecuación:

$$PV^{-\gamma} = nRT \quad \mathbf{2}$$

γ : coeficiente de dilatación adiabática, 1.4 para el aire a 20 °C

Dentro de la cámara de aire, el proceso de expansión de gases se considera adiabático a temperatura constante a diferencia de una detonación convencional (adiabática a volumen constante). Con la ayuda de la ecuación 2 es más fácil ver que presión y volumen son inversamente proporcionales y que por lo tanto, el aumento en

¹ Plano de Chapman-Jouguet: plano ideal detrás del frente de choque en el cual la reacción alcanza su condición de equilibrio respecto a velocidad, presión, temperatura, composición y densidad.

el volumen de los gases dentro de la cámara de aire provoca una disminución en la presión de estos.

Las ecuaciones 3 y 4 presentan una aproximación del cálculo de la presión de detonación al inicio y al final de la cámara de aire, según Lu y Hustrulid [13].

$$PD_{\text{inicio cámara}}(kPa) = \frac{VOD^2 * \rho_e}{2 * (1 + \gamma)} \quad 3$$

Notar que esta ecuación entrega la presión en kilopascales, por lo tanto se realiza la conversión a kilobar y se utiliza la ecuación 4.

$$PD_{\text{final cámara}}(kbar) = PD_{\text{inicio cámara}} \left(\frac{L_e}{L_a + L_e} \right)^y \quad 4$$

L_a : largo cámara de aire.

L_e : largo columna explosivo.

Presión de pozo o de gases: es la presión ejercida sobre las paredes del pozo, y depende la presión de detonación y del confinamiento del explosivo en el pozo. Típicamente es un porcentaje de la presión de detonación (~45%). Esta presión es la responsable de levantar el burden y dilatar las fracturas circundantes a un pozo de tronadura [11,12].

Factor de carga: Es la cantidad de explosivo aplicada o distribuida en un volumen de roca determinado. Se mide en g/ton [12].

Energía y potencia: Típicamente se habla de potencia relativa, en la cual se usa un explosivo como referencia y los otros explosivos se caracterizan en forma de porcentaje con respecto a la potencia de referencia. Lo más normal es trabajar con la potencia relativa al ANFO en volumen o RBS (*Relative Bulk Strength*) que es un número adimensional, que representa la cantidad de veces que la energía de un volumen de un explosivo determinado es mayor en relación al ANFO. La potencia es la energía contenida en una cantidad determinada de explosivo y usualmente se mide en unidades de energía por peso (kJ/kg) [11].

Iniciadores y reforzadores (*Primer y Booster*): Ambos sistemas de alta potencia, constan generalmente de un iniciador de pentolita o un cartucho de emulsión o dinamita. El término iniciador se usa para designar la carga que inicia a la columna, mientras que el término reforzador se usa para designar un aditivo a la columna para mantener una alta velocidad de detonación. Para que el iniciador detone, la columna de explosivo en que se sumerge debe generar suficiente energía de choque para comenzar una detonación a través de la sección completa de la columna del explosivo [11].

2. Mecanismos de fragmentación de roca

La tronadura (o voladura) corresponde al proceso de fragmentación de la roca mediante el uso de explosivos. Este proceso es realizado para poder: liberar, cargar, transportar y procesar el mineral. Para lograr fragmentar la roca se requiere aplicar energía, en este caso, obtenida mediante la aplicación de una reacción química (a altas presiones y temperaturas) denominada detonación.

En el proceso de rompimiento de material, que ocurre durante y después de la detonación completa de una carga confinada, existen 4 etapas que se definen a continuación como [10-12]:

- Detonación.
- Propagación de las ondas de choque (formación de grietas radiales).
- Expansión de gases a altas presiones (expansión de grietas existentes)
- Movimiento del material.

Aunque estas etapas se describen aisladamente, hay que recalcar que en tronadura, la ocurrencia de una u otra de estas se puede dar simultáneamente a intervalos específicos, por ejemplo, la propagación de ondas de choque y la formación de grietas radiales.

La detonación es la fase inicial de un proceso de tronadura (figura 4), en la cual los componentes básicos de un explosivo (combustible y comburente), se convierten inmediatamente en gases de altas presiones y temperaturas. Esta presión, conocida como la presión de detonación, depende principalmente del tipo de explosivo y VOD [10,12].

El marco de tiempo necesario para completar la detonación, es de pocos microsegundos para una carga pequeña esférica y milisegundos para una carga cilíndrica larga. Otros factores que afectan el tiempo de detonación son las formas geométricas, dimensiones y la VOD de la carga.

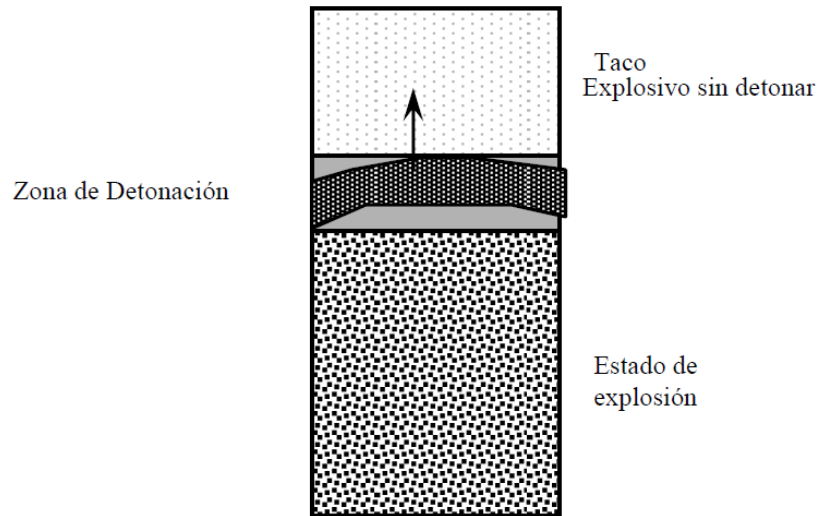


Figura 4: Estado de detonación en un pozo. Vista de perfil [11]

La fase que continúa a la detonación es la propagación de ondas de choque y de esfuerzo a través del macizo rocoso (figura 5). Esta onda, transmitida a través del macizo rocoso, es resultado de la detonación, lo cual produce el impacto en las paredes del pozo y la presión de detonación. La geometría de la distribución de esta onda depende de varios factores, tales como ubicación del punto de iniciación (o puntos), VOD y velocidad de propagación de la onda de choque en la roca (V_p). Además, la teoría de la onda de choque de Kumao Hino postula que la detonación de una carga explosiva inserta en el seno de un macizo rocoso genera una onda de choque (compresión) que se transfiere a la roca como un impacto de gran violencia. Tal impacto tritura la roca circundante vecina a la carga e induce una onda de compresión que se propaga por el sólido hasta alcanzar una eventual superficie libre, donde se refleja como onda de tracción [10-12].

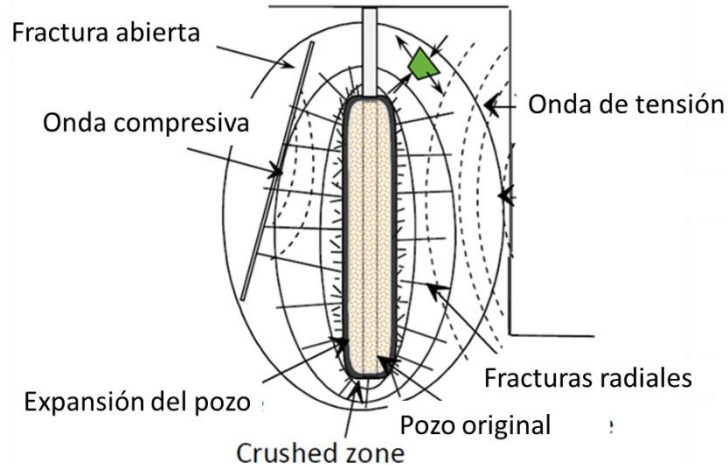


Figura 5: Propagación de ondas de choque en un pozo. Vista de perfil [11]

Por lo general, el fracturamiento por compresión, tensión y cizalle deja una zona de material pulverizado cerca de la carga (también conocida como *crushed zone*), ya que es donde la energía de la onda es máxima. A medida que el frente de onda viaja hacia afuera, se produce una tendencia a comprimir el material en el mismo frente. Perpendicularmente a este frente de compresión, existe otro componente que se conoce como esfuerzo tangencial. Si este esfuerzo es de suficiente magnitud, puede causar fallamiento por tensión perpendicularmente a la dirección de propagación. Los fracturamientos mayores por tensión en la roca se espera que ocurran cerca del pozo, en discontinuidades. Los componentes de compresión, tensión, cizalle y los componentes combinados de cualquier frente de onda, siempre decaerán con la distancia a la carga. La interacción de ondas de esfuerzo en un medio complicado, discontinuo como es el macizo rocoso, es un área de intensa investigación y se considera muy importante en algunas de las nuevas teorías de tronadura. La figura 6 muestra una aproximación del resultado que se puede obtener [10-12].

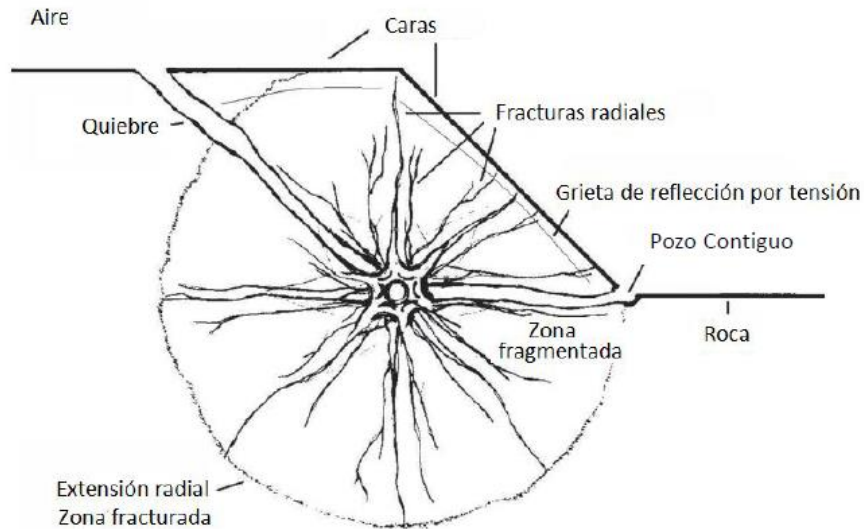


Figura 6: Estado de fracturamiento en un pozo. Vista en planta [11]

Durante, y/o después de la propagación de la onda de esfuerzo, los gases a alta temperatura y presión, producen un campo de esfuerzo alrededor del pozo que puede expandir el pozo original, extendiendo grietas radiales y penetrando en cualquier discontinuidad (figura 7). De esta fase existen controversias sobre el principal mecanismo de fragmentación. Algunos creen que la red de fracturas a través del macizo rocoso está completa, mientras que otros creen que el proceso principal de fracturamiento recién está comenzando. En cualquier caso, son los gases contenidos en la nueva cavidad formada alrededor del pozo, que penetran en las discontinuidades y el impulso impartido hacia el material por la detonación, principales responsables del desplazamiento del material quebrado.

No está clara la trayectoria exacta de los gases dentro de la masa rocosa aunque hay acuerdo respecto a que siempre siguen la trayectoria de menor resistencia. Esto significa que los gases primero emigran a las grietas, diaclasas, fallas y discontinuidades existentes, además de estratos de material. Si una discontinuidad o estrato lo suficientemente grande conecta los pozos a una cara libre, los gases de alta presión generados después de la detonación inmediatamente se irán a la atmósfera. Lo anterior reducirá rápidamente la presión total de confinamiento y conducirá inevitablemente a una disminución en el grado de fragmentación y aumentará las eyecciones de material. Los tiempos de contención para los gases en un macizo rocoso, varían significativamente dependiendo de la cantidad y tipo de material de

taco, de la configuración de la malla en el patrón de perforación (Burden, Espaciamiento) y de la secuencia de iniciación. Estudios hechos con cámara de alta velocidad muestran que los tiempos de retención del gas antes del movimiento del burden varían desde unos pocos a decenas de ms. Se han medido estos tiempos en un rango de 5 a 150 ms para una amplia variedad condiciones como las mencionadas anteriormente [10-12].

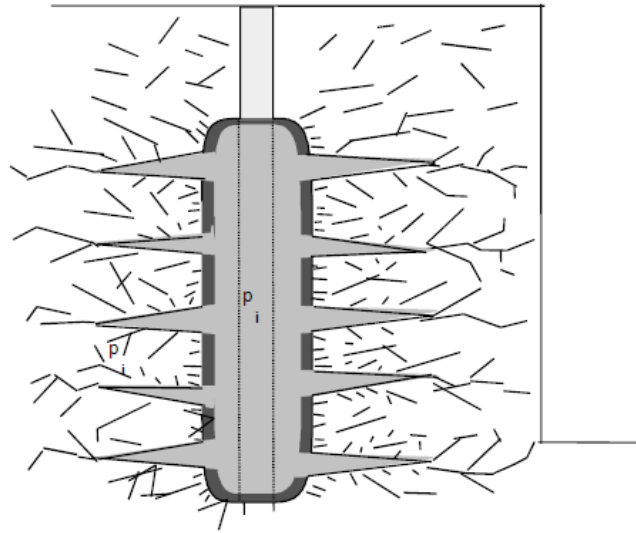


Figura 7: Proceso de expansión de gases al macizo. Vista de perfil [11]

El movimiento del material es la última etapa en el proceso de tronadura (figura 8). La mayor parte de la fragmentación ya se ha completado a través de ondas compresivas y de tensión, de la presurización del gas o una combinación de ambos. Sin embargo, algún grado de fragmentación ocurre a través de colisiones en el aire y cuando el material impacta al suelo [10-12].

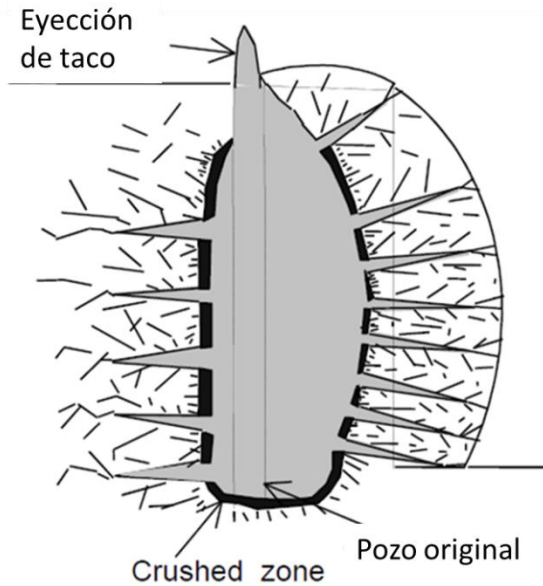


Figura 8: Estado de desplazamiento del material. Vista de perfil [11]

3. Estado del arte

A continuación se hará una revisión de la historia y algunos de los descubrimientos más relevantes acerca de las tronaduras con cámara de aire en su interior, los beneficios que se han encontrado y algunas disposiciones generales.

3.1 Historia

La búsqueda de nuevas técnicas de tronadura más eficiente viene de la necesidad de aprovechar de mejor manera el proceso para obtener los resultados deseados. El desplazamiento del material rocoso está determinado por la onda compresiva, y una vez que ha pasado, el movimiento prácticamente se interrumpe... el medio pasa a un estado de equilibrio casi estático y el proceso de fracturamiento cesa [14,15], sin embargo, si la energía se utilizara durante más tiempo y de manera más eficiente podrían verse mejores resultados.

La primera referencia del uso de una cámara de aire en una tronadura de producción se remonta a 1893. Gran parte del trabajo de investigación sobre esta técnica se ha llevado a cabo en la antigua Unión Soviética, gracias a los aportes de Mel'Nikov y Marchenko [15]. Más adelante, varios investigadores realizaron estudios teóricos y modelos para comprender mejor el mecanismo de funcionamiento y sus efectos en el desempeño de la explosión [14-25]. Los estudios indican que la presencia de la cámara de aire permite que los gases de la explosión se muevan y se

expandan hacia el espacio de aire, lo que disminuye la presión. Las ondas de choque oscilan en el pozo e interactúan mutuamente, también con el taco y las paredes del pozo. Las interacciones repetidas dan como resultado la generación de un frente de choque secundario reforzado y permiten que las ondas de choque actúen sobre el macizo rocoso circundante durante un período más largo [15,17].

En 1987, Chiappetta y Memmele [14], propusieron un modelo de lo que ocurre, en lo que respecta al fracturamiento de la roca circundante al pozo si hay una cámara de aire en este. Se quiere ver cómo es la zona de daño con diferentes perfiles de carga de pozo. La figura 9 muestra sus teorías.

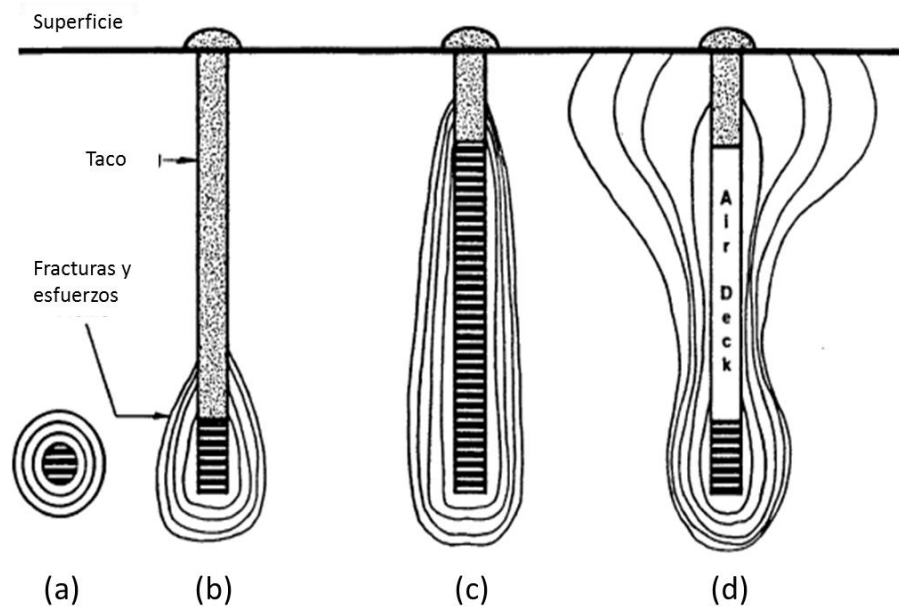


Figura 9: Perfiles de carga y su influencia en la forma de fracturar el macizo. Vista de perfil [14]

En la figura 9(a) se observa la zona de daño que produce una carga esférica pequeña. En la figura 9(b) se ve una carga de explosivo cilíndrica ubicada en el fondo del pozo de poca longitud. El resto del pozo está compuesto por material de taco. Se observa que la zona de daño se concentra en la zona circundante a la columna de explosivo. En la figura 9(c) la carga es de mayor longitud que en el caso anterior, pero también ubicada en el fondo del pozo. Se observa una zona de daño circundante al explosivo acorde a la longitud de la carga. Finalmente, la figura 9(d) muestra un pozo que tiene una cámara de aire entre el taco y la columna de explosivo. Se observa la forma irregular que posee la zona de daño, lo que podría explicar las ventajas que esta técnica entrega.

3.2 Teorías del mecanismo de acción de la cámara de aire

En las tronaduras con cámara de aire, es esta la que juega un papel crítico en la obtención de las ventajas. Durante una explosión, el aire se encuentra inicialmente estático y a temperatura y presión iguales a las del medio. El aire en tales condiciones físicas prácticamente no ofrece resistencia a la expansión de los productos de detonación que tienen una temperatura y presión alrededor de 3 a 4 órdenes de magnitud superior a las condiciones del pozo. Es debido a esta expansión de los gases que la presión disminuye. Los productos de detonación transfieren algo de energía al aire comprimiéndolo y calentándolo [16].

Mel'Nikov [18] introdujo por primera vez la idea de que la energía en una explosión podría redistribuirse en una tronadura con cámaras de aire colocadas dentro de una columna explosiva. Mel'Nikov pensaba que al reducir la presión inicial de los productos de detonación y al aumentar la duración de su acción en la roca, la energía consumida en fragmentar alrededor de la pared del pozo se reduciría, al tiempo que aumentaría la cantidad de energía transmitida al macizo rocoso. Sugería que las cámaras de aire proporcionan un medio por el cual una segunda onda de tensión podría generarse fácilmente. La teoría postula que las reflexiones de la onda de choque dentro del pozo producen una onda de tensión secundaria que extiende la red de micro fracturas antes de la presurización del gas. Aunque esto reduce la presión final del pozo producida por el explosivo, el grado de fracturamiento aumenta a través de la repetida carga de la roca por una serie de réplicas. La cámara de aire actuaría como un acumulador, que primero almacena energía y luego la libera en pulsos separados en lugar de liberarla de una sola vez. Así se contribuye de mejor manera al uso de la energía en, efectivamente, fragmentar, además de ayudar en el desplazamiento del material. Después de la reflexión, las ondas de choque cambian de dirección y comienzan a moverse hacia las paredes del pozo, para ser nuevamente reflejadas por estas. Luego chocan nuevamente en el centro del espacio de aire, y el proceso continua repitiéndose.

Mel'Nikov [18] calculó que las cargas con cámaras de aire transfieren aproximadamente entre 1.5–1.7 veces más energía al medio en comparación a pozos con columnas de explosivo continuas. Como las ondas de choque oscilan repetidamente dentro de este espacio de aire, sus velocidades y presión en el frente

de choque se rigen por la longitud que recorren (en la cámara de aire), por lo tanto, este parámetro es crítico para la fragmentación. Además de la longitud de la cámara de aire, son muy importantes los parámetros del macizo rocoso [14-18].

Por otra parte, Moxon [15] pensaba que si la cámara de aire se ubicaba en algún punto intermedio de la columna de explosivos, los frentes de presión producidos por el explosivo en cada extremo de la cubierta de aire podrían interactuar si son lo suficientemente fuertes. Dicha interacción debería producir un campo de tensión reforzado que contribuiría a la formación de un patrón de fracturas radiales más extenso que si se colocara una cámara de aire de la misma longitud en la parte superior de la carga (debajo del taco).

Posteriormente, en 1996, Liu y Katsabanis [16] encontraron que las relaciones de energía se modifican totalmente con la introducción de una cámara de aire. En primer lugar, la energía retenida se transforma en energía cinética, lo que hace que los productos de la detonación se muevan rápidamente, y luego la energía cinética es transmitida al macizo rocoso colisionando en forma de energía de tensión y disipación elástica. La energía de tensión adicional es responsable de la mejora en la fragmentación.

3.3 Estudios de laboratorio

Mel' Nikov y Marchenko [17] pusieron a prueba su teoría y la confirmaron (a nivel de laboratorio). Dispusieron cargas de explosivo en bloques de concreto, tanto de forma continua como con la aplicación de cámaras de aire entre medio y se notó una capacidad rompedora mayor en este último caso. Las figuras 10 y 11 muestran los resultados de su estudio sobre cuanto tiempo interactúa la onda de choque con el medio.

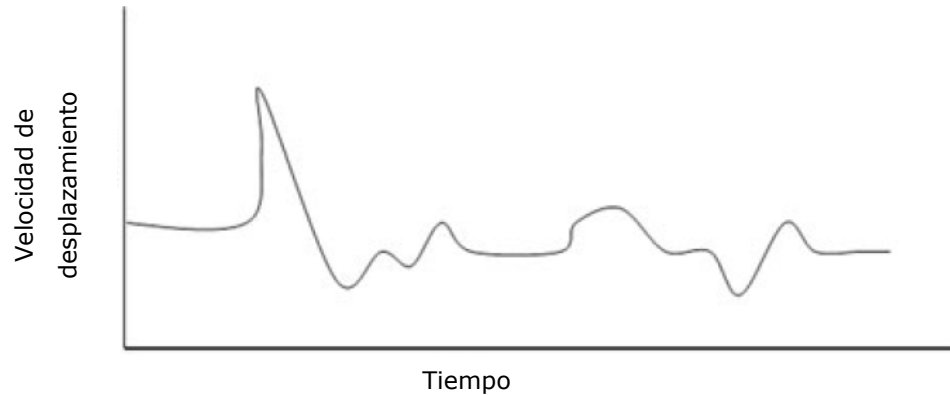


Figura 10: Oscilograma que muestra el efecto de una carga continua [17]

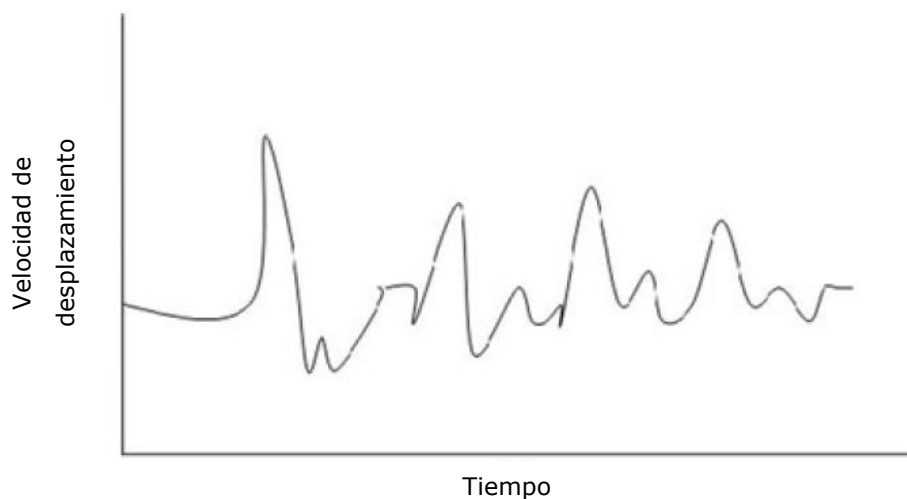


Figura 11: Oscilograma que muestra el efecto de una carga con una cámara de aire entre medio [17]

En la figura 10 se observa que luego de que pasa la onda de choque, el medio adquiere un estado de equilibrio rápidamente. Para ese momento ya no hay transferencia de energía al medio, por lo tanto, ya no hay más fragmentación. La figura 11 muestra que la energía impacta al medio por un periodo de tiempo mayor [17].

Moxon [15] realizó experimentos en modelos de concreto para evaluar la influencia del tamaño de la cámara de aire y su ubicación en la fragmentación. Señaló que el grado de fragmentación dependía de ambos factores. A medida que aumentaba el tamaño de la cámara de aire, el grado de fragmentación se reducía en relación con una carga explosiva de columna completa, sin embargo, la reducción era relativamente pequeña hasta que se excedía un tamaño crítico. Para el estudio se determinó que la longitud crítica era un 30-35% de la longitud de la columna de explosivo. Además, para las mismas longitudes de cámara de aire y columna de

explosivo, se notó que una cámara ubicada en el medio (de la columna de explosivo), produjo una mejor fragmentación que cámaras ubicadas en el tope o en el fondo del pozo [15].

Liu y Katsabanis [16] también pusieron sus teorías a prueba mediante 2 casos de estudio: carga continua y cámara de aire entre taco y columna de explosivo. En el primer caso, el movimiento de los productos de detonación estaba estrictamente confinado a un espacio limitado. Tras la detonación, la presión alcanza un *peak* y luego desciende a un valor estable. El campo de tensión en el pozo es cuasi-estático y decae rápidamente (figura 12).

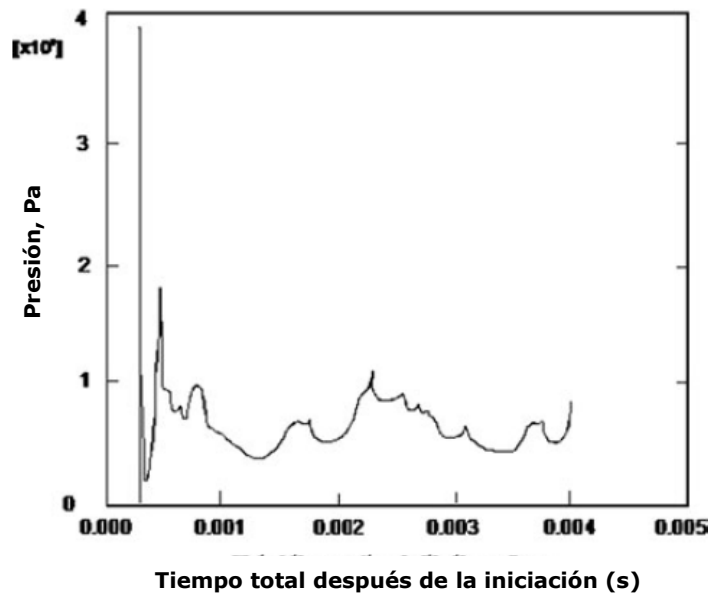


Figura 12: Presión vs tiempo para una columna de explosivo continua [16]

Para el segundo caso (figura 13), como resultado del impacto de gas en el taco, se estimulan una serie de ondas de presión a medida que los productos de detonación se reflejan en la cámara del pozo. Este proceso se acompaña de una rápida liberación y transformación de la energía transportada por los productos de detonación. Estas ondas de tensión adicionales debidas a la carga secundaria actúan en el medio después del paso de la onda de choque primaria y causan un daño adicional. Se observó que existía una longitud de cámara de aire mínima por debajo de la cual los resultados de la explosión eran peores en comparación con cargas de columna completa. Una cantidad significativa de energía se transmitió al macizo rocoso a través del taco. Como resultado, la carga primaria debida a la detonación de la carga

explosiva no pudo impactar el taco con toda la potencia impartida. De hecho, el taco en este caso solamente fue impactado por el gas de la explosión, que viajó a través de la cámara de aire. Se suponía que la pérdida de energía de la carga primaria al taco se compensaba con la carga secundaria debido a la reflexión de los productos de detonación. Sin embargo, si la cámara de aire no es lo suficientemente larga, solo se podría liberar una pequeña porción de energía potencial del gas de la explosión. Esta porción era demasiado pequeña para compensar la pérdida de energía y, por lo tanto, los resultados empeoran en comparación a una tronadura convencional. Con un aumento en la longitud de la cámara de aire, la energía transmitida al medio por la carga secundaria aumentó rápidamente. Ese aumento de energía compensó completamente la pérdida de la carga primaria al taco y mejoró los procesos de fracturamiento y fragmentación de la roca [16].

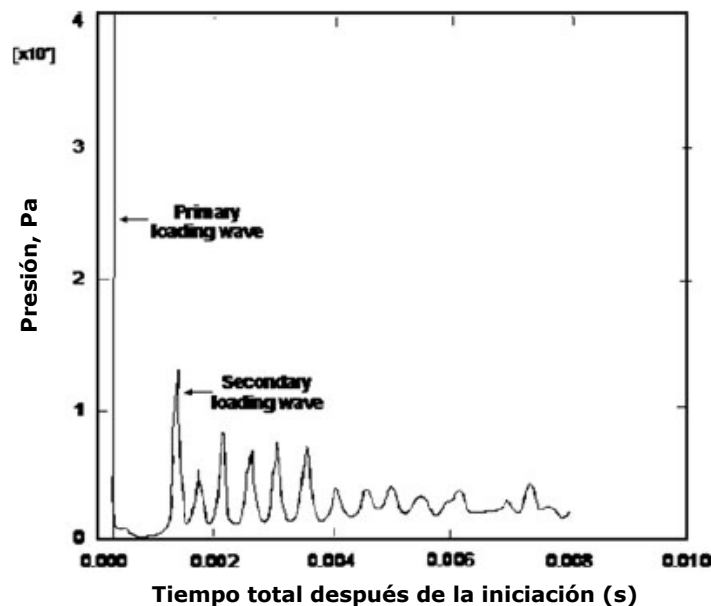


Figura 13: presión vs tiempo para un pozo con cámara de aire [16]

3.4 Estudios y resultados en terreno

Mel'Nikov y Marchenko [17] en 1971 informaron que, independientemente de la resistencia de la roca y el tipo de explosivo, así como los procedimientos de tronadura, el uso de cámaras de aire mejoró sustancialmente el grado y la uniformidad de la fragmentación. El tamaño promedio de los fragmentos, la cantidad de sobre-tamaño y el consumo de explosivos se redujeron en un 50–60%, 50–90% y 10–30% respectivamente. Además de esto, la producción aumentó y el efecto sísmico de la

explosión disminuyó. La productividad de las excavadoras y los medios de transporte aumentó en un 10-30% y, en ocasiones, incluso se duplicó. En 1979 Mel'Nikov sugirió pautas prácticas para seleccionar la longitud de la cámara de aire como se muestra en las ecuaciones 5 y 6 [17-19].

$$L_{ad} = K_1 * L_t \quad (K_1 \text{ entre } 0.15 - 0.35) \quad \mathbf{5}$$

$$L_{ad} = K_2 * d \quad (K_2 \text{ entre } 8 - 12) \quad \mathbf{6}$$

De donde:

- L_{ad} : longitud de la cámara de aire (m)
- L_t : longitud de la carga (incluyendo a la cámara de aire) (m)
- d : diámetro del pozo (m)
- K_1 y K_2 : factores de la roca

Destacar que ambas ecuaciones pueden usarse independientemente, ya que entregan resultados similares, sin embargo, la ecuación 6 se utiliza preferentemente en minería subterránea debido a que no siempre se utiliza carga continua. Mencionar que estas ecuaciones no definen la ubicación de la cámara de aire y solo entregan la longitud que se debería utilizar tomando en cuenta las variables que considera.

Chiappetta y Memmele [14] reportaron en 1987 aplicaciones de cámara de aire en tronadura controlada, más específicamente en pre-corte (ADP: Air-Deck Presplitting) de producción a gran escala. La longitud de la cámara de aire fue de 9.2 m. Los resultados fueron de normales a excelentes en una amplia variedad de formaciones rocosas con reducciones de costos de un orden de 10 a 46% [14].

De manera similar, Bussey y Borg [20] en 1988 también reportaron ADP, con reducciones de costos en perforación y explosivos del orden de 25 y 50% respectivamente, además de mejoras en el control de estabilidad de paredes altas [19].

Por otro lado, Rowlands [21] reportó sobre los resultados de tronaduras en formaciones sedimentarias de carbón usando una cámara de aire. La longitud de esta se mantuvo en el rango de 0.28 a 0.36 veces el largo de la carga original (ADL: Air-Deck Length, para referirse a la longitud de una cámara de aire representada como un porcentaje de la longitud de la carga original) y se ubicó en los estratos más débiles.

El consumo de explosivos se redujo entre un 15 y un 20%, mejorando o manteniendo el grado de fragmentación [21].

Evaluando diferentes tipos de yacimiento, Mead [22] en 1993 realizó pruebas con cámara de aire en 3 casos: una mina de cobre, de hierro y de carbón. El ADL varió entre 0.35 y 0.45 y se ubicó entre la columna explosiva y el taco. El consumo de explosivos se redujo en un 15–35% sin efectos adversos en el proceso de carguío posterior [22].

Thote y Singh reportaron que la tronadura con cámara de aire mejoró la fragmentación (el tamaño promedio de los fragmentos se redujo en 8.25–64.84%) y redujo el consumo de explosivos en un 15–20% en minas de carbón. También observaron una reducción de aproximadamente el 35% en las vibraciones e indicaron que la técnica era más adecuada para pozos profundos, más allá de 6 m. El ADL utilizado estaba en el rango de 0.15–0.16 [25].

Adicionalmente, Jhanwar y Jethwa [23] realizaron estudios de tronaduras de producción con cámara de aire en minas a cielo abierto de manganeso y carbón. La técnica mejoró la fragmentación general y redujo el costo de explosivos entre un 10 y un 35%, las eyecciones de taco en 10–35% y el daño a las paredes entre 50–80% [23]. La cámara de aire mejoró la fragmentación y la hizo más uniforme. El análisis de los resultados reveló que la técnica era más efectiva en rocas de muy baja a baja resistencia con bloques in-situ de tamaño mediano a grande en comparación con rocas de resistencia media con bloques de tamaño pequeño. En rocas de resistencia media con bloques más pequeños, el beneficio fue principalmente en términos de ahorro explosivo y no tanto en términos de fragmentación. Además, en función de sus observaciones en terreno, Jhanwar [19] propuso en 1998 la factibilidad del uso de la cámara de aire dependiendo del tipo de macizo rocoso y una guía para elegir la longitud de la cámara en términos de ADL de acuerdo a un rango de RMR en minería a cielo abierto (tablas 1 y 2) [19,24].

Tabla 1: Factibilidad de la técnica respecto al tipo de roca [19]

Tipo de macizo rocoso	Factibilidad
Resistencia muy baja a baja. Roca sedimentaria	Excelente
Resistencia muy baja a baja. Estructuras escasas	Muy buena
Roca sedimentaria de resistencia media. Estructuras cercanas	Buena

Tabla 2: Rango de largos de la cámara de aire en función de RMR [19]

RMR (Bieniawsky 89)	ADL
20-35	0.30-0.40
35-45	0.20-0.30
45-65	0.10-0.20

3.5 Estudios con cámara de aire en Chile

La empresa FERRADA BLAST ha llevado a cabo pruebas de tronaduras con cámara de aire en 2 minas de Chile. A continuación se presentan los 2 casos.

3.5.1 Mina ubicada en Iquique

Mina de cobre con recursos de 9975 millones de toneladas y una ley promedio de 0.78% que realiza su explotación mediante cielo abierto. La figura 14 muestra el perfil de carga de los pozos con y sin cámara de aire.

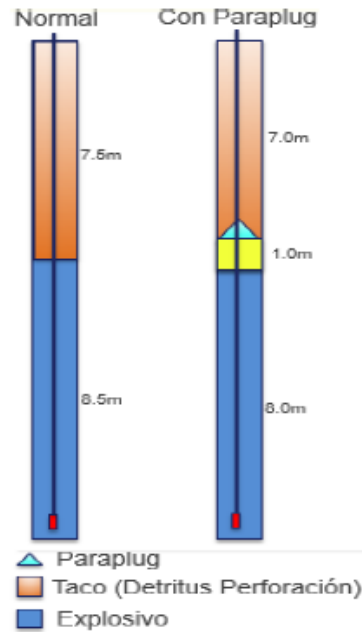


Figura 14: Perfil de carga mina de Iquique para las pruebas [6]

Se realizaron 3 pruebas, 2 en mineral y una en estéril. La figura 15 muestra la malla de tronadura para las 3 pruebas. La figura 16 muestra la explosión en las 3 pruebas.

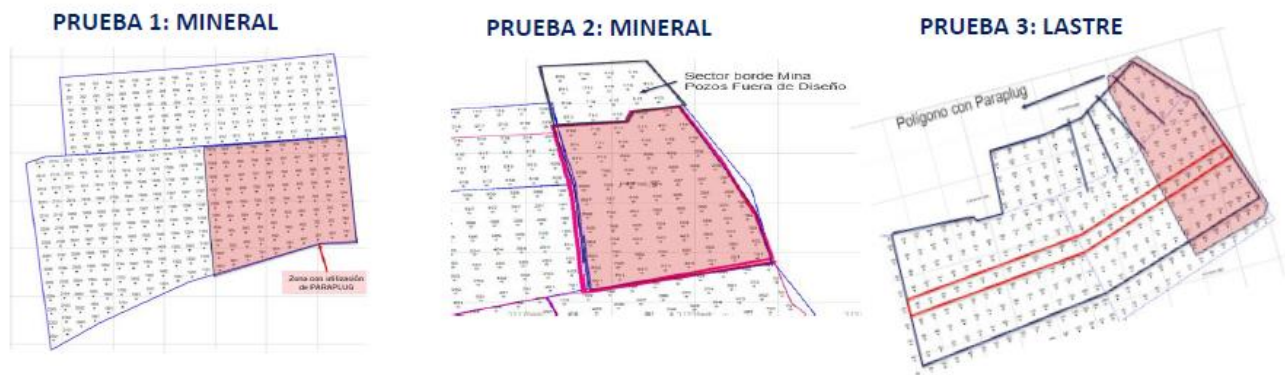


Figura 15: Malla de tronadura para las 3 pruebas de la mina en Iquique [6]

PRUEBA 1: MINERAL**PRUEBA 2: MINERAL****PRUEBA 3: LASTRE**

Figura 16: Tronadura de las 3 pruebas [6]

En rojo se observa la zona de pozos diseñados con cámara de aire. Se puede ver claramente que la eyección del taco y la emanación de polvo es mucho menor en ese sector. Además, el grado de fragmentación mejoró, disminuyendo el P_{80} de 4.63 a 3.11 pulg, produciendo ahorros generales del orden de US\$ 800000 al año. Mencionar también que la disposición de la pila de material se vio más ordenada, lo que facilitó el trabajo de los equipos de carguío [6].

3.5.2 Mina ubicada en Coquimbo

Mina cuya explotación se realiza mediante el método de cielo abierto. La prueba se realizó en roca de dureza media (UCS entre 60-90 MPa). La figura 17 muestra el perfil de carga de los pozos con y sin cámara de aire. Destacar que solo se realizó una prueba. La figura 18 muestra la explosión.

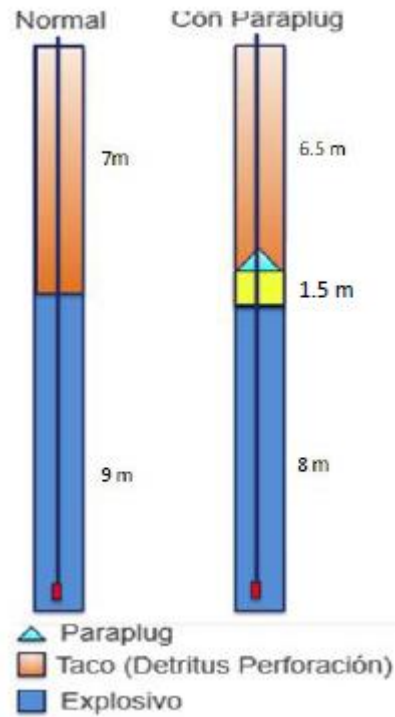


Figura 17: Perfil de carga para la prueba mina en la región de Coquimbo [6]



Figura 18: Tronadura de la prueba [6]

Para esta prueba también se reportaron mejoras en la fragmentación, el orden de las pilas de material, un mejor control en las eyecciones de taco y polvo y ahorros generales de MUS\$ 1500 al año.

3.6 Generalidades y observaciones de la técnica

La presencia de una cámara de aire en el pozo de tronadura induce un cambio en el mecanismo de transferencia de energía explosiva al macizo rocoso. La transferencia de energía tiene lugar en una serie de "pulsos" en lugar de transferirse de una sola vez. Esto aumenta el período de tiempo durante el cual la energía explosiva actúa sobre la roca. Una clara comprensión del mecanismo involucrado, los procesos físicos y sus efectos en el grado de fragmentación aún necesitan ser estudiados para explicar completamente los efectos de la explosión y para formular una base teórica para diseños prácticos utilizando cámaras de aire [5].

La longitud de la cámara de aire es un parámetro crucial de esta técnica y debe seleccionarse cuidadosamente. La longitud adecuada puede diferir para diferentes tipos de roca o para el beneficio que se desee obtener. Sin embargo, pueden hacerse algunas generalizaciones con respecto a un rango óptimo. El ADL basado en el conocimiento actual varía entre 0.1 a 0.35. Se necesitan más estudios [5].

Una cámara de aire ubicada en el medio del pozo suele producir mejores resultados que aquellas ubicadas en el fondo o en el tope del pozo (entre el taco y la columna explosiva). Estas últimas se pueden utilizar para causar una fragmentación adecuada en la zona circundante al taco. Las cámaras de aire en el fondo del pozo generalmente no se sugieren salvo que el resultado deseado sea eliminar la sobreperforación o se desee suavizar las paredes de los bancos inferiores [5].

El rendimiento general de la voladura aumenta con el uso de la cámara de aire: mejoras en la fragmentación y en la productividad del equipo de carga. Funciona mejor en tipos de roca blanda, con una cantidad de discontinuidades considerable o en rocas de resistencia media [5].

CAPITULO III: DESARROLLO EXPERIMENTAL

1. Equipamiento experimental

La prueba se lleva a cabo en una mina ubicada en la región de Atacama (nombre de la mina no revelado por temas de confidencialidad). La prueba consiste en realizar una tronadura de la malla utilizada en la mina, con una pequeña particularidad: una sección de esta estará diseñada con una cámara de aire. En 3 de aquellos pozos se dispondrán las herramientas necesarias para realizar las mediciones. Algunas son:

- *ShotTrack VOD Mini305*
- DataTrapII (Gentileza de Orica)
- 1 rollo de 305 m de cable coaxial RG6 60%
- 6 conectores BNC macho
- PARAPLUG® (100 piezas)
- 6 sensores de presión
- 1 rollo de cable UTP de 8 hebras
- Huincha de medir
- Huincha aisladora
- Conos de tránsito (para darle protección a los equipos)
- Multímetro digital
- Tenaza crimpeadora
- Stripper cable coaxial o pela cable
- Regletas eléctricas
- Cable de prueba para iniciar DataTrapII (Gentileza de Orica)

Además de estas herramientas, son necesarios los implementos típicos para realizar una tronadura, como son (disponibles por parte de la minera):

- Explosivo
- Material de taco
- Detonadores e iniciadores (booster)

Ilustraciones de las herramientas mencionadas anteriormente se encuentran disponibles en Anexo 1.

2. Condiciones experimentales

La mina de prueba cuenta con un movimiento total de 84 millones de toneladas, de las cuales 10.4 millones corresponden a mineral de hierro con una ley promedio de 46.4%. La explotación se realiza a rajo abierto con bancos de 15 metros de altura. Para llevar a cabo las operaciones unitarias se cuenta con cinco perforadoras primarias para perforaciones de 10 5/8" de diámetro y un servicio de perforación de precorte de 6" de diámetro. La tronadura es realizada por una empresa externa (Orica). Para el carguío de material se utilizan una pala eléctrica de cable, dos palas hidráulicas y tres cargadores frontales. Posteriormente, el transporte se realiza con ocho camiones de 200 toneladas cortas (tc) de capacidad y 15 camiones de 240 tc de capacidad.

2.1 Malla y características de la tronadura

La malla a utilizar en la prueba cuenta con 105 pozos. La figura 19 muestra la malla de tronadura, además se marcan allí los pozos seleccionados para realizar la prueba. En esta se pueden diferenciar por colores 4 zonas descritas en la tabla 3 con los respectivos parámetros de diseño, de la sección sin cámaras de aire.



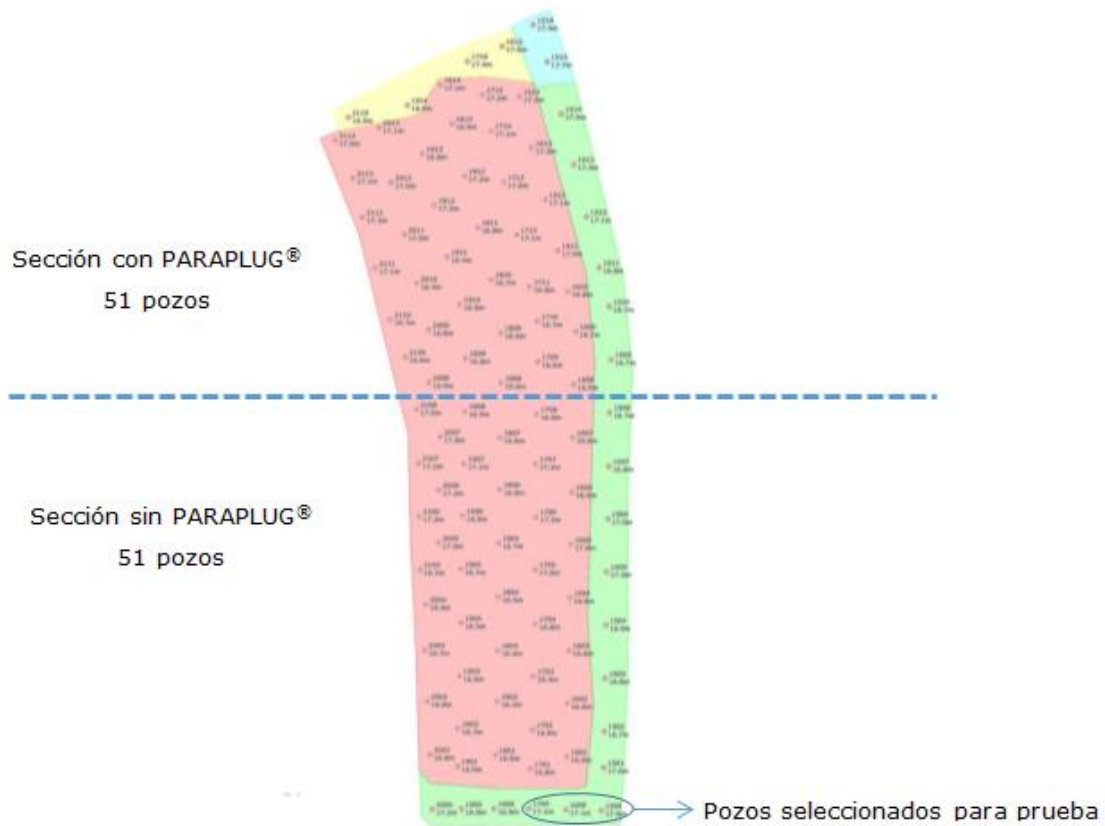


Figura 19: Malla tronadura faena y pozos seleccionados

Tabla 3: Resumen parámetros tronadura sin cámara de aire

Zona Roja	Zona Verde y amarilla	Zona Celeste
6.8 m x 10 m en 10 5/8".	6.8 m x 10 m en 10 5/8".	6.8 m x 10 m en 10 5/8".
Altura de banco: 15 m	Altura de banco: 15 m	Altura de banco: 15 m
Pasadura: 2 m	Pasadura: 2 m	Pasadura: 2 m
Columna de explosivo: 11 m	Columna de explosivo: 11.5 m	Columna de explosivo: 11 m
Taco: 6 m	Taco: 5.5 m	Taco: 6 m
Explosivo: 761 kg de FE50	Explosivo: 691 kg de FE30	Explosivo: 661 kg de FE30

La figura 20 muestra la información de la tabla gráficamente. En esta se presenta una vista de perfil de los pozos, el explosivo con el que se cargan y la longitud que ocupa en el pozo, además de la longitud del taco.

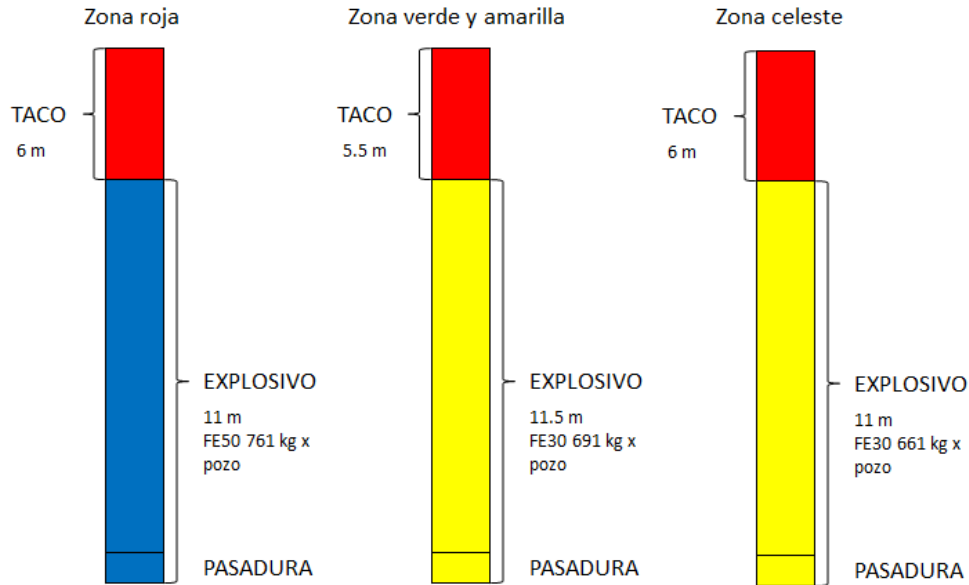


Figura 20: Perfil de carguío de los pozos de la malla, sección sin cámara de aire

Debido a la presencia de la cámara de aire que se utiliza, la columna de explosivos es de menor longitud respecto a los demás tiros de la malla. Para este estudio, se utiliza una cámara de aire estándar, de longitud aproximada de 5 veces el diámetro del pozo (determinar una configuración de cámara de aire óptima se escapa de los alcances de este estudio) y se ubica sobre la columna de explosivo y bajo el material de taco. Notar que los pozos seleccionados son parte de la sección sin cámara de aire, esto se determinó así para dar una mejor protección a los equipos utilizados para medir, ya que si se instrumentaba un pozo de la sección con cámara de aire no era posible posicionar los equipos a una distancia segura. La tabla 4 muestra un resumen de los parámetros de diseño de los pozos en la malla por zona, de la sección con cámara de aire.

Tabla 4: Resumen parámetros tronadura sin cámara de aire

Zona Roja	Zona Amarilla, Celeste y Verde
6.8 m x 10 m en 10 5/8".	6.8 m x 10 m en 10 5/8".
Altura de banco: 15 m	Altura de banco: 15 m
Pasadura: 2 m	Pasadura: 2 m
Columna de explosivo: 10.1 m	Columna de explosivo: 10.4 m
Taco: 5.3 m	Taco: 5 m
Explosivo: 699 kg de FE50	Explosivo: 625 kg de FE30

La figura 21 muestra la información de la tabla gráficamente. En esta se presenta una vista de perfil de los pozos, el explosivo con el que se cargan y la longitud que ocupa en el pozo, la longitud del taco, además de la longitud y ubicación de la cámara de aire.

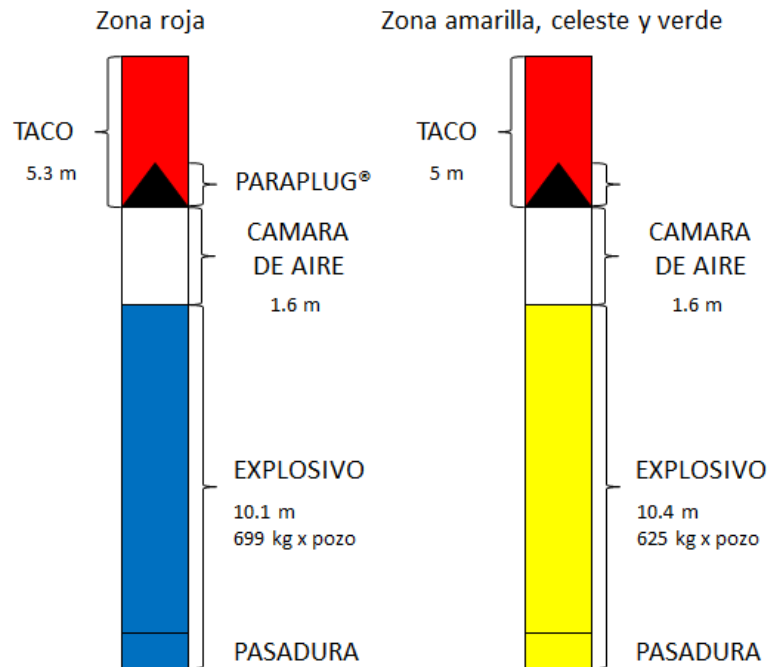


Figura 21: Perfil de carguío de los pozos de la malla, sección con cámara de aire

Destacar que el perfil de carga de los pozos que serán instrumentados para realizar mediciones no es igual al de los pozos de la zona amarilla, celeste y verde de la sección con cámara de aire (este se detalla más adelante).

Los tiempos de retardo se presentan en la figura 22(a). A partir de la figura 22(a) se obtiene la secuencia, los tiempos entre pozo y entre filas que son 17 y 162 ms respectivamente. Notar que en el medio de la malla, donde se encuentra la línea dibujada, hay un descanso de 1 s. La figura 22(b) muestra el primer movimiento de cada pozo.

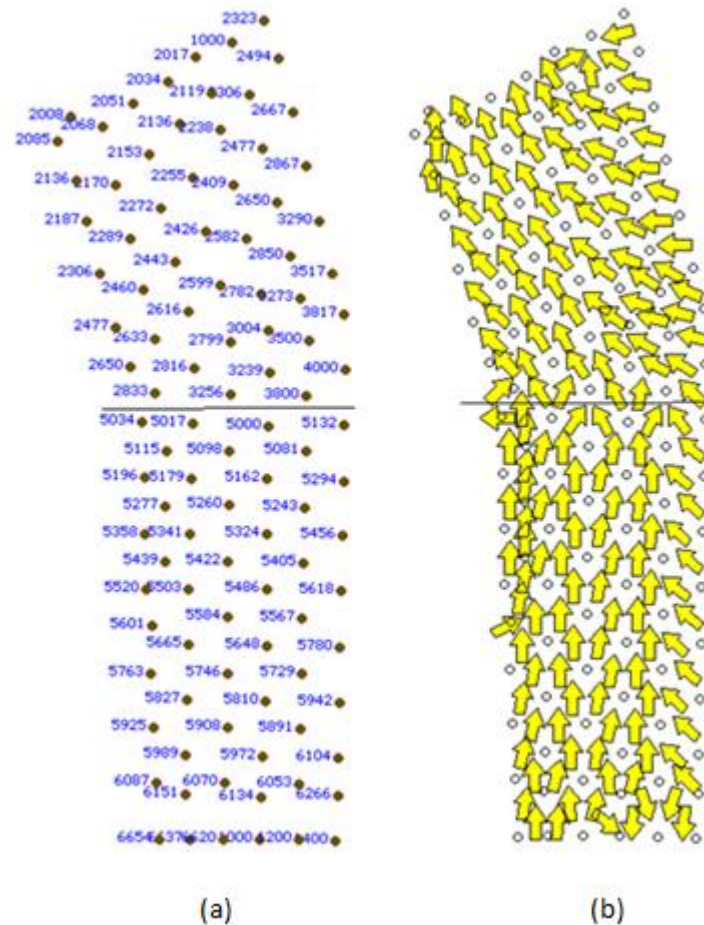


Figura 22: Tiempos de retardo y primer movimiento de cada pozo en la malla

2.2 Propiedades del explosivo

El explosivo utilizado en la faena, *FortanTM Extra* es un HANFO diseñado específicamente para su utilización en seco o bombeándolo. Posee una densidad que se encuentra en un rango de aproximadamente 1.1 g/cm^3 y una VOD entre 3500 y 6000 m/s. Aplicando la ecuación 1 se puede obtener un rango de presión de detonación entre 32250 y 94780 bar. Este cálculo se realiza con el fin de obtener una referencia de los valores a obtener durante la recopilación de datos de la prueba.

3. Montaje experimental

Antes de realizar cualquier montaje, se debe verificar continuidad en los 305 metros de cable coaxial RG6, es decir, se debe estar seguro de que el cable es continuo y no tiene ningún corte que pudiera generar riesgos de corto circuito o una mala toma de datos. Para este fin se utiliza el multímetro. Se toman las varillas del

equipo y se ubican en ambas puntas del cable tanto para medir el *core*, como para medir por fuera (malla). Si el equipo emite un leve sonido, significa que el cable es continuo y se puede proceder.

El siguiente paso es *crimpear* el cable, es decir, unir el conector a la punta del cable que irá conectada al equipo *ShotTrack*. Se necesita una configuración de estructura del cable tal que el conector se adecúe perfectamente y no haya problemas al realizar la conexión al equipo. Para este efecto se utiliza el *stripper* de cable coaxial o pela cable. La figura 23 muestra la configuración mencionada.

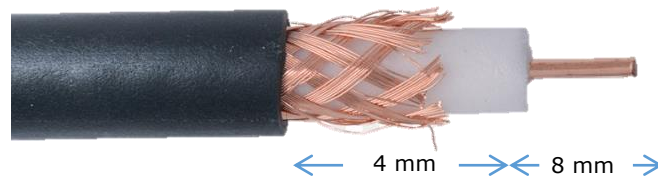


Figura 23: Configuración de la estructura del cable coaxial necesaria

Teniendo el cable pelado de esa manera, se realiza el proceso de *crimpeado*, uniendo el conector con el cable con ayuda de la tenaza crimpeadora. La figura 24 muestra cómo se debe ver la punta del cable luego del proceso.



Figura 24: Cable y conector unidos

De esta manera se puede realizar la conexión al equipo *Shottrack*. La figura 25 muestra cómo se debe ver el cable conectado al equipo.



Figura 25: Cable conectado al equipo ShotTrack

Se debe calibrar el equipo respecto al cable conectado. Dado que se utiliza un largo de 305 m el equipo puede configurarse sin necesidad de ser conectado a un computador. El Anexo 2 presenta el procedimiento a seguir. Para ver el proceso de calibración del equipo para un cable de longitud distinta, consultar Anexo 3. (Esto puede ser útil, en caso de que se deba realizar una segunda o tercera prueba).

Con el equipo listo y dada la malla de tronadura del banco, se procede a instrumentar los pozos seleccionados, es decir, los primeros en salir en la secuencia. Se decide así para evitar que el estallido de algún otro pozo dañe o corte el cable y arruine la medición.

Dado que se instrumentan 3 pozos continuos y la complejidad de introducir un cable rígido en ellos, es que se tiene que saber la longitud total del pozo (en este caso 17 m). Luego de esto se desenrolla la cantidad necesaria de cable. Se procede a instrumentar el primer pozo. Antes incluso de la introducción del booster, se toma la punta del cable sin conector y se aísla con huincha aisladora. Esto se hace por 2 razones: seguridad y para evitar que el cable este expuesto al medio directamente, lo que podría afectar la medición (si hay agua, por ejemplo). A esta punta se le adhiere una roca o algo lo suficientemente pesado para que ayude a llevarla al fondo del pozo. Una vez se toca el fondo se estira el cable lo más posible, para no tener cable de más en el pozo (esto puede afectar la medición). Se puede verificar la cantidad de cable que se introdujo, ya que este posee el metraje graduado en su capa más externa. Haciendo uso de eso, se pasa al segundo pozo. Ya se conoce la profundidad y distancia entre estos, por lo tanto se busca el metraje equivalente a la profundidad (desde el metro en la entrada del segundo pozo) y se le adhiere una piedra tal como se hizo con

la punta del cable en primera instancia. Se procede a buscar nuevamente el metro equivalente a la longitud (ahora desde donde se encuentra la piedra) y este se lleva a la entrada del agujero. Desde ahí se comienza a introducir el cable, tirando desde ambos lados hacia el fondo del pozo (con la piedra en medio, que servirá de ayuda para llegar al fondo, tal como en el primer caso).

Después de primar el pozo, se da comienzo al proceso de carguío de explosivos. Se espera hasta que el explosivo llegue a la altura planificada, la que se muestra en la figura 26. Antes de instalar el PARAPLUG® se introduce al pozo un sensor de presión conectado al cable UTP que llega hasta el equipo DataTrapII. Se utilizarán 2 sensores de presión por pozo, uno al inicio y otro al final de la cámara de aire, para tener mayor información y relacionar ese dato con la VOD medida. Es importante saber que sensor está conectado a que canal del equipo DataTrapII, es por eso que al momento de ensamblar los sensores al cable UTP, se decide que aquel que va abajo, en el fondo de la cámara de aire, se conecta a los cables naranja y azul, mientras que los sensores que van sobre la cámara de aire, conectados a los cables café y verde. Todo esto para facilitar el análisis posterior. Finalmente, estos cables se conectan a una regleta y mediante un cable coaxial al equipo DataTrapII. Para finalizar, se termina de cargar el pozo con el material de taco. La figura 26 muestra un perfil de los pozos listos para la prueba. La figura 27 muestra una foto del montaje terminado en terreno.

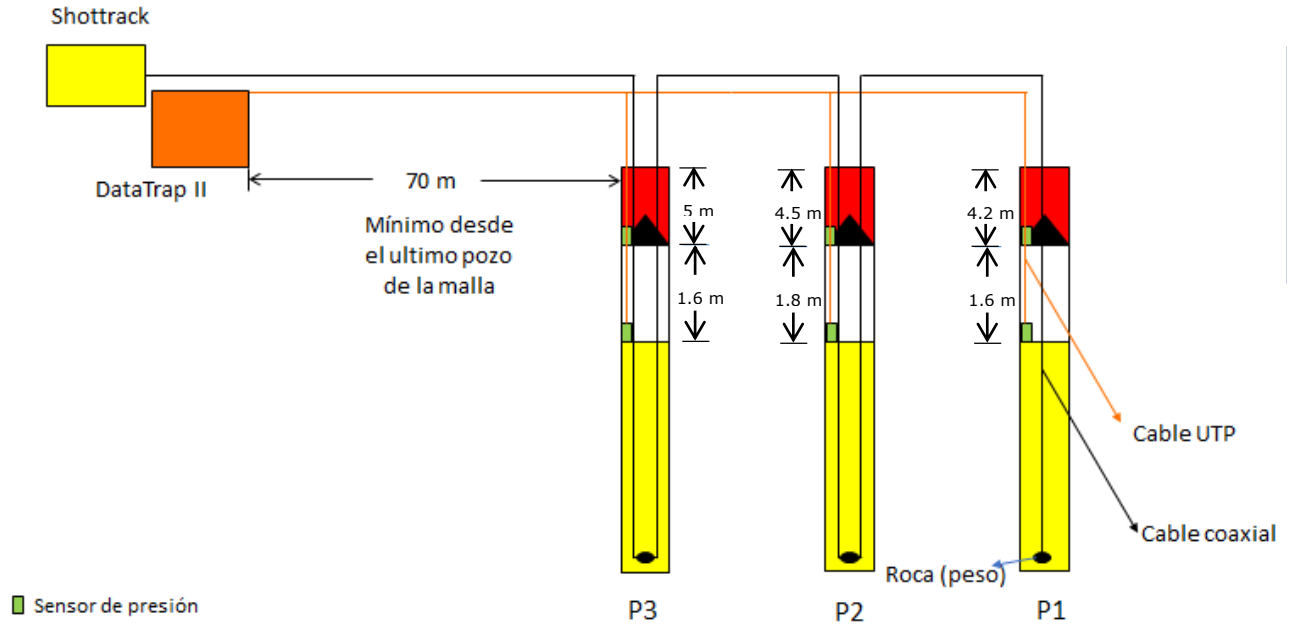


Figura 26: Vista lateral de pozos listos para realizar la prueba. Perfil de carga de los pozos seleccionados para la prueba

Destacar que los pozos en los que se realizaron las mediciones no tienen la misma configuración de cámara de aire que se ve en la figura 19. Los largos de columna de explosivo se detallan más adelante, así como la cantidad (en kg).

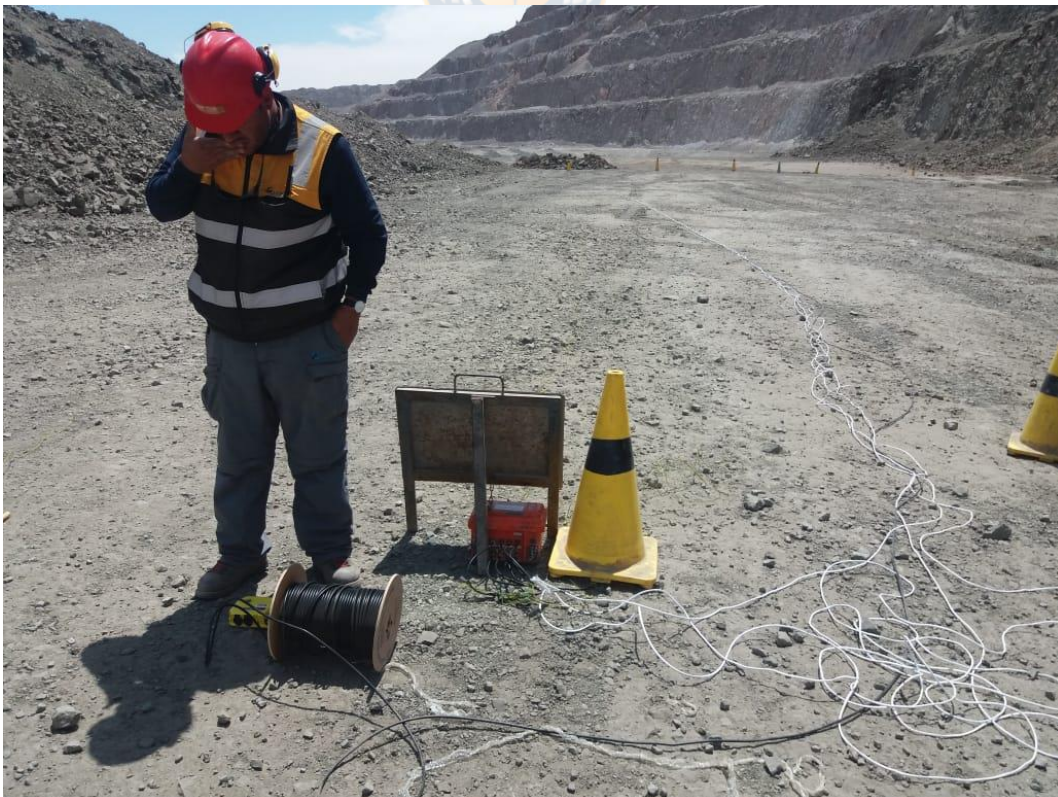


Figura 27: Montaje experimental terminado en terreno

4. Plan de trabajo

4.1 Primeras consideraciones

Se ingresa a faena el día martes 8 de octubre. Se inician reuniones con el área de PyT de la mina. En estas se da a conocer el sector en el que se realizará la voladura para llevar a cabo la prueba. Dada la compleja litología de la malla propuesta preliminarmente, Orica propone cambiar el sector donde se realizaría la prueba, lugar que cuenta con una litología más homogénea, de manera de disminuir la posibilidad de que los datos se vean afectados por propiedades distintas en la roca. La fecha de la tronadura es el día viernes 11 de octubre. La figura 28 muestra un cronograma con la planificación original.

CRONOGRAMA DE TRABAJO IMPLEMENTACION PRUEBA PARAPLUG®		Semana 1					Semana 2					Semana 3				
		L	M	J	J	V	L	M	J	J	V	L	M	J	J	V
Introducción	Tramitación de ingreso mina	■														
	Inducción al personal		■													
	Demostración en terreno			■												
Trabajo en terreno (mina)	Instrumentación para mediciones				■											
	Tronadura					■										
	Procesamiento de datos						■	■	■	■	■	■	■	■		
Trabajo en gabinete (Santiago)	Reunión															
	Elaboración de informe					■				■	■	■	■	■		
	Presentación informe										■	■	■	■		

Figura 28: Cronograma de trabajo preliminar

4.2 Capacitación del personal

El día miércoles 9 de octubre se ingresa a faena con el fin de capacitar al personal en el uso e instalación del tapón cónico PARAPLUG®. En esta instancia, las personas tuvieron la oportunidad de conocer cómo funciona y armarlo antes de introducirlo en los pozos. La inquietud que más se presentó entre los asistentes era el hecho de que el tapón podría cortar los cables de los detonadores, sin embargo, al revisar el dispositivo ellos mismos, se pudo constatar que el material y su forma no constituyen un riesgo para el correcto funcionamiento del evento de tronadura. Más tarde ese mismo día, el personal pudo instalar el dispositivo en algunos pozos a modo de entrenamiento. Una de las preocupaciones de la mina era que el dispositivo podía interrumpir el tiempo de carguío de los explosivos, pero se demostró que los operadores tardan apenas 30 s en promedio para instalarlo.

4.3 Instrumentación en terreno

El carguío de la malla se inicia el día jueves 10 de octubre. Se despliegan en terreno los cables RG6 y UTP junto con las 54 unidades de PARAPLUG® para realizar la prueba. El carguío de la malla completa se lleva a cabo en aproximadamente 3 horas y la instalación del dispositivo no generó retrasos ni impactos negativos en el desarrollo del trabajo.

Listos todos los pozos, y sobre todo aquellos en los que se realizarían las mediciones, los cables se extienden hasta la zona de seguridad en la que el día viernes 11 de octubre, 30 minutos antes de la tronadura, se realiza la conexión con los equipos *ShotTrack* y *DataTrapII*.

4.4 Día de la tronadura

El día viernes 11 de octubre se notifica de un problema, una pala dentro del radio de evacuación sufrió un desperfecto. Se actúa de acuerdo a los protocolos de la empresa y se decide retrasar la tronadura para el día sábado 12 de octubre.

Este día se realiza la conexión con los equipos de medición y el evento de tronadura se lleva a cabo con completa normalidad. Las figuras 29 y 30 muestran una toma comparativa entre las eyecciones del sector con y sin cámara de aire. Destacar que no hubo tiros quedados ni otros problemas en la tronadura.



Figura 29: Tronadura sección con cámara de aire



Figura 30: Tronadura sección sin cámara de aire



CAPITULO IV: RESULTADOS

1. Velocidad de detonación

El software del equipo ShotTrack entrega un gráfico como el que se muestra en la figura 31.

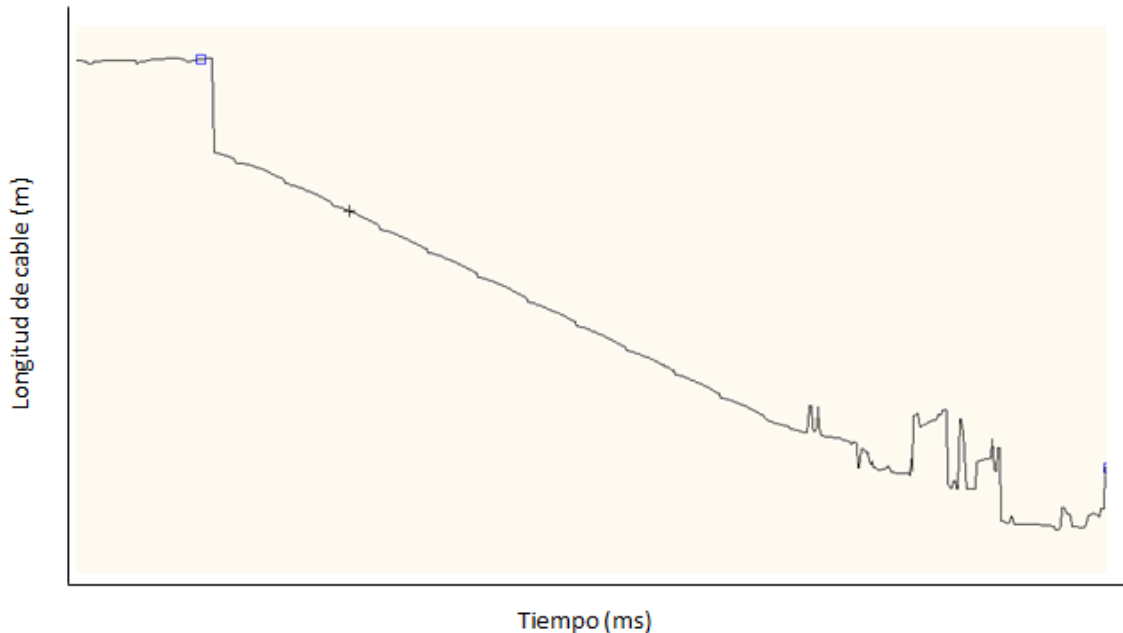


Figura 31: Gráfico ShotTrack para la detonación del pozo 1

Esta gráfica representa la longitud del cable coaxial vs tiempo en ms. Gracias a esta herramienta es posible determinar eventos como el momento de la detonación, además de la posibilidad de elegir la zona en la que se quiere calcular la velocidad de detonación. La figura 32 presenta la misma gráfica, pero en esta es más fácil ver y caracterizar la curva en función del pozo, como se muestra en la misma. A continuación se presentan los resultados para cada uno de los pozos de la prueba. Primero se presenta una vista de perfil del pozo utilizando el gráfico de la figura 32, para identificar la zona donde se encuentra la cámara de aire y ver de manera fácil la VOD en esta. Además se presentan los valores promedio de VOD, tanto para la columna de explosivo como para la cámara de aire.

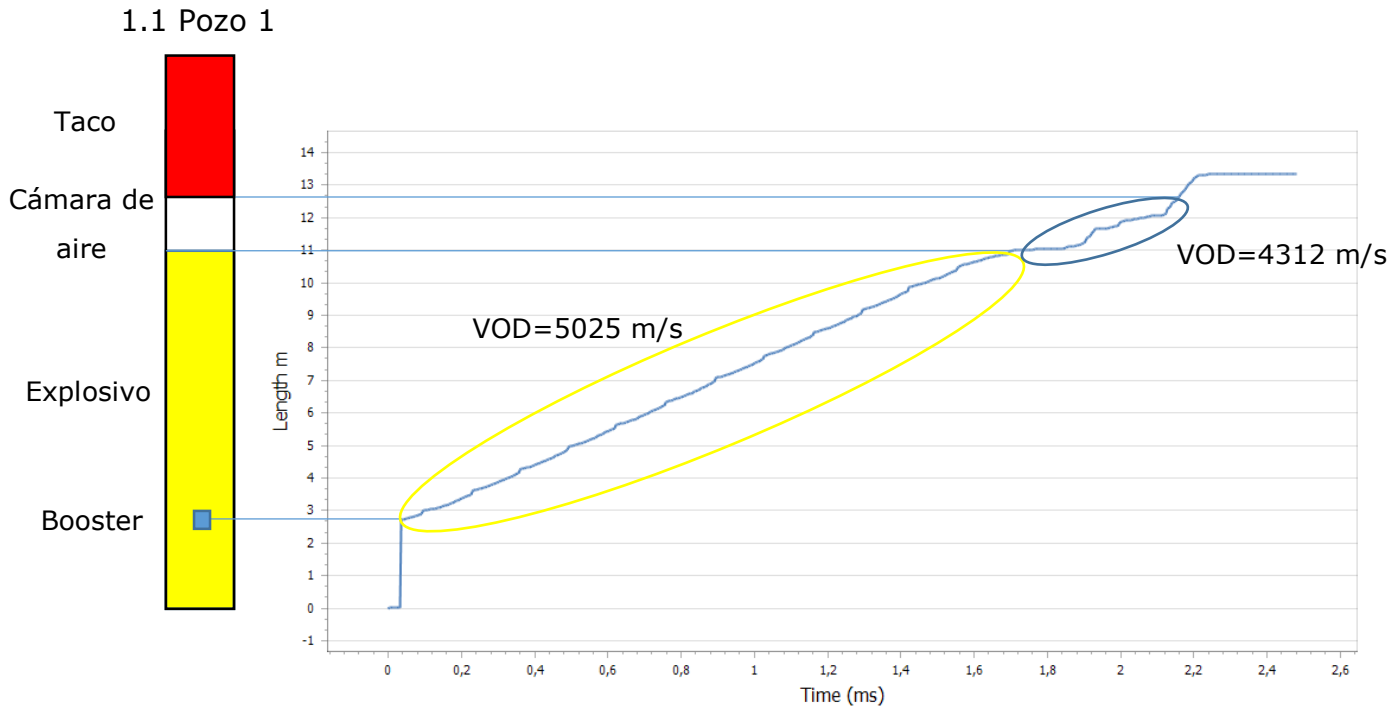


Figura 32: Perfil de pozo a partir del gráfico ShotTrack para el pozo 1 y valores de VOD por zona

En la figura 32 se puede ver un *peak* de velocidad de detonación, justo en la zona en la que se encuentra la cámara de aire, sin embargo, no es posible aseverar que este fenómeno se deba a la presencia de este espacio, ya que como se ve en la figura 31, en la zona de abajo hay errores en la toma de los datos. Estos se deben a la detonación, al ser un proceso tan violento, mueve el cable y este puede desconectarse brevemente del equipo. A pesar de esta problemática, al momento de medir VOD en la zona de la cámara de aire, se determina que el promedio de esta disminuye respecto a la velocidad de detonación en la columna de explosivos.

1.2 Pozo 2

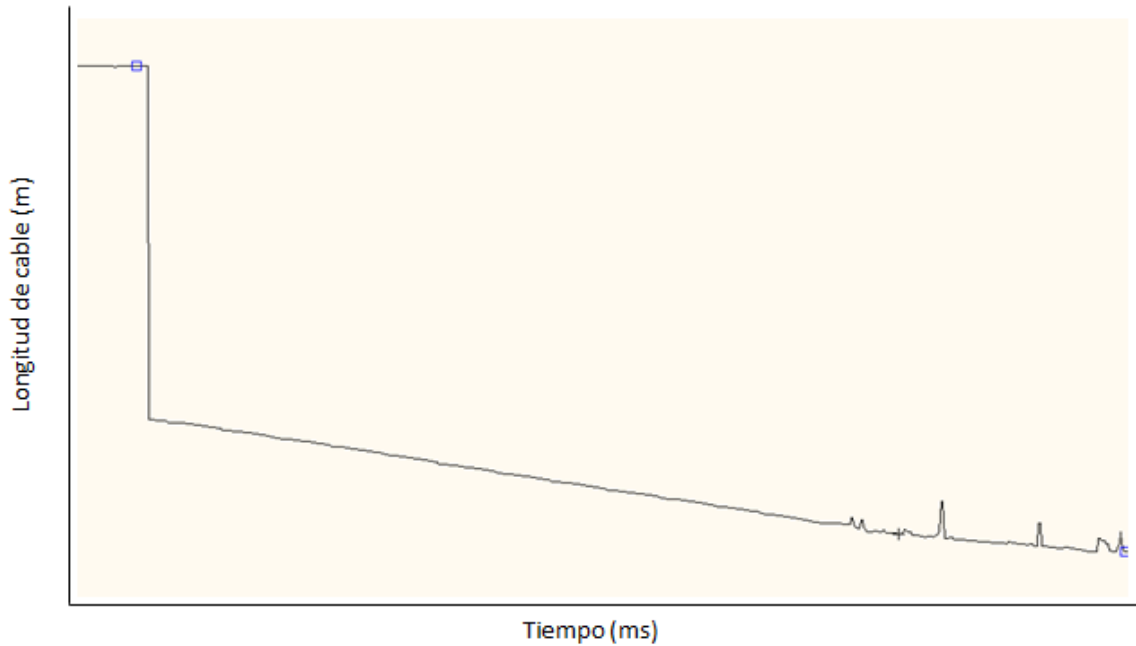


Figura 33: Gráfico ShotTrack para la detonación del pozo 2

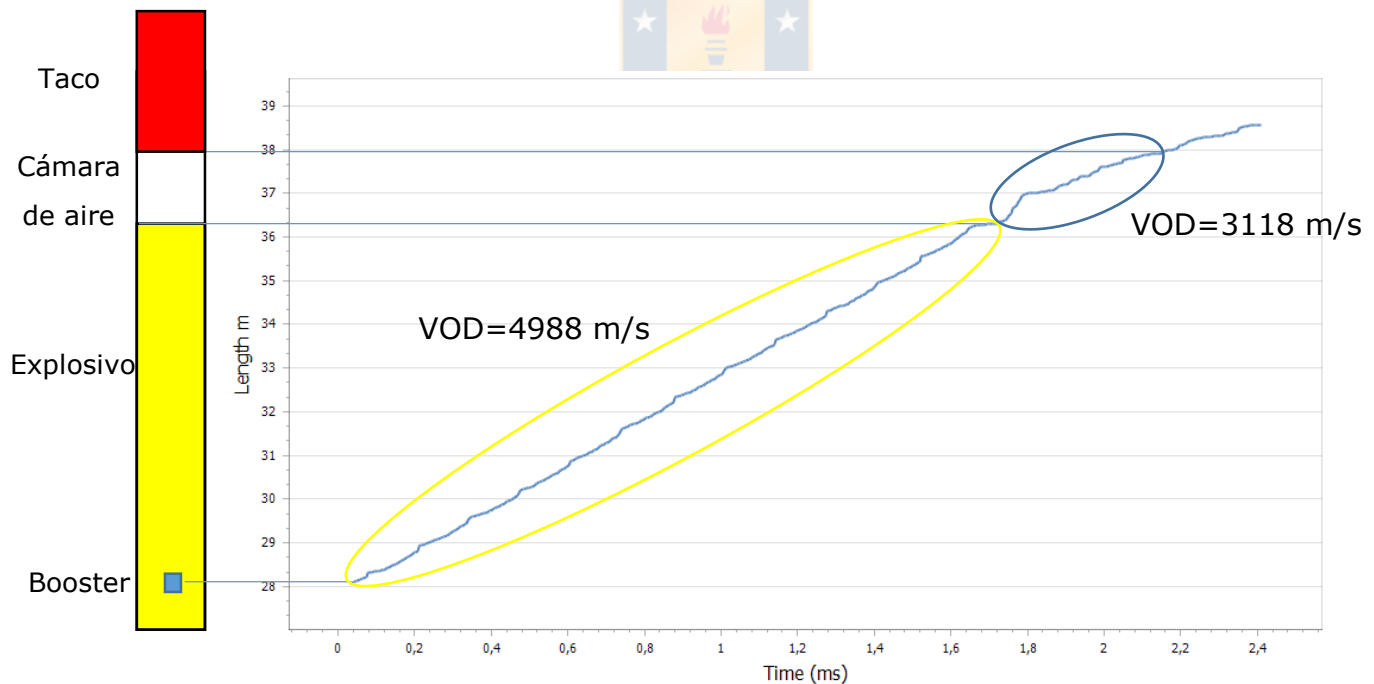


Figura 34: Perfil de pozo a partir del gráfico ShotTrack para el pozo 2 y valores de VOD por zona

La figura 33 muestra que también hay algo de error en la toma de datos. La figura 34 muestra el perfil del pozo junto a la gráfica y las VOD por zona. Gracias a la figura 34 se determinó que el booster se encontraba 2 metros por sobre el fondo del pozo. Tal como para el caso del primer pozo, se ve un *peak* de velocidad en la zona de

la cámara de aire, pero este *peak* se debe al error mencionado anteriormente. Finalmente, el promedio de velocidad de detonación en la cámara de aire disminuye respecto a la VOD en la columna de explosivo.

1.3 Pozo 3

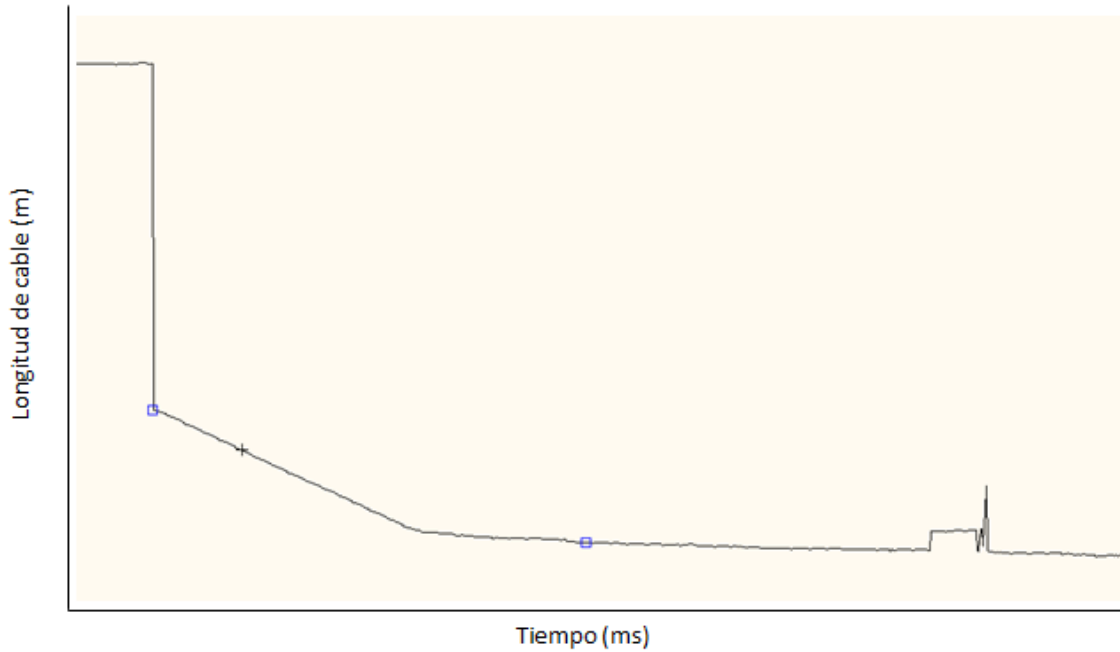


Figura 35: Gráfico ShotTrack para la detonación del pozo 3

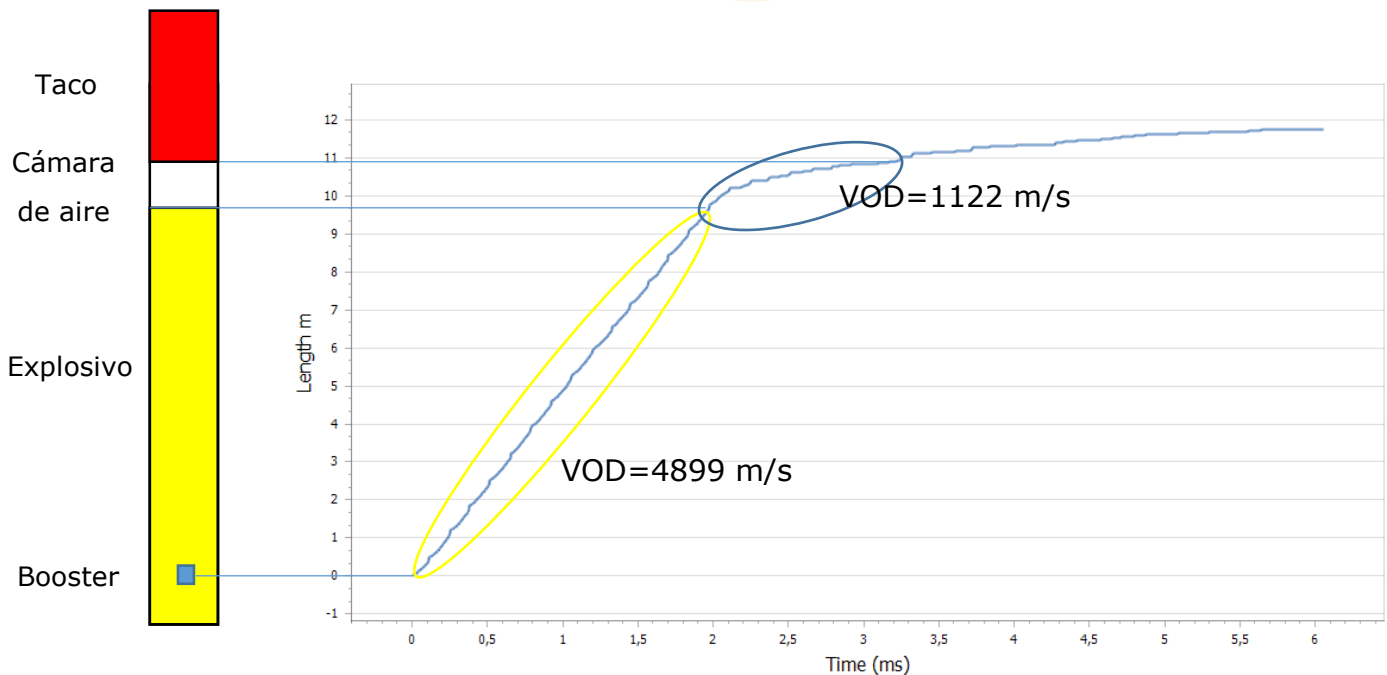


Figura 36: Perfil de pozo a partir del gráfico ShotTrack para el pozo 3 y valores de VOD por zona

Si bien en la figura 35 nuevamente se observa el mismo error que para los pozos anteriores, esta se encuentra fuera del área del evento de detonación, por lo tanto no influye en el análisis de los datos de velocidad de detonación. En terreno se dio cuenta de que el pozo 3 no tenía una profundidad de 17 m y con la ayuda de la figura 36 se determinó que el booster se encuentra junto al final del cable, 2 metros por sobre el fondo del pozo. En este caso, es más notoria la disminución de la VOD en la zona de la cámara de aire respecto a la zona de la columna de explosivos. La tabla 5 muestra un resumen de los datos para cada pozo y un cálculo de la presión de gases usando las ecuaciones 3 y 4. La densidad del explosivo se obtiene de la configuración de los pozos de prueba, esto es:

- Pozo 1: 673 kg de explosivos en 11.2 m, por lo tanto la densidad es: 1.05 g/cc
- Pozo 2: 643 kg de explosivos en 10.7 m, por lo tanto la densidad es: 1.05 g/cc
- Pozo 3: 625 kg de explosivos en 10.4 m, por lo tanto la densidad es: 1.05 g/cc

Tabla 5: Resumen datos VOD y presión de gases calculada

	VOD al inicio de la cámara (m/s)	P de gases calculada al inicio de la cámara (kbar)	VOD al final de la cámara (m/s)	P de gases calculada al final de la cámara (kbar)
Pozo 1	4353	41.450	3187	34.378
Pozo 2	3907	33.391	1594	26.858
Pozo 3	4288	40.221	1097	32.921

2. Presión al interior de la cámara de aire

El equipo DataTrapII entrega un archivo, el cual presenta gráficos para cada canal que se usó del equipo. Como se mencionó anteriormente, el equipo es configurado para medir VOD, por lo tanto, el archivo muestra una curva de distancia (m) vs tiempo (ms). Haciendo uso del programa *Reset Carbon* es posible transformar ese gráfico en otro que muestra resistencia (en ohm) vs tiempo (ms). Luego de este proceso se obtiene un gráfico como el que se muestra en la figura 37.

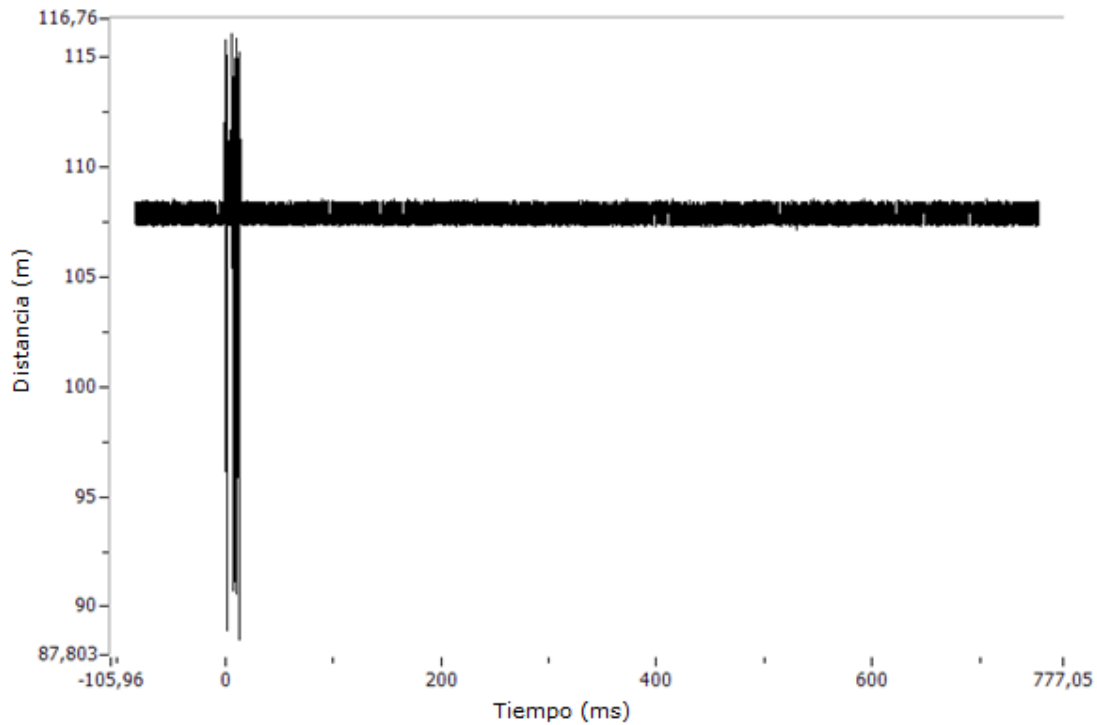


Figura 37: Gráfica entregada por el equipo DataTrapII, resistencia vs tiempo. Canal 2, sensor de abajo, pozo 3

Para obtener la presión, es necesario encontrar el primer *peak* de resistencia. Para eso, se realiza un *zoom* a la zona de interés, es decir, aquella en la que se ven los primeros *peak* (ya sean positivos o negativos). La figura 38 muestra una imagen de la zona de interés en detalle.

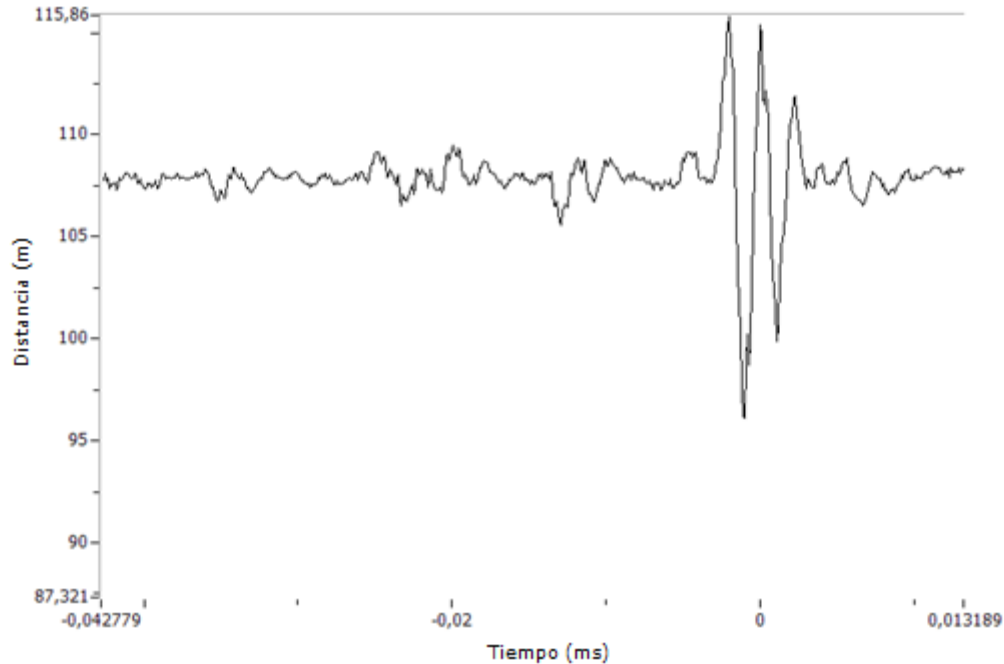


Figura 38: Gráfico de la zona de interés. Canal 2, resistencia de abajo, pozo 3

En esta imagen se identifica claramente el primer valor que se escapa de la media. El proceso a seguir es exportar la gráfica como un archivo de valores csv, para realizar un tratamiento de los datos en *Excel*. Destacar que se tienen 2 de estas graficas por pozo, una para el sensor ubicado al inicio de la cámara de aire y otra para el sensor ubicado al final de la cámara de aire. Para obtener el dato de la presión de detonación en kbar se hace uso de la siguiente ecuación de ajuste:

$$PD \text{ (kbar)} = 7.329r^2 + 4.759r \quad \mathbf{7}$$

Dónde:

- $r = \Delta R / R$
- $R = \text{Resistencia inicial } (\Omega)$
- $\Delta R = R_{peak} - R_{promedio}$

Encontrado el valor del primer *peak*, todos aquellos datos que se encuentren en un tiempo anterior son promediados. Restando el *peak* y el promedio obtenido se encuentra el valor de ΔR . La resistencia inicial se obtiene midiendo con el multímetro cuando se conectan los sensores al cable UTP.

Para las gráficas detalladas de cada sensor consulte el Anexo 4. La tabla 6 muestra un resumen de los datos de presión por pozo y por sensor.

Tabla 6: Resultados medición sensor de presión

	Ubicación sensor	Presión (kbar)
Pozo 1	Abajo	72.86
	Arriba	69.52
Pozo 2	Abajo	713.0
	Arriba	2432.2
Pozo 3	Abajo	59.14
	Arriba	55.25

Viendo los resultados mostrados en la tabla 6 se puede notar que los valores no coinciden con los calculados en la sección anterior de este capítulo y que se muestran en la tabla 5. Así surgen una serie de interrogantes como: ¿Por qué los valores medidos no coinciden con los teóricos? ¿Hay algo que se pueda hacer diferente en el procesamiento de los datos? Es probable que el hecho de que los pozos a medir detonaran en un ambiente confinado alterara los datos, ya que ese confinamiento podría afectar a los sensores. El software *Reset Carbon* fue utilizado de la manera que se indica. Una de las razones más probables sería el hecho de introducir al pozo los sensores de presión a granel, es decir, sin ninguna protección. La solución sería introducir los sensores en un líquido incompresible. Otro aspecto importante, es el hecho de que el equipo se auto-inició, es decir, no lo inicio una detonación externa. Dada la recomendación de la metodología se entiende que el hecho de que esto ocurra no es lo ideal y por ende podría haber afectado en la medición. Finalmente, mencionar el hecho de que las presiones de la tabla 5 son presiones de gases, es posible que los sensores de presión midieran presión de detonación (por alguna razón como las mencionadas en este mismo párrafo), y es por eso que los resultados mostrados en la tabla 6 casi doblan a los resultados calculados. Además, existe la posibilidad de que los sensores se ubicaran a una distancia menor que la planificada, eso explicaría la variación tan pequeña en los resultados de la tabla 6.

A pesar de esta problemática, aún es posible hacer conclusiones con estos resultados. Viendo las figuras 53 y 54 en el anexo 4, se concluye que los sensores del pozo 2 resultaron dañados, ya que después del primer *peak* de presión no siguen midiendo con normalidad o no se registran los datos de manera correcta. Una posible

explicación es que la detonación de pozos contiguos pudo dañar los dispositivos, además de lo mencionado anteriormente.

Ahora bien, para los pozos 1 y 3, se ve que la presión disminuye a medida que se sube por la cámara de aire, cosa que concuerda dada la disminución de la velocidad de detonación en la cámara de aire como se ve en la sección anterior. Usualmente se relaciona una alta presión de detonación con una buena fragmentación, ¿Es esto contradictorio con lo documentado acerca de la técnica respecto a esa variable? No necesariamente, de hecho, estos resultados corresponden a lo teorizado por Mel'nikov y Marchenko. Estos decían que la presión disminuía si había una cámara de aire, ya que los productos de la detonación se mueven y expanden en ese espacio de aire. Gracias a esto se producía una segunda onda de choque reforzada y la energía interactuaba durante más tiempo con el macizo rocoso, mejorando la fragmentación. Además, bajo este mismo concepto, es que se produce la reducción en las eyecciones de taco. De esta manera, es posible concluir que hay un cambio de este parámetro en presencia de una cámara de aire, y que, a pesar de que no está muy claro el por qué (ya que la información no es suficiente para validar las teorías de los científicos citados), este cambio ayudaría en los resultados obtenidos en una tronadura diseñada con una cámara de aire.

3. Fragmentación

Se utiliza el método de análisis de imágenes para obtener la curva granulométrica, tomando fotografías desde la pila del material (método Orica). Para el sector diseñado sin cámaras de aire se obtiene un P_{80} de 7.02 in. Para el sector diseñado con cámara de aire se obtiene un P_{80} de 5.34 in. La figura 39 muestra la curva granulométrica del sector sin cámara de aire y de la malla completa. En el anexo 5 se presentan las curvas granulométricas de cada sector por separado, además de un cuadro con los parámetros de Rosin-Rammler.

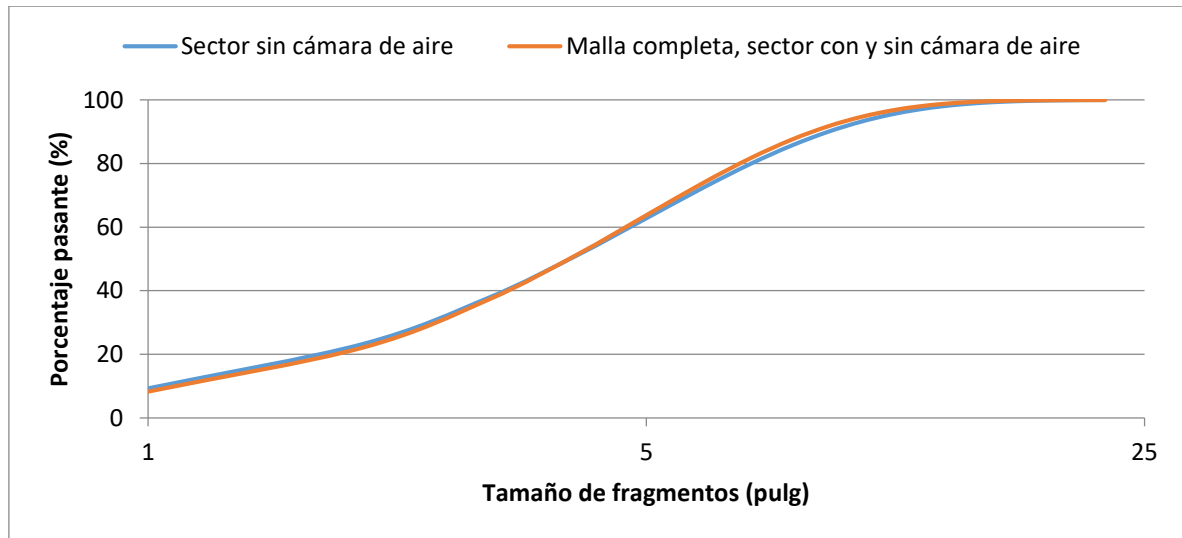


Figura 39: Curva granulométrica de ambos sectores

De la figura 39 se observa que al introducir el sector con cámara de aire en la malla se obtiene una reducción de 7.02 in a 6.76 in, lo que implica una reducción del P_{80} de 3.7% utilizando 60 kg menos de explosivo. Además, se observa una disminución en los gruesos y en los finos.

4. Vibraciones

Uno de los efectos más importantes de la tronadura son las vibraciones. Orica dispuso de los equipos para realizar la medición (geófono) y los resultados se muestran en la figura 40.

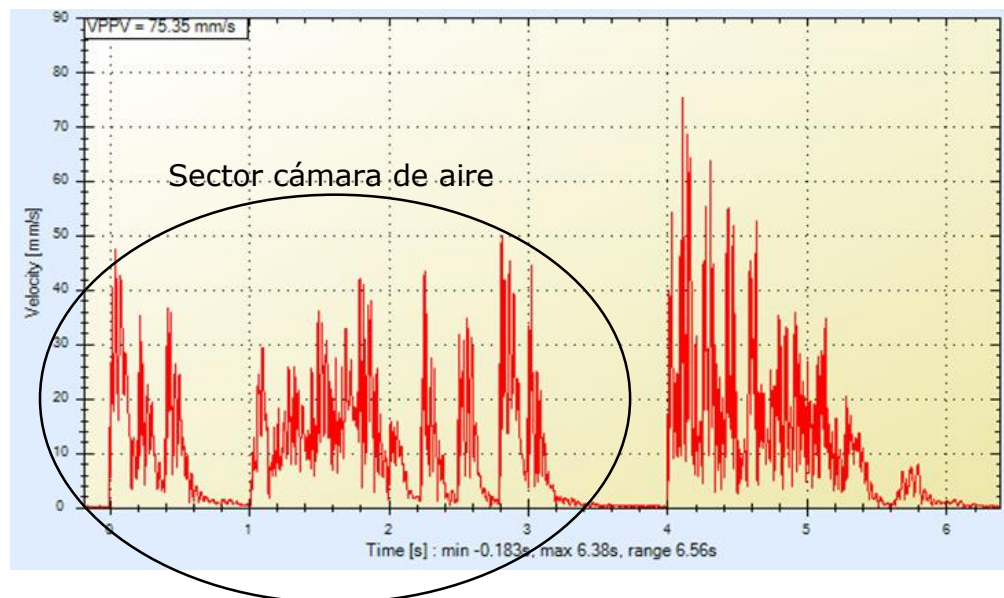


Figura 40: Gráfico de vibraciones

De la figura 40 se nota que el sector de la izquierda corresponde a la zona con cámara de aire y la de la derecha a la zona sin cámara de aire. Claramente los *peak* obtenidos en la zona izquierda son menores a los obtenidos en la zona derecha. Esto demuestra que el uso de cámaras de aire disminuye las vibraciones lo que refuerza una de las teorías respecto a la funcionalidad de la técnica. La diferencia en PPV entre zonas es de aproximadamente 15 mm/s, es decir, un 33.64%. Destacar que la distancia del geófono a los pozos es de aproximadamente 103 m.

5. Evaluación económica

Esta se realiza pensando en que las tronaduras de todo un año se diseñan completamente con cámara de aire, en base al ahorro en la cantidad de explosivos utilizado, suponiendo que se reducen 60 kg de explosivo por pozo para 1500 pozos mensualmente (para un año con 11 meses de trabajo efectivo). Destacar que esto es un caso hipotético, con el objetivo de dar una idea de ahorro, en ningún caso se asevera que en cualquier condición se obtendrán ahorros similares. La tabla 7 muestra el resumen de los cálculos y el ahorro neto final.

Tabla 7: Evaluación económica

Precio explosivo	650 USD/ton
Subida lineal	69.2 kg/m
Perfil de carguío (diseño)	761 kg/pozo
Configuración propuesta	699 kg/pozo
Ahorro por pozo	40.3 USD/pozo
Costo PARAPLUG®	10.25 USD/pieza
Beneficio neto	30.05 USD/pozo
Ahorro mensual	45075 USD/mes
Proyección ahorro anual	540900 USD/año

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Conclusiones

Ejecutada la prueba, y luego de realizar un análisis a los datos obtenidos, se obtiene una disminución en las variables a estudiar dentro de la cámara de aire. A pesar de los problemas que se presentaron en la toma de datos para el caso de la VOD o de la imprecisión de los datos de presión, la metodología utilizada funciona, ya que es posible obtener lo que se buscaba desde un principio. Hay detalles que se pueden mejorar y que presumiblemente mejorarían la experiencia, como los mencionados anteriormente que hacen referencia a los sensores de presión, tales como introducirlo dentro de un líquido incompresible o asegurarse de que el equipo DataTrapII se inicie de la manera sugerida (iniciación externa por cable cortado).

El pozo 3 es aquel que entrega la información más precisa en lo que a VOD respecta. Los datos de presión fueron sometidos a más tratamientos que aquel que se muestra en este trabajo. Sin embargo, la conclusión de que la presión de detonación en la cámara de aire disminuye a lo largo de esta (de abajo hacia arriba) se obtiene en base al conjunto de tratamientos realizados, además del cálculo realizado en base a la VOD con las ecuaciones 3 y 4. Este hallazgo refuerza la teoría de Mel'Nikov y Marchenko, que debido a la disminución en la presión de detonación se obtendría una segunda onda de choque reforzada que actuaría sobre la roca por una cantidad de tiempo mayor, y todo eso ayuda en los resultados de la tronadura. A pesar de esto, no es posible decir con certeza absoluta que dado el cambio en estas variables, se obtienen los resultados (mejores) con cámara de aire. Lo que sí se puede afirmar (al menos para minería del hierro) es que ocurre un cambio en las variables de la detonación producto de la presencia de una cámara de aire, esto a pesar de que se tomen datos a partir de sólo 3 pozos. Si bien el estudio es poco representativo en la toma de los datos de velocidad y presión, los resultados obtenidos coinciden con la teoría y además coinciden en que se obtiene una disminución de estos parámetros, como se vio en el capítulo II, sección 3.

La fragmentación disminuye en la zona con cámara de aire respecto a la zona sin cámara de aire. A pesar de que la disminución no es notoria en la figura 39, un 3.7%

de reducción en el P_{80} no se puede despreciar, considerando que se utilizaron 60 kg menos de explosivo. No se puede asegurar que esto sea resultado de la disminución en los parámetros estudiados, pero si se refuerza la teoría de los autores mencionados en el párrafo anterior además de coincidir con los resultados obtenidos por los autores del capítulo II, sección 3.

Adicionalmente otro resultado que entrega la cámara de aire es el control de polvo (preocupación principal de la gente de la mina en la que se trabajó). Respecto a este resultado se puede concluir que se debe la disminución de la presión de detonación en la zona del taco o que al menos este hecho ayuda. Todo esto, en conjunto con los resultados de fragmentación y vibraciones abre la puerta para comenzar a considerar poner en marcha pruebas en distintas minas, para ver la respuesta de la técnica en diferentes condiciones. Para este efecto es destacable el desempeño del dispositivo PARAPLUG®, ya que se constató en terreno su versatilidad y efectividad en la generación de cámaras de aire, además de su bajo costo, el que ayuda a obtener los beneficios económicos que se observan en la tabla 7, sin mencionar que este ahorro podría ser aún mayor si se considera una mayor reducción en la cantidad de explosivos utilizada. Respecto a este punto, destacar que el ahorro puede ser aún mayor, ya que no se considera el ahorro en costos operacionales que trae consigo reducir el consumo de explosivos. Si bien el objetivo de este estudio no es encontrar una longitud o ubicación de cámara de aire óptima, se sientan las bases demostrando que la técnica ayuda a los resultados de la tronadura en varios aspectos, por lo tanto, investigar sobre esas variables para masificar el uso de cámaras de aire en tronaduras de producción es recomendable.

No olvidar que la minería sustentable es el futuro. Obtener mejores resultados a menores costos es primordial, además de mantener el foco en el medio ambiente y las comunidades. Esta técnica ayudaría a las empresas mineras en esos 3 aspectos fundamentales básicamente por 2 razones:

1. Reduce los costos (utilización de explosivos principalmente)
2. Reducción de emanación de polvo y vibraciones, lo que puede ayudar en una eventual declaración de impacto ambiental, además de evitar posibles conflictos con comunidades cercanas (caso Mina Carmen de Andacollo)

2. Recomendaciones

En primer lugar, es importante saber si los beneficios mencionados son responsabilidad exclusiva de la aplicación de cámaras de aire, por lo tanto se debe aumentar el entendimiento de la técnica para reducir la incertidumbre al utilizarla. Dado que los resultados son muy buenos, de acuerdo a este estudio y a los mencionados en este trabajo, sería ideal poder estandarizar el uso de la técnica, por ejemplo, determinando la longitud y la ubicación que optimicen los beneficios dependiendo del tipo de roca o mineral.

En segundo lugar, si bien hay pruebas y estudios que señalan un buen rendimiento de la técnica de las cámaras de aire no se puede asegurar que se obtendrán los mismos beneficios en cualquier mina. Por lo tanto, se recomienda probar la técnica y constatar la mejoría en los resultados en minas con los siguientes problemas:

- Costos (ahorrando en explosivos)
- Vibraciones
- Eyecciones de taco
- Emanación de polvo
- Fragmentación



Finalmente, en caso de recurrir a las cámaras de aire, es recomendable utilizar el dispositivo PARAPLUG®, debido a su bajo costo, fácil manera de instalar y confiabilidad. Recordar que el dispositivo puede usarse incluso en pozos inundados.

Bibliografía

- [1] **SONAMI.** *Guía de operación para la pequeña minería.* Chile. 2013
- [2] **Vergara, Patricio.** *Importancia de la tronadura en la cadena productiva del negocio minero.* Universidad de Chile. Artículo. 2013
- [3] **Avaria Madariaga, Pamela.** *Técnicas de Voladura Avanzada para la Optimización de Fragmentación y Control de polvo.* Chile. 2018
- [4] **Chiappetta, Frank.** *Nueva técnica de voladura.* Journal of Explosives Engineering. 2004
- [5] **Jhanwar, J. C.** *Theory and Practice of Air-Deck Blasting in Mines and Surface Excavations: A Review.* India. 2011
- [6] **FERRADA BLAST.** PARAPLUG® en Chile. 2017
- [7] **FERRADA BLAST.** Presentación PARAPLUG®. 2017
- [8] **ORICA.** *CRG Procedure for the DataTrapII VOD Circuit.* 2015
- [9] **FERRADA BLAST.** Manual de usuario *ShotTrack.* 2017
- [10] **Konya, Calvin, Albarrán, E.** *Diseño de voladuras.* 1990
- [11] **ENAEX.** Manual de tronadura
- [12] **López Jimeno, Carlos, López Jimeno, Emilio.** *Manual de perforación y voladura de rocas.* IGME. 1994.
- [13] **Lu, W, Hustrulid, W.** *A further study on the mechanism of air-decking.* Fragblast. 2003
- [14] **Chiappetta, Frank, Memmele, M.** *Analytical high—speed photography to evaluate air-decks, stemming retention and gas confinement in pre-splitting reclamation and gross motion studies.* Proceedings of the second international symposium on rock fragmentation by blasting. Society for Experimental Mechanics. USA. 1987

-
- [15] **Moxon, Neville, Mead, D.J., Richardson, S.B.** *Air-decked blasting techniques: some collaborative experiments*. Trans Inst Min Metall. 1993
- [16] **Liu, Liqing, Katsabanis, P.D.** *Numerical modeling of the effects of air decking/decoupling in production and controlled blasting*. Proceeding 5th international conference on rock fragmentation by blasting. Rotterdam. 1996
- [17] **Mel'Nikov, N.V., Marchenko, L.N.** *Effective methods of application of explosive energy in mining and construction*. Twelfth symposium on dynamic rock mechanics. AIME. New York. 1971
- [18] **Mel'Nikov, N.V.** *Utilisation of energy of explosives and fragment size of rock in blasting operations*. Gorn. 1940
- [19] **Jhanwar, J.C.** *Investigation into air-deck blasting and its influence on blast performance and economics in open-pit mines*. Thesis, Department of Mining Engineering, Visvesvaraya Regional College of Engineering, Nagpur University. Nagpur, India. 1998
- [20] **Bussey, J., Borg, David.** *Pre-splitting with the new air-deck technique*. Anaheim, California. 1988
- [21] **Rowlands, M.D.** *Separating explosive charges with air gaps to improve fragmentation whilst reducing explosive usage*. Melbourne: Australian Institute of Mining and Metallurgy. 1989
- [22] **Mead, D.J., Moxon, Neville, Danell, R. E., Richardson, S.B.** *The use of air-decks in production blasting*. Cleveland, Ohio, USA. 1993
- [23] **Jhanwar, J.C., Jethwa, J.L.** *The use of air-decks in production blasting in an open-pit coal mine*. Geotech Geol Eng. 2000
- [24] **Bieniawski, Zdzislaw.** *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons. New York. 1989.
- [25] **Thote, N.R., Singh, D.P.** *Improvement in fragmentation by application of air-deck technique*. 2001

Anexos

Anexo 1: Herramientas a utilizar



Figura 41: Sensor de presión con resistencia de carbón terminado



Figura 42: Equipo ShotTrack, monitor de VOD



Figura 43: DataTrapII



Figura 44: Rollo 305 metros cable coaxial RG6

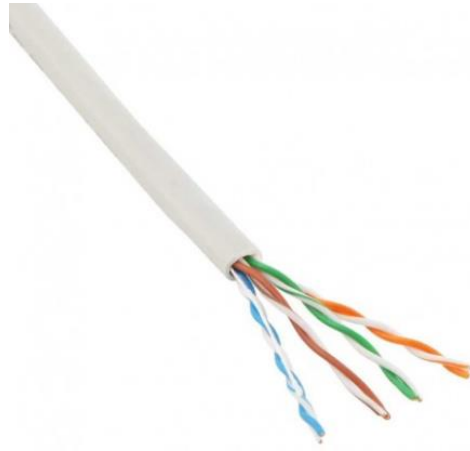


Figura 45: Cable UTP de 8 hebras



Figura 46: Conector BNC macho



Figura 47: Multímetro digital



Figura 48: Tenaza crimpadora BNC a presión



Figura 49: Stripper de cable coaxial



Figura 50: Regleta eléctrica de conexión

Anexo 2: Calibración equipo *ShotTrack*, para un cable de longitud 305 m

Pasos a seguir:

- Con el cable conectado al equipo como muestra la figura 24 se debe apretar el botón de encendido durante al menos 10 segundos. El botón de encendido mostrará una luz azul y aparecerá en la pantalla 8888
- El equipo calibrará automáticamente el cable (solo si este mide 305 m). Este paso puede tardar unos minutos, ya que el equipo comenzara a estabilizar la temperatura.
- Una vez estabilizada la temperatura esta se mostrará en pantalla y además se desplegará el factor de calibración del cable (valores comunes entre 8 y 8.5)
- Finalmente el equipo se apagará

Anexo 3: Calibración equipo *ShotTrack*, para un cable de longitud menor o igual a 305 m (mínimo 50 m)

Pasos a seguir:

- Con el equipo APAGADO, se conecta el cable y luego el conector USB que incluye el equipo para conectarlo al computador (se puede conectar por Bluetooth, pero no es recomendable)
- Abrir software VOD monitor
- Click en la pestaña Device. Si se realizó la conexión mediante cable USB, el programa reconocerá el equipo de manera inmediata.
- Se despliega la ventana que se muestra en la figura 56
- En el apartado Cable length se introduce la medida actual del cable

- Click en Get calibration, se realizara la calibración en el software. Luego click en set cable factor y listo. El equipo ya se puede utilizar para realizar mediciones

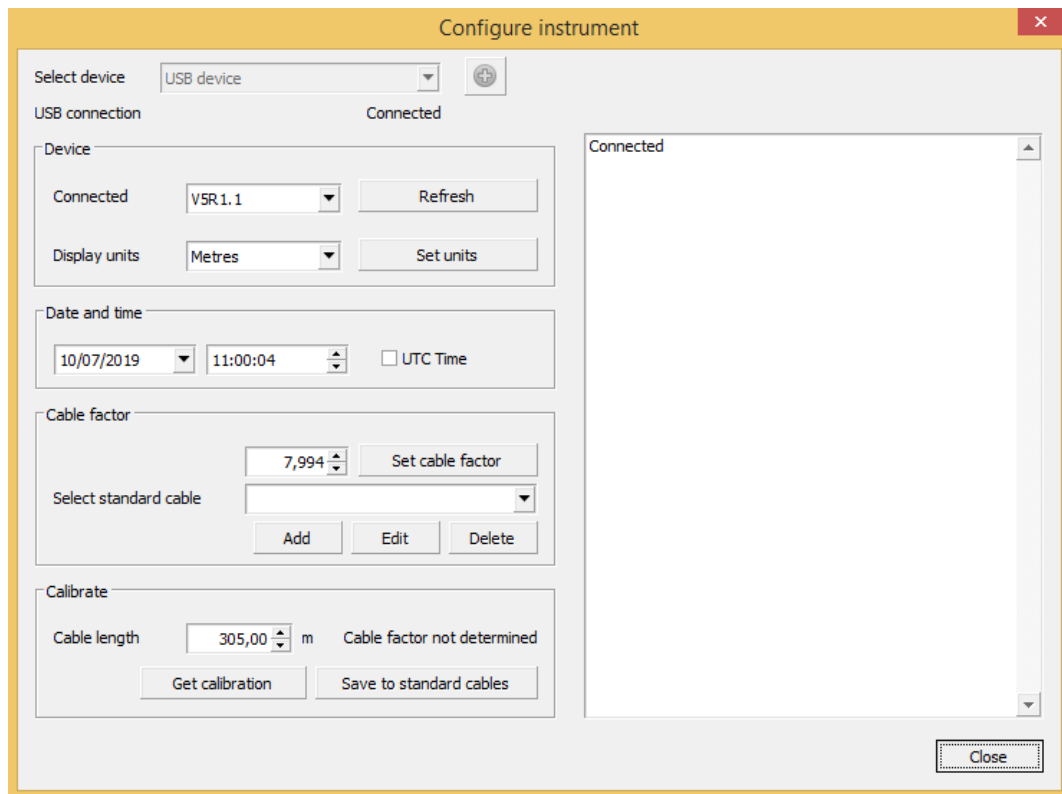


Figura 51: Ventana Device del software ShotTrack VOD monitor

Anexo 4: Gráficos de datos DataTrapII

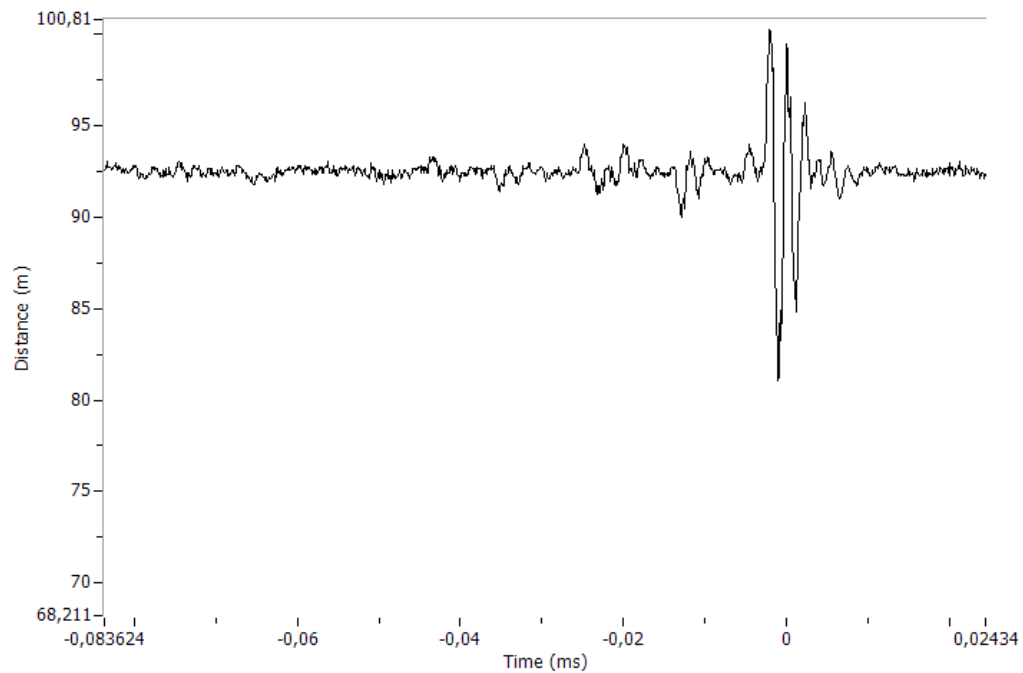


Figura 52: Gráfico de la zona de interés. Canal 3, resistencia de arriba, pozo 3

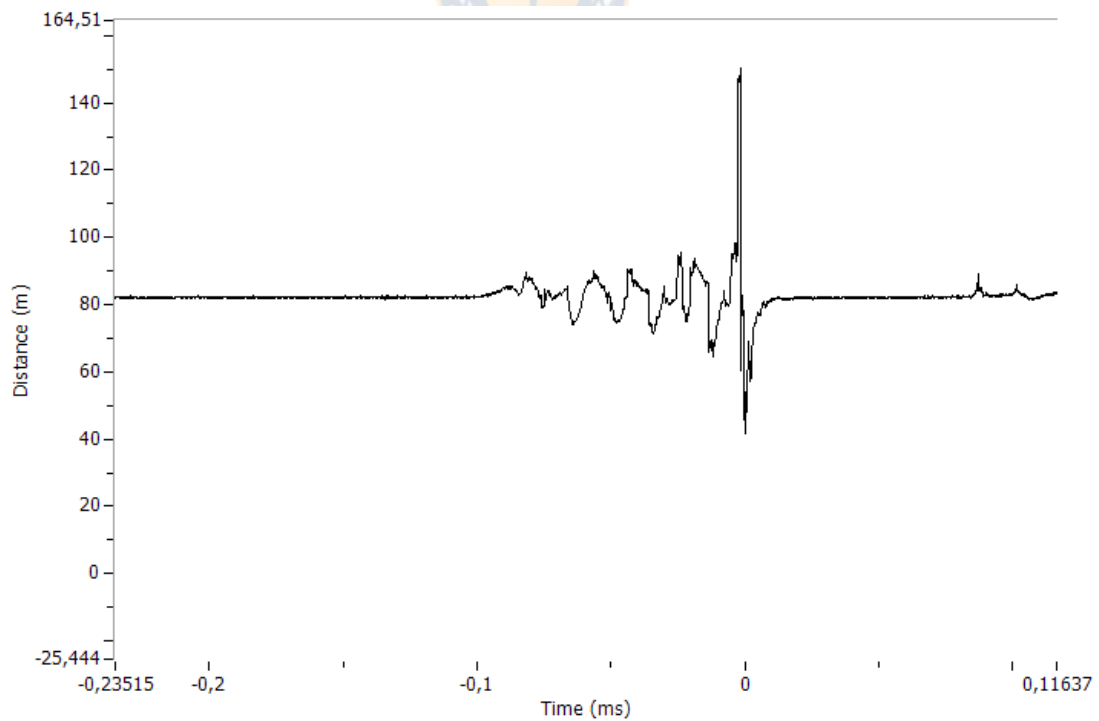


Figura 53: Gráfico de la zona de interés. Canal 4, resistencia de abajo, pozo 2

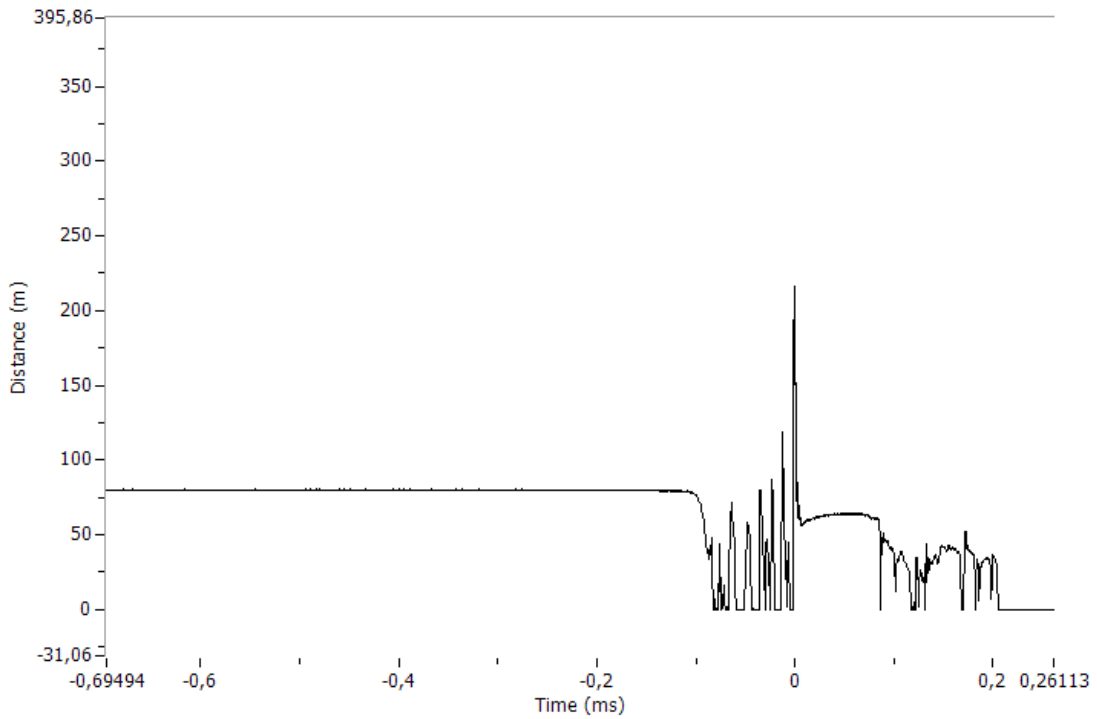


Figura 54: Gráfico de la zona de interés. Canal 5, resistencia de arriba, pozo 2

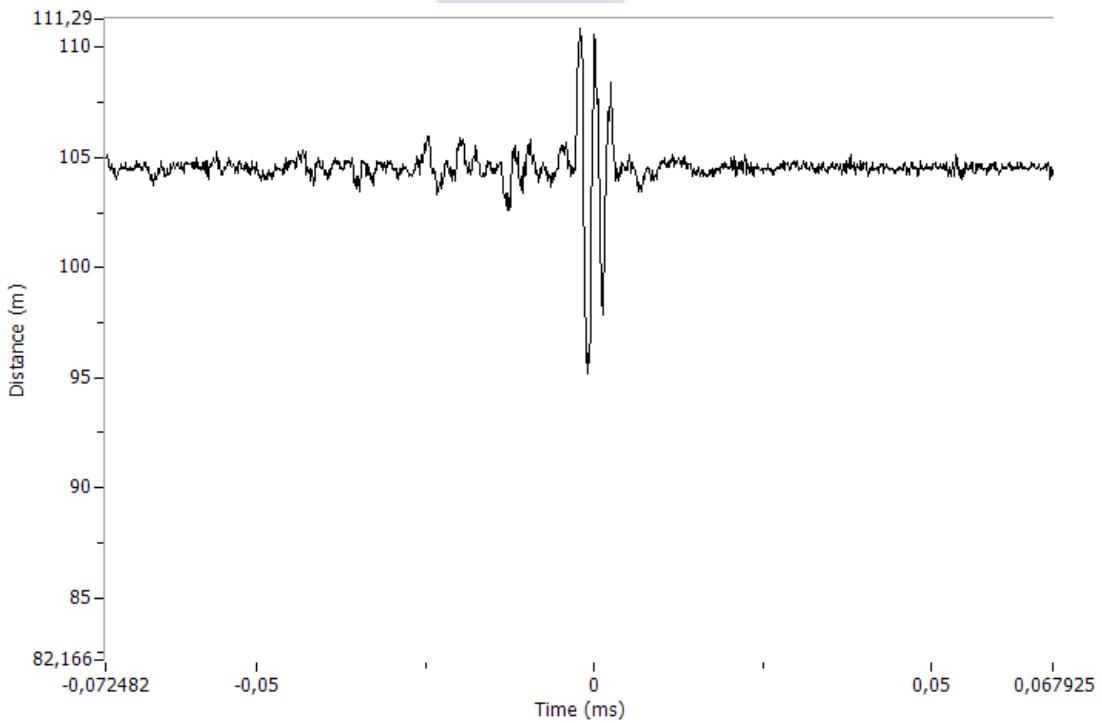


Figura 55: Gráfico de la zona de interés. Canal 6, resistencia de abajo, pozo 1

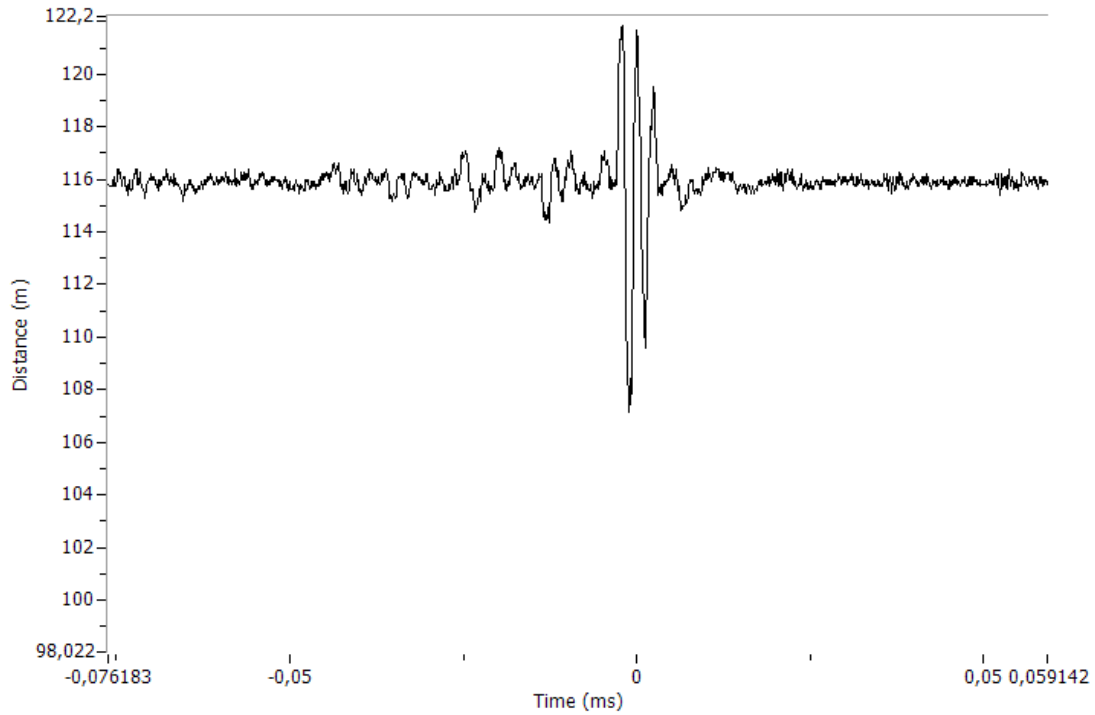


Figura 56: Gráfico de la zona de interés. Canal 7, resistencia de arriba, pozo 1

Anexo 5: Curvas granulométricas con el método de Rosin-Rammler

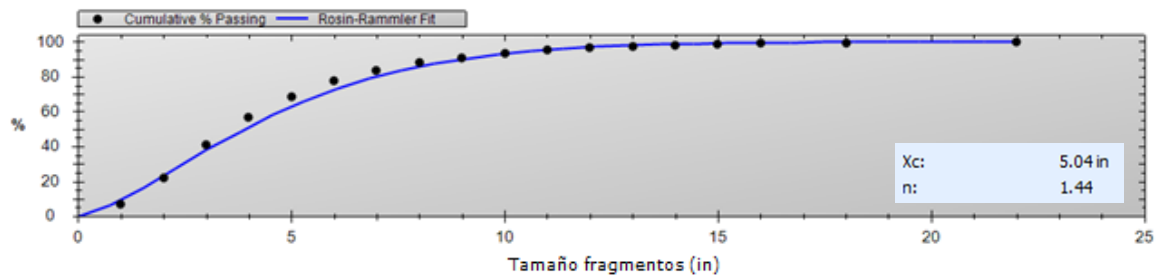


Figura 57: Curva granulométrica sector sin cámaras de aire

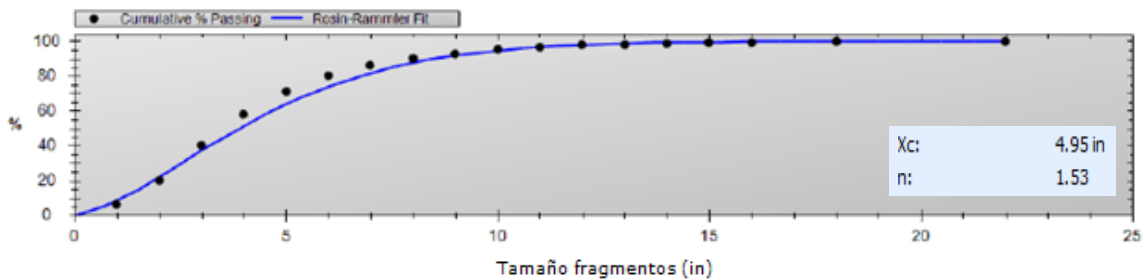


Figura 58: Curva granulométrica malla completa