



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**REGISTRO DE LA VELOCIDAD DE DETONACIÓN (VOD) PARA  
LA FRAGMENTACIÓN DE ROCA EN VOLADURAS CON  
MEZCLAS DE ANFO PESADO 65/35 GASIFICADO.**

**EXAMEN DE SUFICIENCIA DE COMPETENCIA PROFESIONAL**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. JOHAN CRISTOPHER SALAS FLORES**

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO – PERÚ**

**2019**



## DEDICATORIA

*A mis padres, quienes me respaldaron de manera incondicional durante mi etapa de pregrado. A mis hermanas, demás parientes y amigos más cercanos. A todos ellos, muchas gracias por su apoyo incondicional durante todos estos años, el presente trabajo es resultado de todo el cariño recibido.*

*Johan Cristopher*



## AGRADECIMIENTOS

Hago llegar mi más profundo agradecimiento a todo el equipo de *ORICA Mining Services, Site Cerro Verde*, por la oportunidad y confianza brindada, por el profesionalismo mostrado e inculcado hacia mi persona, por sus observaciones y sugerencias las cuales hasta este momento tengo muy presente.

De la misma manera mi más profundo y sincero agradecimiento al Ing. Iván Bastidas, por su soporte desinteresado, amistad y sobre todo la atención puesta en mi desarrollo como profesional.

A mi gran amigo el ing. Hernán Escalante, quien me inculco el interés y cariño por este campo de estudio tan basto que es la voladura.

Johan Cristopher



## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
OBJETIVO GENERAL .....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
Fragmentación .....	8
Descripción del proceso de fracturamiento .....	8
Plano <i>Chapman-Jouguet</i> .....	10
Velocidad de detonación.....	11
Mezclas explosivas o <i>heavy ANFO</i> .....	11
<b>II. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
Resistencia a la compresión de la roca.....	13
Gasificación del <i>heavy ANFO</i> .....	14
Medición de a velocidad de detonación (VOD).....	15
Procedimiento de registro de la velocidad de detonación (VOD).....	16
<b>III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>18</b>
Registro Constante .....	18
Registro variable por contaminación .....	18
Efectividad del registro de VOD y prolongación de <i>plano CJ</i> .....	19
<b>IV. CONCLUSIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>22</b>



## RESUMEN

El presente estudio toma como lugar de estudio el tajo Cerro Verde - fase 5, ejecutado el día domingo 13 de octubre del 2013, considerando el tipo de roca correspondiente a esa fase y el tipo de explosivo recomendado por ORICA, se evaluó la relación entre la velocidad de detonación constante dentro de la columna de carga en los taladros del proyecto CV 2138-0012, y la fragmentación de la roca circundante a estos taladros, empleando una mezcla explosiva gasificada *heavy* ANFO con una composición del 65% de emulsión a base de nitrato de amonio y el 35% restante de ANFO, con el objetivo de determinar la relación que existe entre la velocidad de detonación y la fragmentación resultante, empleando de 5 a 10 m de cable resistivo conectado a un dispositivo de *VOD-microtrap*, considerando principalmente los primeros 5 metros de reacción de la columna de carga, donde la detonación del *booster* inicia la columna de carga, permitiendo registrar la velocidad de detonación de ese primer tramo de la columna de carga, el cual se conoce como plano *Chapman-Jouguet* y asegura que la mezcla explosiva detone a su régimen óptimo produciendo una fragmentación óptima.

**Palabras clave:** columna de carga, detonación, deflagración, plano *Chapman-Jouguet (CJ)*, velocidad de detonación.



## ABSTRACT

*The current article takes as a study site the Cerro Verde pit - phase 5, executed on Sunday 13th, October - 2019 considering the type of rock corresponding to that phase and the type of explosive recommended by ORICA, the relationship between the constant detonation velocity within the column of load in the holes of the CV 2138-0012 project, and the fragmentation of the rock surrounding these drillholes, using a HEAVY ANFO gasified explosive blend with a 65% nitrate-based emulsion composition of ammonium and the remaining 35% of ANFO, In that way to determine the close relation between the velocity of detonation and the resulting fragmentation size from the blasting process, using 5-10 m of resistive cable connected to a VOD-microtrap device, emphasizing mainly the first five meters of reaction of the load column, where the booster's detonation starts the whole column, allowing the Microtrap to record the velocity of detonation from the first five meters, which is known as the Chapman-Jouguet plane and ensures that the explosive blend detonates at a constant rate, producing optimal fragmentation.*

**Keywords:** *load column, detonation, deflagration, Chapman-Jouguet plane (CJ), Velocity of detonation.*



## I. INTRODUCCIÓN

Los registros de velocidad de detonación son considerados un control de calidad que se realizan a las mezclas explosivas, siendo el propósito corroborar que estas se encuentran dentro del rango proporcionado por el fabricante, esto con el fin de garantizar el desempeño al momento de detonar, es usual relacionar la velocidad de detonación con la cantidad de energía entregada por la mezcla explosiva.

La velocidad de detonación (VOD) es una de las propiedades más importantes de los explosivos. Es esencial que el explosivo con las condiciones que se tienen en campo, detone a su velocidad óptima e induzca una presión de detonación suficiente que produzca una buena fragmentación. Como la presión del explosivo es directamente proporcional al VOD de un explosivo, las mediciones de VOD indican el rendimiento del explosivo en tiempo real. (H.S. Venkatesh, 2013)

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar visión óptima entre la relación que existe entre la velocidad de detonación y la fragmentación resultante del proceso de voladura.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Corroborar la reducción de la velocidad de detonación de los *heavy* ANFO al ser cargados en condiciones adversas, con presencia de agua y contaminación proveniente del collar y de las paredes de los taladros.

Corroborar el incremento energético proporcionado por las soluciones gasificantes en los últimos metros de la columna de carga a las mezclas de *heavy* ANFO, especialmente cuando se trata de mezclas con mayor proporción de emulsión.



## Fragmentación

La voladura de roca, representa una de las operaciones más importantes dentro del proceso extractivo en una operación minera su objetivo principal consiste en reducir la roca a un tamaño óptimo, para que sea cargable y así mismo cuidar las paredes del tajo, manteniendo la estabilidad intrínseca de los bancos. El proceso de fragmentación está influenciado por muchas variables, como se especifica en el siguiente cuadro:

**Tabla 1**

*Parámetros a considerar en la fragmentación de roca.*

PARAMETROS CONTROLABLES	PARAMETROS INCONTROLABLES
1. Geométricos: - Diámetro. - Altura de columna de carga. - Burden. - Espaciamiento.	Como propiedades inherentes del macizo rocoso, como:  - Geología. - Tipo de roca y propiedades. - Presencia de agua. - Juntas, fallas. - Etc.
2. Fisicoquímicos: - Tipo de explosivo. - Energía de explosivo. - Sistemas de iniciado.	
3. Tiempo: - Tiempo de retardo. - Secuencia de iniciación.	

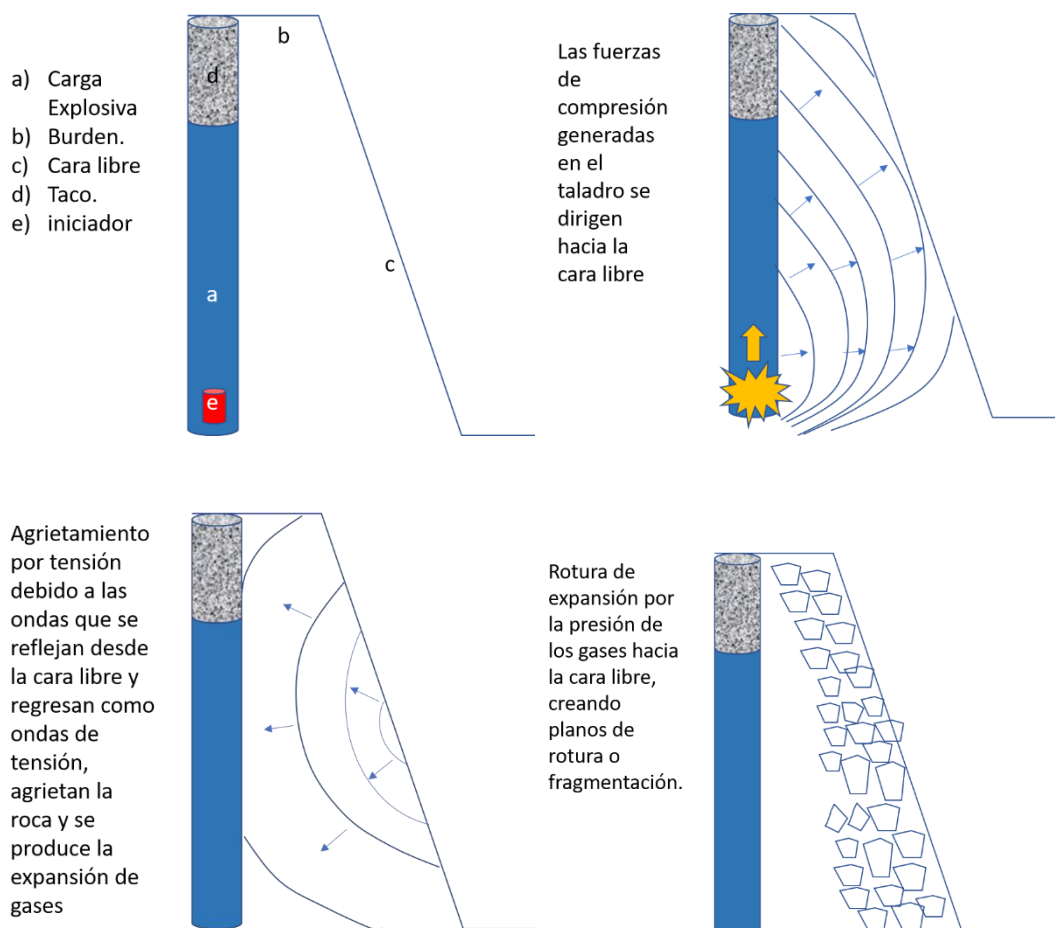
Fuente: Departamento de interior U.S. en minería a cielo abierto – Denver Colorado.

## Descripción del proceso de fracturamiento

La fragmentación de rocas por voladura comprende a la detonación de un explosivo y a la consecuente respuesta del macizo rocoso circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción. (EXSA, 2013)



Inmediatamente después de la detonación, se produce una reacción a través de toda la columna de carga del taladro, la cual consiste en una expansión violenta de gases y fuerzas de compresión, provocando deformación elástica en la roca circundante al taladro, estas fuerzas u ondas de compresión al llegar a una cara libre se rompen en la línea de menos resistencia, también llamado burden y posteriormente serán reflejadas como ondas de tensión hacia su punto de origen fracturando la roca a través de las fisuras y puntos de debilidad generados por las ondas de compresión, simultáneamente el gran volumen de gases liberados a través de las fisuras creadas por tensión y compresión, fragmentaran la roca.



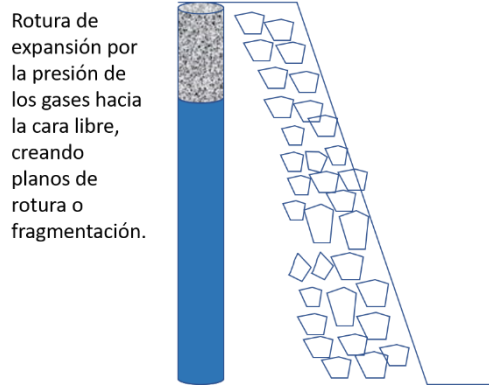


Figura 1. Secuencia de fragmentación de un taladro.

Fuente: Manual de voladura EXSA, 2013.

### **Plano *Chapman-Jouguet***

Se considera que un explosivo detona cuando alcanza una velocidad de detonación mayor a 2000m/s y formación de gran cantidad de gases a altas temperaturas, produciendo presión sobre el área circundante, sin embargo, esta velocidad no es constante a través de toda la columna de carga, si no en un plano ideal al que se le denomina Plano de *Chapman-Jouguet (CJ)*, en el cual la reacción alcanza un equilibrio constante y auto sostenido en cuanto a velocidad, temperatura y presión de gases.

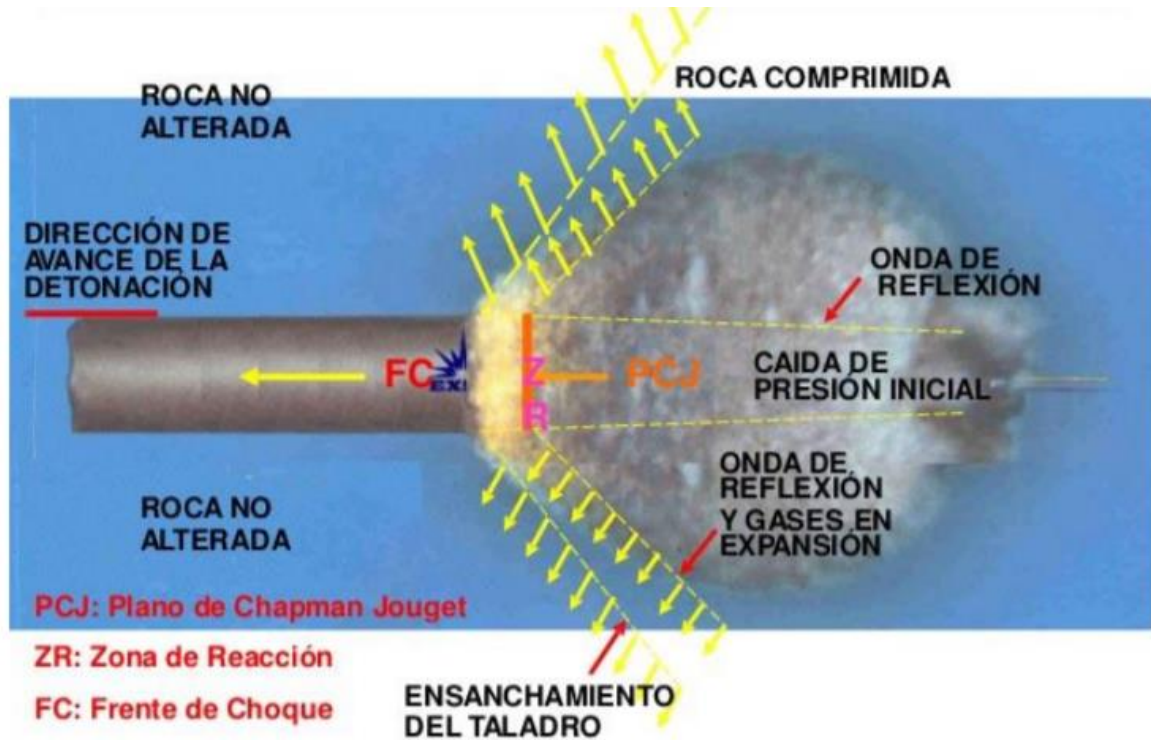


Figura 2. Plano CJ vs frente de choque.

Fuente: Manual de voladura EXSA, 2013.

### Velocidad de detonación

Velocidad de detonación (VOD) es una medida de la razón a que la reacción de la detonación procede, por la columna de explosivo. Típicamente, el VOD varía entre 3000 m/s para ANFO y 6000 m/s para *heavy* ANFO y flexigees. Se considera un indicador del potencial de fragmentación de un explosivo, con el potencial creciente para un VOD creciente, La velocidad de detonación es considerada como el mejor indicador para estimular la performance y consistencia de formulaciones de explosivos a granel, pero no es en sí mismo una medida de la energía total disponible del explosivo. (ENAEX, 2012)

### Mezclas explosivas o *heavy* ANFO

Consisten en mezclas de ANFO y emulsiones a base de nitrato de amonio, entre sus principales funciones está la de energizar el poder rompedor de los ANFOS



convencionales incrementando el VOD de la mezcla a través de reacciones más rápidas y agresivas, por otro lado si la proporción de emulsión es mayor en 2/3 a más, el explosivo incrementa su densidad ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) asimismo dota al mismo de una excelente resistencia al agua, ideal para mallas con taladros inundados, debido a que el nitrato de amonio por si solo se disuelve y degrada rápidamente al contacto con el agua. Es importante recalcar que cuando la proporción de emulsión sobrepasa el 50% de la mezcla explosiva, también se tiene una pérdida energética por la menor proporción de *prills* de nitrato de Amonio, Para este tipo de mezclas es usual compensar esta pérdida energética añadiendo una solución de nitrito de sodio, la cual cumple con la función de sensibilizante y gasificante de la mezcla explosiva, produciendo un incremento del volumen de la columna explosiva, reduciendo su densidad, y propiciando la formación de puntos calientes o *hot spots* con el fin de sostener la reacción de manera uniforme a lo largo de toda la columna explosiva.



## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo está plasmado en la fase 5 del tajo Cerro Verde de Sociedad Minera Cerro Verde, el mismo que presenta problemas de fragmentación debido a la alta dureza de la roca a causa de la profundidad a la que se encuentra en comparación a las fases superiores, 2130 m.s.n.m. aproximadamente, adicionalmente se tiene presencia de agua, lo cual dificulta el carguío del explosivo y no permite el uso de ANFOS y mezclas con porcentajes inferiores a 2/3 de emulsión/ANFO.

### **Resistencia a la compresión de la roca**

La resistencia a la compresión se considera como el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido a la rotura de una fractura se puede definir en límites bastante ajustados, sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en el proceso de compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material, en este caso la roca, la cual está dada en MPa, dicha resistencia debe ser sobrepasada ampliamente por las ondas de compresión y tensión producidas durante el proceso de detonación, mientras más alta sea la resistencia a la compresión de la roca a fragmentar, más energética y rápida deberá ser la reacción de la columna de carga explosiva.

**Tabla 2***Resistencia a la compresión en distintas fases del tajo Cerro Verde.*

Ubicación y nivel	Clase	Calificación de la roca	Resistencia a la compresión (MPa)	Mezcla recomendada
Cerro verde, fase 5 2 130 m.s.n.m.	R6	Extremadamente resistente	250 MPa	HA 65/35 Fortis Extra 65
Cerro verde, fase 6 2 510 m.s.n.m.	R4-R5	Resistente	170 MPa	HA 30/70 Fortan Extra 30

Fuente: Área de geotecnia SMCV.

**Gasificación del *heavy* ANFO**

Se sabe que a más porcentaje de emulsión contenga el *heavy* ANFO, alcanzara un VOD más alto y llegara a reaccionar de manera constante a través de la columna de carga, por ende, será una mezcla explosiva más potente, sin embargo, esto es relativamente cierto ya que cuando la mezcla de *heavy* ANFO sobrepasa el 50% de emulsión en su composición este tendrá un poder de fragmentación menor y será menos energético, pero a su vez ganara resistencia al agua a partir de este punto. Con el fin de añadir mayor energía se realiza un proceso llamado gasificación, consiste en añadir un sensibilizante compuesto de nitrito de sodio y rodamina a la mezcla de heavy anfo con la finalidad de crear pequeñas burbujas de nitrógeno o *hot spots* dentro de la mezcla explosiva, con este añadido la mezcla explosiva desarrolla mayor temperatura durante el proceso de detonación y por ende más energía, extendiendo el *plano CJ* en la columna explosiva hasta aproximarse al taco, sosteniendo una reacción uniforme en casi toda la longitud de la columna explosiva y consiguiendo así una mejor fragmentación.

**Tabla 3***Mezclas explosivas, Fortis y Fortan Extra.*

Producto	Densidad inicial (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad final (g/cm <sup>3</sup> )	Gasificado	Carga lineal (kg/m)
ANFO	0,8	-	NO	42,9
Fortan Extra 30	1,0	-	NO	57,2
Fortan Extra 40	1,15	-	NO	65,8
Fortan extra 50	1,26	1,16	SI	72,1
Fortis extra 65	1,29	1,16	SI	73,8

Fuente: Asistencia técnica – ORICA.

**Medición de a velocidad de detonación (VOD)**

“Los explosivos con un bajo VOD tendrán un bajo impacto en la fragmentación en contraste a los que tienen un VOD alto” (Chiapetta, 1988)

El objetivo primordial de realizar una medición de VOD es asegurarse que la mezcla explosiva cargada en la malla de detonación detono al régimen esperado y se mezcló, fabrico en la proporción deseada por ende tendremos una buena fragmentación, para realizar la medición se emplea un microtrap, dispositivo con la capacidad de registrar VOD de taladros en específico a través de un cable coaxial insertado dentro de la columna de carga, y así registrar la velocidad de la onda de choque producida por la detonación, registrara hasta qué punto de la columna de carga el VOD es constante, *Plano CJ* y desde que punto la mezcla explosiva tiende a deflagrar hasta extinguirse completamente una vez llegado al taco, es de vital importancia que el VOD no disminuya drásticamente una vez pasado el *plano CJ*, de ser así indicaría fuga o pérdida de energía por falta de confinamiento y afectaría considerablemente a la fragmentación de la roca circundante,



prueba de ello es la emanación de gases nitrosos los cuales son producto de una deflagración de la mezcla explosiva.

### **Procedimiento de registro de la velocidad de detonación (VOD)**

Se registra el VOD, empleando un equipo denominado microtrap, el cual registra la velocidad con la que detona la columna de explosiva.

Materiales:

- 100 metros de cable coaxial.
- 20 m de cable resistivo - probecable.
- Microtrap

Procedimiento:

- Se acopla el cable resistivo previamente cortocircuitado al booster.
- Se desciende el booster ya primado al fondo del taladro con total normalidad
- Se carga el taladro, en este caso con HA 65/35
- Se procede a tapan el taladro cuidadosamente para no dañar el cable
- Se realiza un empalme entre el cable resistivo y coaxial en el collar del taladro
- Se procede a extender el cable coaxial entre 50 m a más, con la finalidad de alejar el equipo lo suficiente del disparo.
- Se conecta ambos polos del cable coaxial al microtrap.
- Se realiza un testeo previo.
- Una vez realizado el disparo, se procede a descargar el registro obtenido a través del programa DAS de MERL.

El cliente, en este caso Sociedad Minera Cerro Verde, adquiere explosivos y detonadores electrónicos para proporcionarle la energía y el tiempo que necesita a sus



voladuras y en condiciones específicas. El *MicroTrap*<sup>™</sup> *VOD / Data Recorder* es un dispositivo empleado para registrar la velocidad de detonación de las diferentes variantes de *heavy* ANFO empleados según las características de la roca a fragmentar, esto con el fin de asegurar la calidad de estas mezclas explosivas y contrastarlas con los datos proporcionados por ORICA respecto a sus productos.

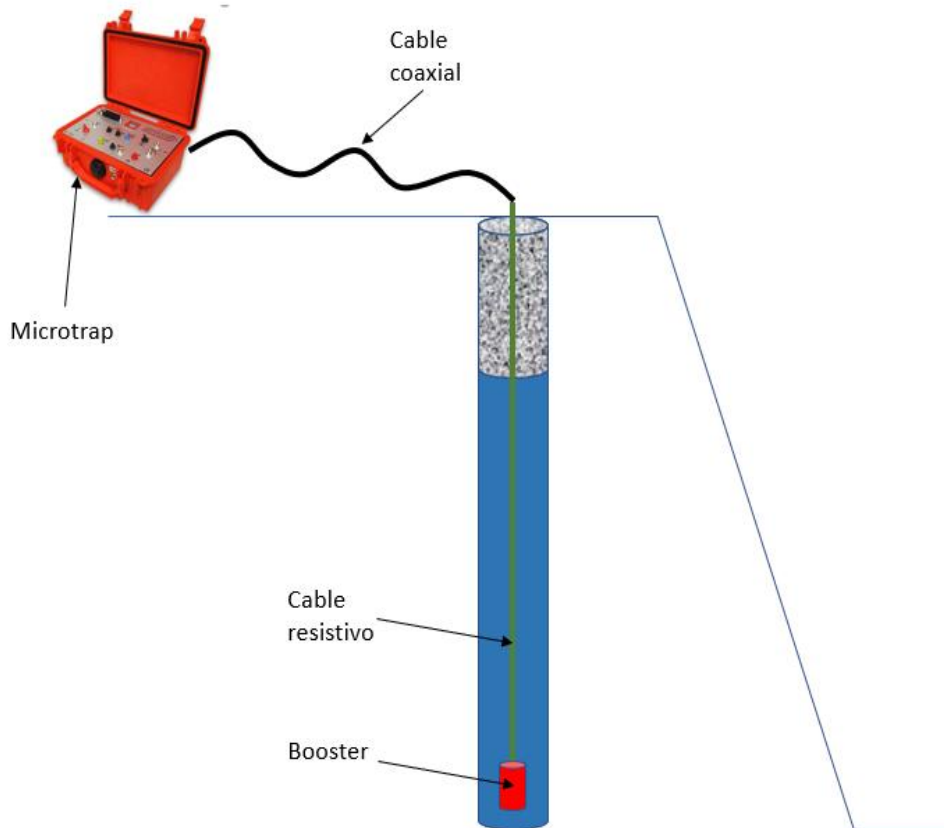


Figura 3. Diagrama de instalación del Microtrap en un taladro cargado con HA 65/35.

Fuente: Asistencia técnica – ORICA.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se tienen 2 lecturas de VOD registradas con el microtrap en taladros cargados con HA 65/35 (Fortis extra 60 gasificado) en la fase 5 del tajo Cerro Verde, ambas pruebas corresponden a la misma malla.

#### Registro Constante

La primera lectura muestra un registro uniforme del VOD, quiere decir que la columna de carga detono de manera constante, debido a que no hubo fuga de energía en la detonación y que el plano CJ se extendió desde el fondo del taladro hasta los 10 m de profundidad alcanzando un VOD de 5234.4 m/s, logrando una fragmentación adecuada en esa zona de la malla de voladura.

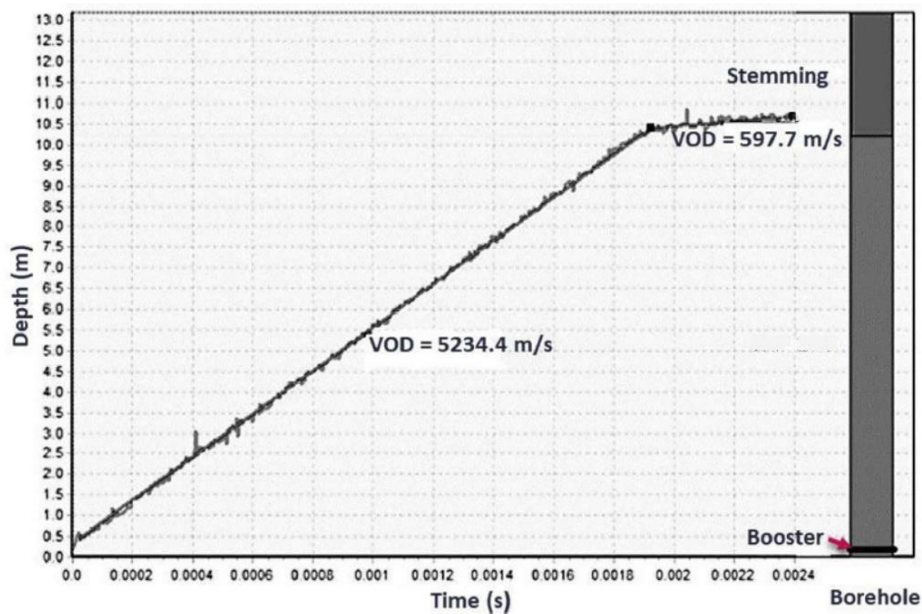


Figura 4. Registro de VOD constante.

Fuente: Asistencia Técnica de ORICA.

#### Registro variable por contaminación

En esta segunda lectura se observa un registro variable, la reacción empieza a un régimen elevado, sin embargo, se tiene una caída drástica del VOD a los 2 metros,

esto debido al bajo confinamiento y que posiblemente la columna de carga se contamina con material de la boca del taladro al momento de bombear la mezcla explosiva, cortando o seccionando la columna de carga explosiva, reduciendo drásticamente el plano CJ en más del 50% del taladro, sin embargo, se aprecia un incremento violento del VOD a los 6 metros debido al segundo booster y a la presencia de hot spots producidos por la gasificación de la columna de carga, alcanzando una segunda lectura de 5140.1 m/s la cual garantiza que la columna de carga detono a pesar de las complicaciones in – situ de la malla, dando como resultado una fragmentación aceptable.

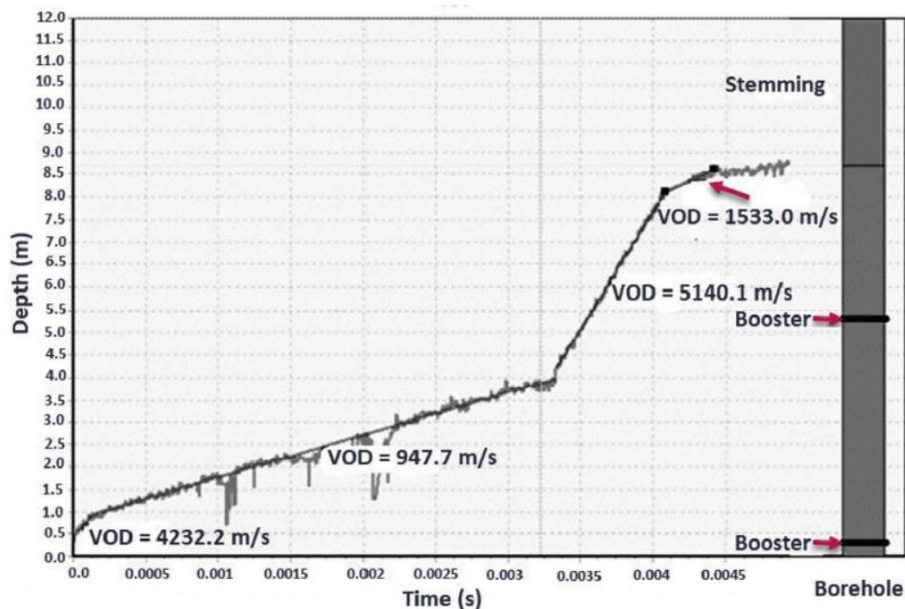


Figura 5. Registro de VOD en entorno con presencia de contaminación.

Fuente: Asistencia técnica de ORICA.

### Efectividad del registro de VOD y prolongación de *plano CJ*

Con respecto a la atribución del mejor indicador para estimular la performance y consistencia de formulaciones de explosivos a granel según el manual de voladura de ENAEX, efectivamente si no se trata del mejor indicador, por lo menos es uno de los más



fiables y prácticos de realizar si lo que se quiere es contrastar la calidad tanto de la emulsión y el nitrato de amonio en la mezcla explosiva, los incrementos de velocidad en el segundo registro dan prueba de ello. Es usual que los fabricantes de explosivos tengan diferentes variantes de emulsión matriz, que varían en densidad y poder energético, estas mejoras en performance van ligadas a un incremento en el costo entre estas variantes, los registros de VOD son usados para corroborar la diferencia energética entre estas variantes.

Con respecto a la prolongación del plano CJ empleando soluciones gasificantes y generación de *hot spots* en la columna de carga, no se tiene certeza al 100% de ello, ya que como se menciona líneas arriba, además de la energía del explosivo también entra a tallar la presión, el confinamiento y los planos de menor resistencia y demás variables de diseño y propiedades intrínsecas del macizo rocoso, variables que este estudio no considera en su totalidad, debido al foco específico de este estudio.



## IV. CONCLUSIONES

Al comparar ambas lecturas se genera de manera inevitable un contraste entre lo que vendría a ser un taladro óptimo, que presenta una longitud óptima y continua, sin presencia de grietas por donde el explosivo de la columna de carga podría infiltrarse ni contaminación de ningún tipo ya sea por material de la boca del taladro o agua, por el otro lado tenemos una apreciación mucho más realista en una malla en fondo de mina, donde se tiene una serie de complicaciones debido a la alta resistencia a la compresión de la roca a detonar en esa zona, lo cual produce agrietamientos y derrumbamientos a lo largo y ancho de toda la malla de voladura, por ende podemos concluir lo siguiente.

Se reafirma la relación que existe entre el VOD de la columna de carga y la fragmentación de la roca debido a la prolongación del *plano CJ* a lo largo de la columna de carga, lo cual asegura que se aprovecha en la mayor medida posible la energía y generación de gases producida por la detonación, asegurando una fragmentación óptima.

Se tiene claro que el proceso de gasificado energiza las mezclas explosivas y que su implementación se aprecia mejor en la parte superior de la columna de carga donde se necesita mayor temperatura y mayor velocidad de reacción debido a la disminución del confinamiento, de esta manera la mezcla tiene menores posibilidades de deflagrar.



## V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

H.S. Venkatesh, (2013) *Variability in velocity of detonation of commercial explosives as measured in field trials.*

Departamento de interior U.S. en minería a cielo abierto – *Denver Colorado. Blaster's training modules – Module 3, Surface blast design.*

EXSA, (2013). manual de voladura, capítulo 1 mecánica de rotura de rocas.

ENAEEX. (2012) Manual de voladura, capítulo 1, terminología de la tronadura.

ORICA. (2015) Sistema Fortis™ Extra. *Technical data sheet* – propiedades técnicas.

Frank Chiapetta, (1988), *Velocity of detonation measurement.*

Departamento de Geotecnia, Sociedad minera Cerro Verde.

Departamento de asistencia técnica, ORICA *Mining Services.*

mrel.com, the most popular VOD data recorder.