



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**Efecto de las Cámaras de Aire en Taladros de Producción para Mejorar la Fragmentación del Material y Reducir el Nivel de Vibraciones por Voladura en Minería a Tajo Abierto en el Norte del Perú, 2016.**

**AUTOR:**

**JORGE LUIS CUMPA FLORES**

**ASESOR:**

**Mg. Ing. PERSI VERA ZELADA.**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

**Perforación y voladura de rocas**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2016**

PÁGINA DE JURADOS

---

Presidente

---

Secretario

---

Vocal

## DEDICATORIA

Es para mí un gran orgullo dedicar ésta tesis a mi familia. A mis padres Víctor y Susana que me apoyaron incondicionalmente y económicamente. A mi esposa Erika y a mis hijos Milagros y Renato que siempre creyeron en mí, por brindarme su apoyo moral en esta vida llena de retos constantes.

## AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a Dios por iluminarme siempre en esta vida. A mis padres por su esfuerzo en apoyarme a culminar mis estudios. A mi esposa e hijos por incentivarne a seguir adelante en cada proyecto. Y finalmente a la Universidad César Vallejo, a mis profesores y a mi asesor que me brindaron todos sus conocimientos para poder finalizar esta etapa de mi vida.

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Jorge Luis Cumpa Flores con DNI N° 26707377, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas, declaro bajo juramento que toda la documentación que acompaño es veraz y autentica.

Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada por la cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Cajamarca, Marzo del 2017.

---

Jorge Luis Cumpa Flores

DNI: 26707377

## PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

Siguiendo el Reglamento de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad César Vallejo, pongo a disposición el siguiente proyecto de tesis titulada:

“EFECTO DE LAS CÁMARAS DE AIRE EN TALADROS DE PRODUCCIÓN PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DEL MATERIAL Y REDUCIR EL NIVEL DE VIBRACIONES POR VOLADURA EN MINERÍA A TAJO ABIERTO EN EL NORTE DEL PERÚ, 2016”.

Esta tesis la someto a consideración, esperando que cumpla con los requisitos de aprobación para obtener el título Profesional de Ingeniero de Minas.

Así mismo debo mencionar que el presente trabajo de investigación fue elaborado con mucho esfuerzo y dedicación, sea un aporte sustancial para dar a conocer el efecto de las cámaras de aire en el proceso del disparo de la carga explosiva con la finalidad de mejorar la fragmentación del material y reducir los niveles de vibraciones que no afecten a las viviendas aledañas al proyecto.

Jorge Luis Cumpa Flores.

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>PÁGINA DEL JURADO</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	iv
<b>DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD</b> .....	v
<b>PRESENTACIÓN</b> .....	vi
<b>ÍNDICE</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	x
<b>RESÚMEN</b> .....	xi
<b>ABSTRAC</b> .....	xii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	13
1.1. Realidad Problemática.....	13
1.2. Trabajos previos .....	14
1.3. Teorías relacionadas al tema .....	16
1.4. Formulación al problema .....	54
1.5. Justificación del estudio .....	54
1.6. Hipótesis.....	54
1.7. Objetivos .....	54
1.7.1 Objetivo General .....	54
1.7.2 Objetivos Específicos.....	54
<b>II. MÉTODO</b> .....	56
2.1    Diseño de investigación .....	56
2.2    Variables, Operacionalización .....	56
2.3.    Población y muestra .....	58
2.4.    Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad .....	60
2.5.    Métodos de análisis de datos.....	62
2.5.    Aspectos éticos.....	63
<b>III. RESULTADOS</b> .....	64

<b>IV. DISCUSIÓN .....</b>	<b>69</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>71</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS</b>	
Instrumentos.....	74
Validación de los Instrumentos.....	75
Matriz de consistencia.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura N° 1. Interacción de las propiedades de las rocas y variables controlables con las operaciones mineras.....	18
Figura N° 2. Proceso de detonación de una mezcla explosiva.....	20
Figura N° 3. Voladura en banco.....	27
Figura N° 4. Ubicación de la cámara de aire en el taladro de producción.....	28
Figura N° 5. Efecto de la cámara de aire ubicada en el centro de la carga vs carga continua .....	29
Figura N° 6. Perfil de fracturas de diferentes geometrías de cargas .....	29
Figura N° 7. Etapas del proceso en cámaras de aire de fondo.....	32
Figura N° 8. Ondas vibracionales internas y superficiales.....	35
Figura N° 9. Tipos de ondas sísmicas .....	37
Figura N° 10. Sismógrafo con sus accesorios.....	39
Figura N° 11. Geófono electrodinámico .....	39
Figura N° 12. Geófono electrodinámico .....	40
Figura N° 13. Ubicación de sensores enterrados en el terreno o fijados al mismo.....	41
Figura N° 14. Esquema pruebas con cámara de aire .....	44
Figura N° 15. Esquema para medir VOD en cámara de inferior .....	44
Figura N° 16. Pruebas voladura completa.....	45
Figura N° 17. VOD en cámara de aire .....	46
Figura N° 18. Power Deck TM en ingles TAPONEX .....	47
Figura N° 19. Primera etapa, diseño de carguío .....	47
Figura N° 20. Segunda etapa, proceso de equilibrio.....	48
Figura N° 21. Tercera etapa, transmisión de la energía al medio .....	49
Figura N° 22. Cuarta etapa, reflexión de las ondas de choque.....	50
Figura N° 23. Quinta etapa, interacción de taladros con cámara de aire al fondo .....	51
Figura N° 24. Parámetros de diseño de la cámara de aire.....	58
Figura N° 25. Equipo de medición de vibraciones Minimate pro6-vibración InstanTel monitor .....	62
Figura N° 26. Instalación del equipo de medición de vibraciones.....	62
Figura N° 27. Fragmentación con disparo en taladro de producción normal y con TAPONEX .....	66
Figura N° 28. Comparación de vibraciones en taladros de producción normal y con TAPONEX ....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla N° 1	Escala de clasificación por grado de toxicidad..... 22
Tabla N° 2	Tabla de Norma Española de Prevención de Daños.....42
Tabla N° 3	Dimensiones del TAPONEX..... 52
Tabla N° 4	Operacionalización de variables..... 57
Tabla N° 5	Parámetros de la voladura..... 60
Tabla N° 6	Diseño de carga para taladros de producción..... 65
Tabla N° 7	Resultados de la fragmentación, disparo en taladro de producción normal vs Taladro de producción con TAPONEX.....66
Tabla N° 8.	Resultados del monitoreo de vibraciones, disparo en taladro de producción normal vs taladro de producción con TAPONEX..... 67
Tabla N° 9	Porcentaje de reducción de fragmentación con TAPONEX..... 68
Tabla N° 10	Porcentaje de reducción de vibración con TAPONEX.....68

## RESUMEN

Se estudió el efecto de las cámaras de aire en taladros de producción, para mejorar la fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones por voladura en minería a tajo abierto en el Norte del Perú, la cual se inició con la revisión bibliográfica de uso de cámaras de aire en voladura y se definió la zona de pruebas para la aplicación de cámaras de aire en función del mapeo geo mecánico y del tipo roca (Roca tipo II con RMR de 61 a 81). Se realizaron cinco experimentos utilizando un diseño de voladura computarizado (JK SimBlast 2.0) y se definió la secuencia de salida para la voladura con cámara de aire de cada proyecto.

Previo a los experimentos de voladura, se realizó la instalación de equipos de medición de vibraciones (Sismógrafo Instantel) para tomar datos durante los experimentos, y posterior a las experiencias, se realizó la distribución granulométrica (Software Wipfrag 2.3).

Los experimentos demostraron que el uso de cámaras de aire en la columna explosiva presenta efectos positivos en la distribución granulométrica p80 y reduce las vibraciones hasta un 58.30 % frente a la voladura convencional que no utiliza cámaras de aire. Adicionalmente el uso de cámaras de aire presenta otros beneficios como la reducción de los fly rock, incremento de la eficiencia en las etapas posteriores, etc.

**Palabras Claves:** Cámaras de aire en taladros de producción - fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones por voladura

## ABSTRACT

The effect of the air chambers in production drills was studied to improve the fragmentation of the material and to reduce the level of vibrations by blasting in open pit mining in the North of Peru, which began with the bibliographical review of the use of Air blast chambers and defined the test area for the application of air chambers based on geo mechanical and rock type mapping (Rock type II with RMR from 61 to 81). Five experiments were carried out using a computerized blasting design (JK SimBlast 2.0) and the output sequence for blast blast was defined for each project.

Before the blasting experiments, the installation of vibration measuring equipment (Seismographer InstanTel) was carried out to take data during the experiments, and after the experiments, of the blasting and the granulometric distribution were carried out (Software Wipfrag 2.3).

The experiments showed that the use of air chambers in the explosive column has positive effects on the particle size distribution p80 and reduces vibrations up to 58.30% compared to conventional blasting that does not use air chambers. Additionally the use of air chambers presents other benefits such as the reduction of fly rock, increase of efficiency in the later stages, etc.

**Keywords:** Air chambers in production drills - fragmentation of the material and reduce the level of vibrations by blasting

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Realidad Problemática**

Las operaciones de desprendimiento del mineral del frente de explotación en minería a tajo abierto, se realizan mediante operaciones de voladura de rocas, esto debido a la dureza de la roca, empleando el método de arranque indirecto con perforación y explosivos; este método es más económico, confiable y rápido para el desarrollo común de las operaciones de producción en este yacimiento (2).

Actualmente, se utilizan modelos diseñados para voladuras con mezclas ANFO/Emulsión, desarrollados en años anteriores, donde se toman en cuenta las características de la mezcla explosiva y la aplicación de la técnica cámara de aire para definir nuevas configuraciones (2).

Ocasionalmente la fragmentación, no es la adecuada en algunos de los estratos volados, en particular en los estratos más duros, el mineral queda mal quebrado lo que ocasiona la presencia de grandes bloques de rocas, dando como consecuencia baja productividad y disponibilidad mecánica de los equipos de carguío y acarreo, que incide también en un aumento en el costo de producción de mineral que se remueve (2).

En las capas de baja dureza se puede observar que ocurre sobre fragmentación y proyecciones indebidas de rocas (fly rock), demostrando que la distribución de energía en estas zonas no es la apropiada, esto nos indica que se ha incidido en un consumo innecesario de explosivos (2).

Se supone que estas variaciones en la fragmentación, están relacionadas con ciertas características del macizo rocoso, la mezcla explosiva y la aplicación de la técnica con cámara de aire utilizada en el yacimiento, donde no hay un estudio previo que permita optimizar los diseños de voladuras (2).

En el presente trabajo de investigación, se estudiará la afectación de las vibraciones producidas por las voladuras, de acuerdo al tipo carga utilizada en la columna de perforación y el efecto generado por el accesorio utilizado en las voladuras como es la cámara de aire: el Taponex (2).

De manera general el presente trabajo no pretende solucionar un problema existente, más bien la idea central es de analizar comparativamente el efecto que produce la utilización del Taponex en el momento de la voladura en términos de fragmentación y vibración (2).

## 1.2. Trabajos previos

**Caso N° 01:** De acuerdo al informe técnico presentado por Chiappetta, donde explica que la cámara de aire inferior transforma la voladura tradicional compresiva en una nueva técnica de voladura tensional (4). Los principales resultados son:

1. Aumento de la presión del barreno con la zona de la cámara (2 a 7 veces).
2. Se transforma la energía potencial de aire en energía cinética.
3. Se reduce el factor de carga.
4. Se disminuye las vibraciones (30% menor).
5. Se reduce fly rock.
6. Se disminuye la onda aérea.
7. La fragmentación resultante es más homogénea y de menor granulometría.

**Caso N° 02:** Según las investigaciones realizadas por Pérez, en su tesis de grado menciona que, el Taponex o air deck es un accesorio de Polietileno con un diseño especial que permite crear cámaras de aire en un taladro de perforación, permitiendo ser instalado sin la necesidad de aire comprimido y su diseño especial es auto soportante (4).

**Caso N° 03:** Las investigaciones realizadas por Cebrián, se refiere a las cámaras de aire empleadas en voladura de rocas, diciendo: las bolsas auto inflables llamadas también BAIFs, son dispositivos que pueden ayudar a reducir la generación de finos alrededor de los barrenos, limitando el empuje del explosivo. Al generarse cámaras de aire dentro de los barrenos, sin ocupar este espacio por retacado inerte, se desencaja el explosivo de las paredes del barreno, evitando la acción de la onda de choque por el disparo sobre la roca, pero se permite la acción de los gases de voladura (5).

**Respecto al uso de cámaras de aire:**

La utilización de cámaras de aire en el fondo del tiro es una técnica muy usada en la actualidad en tronaduras de bancos. Su objetivo es reducir o eliminar la pasadura y reemplazar por una cámara de aire al menos un metro de carga del fondo del tiro (6).

En el trabajo de investigación de Salas, sostiene que las cámaras de aire incrementan la duración de la actividad de la onda de choque sobre el medio circundante, esto debido a una serie de pulsos causados por las reflexiones de las ondas de presión originadas inmediatamente después de la detonación de un taladro (8).

Las investigaciones realizadas por Cruces, indica que la cámara de aire tiene la finalidad elevar la carga explosiva y mejorar la distribución de energía en las rocas con presencia de preformados y alto RQD (Toba cristal, latita porfiritica potásica, brechas de Latita porfiritica) difíciles de fragmentar en la zona alta del taladro (9).

La alternativa de empleo de explosivos de baja densidad, como la nagolita de  $0.6 \text{ g/cm}^3$  o cordones detonantes de alta densidad, hay casos en los que se podría utilizar un explosivo convencional y una cámara de aire (BAIFs) que actúan “diluyendo” la densidad real durante el disparo (5).

Cebrián, explica que el trabajo de cámaras de aire usadas en el interior de los taladros para voladura de rocas; diciendo: con referencia al uso de cámaras de aire en voladura de rocas, explica que: Al crear cámaras de aire dentro de los barrenos, sin ocupar este espacio por retacado inerte, desacoplamos el explosivo de las paredes del barreno, evitando la acción de la onda de choque por detonación de la roca, pero permitimos la acción de los gases de voladura. Esto es equivalente a la acción de un explosivo de baja calidad (5).

Existen casos en los que se puede utilizar un explosivo convencional y una cámara de aire creada por bolsas auto inflables (BAIF's) que actúa diluyendo la densidad real durante la detonación. Esto conlleva a un efecto de empuje por gases sin la creación de grietas radiales por contacto directo del explosivo y sin los inconvenientes de sobre tamaño y empuje desigual de los compartimentos de explosivo separado por arena u otros minerales inertes (6).

### 1.3. Teorías relacionadas al tema

#### 1.3.1 Macizo Rocoso

Definiciones básicas:

- **Roca:** Geológicamente llamamos roca a un conjunto de materiales sólidos con una determinada cristalización con un grado de mineralización (este tipo de mezcla son homogéneas).
- **Suelo:** Acotaremos sobre suelos que son conformados por cuerpos orgánicos y mineralizados, es la parte superficial de la corteza terrestre.
- **Macizo Rocoso:** matriz rocosa + discontinuidades

### **1.3.2 Características geomecánicas del macizo rocoso y su influencia en los resultados de la voladura de rocas**

Las propiedades del macizo rocoso son importantes en las operaciones de perforación y voladura, por ser el medio donde actuará el explosivo. Existen diferencias significativas aún entre rocas de la misma zona en una determinada mina por lo que es necesario saber algunas de sus propiedades. Por lo que en esta parte se estudiará las principales propiedades del macizo rocoso.

Las propiedades de las rocas constituyen las principales variables en el camino hacia una voladura óptima. Los minerales poseen ciertas características que son función de su origen y de los procesos geológicos posteriores que actuaron sobre ellos. El conjunto de estos fenómenos conduce a un determinado entorno, a una litología en particular con unas heterogeneidades debido a los agregados minerales poli cristalinos y a las discontinuidades de la masa rocosa (poros y fisuras), y a una estructura geológica con un gran número de discontinuidades (planos de estratificación, fracturas, diaclasas, etc.). En la figura N° 1, se establece la interdependencia que existe entre las propiedades de las rocas, las variables controlables y algunas de las operaciones básicas del ciclo minero.

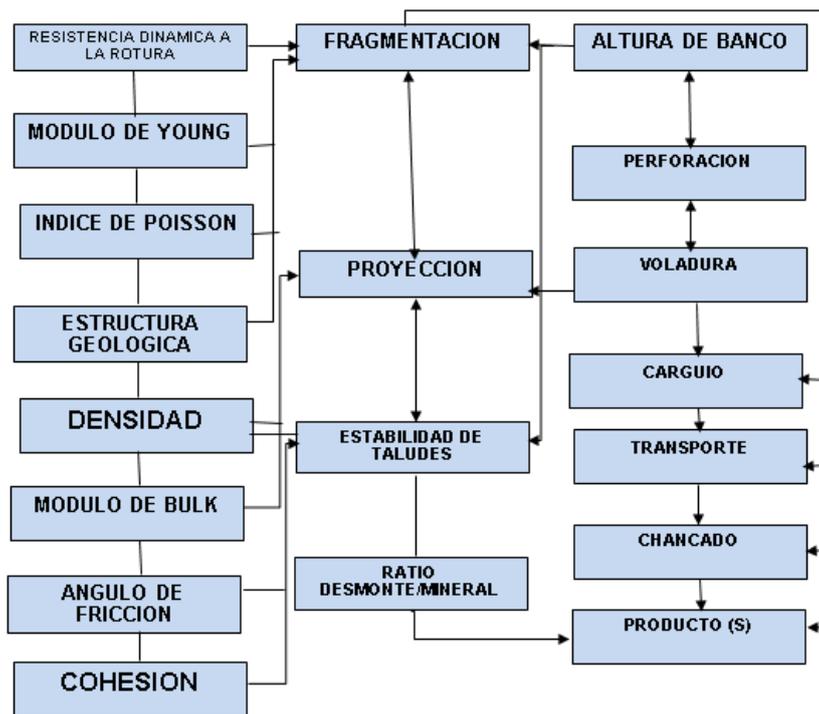


Figura N° 1: Interacción de las propiedades de las rocas y variables controlables con las operaciones mineras.

Fuente: López Jimeno (7).

Para la utilización de la tecnología de los explosivos es necesario saber las propiedades del macizo rocoso. Según López Jimeno, las condiciones geológicas son:

### **1.3.2.1 Condiciones geológicas**

#### **a. Estructura**

Es la forma de presentación de las rocas y está en relación con su origen o formación (macizos, estratos, etc.).

#### **b. Grado de fisuramiento**

Indica la intensidad y amplitud del fracturamiento natural de las rocas. Son importantes la orientación (rumbo y buzamiento) de los sistemas de fisuras y el espaciamiento entre ellos, así como la apertura y los tipos de relleno en las discontinuidades.

#### **c. Presencia de agua**

Define incluso el tipo de explosivo a usar.

### **1.3.3 Parámetros controlables**

Son los parámetros del explosivo. Tiene las siguientes propiedades fisicoquímicas:

#### **a. Densidad**

Es la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, expresada en  $\text{g/cm}^3$ . Prácticamente expresa la masa en gramos de una sustancia contenida en un volumen de  $1 \text{ cm}^3$ . En los explosivos tiene influencia determinante sobre la velocidad de detonación y la sensibilidad.

#### **b. Velocidad de Detonación (VOD)**

Es la velocidad con que viaja la onda a lo largo de una columna explosiva, sea al aire libre o en confinamiento dentro de un taladro de voladura (Ver figura N° 2).

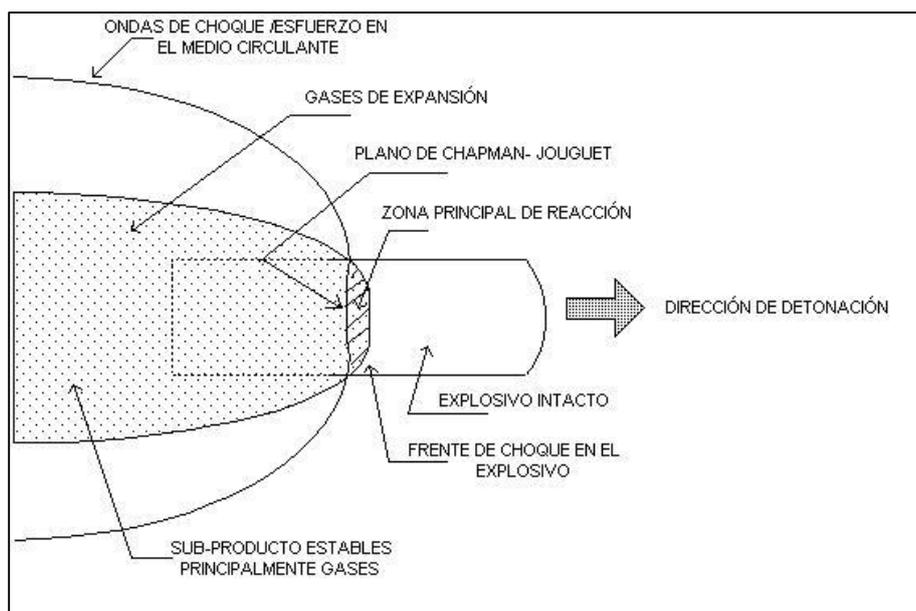


Figura N°2: Proceso de detonación de una mezcla explosiva

Fuente: Manual de Voladura EXSA (2002)

**c. Transmisión o simpatía**

Transmisión de la onda de detonación en la columna de carga. Una buena simpatía asegura la explosión total de la columna de carga.

**d. Resistencia al agua**

Es la habilidad para resistir una prolongada exposición al agua sin perder sus características, es decir su capacidad para rechazar la penetración del agua. La unidad de medida empleada es la de “horas”.

**e. Energía del explosivo**

Se puede dar en cal/g o J/g. Calculada sobre la base de su formulación, aplicable para estimar su capacidad de trabajo.

**f. Sensibilidad a la iniciación**

Cada explosivo requiere un iniciador o cebo mínimo para iniciarse (usualmente se tiene como referencia al detonador N° 8 para calificarlos como altos explosivos (sensibles) y

agentes de voladura (insensibles), por lo que requieren un cebo más potente).

**g. Volumen normal de gases**

Cantidad de gases en conjunto generados por la detonación de 1 kg de explosivo a 0°C y 1 atm de presión, expresado en litros/kg. Indica aproximadamente la “cantidad de energía disponible” para el trabajo a efectuar y generalmente varía entre 600 y 1 000 litros/kg.

**h. Presión del taladro**

Es la presión ejercida por la expansión de gases de detonación en las paredes del taladro. Cuanto menor sea esta presión menor será el daño a la pared final de la voladura, esta presión es aproximadamente el 50 % de la presión de detonación del explosivo.

**i. Categoría de humos**

La detonación de todo explosivo comercial produce polvo, vapor de agua (H<sub>2</sub>O), óxidos de nitrógeno (NO-NO<sub>2</sub>) óxidos de carbono (CO-CO<sub>2</sub>) y eventualmente gases sulfurosos (H<sub>2</sub>S, SO<sub>3</sub> y AlO<sub>2</sub>) si contenía azufre o aluminio. Entre los gases inocuos generados hay siempre cierto porcentaje de productos irritantes tóxicos o letales llamados en conjunto “humos”, como el monóxido de carbono y el bióxido de nitrógeno.

De acuerdo a la proporción contenida de estos gases tóxicos se ha establecido escalas de clasificación por grado de toxicidad, cuya equivalencia métrica según ISO es:

Tabla N°1: Escala de Clasificación por Grado de Toxicidad

CATEGORÍA	VOLUMEN DE GASES NOCIVOS (CO, NO <sub>2</sub> )
1 <sup>ra</sup>	de 0 a 4.53 dm <sup>3</sup>
2 <sup>da</sup>	de 4.53 a 9.34 dm <sup>3</sup>
3 <sup>ra</sup>	de 9.34 a 18.96 dm <sup>3</sup>

Fuente: Manual de Voladura EXSA S.A (2002)

### 1.3.4 Condiciones de la carga

El Manual de Voladura EXSA S.A (2009), menciona que:

– **Diámetro de la carga (diámetro del taladro)**

Influye directamente sobre el rendimiento del explosivo y la amplitud de la malla de perforación. Todo explosivo tiene un diámetro crítico; por debajo de ese diámetro no detonan.

– **Geometría de la carga**

Relación entre el largo de la carga con su diámetro y el punto donde es iniciada. Se refleja en el proceso de rompimiento y en la formación de “zonas de fracturación” en las cargas cilíndricas de los taladros de voladura.

– **Grado de acoplamiento**

Radio del diámetro de carga al diámetro del taladro. El acoplamiento físico entre la carga explosiva y la roca permite la transferencia de la onda de choque entre ellas, teniendo un carácter muy significativo sobre el rompimiento. El efecto de trituración depende mucho del contacto directo del explosivo con la roca. Para voladura convencional se recomienda que la relación entre diámetro de taladro y diámetro de cartucho no sea mayor que 1,21. Como por ejemplo: cartuchos de 32 mm de diámetro para taladros de 40 mm de diámetro, o cartuchos de 42 mm de diámetro para taladro de 50 mm de diámetro.

- **Depende del acoplamiento, del taqueo o acabado, del uso de taco inerte para sellar el taladro y de la geometría de la carga (burden y distancia entre los taladros)**

Un confinamiento demasiado flojo determinará un pobre resultado de voladura. Por otro lado, un alto grado de confinamiento (por excesivo atacado del explosivo) puede incrementar tanto su densidad que lo puede hacer insensible a la transmisión de la onda de detonación y fallar. Los explosivos a granel (ANFO, emulsión) en bancos se confinan por sí solos.

- **Densidad de carguío (Dc)**

Da la medida de llenado de un taladro. En el caso de un llenado perfecto sin dejar el menor espacio desocupado tendremos por definición una densidad de carguío = 1. En general, cuando un taladro se llena al X% de su espacio ocupado por explosivo tendremos  $Dc = 0,92$ .

- **Distribución de carga en el taladro**

La carga explosiva puede ser de un solo tipo en todo el taladro (carga única) o tener primero explosivo más denso y potente (carga de fondo) y luego explosivo menos denso (carga de columna). También pueden ser varias cargas de igual o distinto tipo separadas entre sí por mineral inerte (cargas espaciadas o decks).

- **Tipo y ubicación del cebo**

Puede emplearse el cebo único, el cebado múltiple (dos o más en rosario en la misma columna de carga, o una en cada decks cargas espaciadas) y el cebado longitudinal (axial), éste generalmente con cordón detonante.

– **Distribución de energía, en cal/t de roca**

La energía aplicada sobre la roca dependerá de la distribución de la carga en el taladro, de la densidad del carguío, del punto de iniciación y del tipo de explosivo utilizado, mientras que el consumo útil de energía está vinculado al confinamiento y tiempo de duración del proceso de rotura antes que los gases se disipen en el ambiente.

– **Intervalos de iniciación de las cargas (timing)**

Los taladros deben ser disparados manteniendo una secuencia ordenada y correcta, para crear las caras libres necesarias para la salida de cada taladro, lo que se logra con los detonadores de retardo o con métodos de encendido convencional escalonados.

– **Variables de perforación**

Tienen importante influencia en los resultados de la voladura: La profundidad del taladro respecto a la altura de banco en superficie y al avance estimado en túneles. La malla de perforación, relación de burden y espaciamiento entre taladros, importante para la interacción entre ellos. Diámetro del taladro, base para determinar el burden y el consumo de explosivo. Otros factores que se deben considerar en el planeamiento de un disparo son el costo de perforación y el costo del explosivo, con base en el consumo total de explosivo por m<sup>3</sup> o tonelada de roca movida (factor de carga en kg/m<sup>3</sup>). También para ciertos tipos de explosivo su vida útil (shelflife).

**1.3.5 Parámetros controlables en voladuras**

El Manual de Voladura EXSA S.A (2009), nos dice que de acuerdo a las necesidades reales del trabajo y condiciones del terreno. Estos parámetros controlables se pueden agrupar de la siguiente manera:

- a) **Geométricos:** altura, ancho y largo del banco, talud, cara libre.
- b) **De perforación:** diámetro y longitud del taladro, malla.
- c) **De carga:** densidad, columna explosiva, longitud de taco, características físico-químicas del explosivo.
- d) **De tiempo:** tiempos de retardo entre taladros, secuencia de salidas de los disparos.

### 1.3.6 Explosivo

Los explosivos son compuestos o mezclas de sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, que por medio de reacciones químicas de óxido-reducción, son capaces de transformarse en un tiempo muy breve, del orden de una fracción de microsegundo, en productos gaseosos y condensados, cuyo volumen inicial se convierte en una masa gaseosa que llega a alcanzar muy altas temperaturas y en consecuencia muy elevadas presiones.

Así, los explosivos comerciales son una mezcla de sustancias, combustibles y oxidantes, que incentivadas debidamente, dan lugar a una reacción exotérmica muy rápida, que genera una serie de productos gaseosos a alta temperatura y presión, químicamente más estables, y que ocupan un mayor volumen, aproximadamente 1 000 a 10 000 veces mayor que el volumen original del espacio donde se alojó el explosivo. Estos fenómenos son aprovechados para realizar trabajo mecánico aplicado para el rompimiento de minerales pétreos, en lo que constituye la “técnica de voladura de rocas”.

### 1.3.7 Voladura

Podemos definir a la voladura como la disposición de un grupo de barrenos que luego serán cargados con una cantidad de explosivos para poder realizar la fragmentación de las rocas, con una granulación deseada, también podemos acotar que voladura también es conocida en otros países con el nombre de **tronadura**.

### **Proceso de Voladura en minería metálica a tajo abierto**

En las investigaciones realizadas por Zhantao y Ken-ichi, explican que el propósito principal de la operación de voladura es la fragmentación de la roca y para esto se requiere de una gran cantidad de explosivos. Los explosivos liberan una gran cantidad de energía durante la explosión, en donde, sólo el 20-30% es utilizada para la ruptura y el desplazamiento de las rocas, mientras que el resto de esta energía se desperdicia en forma de efectos secundarios ambientales (9).

Los estudios llevados a cabo por Exsa SA, mencionan que de acuerdo a los criterios de la mecánica de rotura, la voladura es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento (10).

También indica que en la explotación de minerales se busca preferentemente fragmentación menuda, que facilita los procesos posteriores de conminución en las plantas metalúrgicas, mientras que en la de rocas algunas veces se requiere que sea en grandes bloques, como los que se emplean para la construcción de ataguías o rompeolas (10).

### **Parámetros no controlables en voladuras**

Teniendo en cuenta los diversos criterios que involucra un trabajo de voladura, como el propósito o uso final del lugar a excavar o el del mineral a obtener el volumen a ser excavado, el grado de fragmentación promedio requerido, si la roca excavada se quedará in situ o será transportada a otro lugar, el tipo y la dimensión del equipo de remoción y acarreo disponible, la proximidad a instalaciones importantes que puedan ser afectadas por vibraciones o proyecciones, además de otros, es pues necesaria una planificación cuidadosa de la voladura

considerando todos los detalles que puedan influir en sus resultados (10).

Según el manual de Exsa SA, indican que, existe una serie de factores o variables que intervienen directa o indirectamente en la voladura, que son mutuamente dependientes o que están relacionados uno u otro; unos son controlables y otros no (10).

### Parámetros controlables en voladuras.

Según el manual de EXSA SA, mencionan que, de acuerdo a las necesidades reales del trabajo y condiciones del terreno. Estos parámetros controlables se pueden agrupar en:

- **Geométricos:** altura, ancho y largo del banco, talud, cara libre.
- **De perforación:** diámetro y longitud del taladro, malla.
- **De carga:** densidad, columna explosiva, longitud de taco, características físico-químicas del explosivo.
- **De tiempo:** tiempos de retardo entre taladros, secuencia de salidas de los disparos (10).

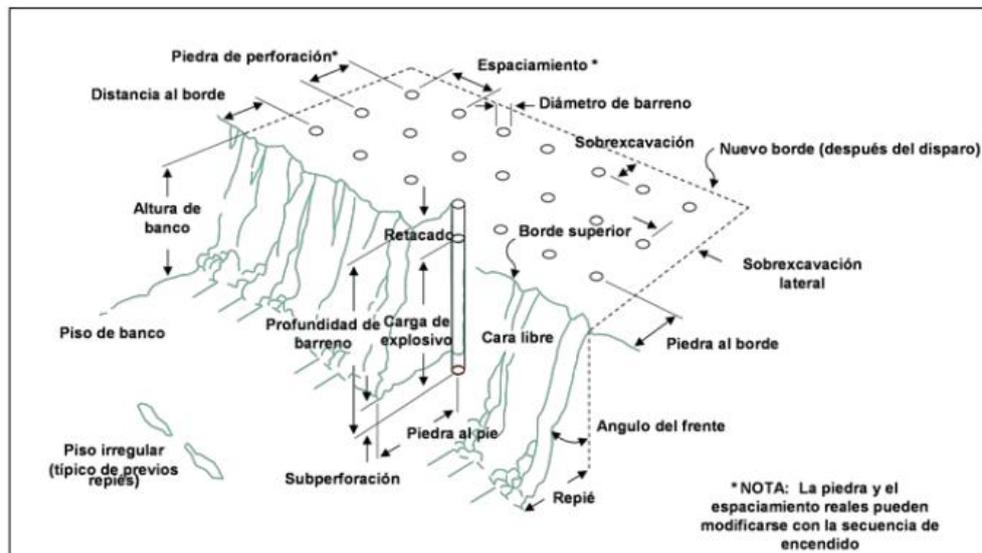


Figura N° 3: Parámetros de Voladura en banco.

Fuente: EXSA

### 1.3.8 Voladuras de rocas con cámara de aire

Salas, ha dado importantes alcances sobre el uso de cámaras de aire en voladura de rocas. Menciona que la cámara de aire es un espacio de aire que se genera por medio del “taponamiento” del taladro con un accesorio especial, el cual se ubica convenientemente dentro del taladro de la voladura (7).

Puede ser ubicada en la parte superior, media o inferior de la carga explosiva dependiendo del propósito. Puede ubicarse también 02 cámaras de aire en un solo taladro y puede ocupar hasta un 40% por volumen del total de la columna explosiva (Ver figura N° 3). La posición y el tamaño de las cámaras de aire cambian la fragmentación y el despliegue de la voladura (7).

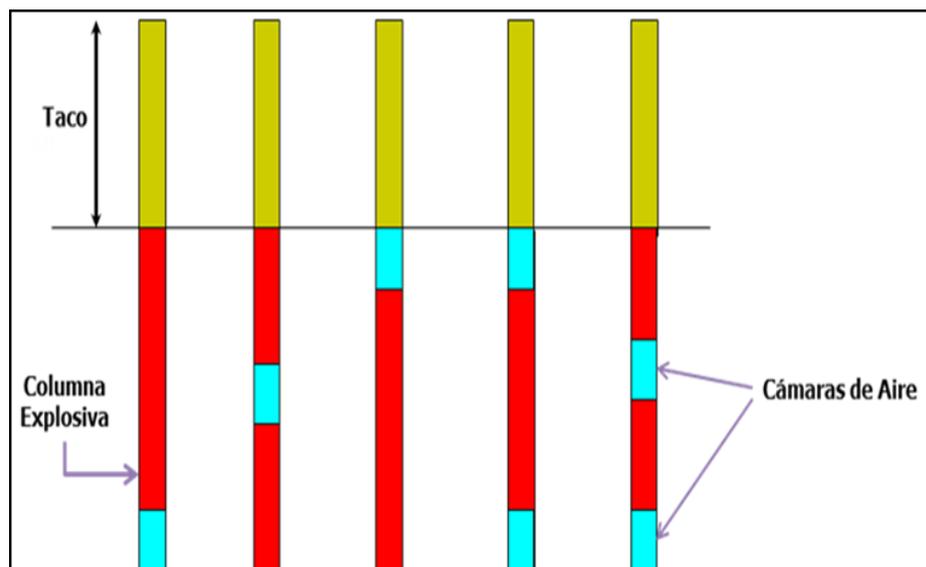


Figura N° 4: Ubicación de la cámara de aire en el taladro de producción

Fuente: Salas 2,011

#### a) Efectos de las cámaras de aire

Según Salas, los pulsos reducidos pero prolongados originan incremento de fracturas:

- Pulso no tan intenso, como la producida por una columna sólida, pero la efectividad de las ondas de

choque y tensión, se extienden sobre un mayor volumen de roca.

- Diversos estudios concluyen que las cámaras de aire incrementan la duración de la acción de las ondas de choque sobre el macizo rocoso, de 2 a 5 veces (7).

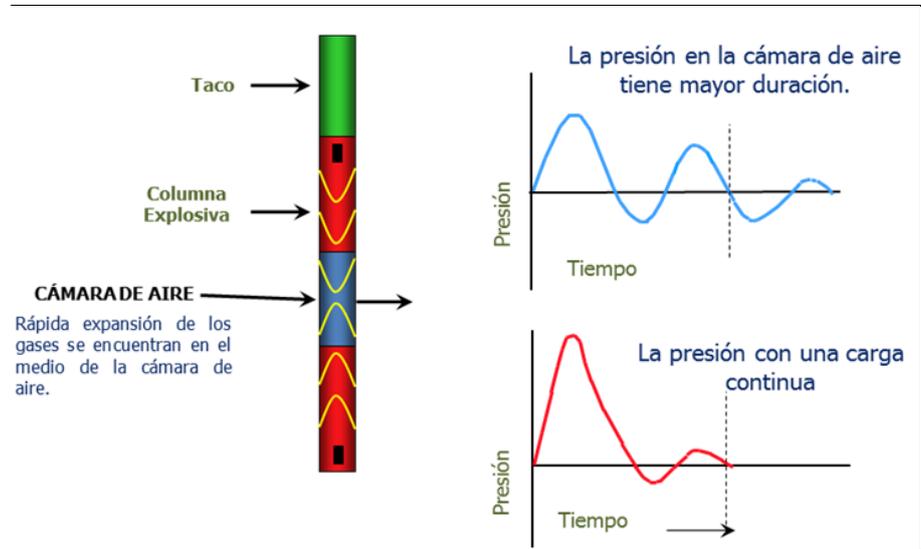


Figura N° 5: Efecto de la cámara de aire ubicada en el centro de la carga vs carga continua

Fuente: Salas 2011

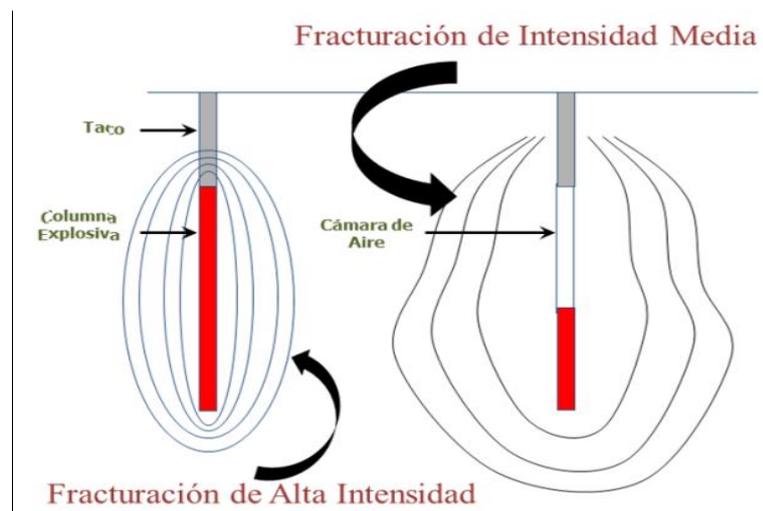


Figura N° 6: Perfil de fracturas de diferentes geometrías de cargas

Fuente: Salas 2,011

En la Figura N° 5 podemos observar una comparación entre los niveles de presión y los tiempos que duran los efectos de dicha presión sobre las rocas a volar. También se puede observar que la cámara de aire tiende a generar una rápida expansión de los gases que se encuentran en el medio de la columna explosiva. En la Figura N° 6 podemos observar el perfil y las diferentes geometrías que se forman después de la voladura.

#### **b) Principio de acción de las cámaras de aire**

De acuerdo a Salas (7):

-Las cámaras de aire incrementan la duración de la acción de la onda de choque sobre el medio circundante, esto debido a una serie de pulsos causados por las reflexiones de las ondas de presión originadas inmediatamente después de la detonación de un taladro.

-Con el uso de las cámaras de aire, la tensión máxima aplicada sobre la roca que la rodea, es menor que la tensión extrema aplicada por el explosivo en columnas continuas.

-Reduciendo la presión inicial aplicada por la carga explosiva, pero incrementando la duración del pulso de presión. Esto, efectivamente reduce la energía utilizada para quebrantar la roca cercana al taladro, al mismo tiempo, incrementa la cantidad de energía transmitiéndola a mayor distancia dentro de la roca.

-En presencia de agua, los resultados del uso de cámaras de aire es óptimo, por cuanto el agua es un excelente conductor de las ondas de choque.

#### **c) Etapas del proceso en cámara de aire de fondo.**

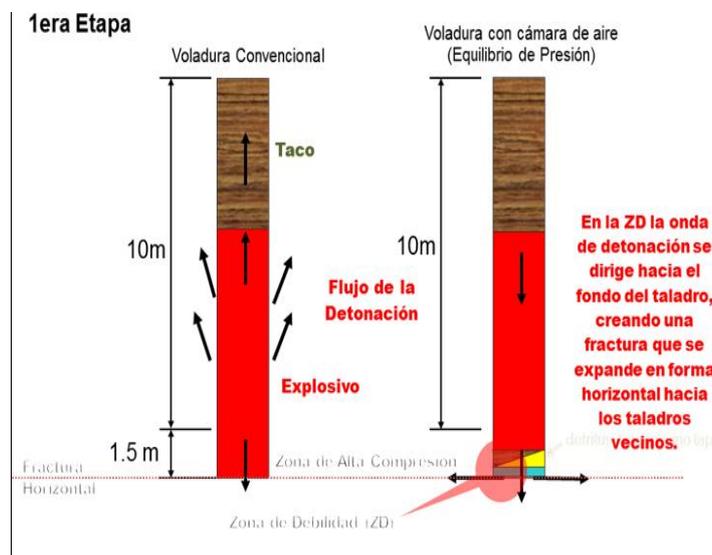
El mecanismo de voladura utilizando cámara de aire de fondo, presenta principalmente cuatro etapas:

En la **primera etapa** la onda de detonación se dirige hacia el fondo del taladro, creando una fractura que se expande en forma horizontal hacia los taladros vecinos (Ver Figura N° 7, 1era Etapa).

En la **segunda etapa** se genera una especie de pre-corte que se forma simultáneamente con los taladros colindantes (ver Figura N° 7, 2da Etapa).

En la **tercera etapa** las ondas de choque son reflejadas al penetrar en un cambio de medio, formado por el plano de fractura al fondo de la voladura (ver Figura N° 7, 3ra Etapa).

En la **cuarta etapa** las ondas de tensión y choque son reflejadas con mayor intensidad en una forma de ondas de tensión (ver Figura N° 7, 4ta Etapa).



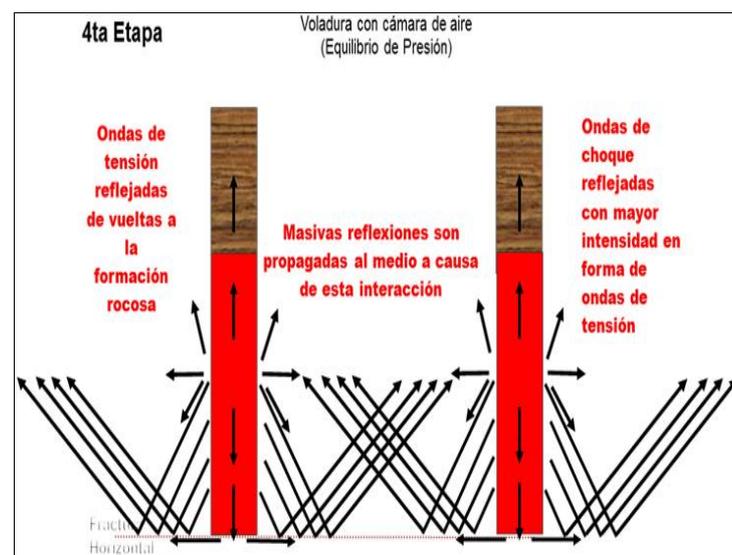
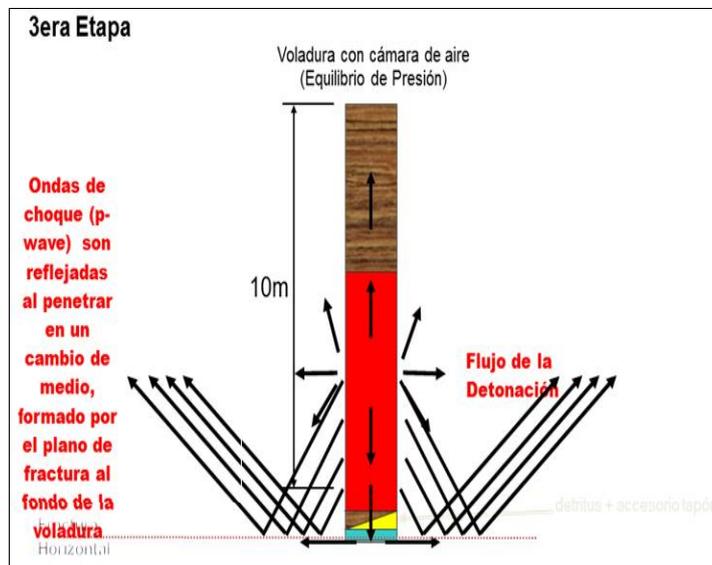
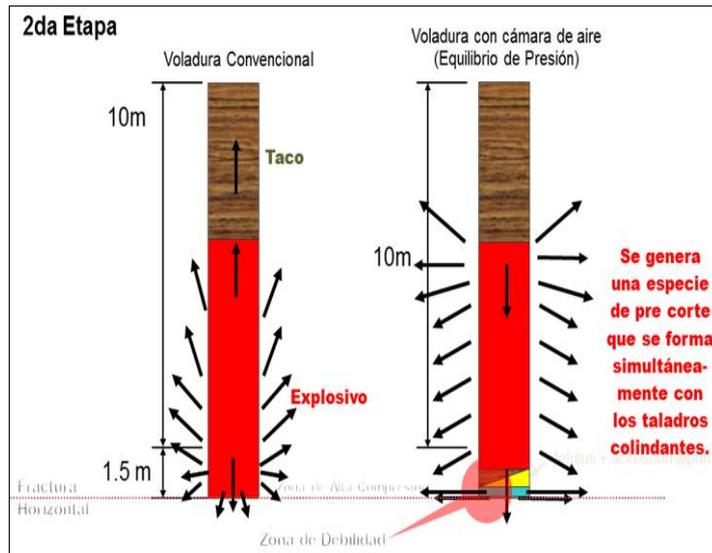


Figura No 7: Etapas del proceso en cámara de aire de fondo  
Fuente: Salas 2,011

**d) Beneficios diversos de las cámaras de aire según aplicación (7)**

- Reducción de la columna explosiva y ahorro en el consumo de explosivos.
- Reducción de vibraciones por menor uso de carga explosiva.
- Eliminación o reducción de la sobre perforación, ahorro en perforación.
- Reducción de la eyección de tacos (fly rock).
- Fragmentación más homogénea (reducción de gruesos en la zona del taco)
- Reducción de finos.
- En algunas aplicaciones evita la contaminación del taco con el explosivo.
- Mejora de pisos.
- Reducción del largo del taco.

**Evaluación de voladuras a tajo abierto**

De acuerdo al manual de Exsa SA, considera que, una voladura se evalúa por los resultados obtenidos. Para calificarla se consideran los siguientes aspectos: volumen de mineral movido, avance del disparo, pisos, fragmentación, forma de acumulación de los detritos, costo total del disparo generación de humos (10).

- **La dispersión de fragmentos a distancia (fly rocks).**  
Además de incrementar el riesgo de proyección de fragmentos volantes, tiene el inconveniente en minas de “diluir” el mineral de valor económico al mezclarlo con desmonte, cuando se desparrama lejos de la cara de voladura (10).

- **La generación de humos.**  
Se la califica por porcentajes dependiendo de la coloración de los mismos, los cuales pueden ser anaranjados (gases nitrosos) o grises (gases carbonosos). Los humos están íntimamente vinculados con la calidad del explosivo fabricado, por lo que el control de la calidad de los insumos como el producto final debe ser estrictamente evaluados (10).
  
- **VOD.**  
Es la velocidad con la cual la onda de detonación viaja por el explosivo, puede ser expresada para el caso de explosivos confinados como no confinados; por sí misma es la propiedad más importante cuando se desea clasificar un explosivo. Como en la mayoría de casos el explosivo está confinado en un barreno, el valor de velocidad de detonación confinada es el más importante (10).
  
- **La densidad.**  
La densidad del explosivo es usualmente indicada en términos de gravedad específica, la gravedad específica de explosivos comerciales varía de 0.6 a 1.7. Los explosivos densos usualmente generan mayores velocidades de detonación y mayor presión; estos suelen ser utilizados cuando es necesaria una fina fragmentación de la roca. Los explosivos de baja densidad producen una fragmentación no tan fina y son usados cuando la roca está diaclasada o en canteras en las que se extrae mineral grueso (10).
  
- **Velocidad Pico Partícula.**  
Las voladuras producen vibraciones en el subsuelo que pueden causar daños en las estructuras circundantes debido a los esfuerzos y deformaciones de tipo dinámico que se superponen a las estáticas. Los estudios teóricos muestran que la velocidad a la que se desplazan las partículas en el

subsuelo es la variable determinante de la magnitud de los esfuerzos a los que son sometidas las estructuras (10).

– **Factor de potencia.**

Es la relación entre el número de kilogramos de explosivos empleados en una voladura determinada y el número de toneladas a romper producto de esa voladura o el volumen correspondiente en metros cúbicos a romper. Las unidades son kg/TM o  $\text{kg/m}^3$  (10).

### 1.3.9 Vibraciones generadas por la voladura

El paso de una onda sísmica por un medio rocoso produce en cada punto de éste un movimiento que se conoce por vibración. Las vibraciones generadas por la voladura se transmiten a través del macizo rocoso como ondas sísmicas, cuyo frente se desplaza en forma radial a partir del punto de detonación, se clasifican en dos grupos: Ondas Internas y Ondas Superficiales. Así dentro de las ondas internas las más importantes son las Longitudinales o Primarias “P” y las Transversales o Secundarias “S”, y dentro de las Superficiales las que se generan más comúnmente son las Ondas Love y las Ondas Rayleigh. En la figura 8 podemos ver los tipos de ondas superficiales e internas.

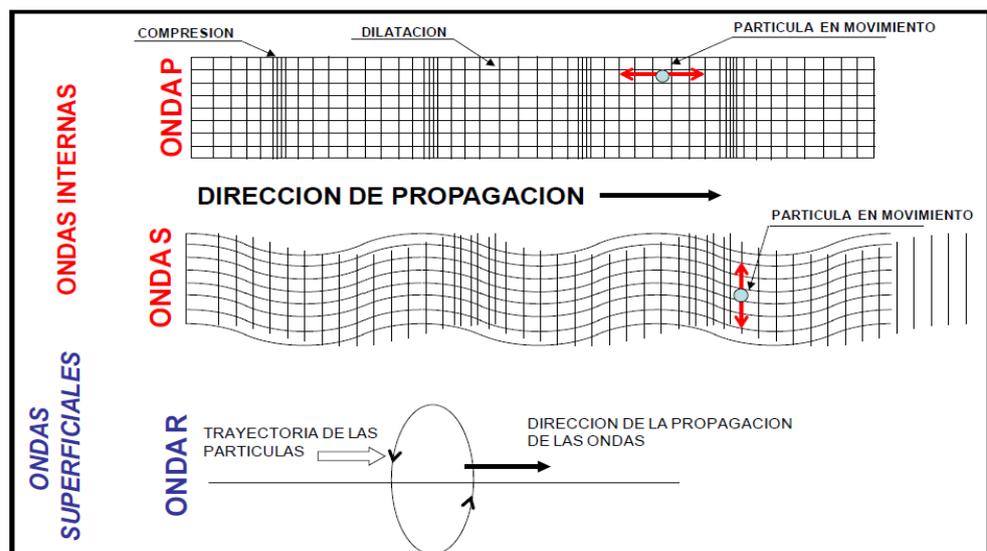


Figura N° 8: Ondas vibracionales internas y superficiales

Fuente: EXSA 2010.

A continuación damos una breve descripción de cada tipo de onda generada por la voladura.

- **Las ondas P** (PRIMARIAS O o PRIMAE) son ondas longitudinales o compresionales lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de mineral líquido o sólido. Velocidades típicas son 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito.
  
- **Las ondas S** (SECUNDARIAS o SECUNDAE) son ondas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Debido a ello, éstas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que producen la mayor parte de los daños. Sólo se trasladan a través de elementos sólidos. La velocidad de propagación de las ondas S en medios isótropos y homogéneos depende del módulo de corte  $\mu$  y de la densidad  $\rho$  del mineral.
  
- **Las ondas superficiales Tipo Love**, son ondas superficiales que producen un movimiento horizontal de corte en superficie. Se denominan así en honor al matemático neozelandés A.E.H. Love quien desarrolló un modelo matemático de estas ondas en 1911. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh.
  
- **Las ondas Rayleigh**, también denominadas ground roll, son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico

retrógrado del suelo. La existencia de estas ondas fue predicha por John William Strutt, Lord Rayleigh, en 1885. Son ondas más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de las ondas S.

En la Figura N° 9 podemos observar en forma esquemática las ondas primarias y secundarias, como las superficiales.

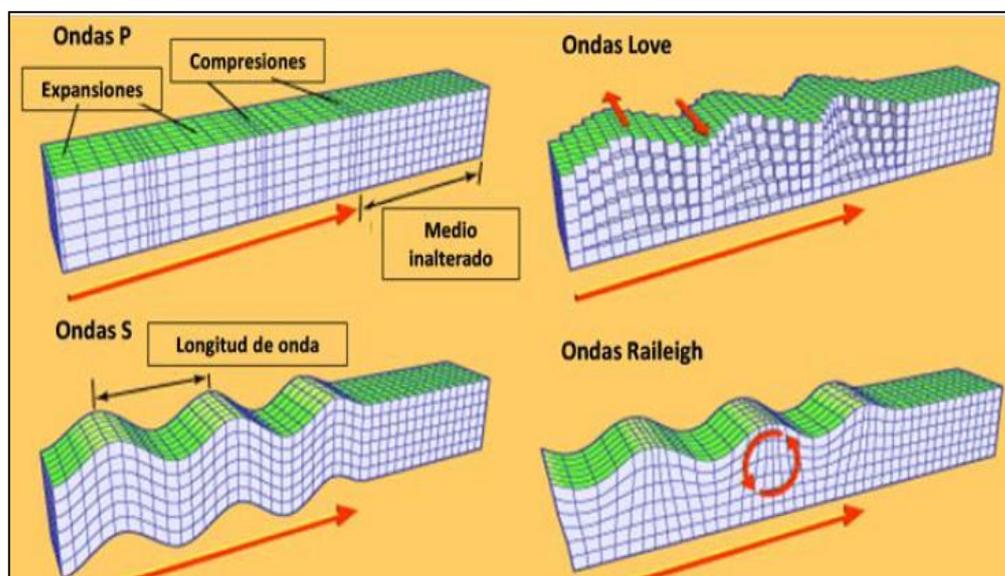


Figura N° 9: Tipos de ondas sísmicas

Fuente : P/V de rocas Madrid 2013

### 1.3.10 Medidas de las vibraciones producidas por la voladura

Bernaola, Castilla, Herrera, 2013, es preciso hacer aquí una distinción entre aspectos bien diferenciados del fenómeno de la vibración. Uno de ellos es la propagación o transmisividad de la vibración por el medio y otro es el movimiento propio que el paso de la vibración genera en las partículas del medio. Cabe entonces diferenciar entre dos tipos de velocidades:

Velocidad de onda o de propagación es aquella con la que la vibración se propaga por el medio.

Velocidad de partícula es aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula, excitada por el paso de la onda de energía vibratoria.

Como ya se ha dicho, una partícula sometida a una vibración, experimenta un movimiento oscilante del que sus parámetros medibles pueden ser desplazamiento, velocidad, aceleración de partícula y la frecuencia del movimiento ondulatorio. Conociendo cualquier pareja de estos parámetros, se puede deducir el valor del resto, por integración y/o derivación. De todos los parámetros posibles de medida, universalmente se toma la velocidad de vibración como el que mejor representa el nivel de vibración y daños producidos, para edificaciones. No obstante es imposible hoy día establecer un criterio fiable que no considere las frecuencias dominantes en la vibración. Las vibraciones reales no se corresponden a un movimiento armónico puro, pero cualquier señal recibida por el captador se puede representar como la suma de una serie de movimientos armónicos individuales, que se conoce con desarrollo en serie de Fourier de la señal.

#### **1.3.11 Equipos de medida de las vibraciones generas por voladura.**

Bernaola, Castilla, Herrera (2013), para recoger la oscilación generada por el terreno se emplean equipos de medida denominados sismógrafos. Un sismógrafo cuenta con:

- Una serie de sensores o elementos para captar el ruido y las vibraciones del terreno transformándolos en impulsos eléctricos (micrófonos, velocímetros y acelerómetros).
- Un amplificador de la señal.
- Un módulo de memoria para el almacenamiento de datos.
- Algunos modelos incorporan un sistema de impresión que visualiza y gestiona los datos.



Figura N° 10: Sismógrafo con sus accesorios

Fuente: Bernaola, Castilla 2013.

Para captar las vibraciones del terreno pueden utilizarse sismógrafos o acelerómetros.

Los geófonos electrodinámicos son los más usados en la actualidad y están basados en el desplazamiento relativo de una bobina en el interior de un campo magnético lo que genera una fuerza electromotriz (f.e.m.) proporcional a la velocidad de desplazamiento. Uno de los elementos (el imán o la bobina) se fija al aparato y, con éste, al terreno, mientras que el otro está libremente suspendido de aquel y por tanto permanece inmóvil.

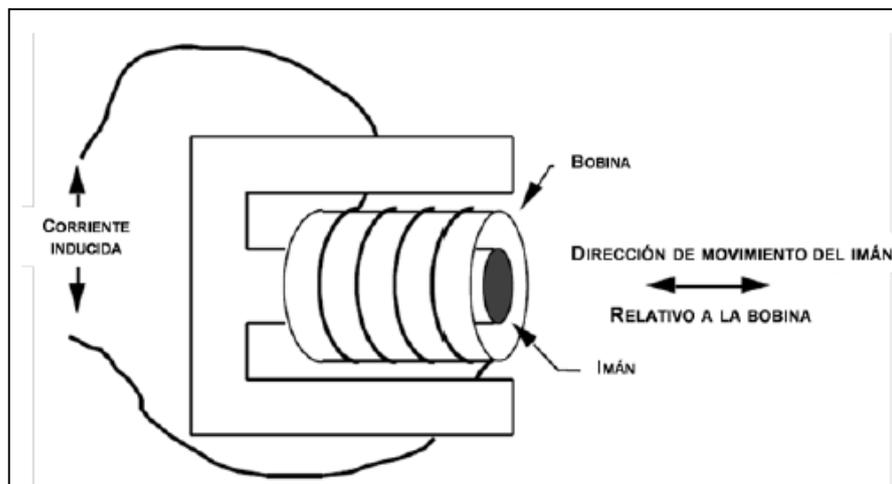


Figura N° 11: Geófono electrodinámico.

Fuente: Bernaola, Castilla 2013.

Los sismógrafos actuales llevan incorporado tres geófonos colocados perpendicularmente entre sí para captar la vibración producida en las direcciones del espacio. Así se puede recoger la respuesta en la dirección longitudinal, vertical y transversal además de la onda aérea por medio de un micrófono.

Los acelerómetros se basan en el cambio de ciertas propiedades físicas de algunas sustancias cuando son sometidas a esfuerzos de presión y se caracterizan por dar respuesta tanto a altas como a bajas frecuencias.

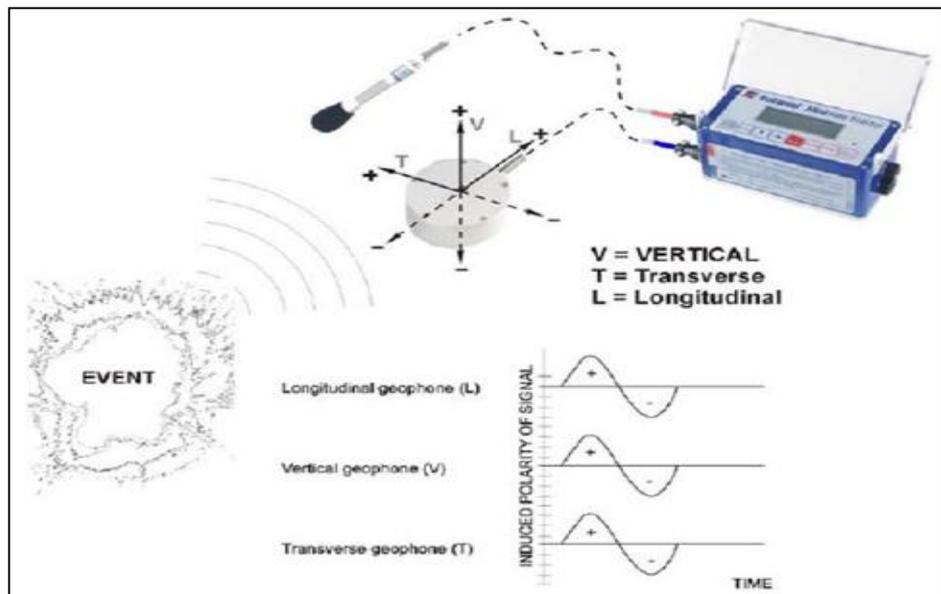


Figura N° 12: Geófono electrodinámico.

Fuente: Bernaola, Castilla 2013.

A diferencia de los acelerómetros piezoeléctricos, los acelerómetros piezoresistivos no generan corriente alguna, sino que, simplemente, por efecto de la presión, varía de forma proporcional la resistividad del elemento semiconductor que incorpora, normalmente sílice. De esta forma este mineral actúa como una resistencia variable. Generalmente un acelerómetro de este tipo está constituido por uno o dos pares de elementos semiconductores dispuestos de forma que el movimiento pone a

un elemento en tensión y al otro en compresión, y así sus resistividades varían en sentido contrario, mejorando la sensibilidad del aparato. Esta variación de las resistencias se mide en un puente de Wheatstone. La principal ventaja de este tipo de acelerómetros es que dan una respuesta más amplificada tanto para bajas como para altas frecuencias.

La forma de fijación de estos aparatos al terreno dependerá lógicamente de la superficie de fijación y de la magnitud esperable del movimiento a medir. Si se dispone de una superficie plana y horizontal y no es probable que la aceleración del movimiento vibratorio supere el valor de  $0,2\text{ g}$ , siendo "g" la aceleración de la gravedad, el sensor puede estar simplemente apoyado sobre dicha superficie. En otras circunstancias, el sensor habrá de ser enterrado en el terreno o fijado al mismo mediante un sistema apropiado de adherencia o anclaje.

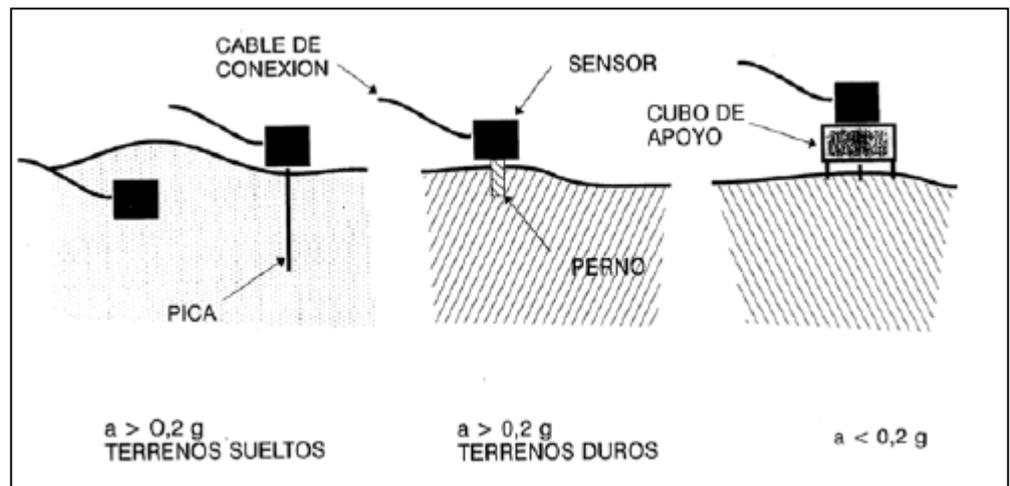


Figura N° 13: Ubicación de sensores enterrados en el terreno o fijados al mismo.

Fuente: Bernaola, Castilla 2013.

### 1.3.12 Monitoreo de vibraciones

Según la Normativa española (UNE 22-381-93), distingue tres tipos de estructuras (Ver Tabla N° 2):

- a. Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.
- b. Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.
- c. Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

Tabla N° 2: Tabla de Norma Española de Prevención de Daños

Tipo de estructura	Frecuencia principal (Hz)		
	2 – 15	15 – 75	> 75
	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)	Velocidad (mm/s)
Grupo I	20	0.212	100
Grupo II	9	0.095	45
Grupo III	4	0.042	20

Fuente: Normativa española UNE 22-381-93

El criterio de prevención de daño establece que por debajo de 15 Hz y por encima de 75 Hz los límites se fijan mediante velocidades de partícula, mientras que entre estos valores el límite se fija en el desplazamiento.

Cuando el nivel está dado en desplazamientos, se puede calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal, considerando un movimiento ondulatorio ideal de tipo sinusoidal:  
 $v=2 \pi f d.$

Donde  $v$  es la velocidad de partícula equivalente (mm/s),  $f$  es la frecuencia principal (Hz) y  $d$  (mm) es el desplazamiento admisible indicado en la Tabla N° 2.

De acuerdo al estudio de vibraciones realizado por Geoengineering:

- 1) Las viviendas a proteger en el área de las instalaciones se pueden clasificar como edificios con tabiques tradicionales según el criterio de daños del USBM, en el Grupo II según la norma UNE y en el Tipo II de la norma DIN.
  
- 2) Teniendo en cuenta la clasificación de las edificaciones y las frecuencias dominantes registradas, se establecen los valores máximos de vibración definidos por los criterios de daños. Este valor es de 9 mm/s según la norma española UNE, que es la que se recomienda aplicar, para el intervalo de frecuencias entre 2 y 15 Hz.

### **1.3.13 Experimentos utilizando cámaras de aire.**

Chiappetta hizo experimentos en una mina en Pennsylvania para obtener una explicación técnica del proceso en un mineral no estratificado. Se efectuaron varias pruebas en los cuales se miden los mismos parámetros para poder evaluar y comparar, estos se pueden ver en la Figura N° 14.

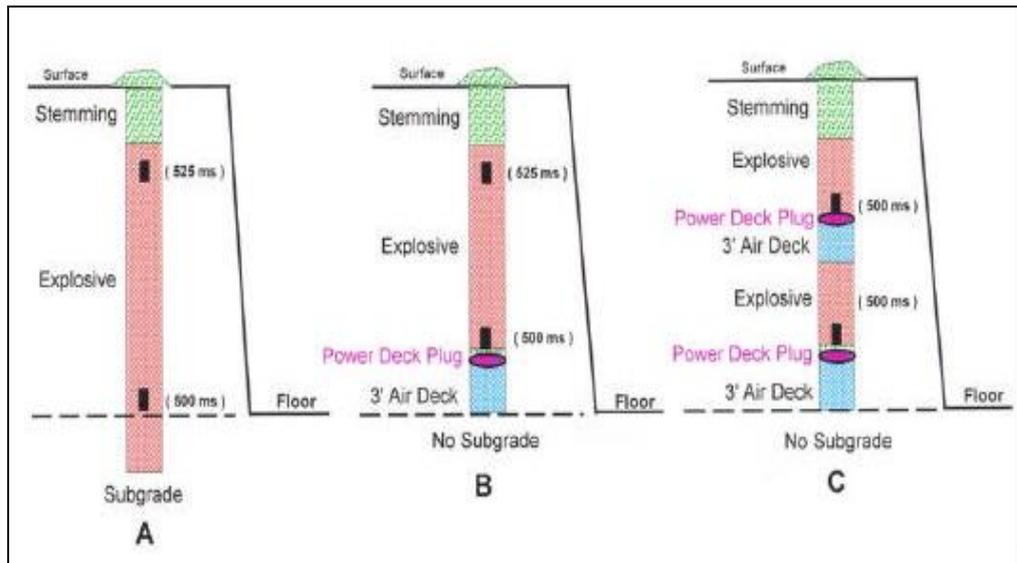


Figura N° 14: Esquema pruebas con cámaras de aire.

Fuente: Chiappetta (2004).

Para medir la velocidad de detonación VOD se perfora desde la cara libre del banco un pozo de 3" inclinado para interceptar al pozo vertical y extraer por ahí el cable coaxial, el esquema se muestra en la Figura N° 15.

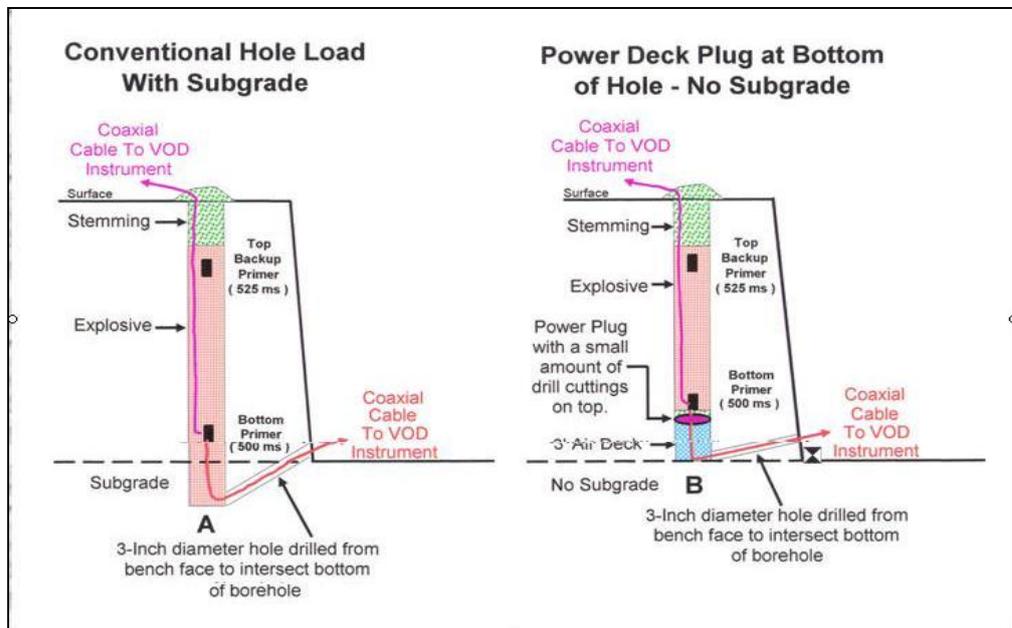


Figura N° 15: Esquema para medir VOD en cámara inferior

Fuente: Chiappetta (2004).

Todas las pruebas anteriores se realizan pozo a pozo, para evaluar: el daño al piso del piso de perforación, desplazamiento, sobre quiebre, fragmentación y vibración. Se puede ver en la Figura N° 16.



Figura N° 16: Pruebas voladura completa

Fuente: Chiappetta (2004).

Los resultados obtenidos con el estudio realizado por se comprueba que las cámaras de aire inferior transforman la Voladura Tradicional compresiva en una nueva Técnica de Voladura Tensional.

Los principales resultados son:

- a) Aumento de la presión de taladro en la zona de la cámara.
- b) Se transforma la energía potencial del aire en Energía cinética.
- c) Se reduce el factor de carga
- d) Se disminuye las vibraciones
- e) Se reduce Fly Rock
- f) Se disminuye la Onda aérea.

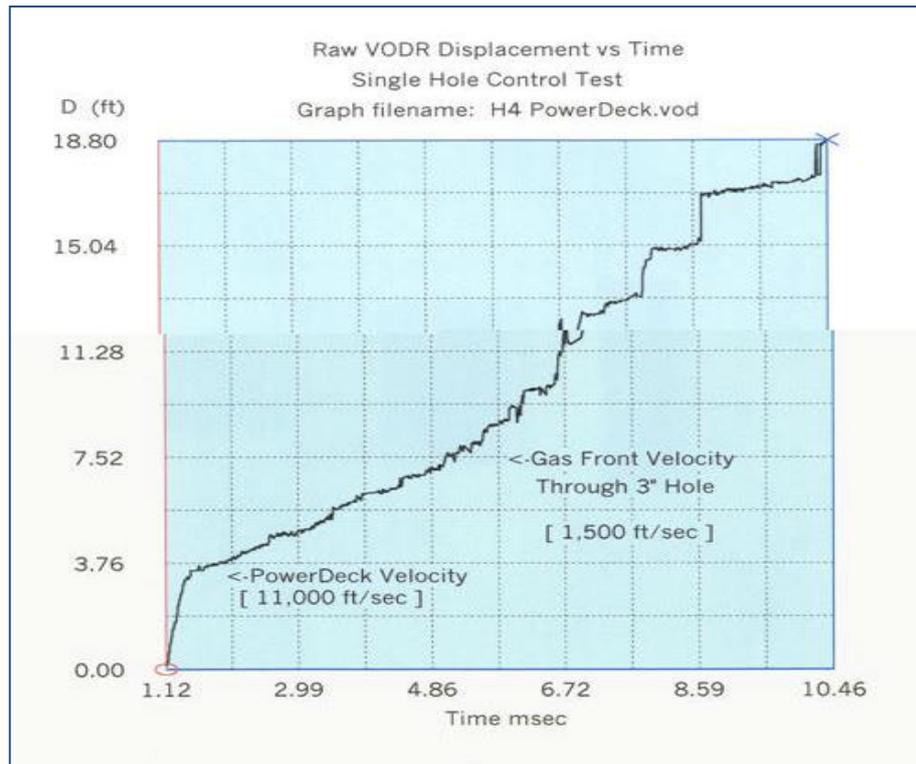


Figura N° 17: VOD en cámara de aire

Fuente: Chiappetta (2004).

#### 1.3.14 Aplicación industrial del Taponex.

Esta nueva técnica utiliza un accesorio de diseño cónico, con una cámara de aire en el fondo del pozo y una masa predeterminada de detritos encima del tapón. A esta combinación se le denomina Power Deck™ en inglés TAPONEX® para Latino América.

El TAPONEX® (Ver figura N° 18) es un accesorio de plástico (Polietileno) con un diseño particular que permite crear cámaras de aire en un pozo de voladura, su exclusivo diseño permite ser instalado sin la necesidad de aire comprimido, su forma es auto soportante.

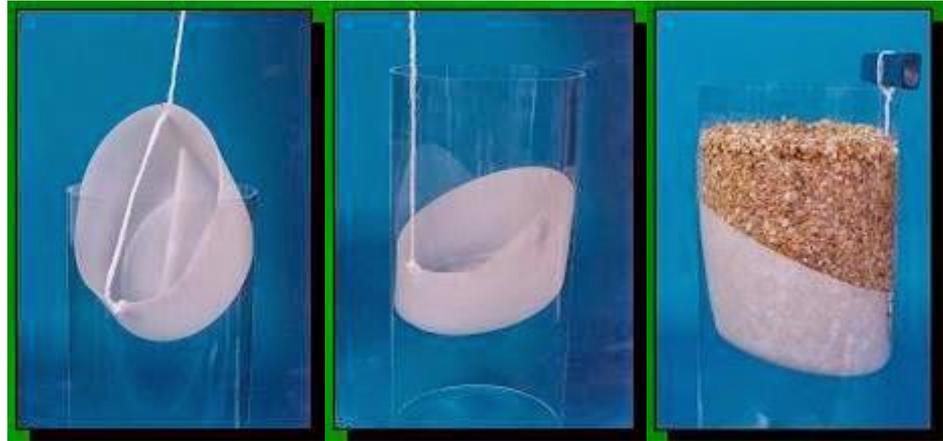


Figura N° 18: Power Deck™ en inglés TAPONEX.

Fuente: Perca (14)

#### 1.3.14.1 Etapas del funcionamiento de la cámara de aire en el taladro

**Primera Etapa, diseño de carguío.** En la Fig. N° 19, se observa la configuración de carga de un taladro con cámara de aire en el fondo y sin sobre perforación vs. Taladro con sobre perforación.

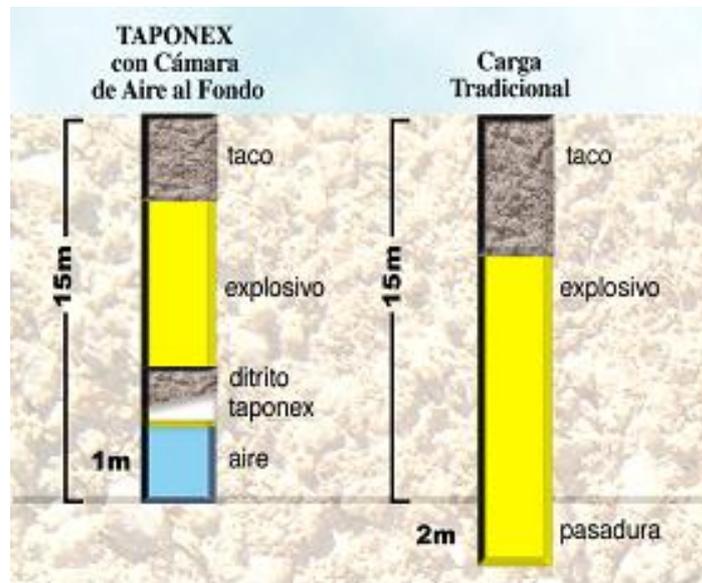


Figura N° 19: Primera etapa, diseño de carguío.

Fuente: Perca (14)

**Segunda etapa, Proceso de Equilibrio.** En la fig. N° 20 se observa que la cámara de aire obliga a equilibrar la presión, la detonación es hacia el fondo del taladro. El retenedor de taco protegido con 1/2 m de detritus, encabeza la onda de detonación al fondo del taladro, crea una fractura que se expande en forma horizontal hacia los taladros vecinos.



Figura N° 20: Segunda etapa, proceso de equilibrio

Fuente: Perca (14)

**Tercera etapa, transmisión de la energía al medio.** En la figura N° 21 se observa que las Ondas reflectivas chocan con las ondas de choque provenientes de la detonación. Una multitud de ondas de choque secundarias son propagadas al medio en forma de pulsos. Debido a las ondas reflectivas ascendentes, el flujo de detonación es desviado hacia el costado y fondo del medio colindante. Las Ondas de choque se propagan por las fracturas horizontales formadas con anterioridad en el fondo del taladro. Se crea una forma de pre-corte al nivel de banco, simultáneamente con los taladros colindantes.

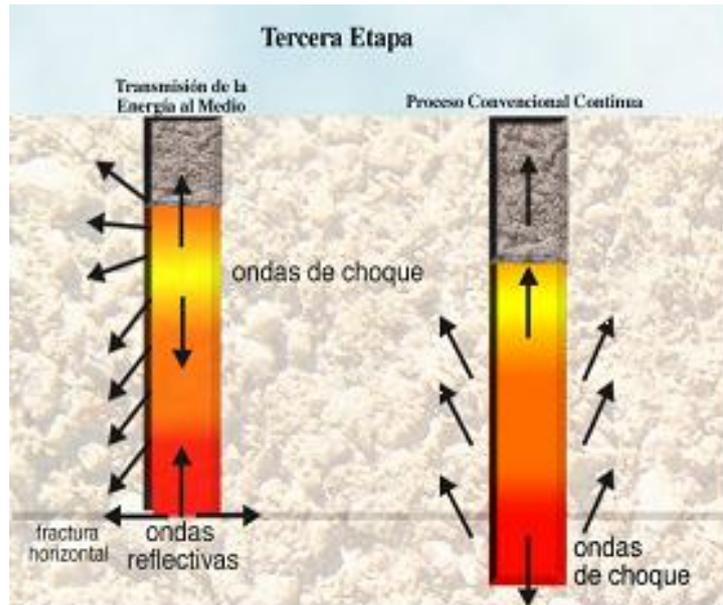


Figura N° 21: Tercera etapa, transmisión de la energía al medio

Fuente: Perca (14)

**Cuarta etapa, Reflexión de las ondas de Choque.** En la fig. N° 22 se observa que las ondas de choque son reflejadas al penetrar un cambio de medio formado por la fractura horizontal al fondo de la voladura. Las ondas de choque se reflejan con mayor intensidad en forma de ondas de tensión. Las ondas de tensión ofrecen más cantidad de daño a la roca. No olvidar que para fracturar la roca con un mínimo de esfuerzo y energía, el mineral debe cargarse principalmente con tensión.

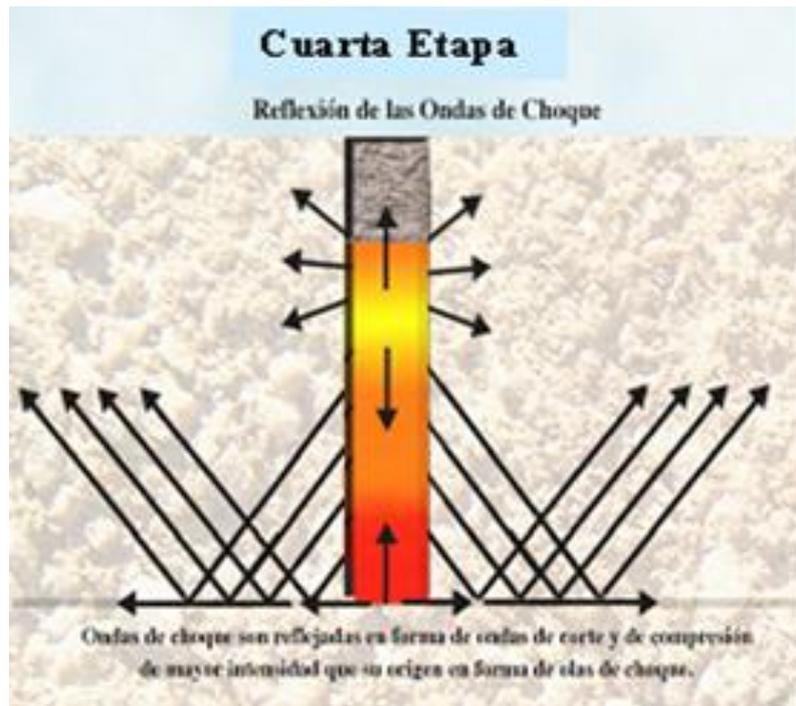


Figura N° 22: Cuarta etapa, reflexión de las ondas de choque.  
Fuente: Perca (14)

**Quinta Etapa, Interacción de Taladros con cámara de aire al fondo.** En la fig. N° 23, se observa que las ondas de tensión son reflejadas devuelta a la formación. Al mismo tiempo, interaccionan con las ondas de tensión originadas por el proceso de los taladros vecinos. Esta interacción no es bien entendida, se sospecha que una multitud de reflexiones son propagadas al medio a causa de esta interacción.

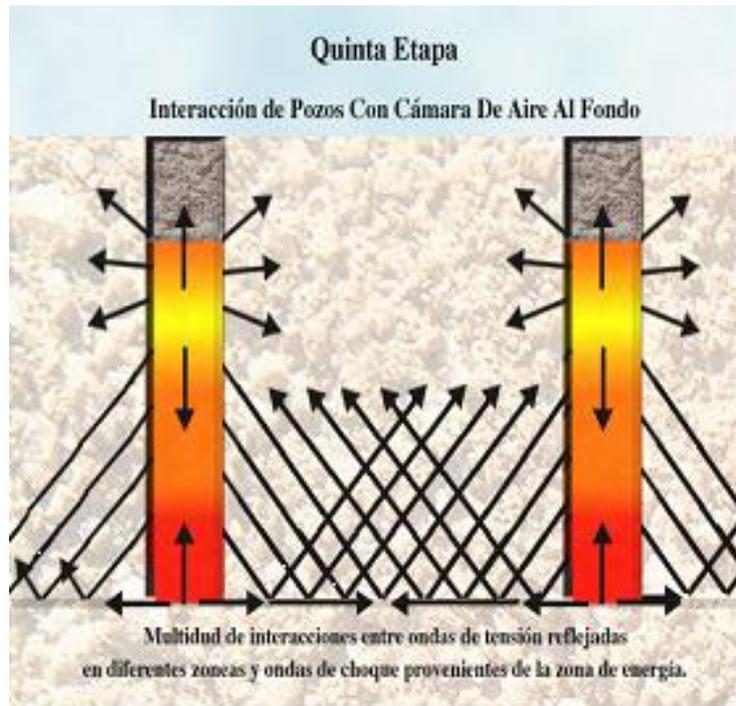


Figura N° 23: Quinta etapa, interacción de taladros con cámara de aire al fondo.

Fuente: Perca (14)

### 1.3.14.2 Componentes del Taponex

TAPONEX está compuesto por el recipiente polietileno, una cuerda polipropileno, y una vara de madera o plástico de 100 cm de longitud. La longitud de la cuerda dependerá de la longitud del taladro donde se instalará el TAPONEX.

Para el caso de colocarlo en el fondo de los taladros el TAPONEX consiste de un recipiente plástico y una vara de madera o plástico de un (01) metro de longitud en la mayoría de los casos, ésta longitud dependerá de la longitud de la cámara de aire que se elija dejar en el fondo (Ver figura N° 18).

EXSA S.A empresa la cual se dedica a la optimización de Perforación y Voladura. Diseña, fabrica y

comercializa el producto TAPONEX, sistema y accesorio patentado, a nivel mundial con oficinas en EEUU, Perú, Sudáfrica, Australia y Chile.

### 1.3.14.3 Funcionamiento del Taponex

El Taponex permite mantener confinada unos milisegundos más, la energía generada por la columna explosiva para lograr fragmentar mejor la roca en la zona del taco. Sin embargo en forma indirecta se ha podido apreciar beneficios como son reducción de la fly rock, cantidad de mineral explosivo utilizado y vibración por voladuras. A continuación presentamos una tabla donde están las dimensiones estándar del Taponex.

Tabla N°3: Dimensiones del TAPONEX

DIMENSIONES Y EMBALAJE					
TAPONEX® para taladros de diámetro	61/4"	77/8"	9"	97/8"	121/4"
	–			–	–
	63/4"			105/8"	133/4"
Unidades por rollo de embalaje	50	50	50	50	30
Peso (kgs)	9	12	15.5	17	23.7
Diámetro rollo (m)	0.61	0.60	0.71	0.74	0.80
Altura	0.16	0.19	0.24	0.27	0.31

Fuente: (EXSA-2015).

El Taponex presenta los siguientes efectos:

- Reacciona a la onda explosiva.

- Mecanismos friccionales dificultan eyección de rocas.
- La Cámara de Aire produce un cambio de medio que refleja las ondas de choque.
- La onda de devuelve hacia abajo disminuyendo presión sobre el taco.

Las principales aplicaciones del TAPONEX se destacan las orientadas a:

- Reforzar el comportamiento del taco.
- Formar cámaras de aire en pozos secos.
- Formar cámaras de agua en pozos saturados de agua.
- Reducir el Air Blast u Onda Expansiva de la voladura.
- Evitar la contaminación de columnas de emulsión con el mineral del taco.
- Reducir las vibraciones producidas por la voladura.
- Control del piso y reducción o eliminación del sobre rompimiento, lo que permite disminuir el largo de la perforación.
- Fragmentación más homogénea.
- La granulometría es más fina a pesar de la disminución del factor de carga.
- El sistema se ha utilizado en rocas de 80 MPa hasta 230 MPa.
- Se mantiene la misma malla, secuencia de salida y tipos de explosivo.

#### **1.4. Formulación del problema**

¿Cuál es el efecto de las cámaras de aire en taladros de producción en minería a tajo abierto en el Norte del Perú, 2016?

#### **1.5. Justificación del estudio**

Los resultados de esta investigación, contribuirán con datos prácticos útiles para comprobar y/o generar nuevos métodos referentes al uso de cámaras de aire en operaciones de voladura superficial.

Con este estudio se va a aplicar los conocimientos adquiridos en nuestra formación universitaria en el campo de la minería. Esta tesis va a ser una guía para todos aquellos estudiantes, egresados y profesionales, que busquen información sobre el método de corte y relleno mecanizado.

#### **1.6. Hipótesis**

Los efectos de las cámaras de aire en taladros de producción mejoran la fragmentación del material y reducen el nivel de vibraciones por voladura en minería a tajo abierto en el norte del Perú, 2016.

#### **1.7. Objetivos**

##### **1.7.1 General**

Determinar el efecto de las cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, para mejorar la fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones en minería a tajo abierto.

##### **1.7.2 Específico**

- Evaluar el efecto de cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, para mejorar la fragmentación del material en minería a tajo abierto.

La Hipótesis a probar es:

$H_0$ : La fragmentación promedio con disparos en taladro de producción con Taponex es igual a la fragmentación

promedio con disparos en taladro de producción normal (pulgadas).

$H_1$ : La fragmentación promedio con disparos en taladro de producción con Taponex es menor a la fragmentación promedio con disparos en taladro de producción normal (pulgadas)

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 < \mu_2$$

Donde:

$\mu_1$ : La fragmentación promedio con disparos en taladro de producción con Taponex (pulgadas).

$\mu_2$ : La fragmentación promedio con disparos en taladro de producción normal (pulgadas).

Con  $\alpha = 0.05$

- Evaluar el efecto de cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, para reducir el nivel de vibraciones en minería a tajo abierto.

La Hipótesis a probar es:

$H_0$ : Las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción con Taponex es igual a las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción normal (mm/s)

$H_1$ : Las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción con Taponex es menor a las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción normal (mm/s)

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 < \mu_2$$

Donde:

$\mu_1$ : Las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción con Taponex (mm/s).

$\mu_2$ : Las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción normal (mm/s).

Con  $\alpha = 0.05$

- Determinar los porcentajes de reducción de la fragmentación del material y de la vibración usando cámaras de aire (taponex).

## **II. MÉTODO**

### **2.1. Diseño de Investigación**

Experimental con diseño Cuasi experimental.

La investigación es de tipo cuasi experimental puesto que se analiza comparativamente el efecto que produce la utilización de las cámaras de aire (taponex) y el método tradicional, en el momento de la voladura en términos de fragmentación y vibración.

### **2.2. Variables, Operacionalización**

- **Variable independiente**

Ubicación de la Cámara de aire (Taponex) en el taladro de producción.

- **Variable dependiente**

Fragmentación del material y reducción del nivel de vibraciones por voladura.

**Tabla N° 4: Operacionalización de variables**

<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADOR</b>
Ubicación de la Cámara de aire (Taponex) en el taladro de producción.	La cámara de aire es un espacio de aire que se genera por medio del “taponamiento” del taladro con un accesorio especial, el cual se ubica convenientemente dentro del taladro de producción.	Se ubica principalmente en los siguientes casos: sobre el explosivo, en la zona del Taco como cámara de aire capacidad; y/o bajo el explosivo, para control del piso en una voladura.	Altura y Ubicación en el taladro de producción.	Un metro de cámara de aire bajo el explosivo.
<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADOR</b>
Fragmentación del material y reducción del nivel de vibraciones por voladura.	La fragmentación de rocas es uno de los principales objetivos en toda operación de voladura.	Se evalúa la fragmentación para determinar el tamaño promedio de la roca y su distribución (porcentaje de material fino y grueso).	Granulometría	Pulgadas
	Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio).	Las vibraciones producidas por la voladura se evalúan a través de la Velocidad pico de partícula VPP a distintas frecuencias (es el parámetro utilizado internacionalmente para predecir los efectos causados sobre estructuras cercanas).	Velocidad pico de partícula (VPP)	- mm/s

### 2.3. Población y muestra

#### **Población:**

Taladros de producción con aplicación de cámaras de aire, en minería a tajo abierto en el Norte del Perú.

#### **Muestra:**

Taladros de producción con aplicación de cámaras de aire, en minería a tajo abierto en el departamento de Cajamarca.

#### **Unidad de análisis:**

Un taladro de producción con aplicación de cámaras de aire, en minería a tajo abierto en el departamento de Cajamarca.

En la Figura N° 24 podemos observar el diseño estándar del taladro de producción, además de las características generales de las otras variables como son el burden, espaciamento, taco y la sobre perforación.

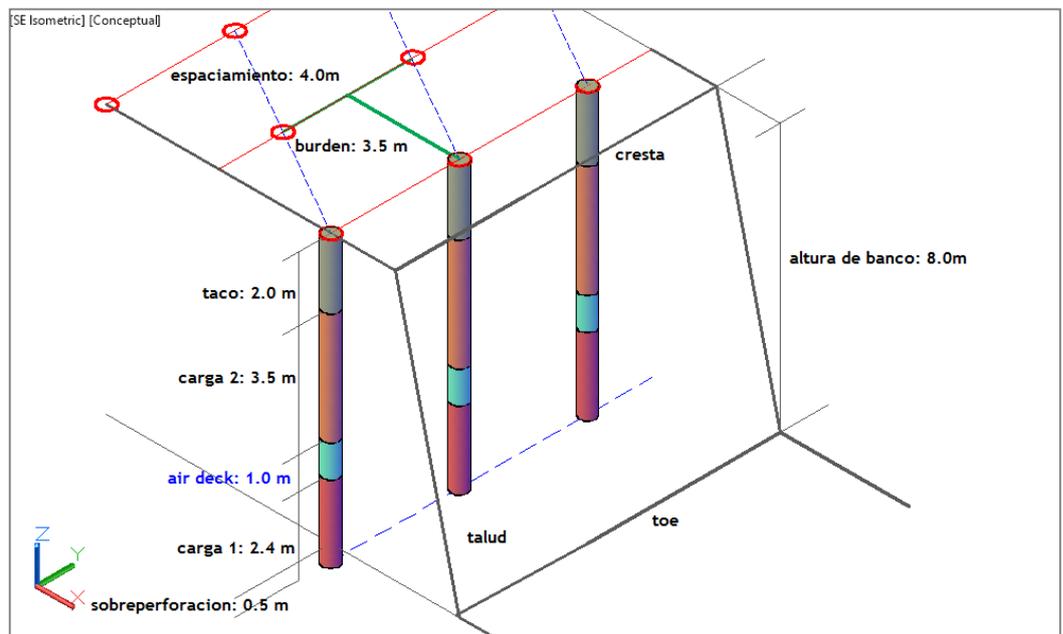


Figura N° 24: Parámetros de diseño de la cámara de aire.

En la Tabla N° 5, podemos observar un resumen de los principales parámetros de la voladura, adicionalmente se incluye en dicha tabla una comparación entre una voladura con Taponex o cámara de aire y una voladura tradicional.

Para una mejor comparación, la Tabla presenta cuatro categorías:

- Datos generales.
- Propiedades de la roca.
- Propiedades del explosivo.
- Parámetros de diseño

Tabla N° 5: Parámetros de la voladura.

	Descripción	Abreviatura	Unidad	Disparo en taladro de producción con TAPONEX				
				V1	V2	V3	V4	V5
Datos Generales	Proyecto			V1	V2	V3	V4	V5
	Fecha			26/06/2016	03/07/2016	10/07/2016	17/07/2016	24/07/2016
	N° de taladros	NT	uni.	247	446	157	69	204
	Área	A	m <sup>2</sup>	3,458.00	6,244.00	2,198.00	966	2,856.00
	Volumen	V	m <sup>3</sup>	31,019.26	60,955.74	20,516.39	9,939.34	24,236.89
	Tonelaje	T	Ton	75,687.00	148,732.00	50,060.00	24,252.00	59,138.00
Propiedades de la roca	Densidad de la roca	SG	gr/cm <sup>3</sup>	2.44	2.44	2.44	2.44	2.44
	Resistencia a la compresión simple	UCS	Mpa	63.5	63.5	156	120	123
	Porcentaje RQD	RQD	%	81	63	81	81	85
	Buzamiento de estratos	Bz		17°	35°	65°	55°	275°
	Dirección de estratos	Dir.		N 151°	N 327°	N 85°	N 130°	N 50°
	Descripción del macizo rocoso	RMR II	uni.	63	57	68	49	61
Propiedades del explosivo	Velocidad de detonación	VOD	m/s	3508	3828.5	3750	3690	3747
	Densidad del explosivo	SGE	gr/cm <sup>3</sup>	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	Densidad lineal	DL	kg/m	16.82	16.82	16.82	16.82	16.82
	Cantidad total de ANFO	WA	kg.	24,553.10	37,466.00	10,824.00	6,199.00	19,979.00
	Cantidad total de booster	WB	kg.	177.8	272.25	113.4	62.1	96.3
	Factor de carga	FC	kg/m <sup>3</sup>	0.797	0.619	0.533	0.63	0.828
	Factor de potencia	FP	kg/t	0.327	0.254	0.218	0.258	0.339
Parámetros de diseño	Malla	M		triangular	triangular	triangular	triangular	triangular
	Diámetro de taladro	D	mm	156	156	156	156	156
	Burden	B	m.	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	Espaciamiento	S	m.	4	4	4	4	4
	Relación S/B	S/B	m.	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
	Altura de banco	H	m.	8	8	8	8	8
	Sobre perforación	J	m.	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	Altura de carga N° 1	C1	m.	2	2	2	2	2
	Altura de cámara de aire (Taponex)	AD	m.	1	1	1	1	1
	Altura de carga N° 2	C2	m.	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	Taco	T	m.	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia

## **2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad**

Para poder recolectar los datos provenientes de la observación de las variables de estudio, durante su aplicación, se considerarán las siguientes técnicas e instrumentos:

### **2.4.2. Técnicas**

Para la recolección de datos, se utilizarán las técnicas de observación y análisis documental, realizada a través de información bibliográfica. Esta última técnica nos servirá para recaudar información: del mapeo geo mecánico del macizo rocoso del banco en estudio, parámetros de perforación de los bancos, característica de la ubicación de la columna explosiva con su respectivo taco y cámara de aire en el fondo del taladro; nivel de daño que se produjo del macizo. Luego se realizará una recopilación de datos obtenidos en la aplicación y no aplicación de las cámaras de aire. Los datos que se recolectarán mediante las técnicas indicadas anteriormente sistematizados a través de herramientas informáticas como son las hojas de Excel y Word.

Otra técnica usada en la investigación se basará en la medición de la vibración (proporcionada por el sismógrafo) de voladura a tajo abierto cuando se usan cámaras de aire y por el método convencional.

Los equipos para la medición de las vibraciones (el equipo Instantel) fueron instalados en la zona de influencia de la voladura. En las Figuras N° 25 y 26, podemos ver unas fotos de la instalación del equipo de medición.



Figura N° 25: Equipo de medición de vibraciones Minimate pro6-vibración instantel monitor



Figura N° 26: Instalación del equipo de medición de vibraciones

### 2.4.3. Instrumentos

Los instrumentos a utilizar son la ficha de experimentación para anotar las mediciones de la fragmentación y las vibraciones.

### 2.4.4. Validación y confiabilidad del instrumento

- **La validez de los instrumentos de recolección de datos**

Se realizará con el apoyo del Ing. Shonel Miguel Cáceres Pérez, Ing. Miguel Ulises Aquino Jave y Mg. Sc Aracelli Maribel Poémape Grados.

## **2.5. Métodos de análisis de datos**

Se utilizó diferentes programas o software mineros, para procesar y/o analizar los datos:

- Hojas de cálculo Excel
- Bases de datos del área de voladura.
- Graficadores: Autocad y Excel.
- Sismógrafos Minimate Plus (equipo para medir la vibración)
- WipFrag (Software Medición de Fragmentación voladuras)
- JK SimBlast (Software para la simulación, análisis, gestión y evaluación de voladuras).

### **Procedimiento experimental.**

- Se realizó el mapeo geo mecánico del macizo rocoso del banco a estudiar.
- Se realizó la perforación de los bancos, teniendo en cuenta los respectivos parámetros.
- Se colocó las cámaras de aire al centro del taladro de producción, luego la columna explosiva con su respectivo taco.
- Se instaló sismógrafos y equipos adecuados para medir las vibraciones.
- Se midió la fragmentación con el software WipFraq, con y sin cámara de aire.
- Se midió la vibración con los sismógrafos, con y sin cámara de aire.

## **2.6. Aspectos éticos**

En la presente investigación se tendrá en cuenta los siguientes aspectos éticos:

- El ser autor neto de la investigación, aplicando el conocimiento adquirido durante el periodo de estudio.
- Utilizar la información referencial como lo que es referencias evitando el plagio de otros proyectos.
- El uso de los datos será con fines exclusivamente universitarios para sustentación de tesis.
- La presentación de datos verídicos como resultado de la investigación.

### III. RESULTADOS

Tabla N° 6: Diseño de carga para taladros de producción

PRODUCCIÓN	
Tipo de Roca	ARENISCA LIMO
Dureza	
Explosivo	QUANTEX
TAJO	CHALARINA
Iniciación	Pirotecnico
Malla	TRIANGULAR
Burden (m)	3.39
Espaciamiento (m)	3.90
Altura de Banco (m)	6.00
Sobreperforación (m)	0.50
Prof. de Taladro (m)	6.50
Diametro de Tal. (pulg)	5 3/4
Dens. Emulsión (g/cm <sup>3</sup> )	1.32
Dens. Emulsión (g/cm <sup>3</sup> )	1.05
Densidad Lineal teórica antes de gasificar (Kg/m)	22
Densidad Lineal teórica gasificada (Kg/m)	18
Cant. de Explosivo real (kg)	54
Taco Inicial (m)	4.00
Taco Final (m)	3.60
Esponjamiento (m)	0.40
Long. de Carga Inicial (m)	2.50
Long. de Carga Final (m)	2.90
Dens. de la Roca (ton/m <sup>3</sup> )	2.30

Fuente: EXSA

**Objetivo específico 1: Efecto de la cámara de aire sobre la fragmentación del material.**

Tabla N° 7: Resultados de la fragmentación, disparo en taladro de producción normal vs taladro de producción con TAPONEX

TAMAÑO	DISPARO EN TALADRO DE PRODUCCION NORMAL	DISPARO EN TALADRO DE PRODUCCION CON TAPONEX
Tamaño mínimo medido (pulg)	2.50	2.10
Tamaño P20 (pulg)	2.86	2.17
Tamaño P50 (pulg)	6.53	4.90
Tamaño P80 (pulg)	11.33	8.97
Tamaño máximo medido (pulg)	25.13	24.86

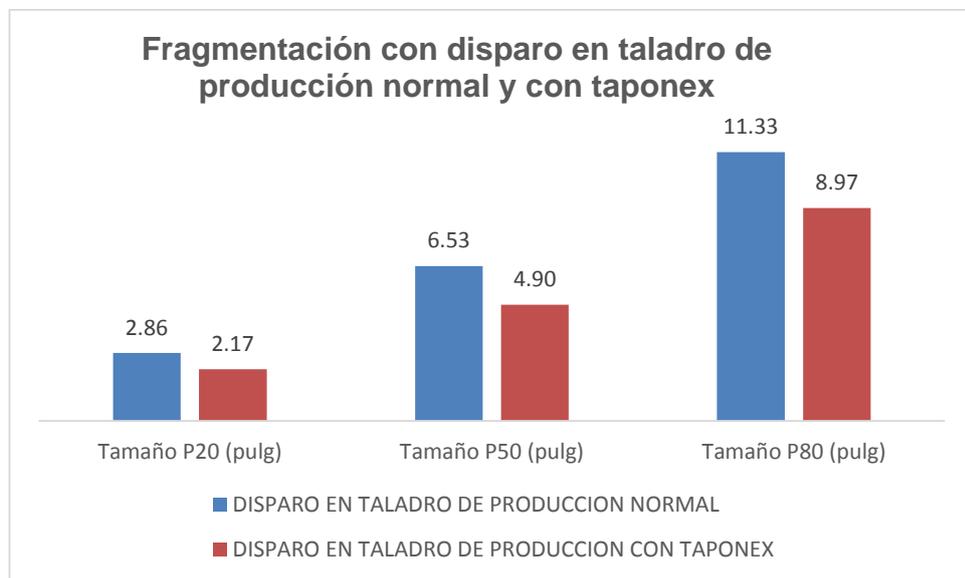


Figura N° 27: Fragmentación con disparo en taladro de producción normal y con TAPONEX.

**Resultados en Minitab V17. Statistical Software**

Two-sample T for DISPARO TALADRO DE PROD TAPONEX vs DISPARO EN TALADRO DE PROD NOR

	N	Mean	StDev	SE Mean
DISPARO TALADRO DE PROD	3	5.35	2.85	0.55
DISPARO EN TALADRO DE PR	3	6.91	3.53	0.68

Difference =  $\mu$  (DISPARO TALADRO DE PROD TAPONEX) -  $\mu$  (DISPARO EN TALADRO DE PROD NOR)

Estimate for difference: -1.560

95% upper bound for difference: -0.097

T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -1.79 P-Value = 0.040 DF = 4

Both use Pooled StDev = 3.2091

**Objetivo específico 2: Efecto de la cámara de aire sobre las vibraciones.**

Tabla N° 8: Resultados del monitoreo de vibraciones, disparo en taladro de producción normal vs taladro de producción con TAPONEX.

PROYECTO	DISTANCIA DEL SISMOGRAFO (m)	VIBRACION EN DISPARO CON TALADRO DE PRODUCCION NORMAL (mm/s)	VIBRACIÓN EN DISPARO CON TALADRO DE PRODUCCION CON TAPONEX (mm/s)
V4	300	5.36	3.41
V5	300	9.97	4.19
V1	280	10.12	4.22
V3	195	17.7	15.9
V2	130	20.48	15.85

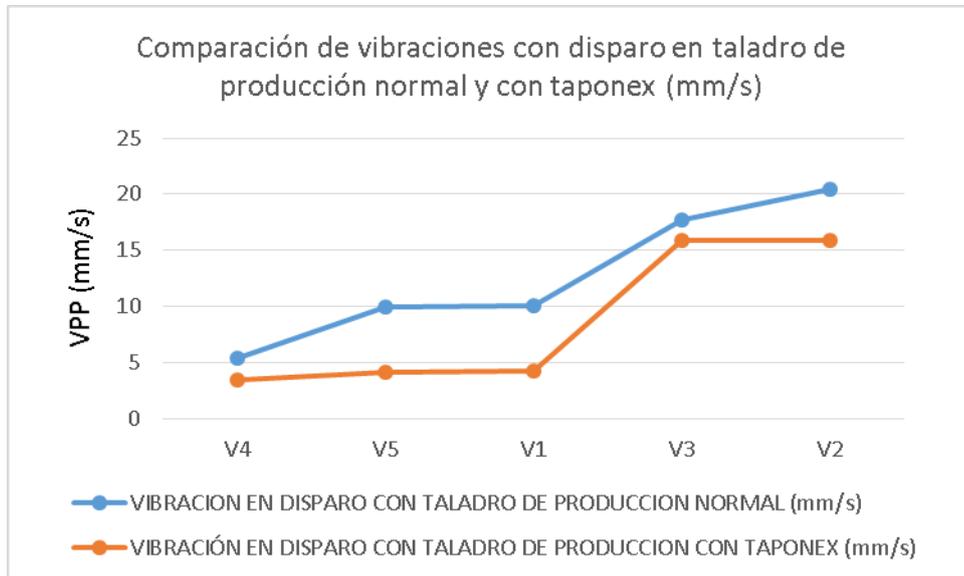


Figura N° 28: Comparación de vibraciones en taladro de producción normal y con TAPONEX.

**Resultados en Minitab V17. Statistical Software**

Two-sample T for VIBRACIÓN EN DISPARO CON TALADR TAPONEX vs VIBRACION EN DISPARO CON TALADR NORMAL

	N	Mean	StDev	SE Mean
VIBRACIÓN EN DISPARO CON	5	8.71	6.06	1.6
VIBRACION EN DISPARO CON	5	12.73	5.74	1.5

Difference =  $\mu$  (VIBRACIÓN EN DISPARO CON TALADR TAPONEX) -  $\mu$  (VIBRACION EN DISPARO CON TALADR NORMAL)  
 Estimate for difference: -4.01  
 95% upper bound for difference: -0.35  
 T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -1.86 P-Value = 0.037 DF = 8  
 Both use Pooled StDev = 5.8998

**Objetivo específico 3: Determinar los porcentajes de reducción de la Fragmentación del material y de la Vibración usando cámaras de aire (Taponex).**

Tabla N° 9: Porcentaje de reducción de fragmentación con TAPONEX

TAMAÑO	% de REDUCCIÓN DE FRAGMENTACIÓN CON TAPONEX	
Tamaño mínimo medido (pulg)	16.00	<b>23.31</b>
Tamaño P20 (pulg)	24.13	
Tamaño P50 (pulg)	24.96	
Tamaño P80 (pulg)	20.83	
Tamaño máximo medido (pulg)	30.65	

Tabla N° 10: Porcentaje de reducción de vibración con TAPONEX

PROYECTO	% de REDUCCIÓN DE VIBRACIÓN CON TAPONEX	
V4	36.38	<b>37.09</b>
V5	57.97	
V1	58.30	
V3	10.17	
V2	22.61	

## IV. DISCUSIÓN

### **Objetivo específico 1:**

La diferencia de mayor importancia en la distribución del tamaño de la fragmentación fué encontrada en los tamaños (mallas) P20, P50 y P80. En todos los casos, los resultados del disparo con el Taponex significaron una reducción en el tamaño de la fragmentación de aproximadamente 24.13 % para la malla P20, 24.96 % para la malla P50 y 20.83 % para la malla P80. Así la distribución del tamaño de la fragmentación fué reducida substancialmente en el disparo con Taponex (Ver Tabla N° 7 y Figura N° 27). Estadísticamente se verifica que el valor del P-Value = 0.040

### **Objetivo específico 2:**

Para distancias entre 130 y 195 metros, los valores de vibración en disparo con taladro de producción normal están entre 17.7 y 20.48 mm/s. Los valores de vibración en disparo con taladro de producción y Taponex están entre 15.85 y 15.90 mm/s.

Para distancias entre 280 y 300 metros, los valores de vibración en disparo con taladro de producción normal están entre 5.36 y 10.12 mm/s. Los valores de vibración en disparo con taladro de producción y Taponex están entre 3.41 y 4.22 mm/s. (Ver Tabla N° 8 y Figura N° 28).

Estadísticamente se verifica que el valor del P-Value = 0.037

### **Objetivo específico 3:**

En la Tabla N° 7 podemos apreciar que el uso de las cámaras de aire tiene un efecto positivo en la fragmentación del material en un menor p80, tal como se puede ver en el **gráfico** el p80 varía de 11.33 a 8.97 pulgadas con un porcentaje de reducción del 20.83 %.

En la Tabla N° 10 podemos apreciar que el uso de las cámaras de aire disminuye desde un 10.17 % hasta un 58.30 % las vibraciones, otro factor importante es que se destaca son las percepciones que significan esta reducción de vibraciones sobre las comunidades aledañas.

## V. CONCLUSIONES

En referencia al objetivo específico 1, el disparo con Taponex obtuvo entre 20.83 a 24.96 % de mejoras en la fragmentación del material para las mallas entre P20 a P80; por lo tanto se concluye que existe un efecto del uso de la cámara de aire sobre la fragmentación del material.

Se verifica que el valor del P-Value = 0.040 es menor a  $\alpha = 0.05$ , se rechaza la  $H_0$  y se acepta  $H_1$ .

Por lo tanto se concluye que con un  $\alpha = 0.05$ , la fragmentación promedio con disparos en taladro de producción con Taponex es menor a la fragmentación promedio con disparos en taladro de producción normal (pulgadas).

En referencia al objetivo específico 2, el disparo con el uso de cámaras de aire en la columna explosiva reduce las vibraciones hasta un 58.30 % frente a la voladura convencional que no utiliza cámaras de aire; por lo tanto se concluye que existe un efecto del uso de la cámara de aire en la reducción de las vibraciones. Esta importante reducción de las vibraciones es fundamental porque evita la percepción de las comunidades aledañas sobre el daño de sus viviendas.

Se verifica que el valor del P-Value = 0.037 es menor a  $\alpha = 0.05$ , se rechaza la  $H_0$  y se acepta  $H_1$ .

Por lo tanto se concluye que con un  $\alpha = 0.05$ , las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción con Taponex es menor a las Vibraciones promedio con disparos en taladro de producción normal (mm/s).

En referencia al objetivo específico 3,

Se determina que con el uso de cámaras de aire (Taponex) se reduce la fragmentación en un promedio de 23.31%. y la vibración en un promedio de 37.09%.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Estandarizar el uso de las cámaras de aire en las empresas mineras a tajo abierto en el Perú, para minimizar el nivel de vibraciones y cumplir la normativa peruana de vibraciones que está basada en la Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones mineras de 25 mm/s de VPP (velocidad pico partícula) máximo. Además que permite obtener buena fragmentación reduciendo el P80 y minimizar los costos de operaciones mina, lográndose optimizar la rentabilidad de la empresa minera.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. **Hernández** Roberto, **Fernández** Carlos, **Baptista** Pilar, *Metodología de la Investigación*, 4ta Edición, México D.F, 2006, 1998,1991, Pág. 108.
2. **Montiel** Néstor. *Optimización del diseño de perforación y voladura aplicando cámara de aire con el explosivo Fortis extra, Mina Paso Diablo, Carbones del Zulia S.A, Estado Zulia*. (Tesis). Universidad Central de Venezuela. Junio, Caracas, Venezuela 2014.
3. **Chiappetta** Frank. *Optimización de Voladura con Cámaras de Aire* (Informe técnico). New Orleans: ISEE 2004.
4. **Pérez** Andrea. *Análisis Comparativo de la Reducción de Vibraciones en la Cantera de Cerro Blanco, durante Voladuras, utilizando carga tradicional de explosivo y el uso de Taponex* (Tesis). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador 2010:
5. **Cebrián** Benjamín. *Control de estabilidad de taludes mediante voladuras de contorno – cámara de aire*. (Artículo científico).2007.
6. **Araya** E. *Aplicación de cámaras de aire en minas los colorados* (Informe técnico). Atacama 2007: Orica.
7. **Jimeno** López. *Manuales gratis*. Recuperado el 23 de Mayo de 2015, de *Manual de Perforación y Voladura de Rocas (06 de Diciembre de 2012)*: <http://www.tutomundi.org/2012/12/manual-de-perforacion-y-voladura-de-rocas-lopez-jimeno.html>
8. **Salas** J. *Aplicación de las cámaras de aire en la voladura de mina Pierina*. Lima 2011.
9. **Cruces** J. *Optimización de la fragmentación de roca en mina y su influencia en los circuitos de trituración y molinos* (Investigación). Perú 2009: PERUMIN 30 CONVENCION MINERA.
10. **Zhantao**, L., **Ken-ichi** I. *An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength*. China 2012: Soils and Foundations.
11. **Exsa** SA. *Manual práctico de voladuras*. Lima 2009: EXSA SA.
12. **George D.** , **Mallery P.** *SPSS / PC + paso a paso: Una sencilla guía y referencia*. Belmont, EE.UU (1995): Wadsworth. Compañía de publicidad.

13. "Evaluación Técnico-Económica-Ecológica de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas en Cuajone – southern peru", disponible en [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1273/1/medina\\_cr.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1273/1/medina_cr.pdf).
14. Perca Catachura Luis Fortunato (Abril del 2014)  
<http://mineriavoladura.blogspot.pe/2014/04/informacion-actual.html#comment-form>

# **ANEXOS**

# Anexo 1: Instrumento para la recolección de datos

## Ficha de experimentación de mediciones de fragmentación y vibraciones.



### Event Report

Date/Time Tran at 18:30:54 March 11, 2016  
 Trigger Source Geo: 1.01 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 6.0 sec at 1024 sps  
 Job Number: 1

Serial Number BE14224 V 10.72-8.17 MiniMate Plus8  
 Battery Level 6.1 Volts  
 Unit Calibration December 9, 2015 by Geoinstruments  
 File Name \_\_TEMP.EVT

**Notes**

Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Post Event Notes**

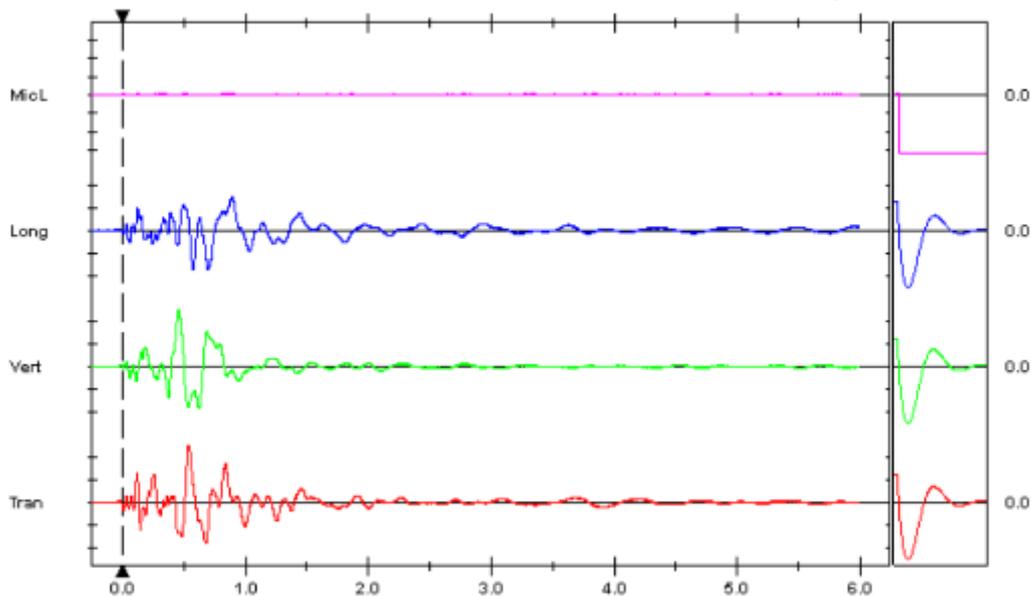
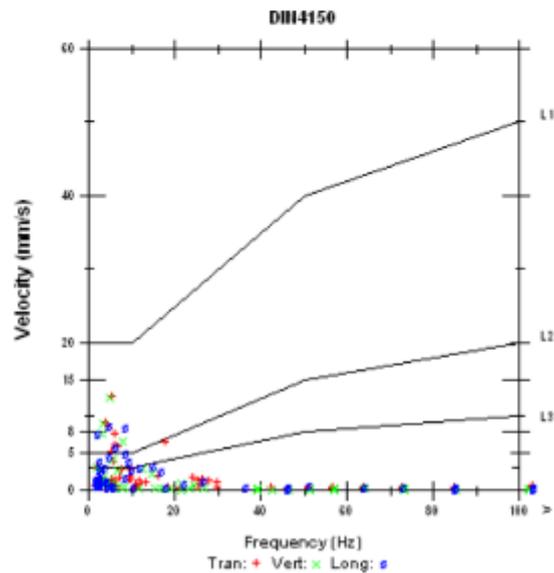
COMPAÑIAMINERA CMD - PROYECTO EL TORO  
 FAMESA EXPLOSIVOS SAC  
 BANCO 3380  
 Distancia al punto de monitoreo 195.9m

**Extended Notes**

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.006 sec  
 ZC Freq >100 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	12.8	12.7	8.76	mm/s
ZC Freq	5.8	4.8	5.0	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.539	0.458	0.094	sec
Peak Acceleration	0.0928	0.0663	0.0663	g
Peak Displacement	0.301	0.512	0.401	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.5	7.7	7.4	Hz
Overswing Ratio	3.9	3.6	4.0	

Peak Vector Sum 15.9 mm/s at 0.539 sec



Time Scale: 0.50 sec/div Amplitude Scale: Geo: 5.00 mm/s/div Mic: 10.00 pa.(L)/div Sensor Check  
 Trigger = 0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0

Time Scale: 0.50 sec/div Amplitude Scale: Geo: 5.00 mm/s/div Mic: 10.00 pa.(L)/div Sensor Check



## Event Report

Date/Time Vert at 18:32:27 March 14, 2016  
 Trigger Source Geo: 0.510 mm/s  
 Range Geo: 254 mm/s  
 Record Time 12.75 sec (Auto=6Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 2

Serial Number BE14224 V 10.72-8.17 MiniMate Plus/8  
 Battery Level 5.9 Volts  
 Unit Calibration December 9, 2015 by Geoinstruments  
 File Name \_\_TEMP.EVT

**Notes**

Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Post Event Notes**

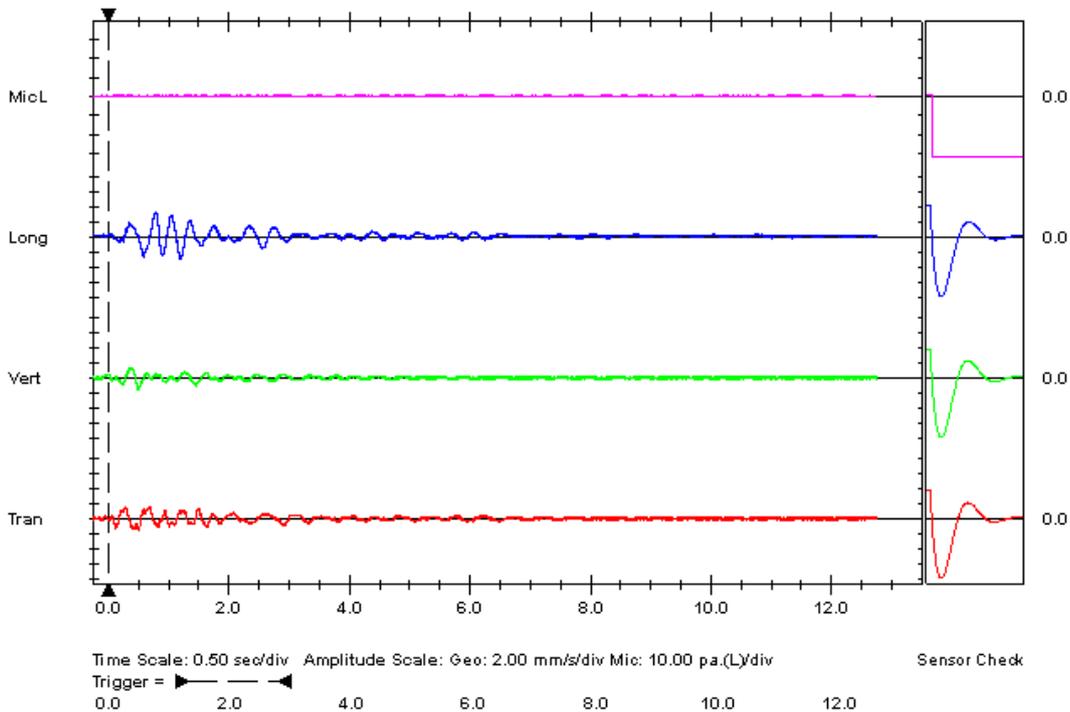
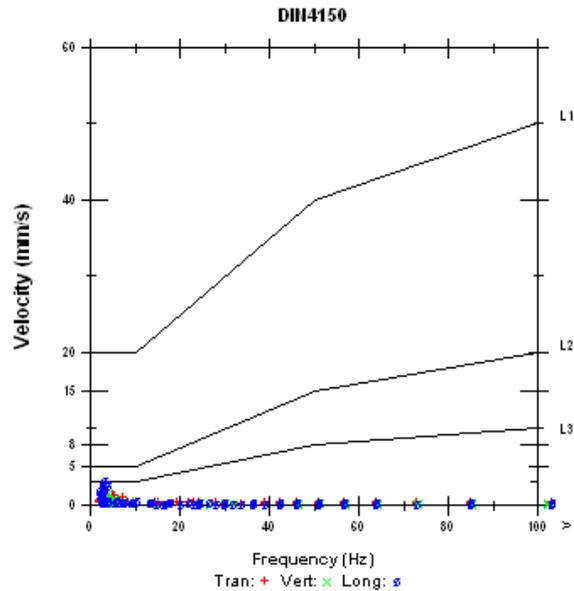
COMPAÑIA MINERA CDM - PROYECTO EL TORO  
 FAMESA EXPLOSIVOS SAC  
 BANCO 3380 - PROYECTO 519

**Extended Notes**

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 0.750 pa.(L) at 5.365 sec  
 ZC Freq >100 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.52	1.65	3.30	mm/s
ZC Freq	3.2	4.0	3.3	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.281	0.494	0.793	sec
Peak Acceleration	0.0398	0.0398	0.0398	g
Peak Displacement	0.0971	0.0695	0.156	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.6	7.7	7.4	Hz
Overswing Ratio	4.0	3.7	4.1	

Peak Vector Sum 3.41 mm/s at 0.793 sec



## Anexo 2: Validación de instrumentos

### ANEXO 04



### FICHA DE VALIDACIÓN

#### I. DATOS INFORMATIVOS

Apellidos y nombres del especialista o experto	Grado académico, cargo, institución donde labora.	Autor(s) de la investigación
Cáceres Pérez Shonel Miguel	Estudios de Maestría en Ingeniería Geológica-Mención Geometalurgia Docente de Working Adult en Universidad Privada del Norte.	Jorge Luis Cumpa Flores
<b>Título de la Investigación:</b> "EFECTO DE LAS CÁMARAS DE AIRE EN TALADROS DE PRODUCCIÓN PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DEL MINERAL Y REDUCIR EL NIVEL DE VIBRACIONES POR VOLADURA EN MINERÍA A TAJO ABIERTO EN EL NORTE DEL PERÚ, 2016"		

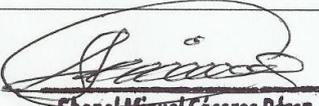
#### II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

INDICADORES	CRITERIOS	DEFICIENTE 0-20%	REGULAR 21-40%	BUENA 41-60	MUY BUENA 61-80%	EXCELENTE 81-100%
1. CLARIDAD	Formulado con lenguaje apropiado				X	
2. OBJETIVIDAD	Expresado en conductas observables				X	
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología					X
4. ORGANIZACIÓN	Existe una secuencia lógica				X	
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en cantidad y claridad			X		
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para valorar aspectos de la investigación				X	
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teórico científicos			X		
8. COHERENCIA	Entre ítems, indicadores y dimensiones			X		
9. METODOLOGÍA	Corresponde al propósito de la propuesta			X		
10. OPORTUNIDAD	Propósito para su aplicación en el momento adecuado				X	

### III. OPINIÓN DE APLICACIÓN

En general el tema de la presente tesis es bastante aplicativo en las operaciones mineras. Gracias a su aplicación las empresas o unidades mineras podrían lograr importantes ahorros en material y tiempo en las labores de perforación y voladura para la producción. En el aspecto académico considero que servirá de base para futuros estudios relacionados con el tema.

### IV. PROMEDIO DE VALIDACIÓN

Cajamarca, diciembre del 2016	26706635	 <b>Shonel Miguel Cáceres Pérez</b> INGENIERO GEOLOGO Registro del colegio de Ingenieros del Peru N° 146891
<b>Lugar y fecha</b>	<b>DNI</b>	<b>Firma del Experto</b>

## FICHA DE VALIDACIÓN

### I. DATOS INFORMATIVOS

Apellidos y nombres del especialista o experto	Grado académico, cargo, institución donde labora	Autor(s) de la investigación
ARQUINO JAVE MIGUEL ULISES	INGENIERO GEÓLOGO INGENIERO SSO - GOLD FIELD.CO	JORGE LUIS CUMPA FLORES

Título de la investigación:  
 "EFECTO DE LAS CAMARAS DE AIRE EN TALADROS DE PRODUCCIÓN PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DEL MINERAL Y REDUCIR EL NIVEL DE VIBRACIONES POR VOLADURA EN MINERÍA A TAJO ABIERTO EN EL NORTE DEL PERÚ, 2016"

### II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

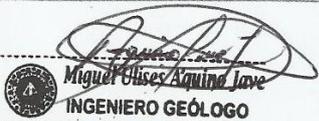
INDICADORES	CRITERIOS	DEFICIENTE 0-20%	REGULAR 21-40%	BUENA 41-60%	MUY BUENA 61-80%	EXCELENTE 81-100%
1. CLARIDAD	Formulado con lenguaje apropiado				✓	
2. OBJETIVIDAD	Expresado en conductas observables				✓	
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología					✓
4. ORGANIZACIÓN	Existe una secuencia lógica				✓	
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en cantidad y claridad				✓	
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para valorar aspectos de la investigación				✓	
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teórico-científicos					✓
8. COHERENCIA	Entre ítems, indicadores y dimensiones				✓	
9. METODOLOGÍA	Corresponde al propósito de la propuesta					✓
10. OPORTUNIDAD	Propicio para su aplicación en el momento adecuado				✓	

III. OPINIÓN DE APLICACIÓN

\* EFECTO DE LAS CÁMARAS DE AIRE EN TALADROS DE PRODUCCIÓN, PARA MEJORAR LA FRAGMENTACIÓN DEL MINERAL Y REDUCIR EL NIVEL DE VIBRACIONES POR VOLADURA EN MINA A TAJO ABIERTO. (PROP. ELÁSTICA O DE RESISTENCIA DE LA ROCA).

\* PROPIEDADES GEOMECÁNICAS EN CUANTO AL MACIZO ROCOSO.

IV. PROMEDIO DE VALIDACIÓN

Cajamarca, diciembre de 2016	40195803	 Miguel Ulises Aquino Jave INGENIERO GEÓLOGO Registro del colegio de Ingenieros del Perú N° 119206
Lugar y fecha	DNI	Firma del experto

### FICHA DE VALIDACIÓN

#### I. DATOS INFORMATIVOS

Apellidos y nombres del especialista o experto	Grado académico, cargo, institución donde labora	Autor(s) de la investigación
Poemaje Grados Araceli Hankel.	Magister en Ciencias de Estadística Aplicada Docente Univ. Nari de Cajamarca	Cumpsa Flores Jorge Luis
Título de la investigación: Efecto de las Cámaras de Aire en Taladros de Producción para mejorar la fragmentación del Mineral y Reducir el Nivel de Vibraciones por Voladura en Minería a Tajo Abierto en el Norte del Perú 2010		

#### II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

INDICADORES	CRITERIOS	DEFICIENTE 0-20%	REGULAR 21-40%	BUENA 41-60%	MUY BUENA 61-80%	EXCELENTE 81-100%
1. CLARIDAD	Formulado con lenguaje apropiado				X	
2. OBJETIVIDAD	Expresado en conductas observables				X	
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología				X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una secuencia lógica					X
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en cantidad y claridad				X	
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para valorar aspectos de la investigación					X
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teórico-científicos				X	
8. COHERENCIA	Entre items, indicadores y dimensiones			X		
9. METODOLOGÍA	Corresponde al propósito de la propuesta				X	
10. OPORTUNIDAD	Propicio para su aplicación en el momento adecuado					X

III. OPINIÓN DE APLICACIÓN

.....  
.....  
.....  
.....

IV. PROMEDIO DE VALIDACIÓN 86%

Cajamarca, diciembre de 2016	19259155	 ARACELLI MARIBEL POEMAPE GRADOS COESPE N° 43 COLEGIO DE ESTADÍSTICOS DEL PERÚ
Lugar y fecha	DNI	Firma del experto

### Anexo 3: Matriz de Consistencia

Planteamiento del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Muestra	Diseño	Instrumento	Estadística
<p><b>Pregunta general:</b></p> <p>¿Cuál es el efecto de las cámaras de aire en taladros de producción en minería a tajo abierto en el Norte del Perú, 2016?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Determinar el efecto de las cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, para mejorar la fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones en minería a tajo abierto.</p> <p><b>Objetivo Especifico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluar el efecto de cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, para mejorar la fragmentación del material en minería a tajo abierto.</li> <li>- Evaluar el efecto de cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, para reducir el nivel de vibraciones en minería a tajo abierto.</li> <li>- Determinar los porcentajes de reducción de la fragmentación del material y de la vibración usando cámaras de aire (taponex).</li> </ul>	<p>Los efectos de las cámaras de aire en taladros de producción mejoran la fragmentación del material y reducen el nivel de vibraciones por voladura en minería a tajo abierto en el norte del Perú, 2016.</p>	<p><b>Variable Independiente</b> Ubicación de la cámara de aire (Taponex) en el taladro de producción.</p> <p><b>Variable Dependiente</b> Fragmentación del material y reducción del nivel de vibraciones por voladura.</p>	<p><b>Población:</b> Taladros de producción con aplicación de cámaras de aire, en minería a tajo abierto en el Norte del Perú.</p> <p><b>Muestra</b> Taladros de producción con aplicación de cámaras de aire, en minería a tajo abierto en el departamento de Cajamarca.</p>	<p><b>Método:</b> Experimental</p> <p><b>Nivel de Investigación:</b> Explicativa</p> <p><b>Diseño:</b> Cuasi experimental</p>	<p>Los instrumentos a utilizar son la ficha de experimentación para anotar las mediciones de la fragmentación y las vibraciones.</p>	<p>Descriptiva</p>