



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



**“INNOVACIÓN DE VOLADURA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA  
CON EL USO DE DETONADORES DUALES EN LA COMPAÑÍA  
MINERA SANTA LUISA – MINA HUANZALÁ”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. RAMIRO JESUS GONZALES NINA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO – PERÚ**

**2020**



## **DEDICATORIA**

A Dios por darnos la vida, salud y por permitirme llegar a este momento en mi carrera profesional. A mi madre Lelia, por brindarme su apoyo incondicional y el amor infinito. A mis hermanos Max, Elisban y Zenón, por todo los alientos y el apoyo incondicional.

A mi esposa Zulema, compañera de vida por todo el amor, por todo el apoyo y en todo momento, a mi amigo Alex, por compartir las experiencias y apoyo en el proyecto.



## AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la vida para poder hacer posible este proyecto.

Mi eterno agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, Facultad de Ingeniería de Minas, por haberme brindando toda la enseñanza y los conocimientos para el desenvolvimiento a lo largo de mi vida profesional.

Agradecimiento a la empresa Enaex Perú y a todo el staff de ingenieros, por darme la oportunidad de adquirir cada experiencia y plasmarlo en el presente trabajo de investigación. Agradecimiento a toda mi familia, a mi madre Lelia Nina, por todo el esfuerzo de lucha para conmigo, a mis hermanos por el apoyo incondicional y Zulema López por todo el apoyo, gracias a todos ustedes por hacer posible este objetivo.



## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	
AGRADECIMIENTO .....	
ÍNDICE DE FIGURAS .....	
ÍNDICE DE TABLAS .....	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	
RESUMEN .....	12
ABSTRACT.....	13

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema.....	15
1.2. Formulación del problema .....	16
1.2.1. Problema general.....	16
1.2.2. Problemas específicos .....	16
1.3. Objetivos de la investigación .....	16
1.3.1. Objetivo general .....	16
1.3.2. Objetivos específicos .....	16
1.4. Justificación e importancia del proyecto.....	16

### CAPITULO II

#### REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de la investigación .....	18
2.1.1 Antecedentes internacionales:.....	18
2.1.2 Antecedentes nacionales: .....	19
2.2 Bases teóricas .....	19
2.2.1 Sistemas de iniciación .....	19



2.2.2	Sistemas no eléctricos .....	20
2.2.3	Sistema eléctrico .....	26
2.2.4	Detonadores electrónicos .....	28
2.2.5	Teoría de la fragmentación .....	32
2.2.6	Vibraciones .....	37
2.2.7	Características de las vibraciones .....	52
2.2.8	Instrumentos para monitorear las vibraciones .....	53
2.2.9	Velocidad pico partícula .....	57
2.2.10	Monitoreo de vibraciones.....	66
2.3	Definición de términos básicos .....	72
2.4	Hipótesis.....	74
2.4.1	Hipótesis general.....	74
2.4.2	Hipótesis específica.....	74

### **CAPITULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Ubicación de la compañía minera santa luisa – mina huanzalá.....	75
3.2	Tipo de investigación .....	77
3.3	Diseño de investigación .....	77
3.4	Nivel de investigación.....	77
3.5	Población.....	77
3.6	Muestra.....	78
3.7	Identificación y clasificación de variables. ....	78
3.8	Operacionalización de variables .....	78
3.9	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	79
3.10	Procesamiento de datos .....	80



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Descripción de las voladuras monitoreadas .....	81
4.1.1	Diseño de perforación de taladros.....	81
4.1.2	Diseño de amarre de voladura.....	82
4.1.3	Voladuras con el nuevo sistema de iniciación .....	86
4.1.4	Tiempo de carguío de un frente en breasting.....	87
4.2	Análisis de fragmentación.....	88
4.3	Monitoreo de vibraciones.....	90
4.4	Discusiones .....	92
CONCLUSIONES:.....		93
RECOMENDACIONES:.....		94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		95
ANEXOS .....		97

**Área** : Ingeniería de Minas

**Tema** : Innovación de voladura en minería subterránea con el uso de detonadores duales en la Compañía Minera Santa Luisa – Mina Huanzalá

**Fecha de sustentación:** 07 de enero del 2020



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Características del tubo de choque.....	20
Figura N° 2: Cordón detonante.....	24
Figura N° 3: Distribución de retardos.....	26
Figura N° 4: Detonadores electrónicos.....	29
Figura N° 5: Instalación de un sistema electrónico.....	30
Figura N° 6: Modelo de flexión de la viga antes de la detonación.....	33
Figura N° 7: Teoría combinada.....	34
Figura N° 8: Tipos de fisuras en las proximidades del taladro.....	35
Figura N° 9: Agrietamiento y rotura por flexiones de la onda de choque.....	35
Figura N° 10: Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión.....	38
Figura N° 11: El signo de las amplitudes.....	40
Figura N° 12: Onda completa de vibración.....	41
Figura N° 13: Estimación de la velocidad de propagación.....	43
Figura N° 14: Movimiento de las partículas dentro de la onda P.....	44
Figura N° 15: Movimiento de las partículas dentro de la onda S.....	45
Figura N° 16: Movimiento de las partículas dentro de diferentes tipos de onda.....	46
Figura N° 17: Registro de la llegada de las ondas P, S y R.....	47
Figura N° 18: El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar.....	48
Figura N° 19: Momento de arribo de la onda.....	49
Figura N° 20: onda de un pozo a 20 metros.....	52
Figura N° 21: Forma geométrica del modelo de Holmberg y Persson, near-field.....	65
Figura N° 22: Comparación de modelos Devine y Holmberg & Persson.....	66
Figura N° 23: Registro de tres componentes de una forma de onda.....	67
Figura N° 24: Posiciones relativas de los puntos de registro (Wiss y Linehan).....	69
Figura N° 25: Direcciones preferentes de cooperación de ondas en una voladura múltiple.....	70
Figura N° 26: Influencia de intervalo de retardo en el nivel máximo de vibración.....	71
Figura N° 27: Diseño de perforación de taladros – tajeo en Breasting.....	82
Figura N° 28: Sistemas de conexión del detonador Muki.....	85
Figura N° 29: Sistemas de conexión del detonador Muki en un frente en brasting.....	86
Figura N° 30: Análisis de fragmentación en – R200/V4.....	89



Figura N° 31: Análisis de fragmentación en – C600/V2.....	89
Figura N° 32: Analisis de vibracion con el uso del Muki.....	91





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Número de detonadores.....	31
Tabla N° 2: Valores de las constantes K y $\alpha$ para distintos tipos de roca .....	64
Tabla N° 3: Rutas de acceso a la Compañía minera Santa Luisa – Mina Huanzalá.....	76
Tabla N° 4: Operacionalización de variables .....	78
Tabla N° 5: Especificación del diseño de perforación.....	81
Tabla N° 6: Características técnicas del emulnor 3000 .....	83
Tabla N° 7: Accesorios, explosivos y diseño de carga .....	84
Tabla N° 8: Resumen de disparos realizados con el nuevo sistema de iniciación MUKI. ...	86
Tabla N° 9 : Tiempo demora en carguío de frente en breasting .....	87
Tabla N° 10: Resultados del grado de fragmentación obtenida y comparativa.....	88
Tabla N° 11: Resultados de las VPP de cada una de las voladuras monitoreadas .....	90



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- V<sub>p</sub> : Velocidad de Propagación de la Onda compresional P.
- V<sub>s</sub> : Velocidad de Propagación de la Onda transversal S.
- V<sub>R</sub> : Velocidad de Propagación de la Onda Rayleigh R.
- V<sub>L</sub> : de Propagación de la Onda Love L.
- f : Frecuencia, cuantos ciclos de compresión y tensión por segundo, Hertzios.
- A : Amplitud, máximo valor o esfuerzo a la cual el medio es expuesto.
- t : Tiempo, duración total que el medio está expuesto a la vibración.
- $\lambda$  : Longitud de onda, distancia que viaja en un ciclo completo de compresión y tensión.
- VPP : Velocidad Pico Partícula.
- SD : Distancia Escalada.
- d : Distancia de monitoreo.
- W : Carga operante.
- K : Factor de Amplitud.
- $\alpha$  : Factor de Atenuación.
- L : Densidad de carga lineal.
- Ro : Distancia cercana a la detonación del taladro.
- VPP<sub>c</sub> : Velocidad Pico Partícula crítica.
- ISEE : Sociedad Internacional de Ingenieros Explosivistas.
- MUKI : Detonador no eléctrico de doble retardo.
- CINTEX : Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos, Enaex.



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado: “INNOVACIÓN DE VOLADURA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA CON EL USO DE DETONADORES DUALES EN LA COMPAÑÍA MINERA SANTA LUISA – MINA HUANZALÁ”, desarrollado en la unidad minera Huanzalá, ubicado en el distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash, donde se tuvo deficiente grado de fragmentación de rocas y el nivel de vibraciones que ocasionaban trabajos secundarios en voladura, limpieza de mineral y roca inestable, donde el objetivo principal fue optimizar el proceso de voladura con la introducción de un nuevo sistema de iniciación en la compañía minera, así mismo como objetivos secundarios mejorar la fragmentación de la roca y también minimizar el nivel de vibraciones producto de la voladura. En la compañía minera Santa luisa – mina Huanzalá comprometidos con el desarrollo tecnológico y mejora continua se decidió implementar el uso de detonadores duales en remplazo de accesorios convencionales, como, cordón detonante y detonador simple, una alternativa diferente en voladura subterránea con el afán de mejorar los indicadores de gestión en cuanto a los resultados de voladura y las operaciones en general. El método de investigación para este estudio fue de carácter descriptivo porque describe las características principales del accesorio Muki y se demostró que con una correcta configuración de tiempos de retardo se obtuvo mejoras en la fragmentación de roca y control de vibraciones. Una vez realizada las pruebas se analizó los resultados y se aplicó para las demás voladuras. Los instrumentos utilizados para registrar el nivel de vibraciones fueron sismógrafos y geófonos por otra parte para medir el grado de fragmentación de la roca se utilizó cámaras fotográficas y software que calcula el grado de fragmentación mediante imágenes. En cuanto a resultados en total se ejecutó 8 voladuras para análisis de fragmentación y 17 voladuras para el determinar el nivel de vibraciones, se demostró que en el grado de fragmentación de rocas se mejoró en promedio de 10.34pulg a 7.30pulg de diámetro, así mismo el nivel de vibraciones promedio de las voladuras evaluadas fue de 17.01 mm/s, siendo un valor aceptable conforme a las normas que regulan las vibraciones producidas por las voladuras. Finalmente se concluye que en las pruebas realizadas en sus labores no se obtuvo fragmentos de roca de gran tamaño y también los niveles de vibración fueron bajas de tal manera un macizo rocoso estable.

Palabra clave: Sistema de iniciación, detonador dual, fragmentaciones de roca, nivel de vibraciones, compañía minera Santa Luisa, Enaex Perú-Chemtrade.



## ABSTRACT

The present research work called: “INNOVATION OF VOLADURA IN UNDERGROUND MINING WITH THE USE OF DUAL DETONATORS IN THE MINING COMPANY SANTA LUISA - MINA HUANZALÁ”, developed in the mining company mining Huanzalá, located in the district of Huallanca, province In Bolognesi, Ancash department, there were problems with the poor degree of rock fragmentation and the level of vibrations that caused secondary work in blasting and cleaning of ore. Then the research work has as main objective to optimize the blasting process with the introduction of a new initiation system in the mining company, as well as secondary objectives to improve the fragmentation of the rock and also minimize the level of vibrations resulting from the blasting. In the Santa Luisa mining company - Huanzalá mine committed to technological development and continuous improvement, it was decided to implement the use of dual detonators in replacement of conventional accessories, such as, detonating cord and simple detonator, a different alternative in underground blasting in order to improve management indicators regarding blasting results and operations in general. The research method for this study was descriptive in nature because it describes the main features of the Muki accessory and it will be demonstrated that with a correct delay time configuration, improvements in rock fragmentation and vibration control were obtained. Once the tests were performed, the results were analyzed and applied for the other blasting. The instruments used to record the level of vibrations were seismographs and geophones on the other hand to measure the degree of rock fragmentation cameras were used and software that calculates the degree of fragmentation using images. In terms of results in total, 8 blasting was performed for fragmentation analysis and 17 blasting to determine the level of vibrations, it is shown that in the degree of rock fragmentation, an average of 10.34 inches to 7.30 inches in diameter was improved, as well The average vibration level of the blasting evaluated was 17.01 mm / s, being an acceptable value according to the regulations that regulate the vibrations produced by the blasting. Finally, it is concluded that in the tests carried out in their work, no large rock fragments were obtained and also the vibration levels were low in such a way a stable rock mass.

Keywords: Initiation system, dual detonator, rock fragmentation, vibration level, Santa Luisa mining company, Enaex Peru-Chemtrade.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La voladura como una de las operaciones unitarias de mayor relevancia en toda la actividad minera, tiene como propósito lograr el adecuado grado de fragmentación de acuerdo a un diseño estándares determinados según plan de minado y consigo lograr el mínimo daño al macizo rocoso remanente (hastiales y techos), frentes de trabajo seguros para el desenvolvimiento de personal y equipos, de tal modo que minimice los costos de perforación, voladura, sostenimiento, limpieza, transporte y chancado primario, con esto tener mejores rendimientos en las actividades y mejores beneficios tanto personal y como empresa.

La introducción de un nuevo sistema de iniciación de voladura (detonadores duales) será una alternativa de solución para los problemas en mención. Por lo tanto, para ejecutar voladura en labores subterráneas, en la actualidad se tiene disponible el detonador no eléctrico de doble retardo y se aplicará en las labores de producción (tajeos en breasting) en compañía minera Santa Luisa - mina Huanzalá.

La característica principal del detonador dual es que contiene dos micro retardos uno de fondo y otro de superficie, los mismos que hace que la secuencia de salida resulte pausada (taladro por taladro) de esta manera se puede controlar el nivel de carga operante y como sistema eficaz de iniciación se puede lograr una alta eficiencia en seguridad eliminando toda posibilidad de conexiones erróneas.

La tesis está estructurada en cuatro capítulos:

En el capítulo I, se presenta la introducción, la realidad problemática en la unidad minera en cuanto a la mala fragmentación, formulación del problema, los objetivos de la investigación, justificación del e importancia del proyecto.

En el capítulo II, presentamos los antecedentes de la investigación, la revisión de literatura donde se presenta la parte teórica que serán las bases para la ejecución del siguiente trabajo de investigación ejecutada en la compañía minera Santa Luisa – Mina Huanzalá, como también la definición de términos básicos y la hipótesis del trabajo.

En el capítulo III, los materiales y métodos, donde el tipo de investigación viene a ser, descriptivo y aplicativo, también anotamos la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y la operacionalización de variables.



En el capítulo IV, presentamos los resultados obtenidos de las pruebas realizadas y las discusiones, resultados del grado de fragmentación comparando con el sistema que se venía usando y el que se implementó, y también resultados en cuando al monitoreo del nivel de vibraciones usando un sismógrafo como equipo de monitoreo.

Con el uso del detonador dual se logró minimizar el nivel de vibraciones, esto se evaluó con el uso de un sismógrafo quien determino la vpp de las voladuras realizadas, también optimizar la fragmentación, esto midió mediante un análisis fotográfico haciendo uso del software wipfrag.

### **1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA**

En la compañía minera Santa Luisa mina Huanzalá, se tenía problemas de vibraciones excesivas producto del deficiente uso de accesorios y explosivos, el mismo que ocasionaba la inestabilidad del macizo rocoso circundante comprometiendo la seguridad de los trabajadores, así mismo, una mala fragmentación de rocas en la voladura que ocasionaba bajo rendimiento a los equipos de carguío y voladura secundaria de bancos. En mina Huanzalá en cuanto al diseño de voladura se viene trabajando con secciones de 4mX4m en labores de tajeo en breasting y también método de taladros largos en paralelo.

El problema surge por la presencia de bloques de dimensiones mayores que afectan seriamente en la siguiente actividad que es la limpieza de mineral, donde el operador de scoop tram, tiene un trabajo adicional que es separar en una cámara de acumulación los bloques de grandes dimensiones, el cual es su posterior deberá ser reducido haciendo el uso de una voladura secundaria y plasteo.

De igual manera en la estabilidad del macizo rocoso para tener frentes de trabajo seguros y estables, no se tenía un monitoreo y registro de vibraciones ocasionadas por las voladuras, entonces fue necesario hacer el monitoreo de vibraciones de tal manera mejorar las variables en la actividad de voladura o cambiar los diseños de voladura en la unidad minera Santa Luisa – Mina Huanzalá.



## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

¿Es posible optimizar el proceso de voladura con la aplicación de los detonadores duales en mina Huanzalá?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- A. ¿En qué medida el uso de los detonadores duales mejora la fragmentación de la roca en la mina Huanzalá?
- B. ¿En qué medida minimizamos el nivel de vibraciones con el uso de los detonadores duales en las labores de producción de mina Huanzalá?

## **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Objetivo general**

Optimizar el proceso de voladura con la introducción de los detonadores duales en la mina Huanzalá.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- A. Mejorar la fragmentación de la roca con el uso de detonadores duales en las labores de mina Huanzalá.
- B. Controlar el nivel de vibración con el uso de detonadores duales en las labores de mina Huanzalá.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO**

En la unidad minera Huanzalá como parte de la mejora continua se ha optado por implementar una nueva alternativa en el sistema de iniciación de voladura, en este caso la implementación de detonadores duales en sus labores de producción. Durante los meses de septiembre y octubre del año 2015

Con esta investigación resaltaremos la incidencia de los detonadores duales en la optimización del proceso productivo de voladura, obteniendo mejores índices en cuanto al nivel de vibraciones y fragmentación de rocas.



En estos tiempos de crecimiento tecnológico la minería ha crecido vertiginosamente en el campo de la tecnología de explosivos y otros, entonces las empresas mineras deben acatarse a estos cambios para obtener resultados favorables en su economía y de la mano con el cuidado del medio ambiente y seguridad para el personal en general.

Se tiene en cuenta los siguientes criterios:

#### **1.4.1. Conveniencia**

En este aspecto la presente investigación es conveniente para este tiempo y espacio, pues servirá para la mejora continua que toda empresa busca, pues la implementación de un nuevo sistema de iniciación servirá para disminuir los niveles de vibración y mejorar los índices de fragmentación de la roca.

#### **1.4.2. Relevancia social**

Con la implementación de este sistema de iniciación se garantizará la seguridad de las personas involucradas con el trabajo de voladura, e indirectamente corrobora el bienestar social y económico del trabajador y del empresario. Teniendo en cuenta que el trabajador es trascendental en una operación minera.





## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1 Antecedentes internacionales:

Vásquez (2013) En sus tesis de pre grado Predicción de la ley de atenuación, frecuencia dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladuras a cielo abierto. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, España. Indica que a partir de análisis de las leyes de atenuación obtenidas para las dos agrupaciones de voladuras, se establece que la detonación de barrenos semilla genera un mayor nivel de vibraciones en contraste con las voladuras sin la presencia de estos (con barrenos con cara libre) ello se refleja en el desplazamiento superior de la ley estimada ( $KN^{\circ}1-N^{\circ} 4 > KN^{\circ}5-N^{\circ} 10$ )

Que analizando la expresión matemática para la ley de atenuación del terreno de afirma que la velocidad pico partícula (VPP) es inversamente proporcional con la distancia (D) y directamente proporcional con la máxima carga instantánea. A partir de ello, se determina que, si se quiere reducir el nivel de daño producido por una voladura, se debe disminuir la carga (reduciendo el riesgo de acople de los tiempos de la detonación de los barrenos) o aumentar la distancia.

Garrido (2007) en su tesis doctoral Diagnostico y Optimización de Disparos en Desarrollo horizontal Mina el Teniente. El objetivo general de este estudio fue efectuar un diagnóstico técnico de las operaciones de Perforación y Tronadura de desarrollo horizontal en la “Mina Reservas Norte” de Codelco Chile División el Teniente, específicamente en el Nivel de Producción (Teniente Sub-6). Como instrumento de investigación se utilizó las fotografías de los disparos antes y después de cada tronadura, para posterior digitalización en software 2DFace y el monitoreo de las vibraciones producto de la tronadura. Sus conclusiones fueron los siguientes.

Reducción del número de perforaciones por disparo un 10%, reducción de la sobre excavación de un 24% a un 6%, menor exposición al riesgo por desprendimientos y caídas de rocas, disminución de los tiempos de trabajo y disminución de los costos directos de perforación y tronadura.



### **2.1.2 Antecedentes nacionales:**

Quispe (2015) en sus tesis Aplicación del detonador no eléctrico de doble retardo en la U.E.A San Juan de Arequipa – CIA Century Mining S.A.C. concluye que: Se reduce la duración de los ciclos de carguío de explosivo para voladura y aseguramos la seguridad en el manipuleo. En tal sentido, la obtención de una buena fragmentación, coronas estables y el hecho de evitar la sobre excavación, nos permite alcanzar logros positivos en la reducción de costos de explosivos y factor de carga, al igual que disminuir costos en sostenimiento.

Huanuqueño (2014) en sus tesis Costos de voladura usando detonador no eléctrico dual en labore subterráneas U.E.A. Chungar, Compañía minera Volcan S.A.A. concluye que: Se elimina la necesidad de tener varios retardos. Elimina el consumo de cordón detonante y por consiguiente la vibración producida por este, ya que los tiempos de exposición de vibración con detonantes son de tres a cuatro segundos, a comparación del Fanel que es de seis a ocho segundos.

Huiza (2013) en su informe Pruebas técnicas de iniciación de detonador no eléctrico con doble retardo en Consorcio Minero Horizonte, indica que: “Se realizaron 46 disparos con un consumo total de accesorios de 1375 unidades. No se obtuvo problemas significativos en los resultados de la voladura (tiros cortados, congelados, ni anillados)”.

Cruz (2013) en su tesis Selección del explosivo y carga máxima con retardo según el macizo rocoso en el análisis de vibraciones por modelamiento U.P. Titán concluye que: “Las vibraciones producidas por la voladura y el conocimiento de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permiten estimar la probabilidad de ocasionar daño en el macizo para de esta forma llevar el mejor control en las operaciones de minado”.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1 SISTEMAS DE INICIACIÓN**

Para que un explosivo pueda detonar es necesario iniciarlo, lo que se efectúa normalmente mediante los denominados “accesorios de voladura”, que comprenden a los fulminantes o detonadores, mecha de seguridad y mecha rápida, conectadores, retardadores, cordones detonantes, cables, explosores e instrumentos de control como ohmímetros y otros.

La utilización de estos debidamente seleccionados y combinados para cada caso, da a lugar a los procedimientos empleados para iniciar la detonación de una voladura, conocidos como sistemas de iniciación, teniendo en cuenta que existe desde un sistema convencional hasta un sistema electrónico, de acuerdo a nuestra investigación nos enfocaremos al sistema no eléctrico.

## 2.2.2 SISTEMAS NO ELÉCTRICOS

### 2.2.2.1 Detonadores no eléctricos

Estos sistemas se caracterizan por emitir una onda de choque de baja velocidad (aproximadamente 2000m/s) que se propaga a través de un tubo de plástico en cuyo interior contiene una película delgada de explosivo de 20mg/m, la cual es transmitida hacia el detonador. La reacción no es violenta y no causa interrupción ni al explosivo ni al taco.

#### 2.2.2.1.1 Características

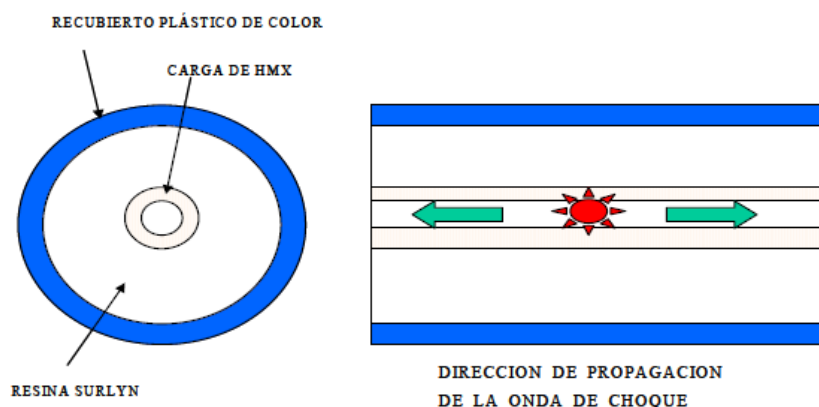


Figura N° 1: Características del tubo de choque

Fuente: Cintex (2005)

- **Cápsula detonante de aluminio**, con elemento de retardo y sello antiestático.
- **Conector plástico J**, para unir el tubo de choque a una línea troncal de cordón detonante
- **Etiqueta**, que indica el periodo de retardo del detonador y el tiempo nominal de detonación.

La tecnología del detonador no eléctrico con elemento pirotécnico, está basada en un “retardo de plomo”, que define el tiempo preciso de cada retardo de la serie, estos elementos de retardo son obtenidos a partir de un tubo de plomo cuyo núcleo relleno con



un tipo de mixto pirotécnico. Posteriormente, es sometido a varias etapas de estiramiento hasta obtener una varilla trefilada con un diámetro final compatible con el diámetro interno del detonador. La varilla es cortada en forma precisa, obteniendo los elementos de retardo con sus respectivos largos. El largo del elemento de retardo variara dependiendo del tiempo requerido y de la velocidad de combustión del compuesto pirotécnico.

Todos los detonadores tienen un elemento de retardo principal de gran precisión (Delay Element), sobre los 200ms se incorpora otro elemento pirotécnico sellador (Sealer Element), y finalmente sobre los 1800ms se incorpora un tercer elemento iniciador (Starter Element). El NONEL® presenta en su composición un conector plástico tipo J Hook, cuya función es poder ser acoplado a una línea de cordón detonante.

Además, el producto NONEL® trae una etiqueta de retardo, adherida al tubo, que indica el tiempo y el número de la serie de retardos.

Los detonadores NONEL® serie MS poseen un tubo de choque color naranja y los detonadores NONEL® serie LP tienen un tubo de choque color amarillo.

#### 2.2.2.1.2 Componente del detonador

- A. **Isolation Cup:** Corresponde a un sello antiestático, elemento fundamental para eliminar el riesgo de iniciación por descargas estáticas accidentales. Este dispositivo está constituido por un material semi conductor que elimina la estática que pueda acumular el tubo de choque al ser sometido a ambientes de alta generación de corrientes vagabundas. Además, Isolation Cup garantiza una única posición dentro del detonador y permite centralizar eficazmente la alineación del tubo sobre el elemento de retardo.
  
- B. **Delay Ignition Buffer (DIB):** Esta tecnología es la única que está presente en los detonadores no eléctricos y corresponde a un disco compuesto por una malla muy fina que se ubica por sobre el tren de elementos de retardos.

El DIB controla la transmisión de la señal del tubo de choque proporcionando una mayor precisión y evita el problema de reversa de la onda de choque. El DIB actúa también como un amortiguador de la onda de choque para para tubos no eléctricos de

gran longitud, además de un acelerador de señal en casos de utilizar tubos de corto metraje.

De acuerdo al sistema de hermeticidad del NONEL®, si se produjera una ruptura del tubo de choque, sin la presencia del DIB ocurriría una despresurización instantánea que podría afectar el normal inicio del primer elemento pirotécnico de retardo, provocando variación del tiempo de retardo nominal y problemas de funcionabilidad.

Tren de elementos de retardos:

- Elemento sellador (Sealer Element), cuando se combustiona el elemento sellador se produce en condiciones de sellado, generando una barrera natural que impide la acción del oxígeno atmosférico en el normal funcionamiento del tren de retardo. El segundo crimper sobre el sellador asegura esta función.
- Elemento iniciador (Starter Element), este es un elemento pirotécnico de alto rendimiento calórico que asegura la normal transmisión de la combustión al elemento principal.
- Elemento principal (Main Element), Este elemento pirotécnico es el que en definitiva entrega el retardo de la serie especificada. El tiempo nominal para cada detonador se obtiene como combinación de los colores precisos de los diferentes elementos de retardo.

C. **Cusion Disk (CD):** Este es un anillo limpiador que queda posicionado sobre las cargas explosivas y su función es asegurar la limpieza posterior de todos los restos explosivos adheridos en la pared interior del casquillo. El CD fue desarrollado para prevenir detonaciones no deseadas por efecto de presencia de explosivos en las paredes interiores del casquillo durante el proceso de carga y manipulación de los detonadores.

### 2.2.2.1.3 Ventajas del sistema

- El sistema no se inicia con golpes.
- El tubo puede sufrir estiramiento de hasta 5 veces su longitud, sin perder su capacidad de iniciación.
- No se inicia su carga explosiva al ser quemado el tubo con fuego.
- No sufre destrucción después de haber sido iniciado.



- No puede iniciarse accidentalmente con descargas eléctricas, corrientes estáticas, transmisiones de radios de alta frecuencia, fuego y fricción no es afectado por las corrientes extrañas.
- Puede sufrir nudos y quiebres bruscos, no perdiendo su característica de iniciación.
- Aumenta la flexibilidad de diseño, permitiendo una amplia elección de intervalos de retardo para lograr resultados específicos de voladura.
- Se conectan en forma sencilla y rápida, sin requerir de accesorios especiales.
- La señal propagada por el interior del tubo es silenciosa.
- Permite lograr diagramas muy flexibles.

#### **2.2.2.1.4 Desventajas**

- Puede llegar a cortarse producto de detritus de taco de mala calidad.
- Existe probabilidad de corte de iniciación cuando se emplea en combinación con cordón detonante no apropiado.
- Al ser iniciado el tubo con un detonador, este debe ser de baja potencia, de lo contrario podría cortar el tubo sin ser iniciado.

#### **2.2.2.1.5 Aplicaciones**

- Para uso en minería a cielo abierto, subterráneo y obras civiles.
- Para iniciar explosivos de tipo dinamitas, emulsiones pequeño diámetro y pentolitas APD.
- Los detonadores no eléctricos de la serie Milisegundo (MS), son utilizados en tronadura de banqueo en minería a cielo abierto y en tronaduras de desarrollo horizontales, verticales e inclinados y producción en minería subterránea.

#### **2.2.2.2 Cordón detonante**

Los cordones detonantes normalmente consisten de un núcleo de PETN el cual es encerrado en varios hilos de plástico, sintéticos y componentes protectores de agua. El cordón detonante puede iniciar explosivos por iniciación directa en cualquier punto del cordón, o puede llevar una onda de detonación que es capaz de iniciar otros cordones o fulminante no eléctricos en la voladura.

La velocidad de detonación del cordón detonante es cercana a 6000m/s. las varias cubiertas protegen el núcleo de explosivo de la abrasión, provee resistencia a los fluidos contaminantes y prevé una resistencia considerable a la tensión.

Cualquier número de cambios puede ser realizado a los amarres en una secuencia planificada con retardos o conectores detonantes para obtener el resultado requerido. La iniciación de la detonación puede ser iniciado mediante una mecha de seguridad y un fulminante o un fulminante eléctrico con el cual es atado a la línea troncal. El fulminante es colocado a lo largo del cordón detonante y el extremo cargado apuntaría a la dirección del viaje de la onda de choque en la línea troncal. Algunas veces un detonador eléctrico es unido directamente al cordón usando cámaras especiales de plástico. Para la iniciación de voladuras en condiciones adversas (es decir humedad o congelamiento), iniciadores especiales están disponibles para conectar a las líneas descendentes a la línea troncal. Esto se debe a que un cordón detonante húmedo se propagaría cuando es iniciado pero esto no es iniciado confiablemente mediante un fulminante u otro cordón detonante. La conexión de varios cordones detonantes se realiza principalmente anudando.

Los cordones detonantes vienen en una variedad de tipos. La selección del cordón apropiado depende de la aplicación.

La voladura con retardo es posible cuando se usa cordones detonantes. Esto es realizado mediante el uso de conectores detonantes en superficie o retardos dentro del taladro.



*Figura N° 2: Cordón detonante*

Fuente: Cintex (2005)



### 2.2.2.3 Detonadores

El detonador está constituido por una capsula pequeña de aluminio el cual contiene explosivos como la ázida de plomo, PETN o una combinación de explosivos. Los detonadores son utilizados para iniciar explosivos y existen de diferentes clases y pueden ser con o sin retardo.

Un detonador simple está constituido de un cilindro de aluminio o cobre, el cual es cerrado en un extremo. El detonador tiene un explosivo muy potente en el fondo (carga secundaria) y en la parte superior una carga primaria. La carga primaria es iniciada por la guía de seguridad. Por consiguiente, la carga primaria inicia a la carga secundaria. El detonador no tiene retardo.

### 2.2.2.4 Detonador no eléctrico de doble retardo.

También llamado sistema silencioso, es un detonador no eléctrico, que permite reemplazar cordones detonantes, como líneas troncales en disparos de minería a cielo abierto y subterráneo. Está formado por un tubo no eléctrico de largo variable, que tiene en un extremo un detonador y en el otro un conector de superficie.

- Se recomienda su uso para minimizar el nivel de ruido y vibraciones. Es un sistema muy flexible, que permite diseñar o modificar disparos en el mismo terreno, por medio de conexiones simples y versátiles.
- Elimina el cordón detonante, los conectores de superficie, y con ello la onda expansiva asociada a la detonación de estos accesorios. Por esta razón este sistema es conocido con el nombre de “sistema silencioso”.
- También se puede utilizar un sistema silencioso, mediante un detonador primadet con tubo nonel y un sistema de retardo en el interior del pozo; además de un conector EZTL de retardo de superficie para conectar entre pozos.
- Elimina el uso de series de detonadores, reemplazándolos por un solo elemento, el cual es introducido en todas las perforaciones por igual, lo que reduce considerablemente el número de ítems de almacenamiento.
- Se evita repetir algunos números en disparos muy grandes, reduciendo los Kg. Por retardo, logrando una tronadura tiro a tiro indefinido y un óptimo control de vibraciones.



- El uso de un mismo detonador en todos los tiros, permite distribuirlos y colocarlos en forma inmediata en ellos y no se requiere a un diagrama de disparo como ocurre en el caso convencional. Esto sumado a un diseño del conector que permite uniones rápidas y seguras, significa reducción de tiempo y menor posibilidad de errores durante el primado y amarre.

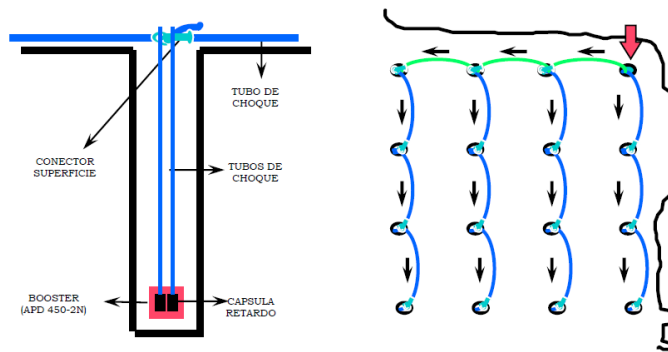


Figura N° 3: Distribución de retardos

Fuente: Cintex (2005)

### 2.2.3 SISTEMA ELÉCTRICO

El término eléctrico se refiere a fulminantes (detonadores) que son activados eléctricamente.

#### 2.2.3.1 Detonadores eléctricos

Un detonador eléctrico típico consiste de un tubo de metal (aluminio o cobre) que contiene una pequeña cantidad de alto explosivo (PETN o Teteryl prensado) como la carga base, una pequeña cantidad de explosivo primario (azida de plomo o fulminato de mercurio) como la carga primaria, una carga suelta de composición pirotécnica y dos alambres los cuales son conectados mediante un fino alambre de platino iridio de alta resistencia. Algunas veces la carga suelta es sustituida por un tipo de carga como dispositivo de encendido que circunda el puente de alambre.

Cuando la corriente es aplicada al fulminante, los siguientes eventos toman lugar sucesivamente:

- La carga suelta (o cabeza de encendido) se inicia.
- El puente de alambre se rompe.



- La carga primaria detona.
- La carga base detona.

Esto es siempre la secuencia, pero en los tiempos actuales no son precisos y ellos están distribuidos estadísticamente.

Los fulminantes eléctricos son de dos clases, fulminantes instantáneos y fulminantes de retardo. Los fulminantes de retardo incluyen un elemento de retardo (de composición pirotécnica) entre la cabeza de encendido y la carga primaria. Dos clases de retardos son disponibles; retardos de milisegundos (MS) y retardos de periodos largos (LP).

Los retardos de milisegundos tienen un intervalo de tiempo de unos pocos milisegundos entre periodos de retardo sucesivos (20 – 200 ms). Los retardos de periodos largos tienen intervalos de tiempo más largos (cercano a 0.5 segundos). Los detonadores de milisegundos son usados en varias aplicaciones en voladura de bancos, canteras y construcción. Los retardos de periodos largos son usados en aplicaciones de desarrollos subterráneos (túneles, piques y zanjas).

### **2.2.3.2 Circuito eléctrico**

El circuito de voladura consiste de los detonadores eléctricos, el alambre del circuito y la máquina de voladura.

El alambre del circuito consiste de un trecho de alambre (alambres detonadores), el alambre de conexión (alambre para conectar la máquina de voladura al circuito detonador) y el alambre conductor (extensión de la línea de encendido a los detonadores individuales o las series de detonación).

### **2.2.3.3 Configuración del circuito**

Tres tipos de circuitos son usados en la voladura:

- Serie; este es usado para un pequeño número de detonadores.
- Paralelo; este es usado para algunas aplicaciones subterráneas.
- Serie-paralelo; es usado para grandes números de detonadores.

## 2.2.4 DETONADORES ELECTRÓNICOS

La necesidad de mejorar resultados en los procesos de tronaduras y aumentar el control de vibraciones a obligado en las últimas décadas, a insistir en la precisión de los detonadores existentes, actualmente estos elementos proporcionan un retardo pirotécnico que provoca una dispersión relativamente alta en los tiempos de iniciación, tanto más alto, mayor es el número de la serie.

Aunque muchos fabricantes de accesorios han desarrollado detonadores pirotécnicos de alta precisión, siguen existiendo ciertas limitaciones, tanto en fabricación como en su almacenamiento. La última generación de la alta precisión es la de los detonadores electrónicos, los cuales contienen un circuito integrado en un chip, en un lugar de elemento de retardo pirotécnico.

En los detonadores convencionales la precisión del disparo depende del rango de los milisegundos. El empleo de un oscilador de cuarzo (reloj digital) incorporado a un circuito impreso, dotará al sistema de unos tiempos en el rango de los milisegundos.

Desde mediados de los años 80, diversos fabricantes de explosivos comenzaron a desarrollar detonadores electrónicos. Estos accesorios permiten, por su gran precisión, un excelente control del proceso de fragmentación, así como de las vibraciones y proyecciones.

### 2.2.4.1 Componentes

Los componentes principales de un detonador electrónico se representan en la figura siguiente. En general consisten de una unidad electrónica y un detonador eléctrico instantáneo. Se distingue un circuito integrado o microchip (4), que constituye el corazón del detonador, un condensador para almacenar energías (5) y un circuito de seguridad (6) conectados a los hilos que sirven de protección frente a diversas formas de sobrecargas eléctricas.

El propio microchip posee circuitos de seguridad internos. La otra unidad es un detonador eléctrico instantáneo ya explicado en la sección “sistema eléctrico”, en el cual la gota inflamadora (3) para la iniciación de la carga primaria (2) está especialmente diseñada para proporcionar un tiempo de iniciación pequeño con la mínima dispersión.

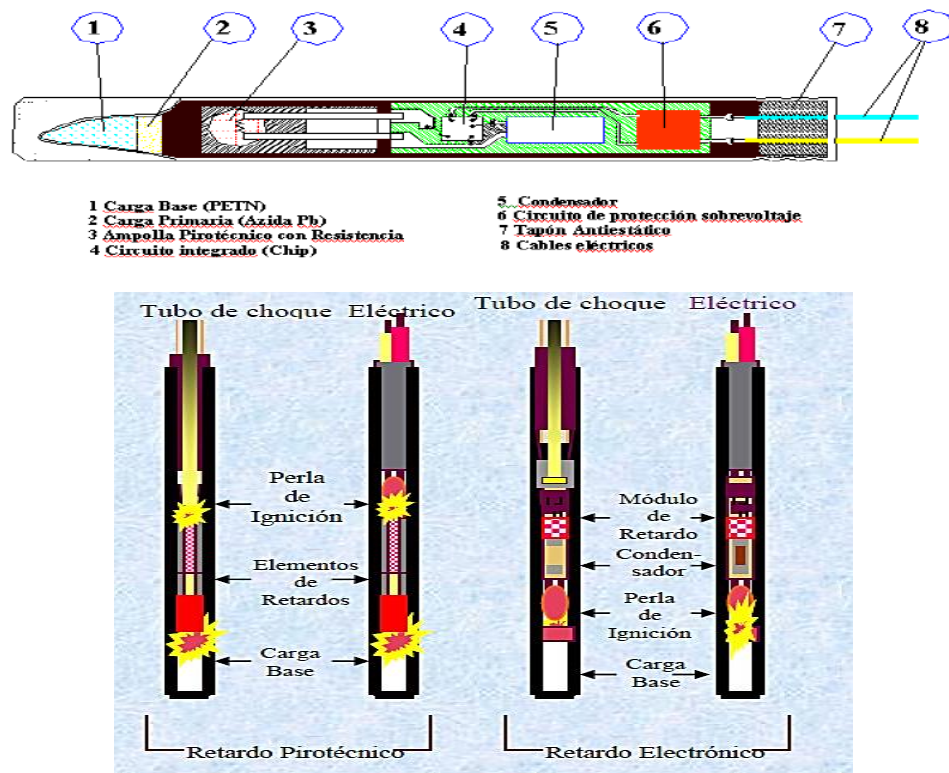


Figura N° 4: Detonadores electrónicos

Fuente: Cintex (2005)

En cuanto a los tiempos de retardos, los detonadores electrónicos tienen mucha mayor flexibilidad que los detonadores convencionales. El tiempo de duración del periodo, se programa y almacena instantes antes de la tronadura sobre una Ram o una Eprom si el explosor (tarjeta Hardware) admite preprogramación, las posibilidades son tan amplias que algunos fabricantes ofrecen rangos de tiempo que van desde 1 milisegundo hasta 15 segundos.

Los microchip proporcionan tiempos de retardos con exactitud del orden de 0.1% del intervalo programado.

Los sistemas de amarre, que emplean los sistemas electrónicos son similares a los empleados con detonadores eléctricos.

Tipo de amarre utilizado por sistema Hotshot de DynoNobel.

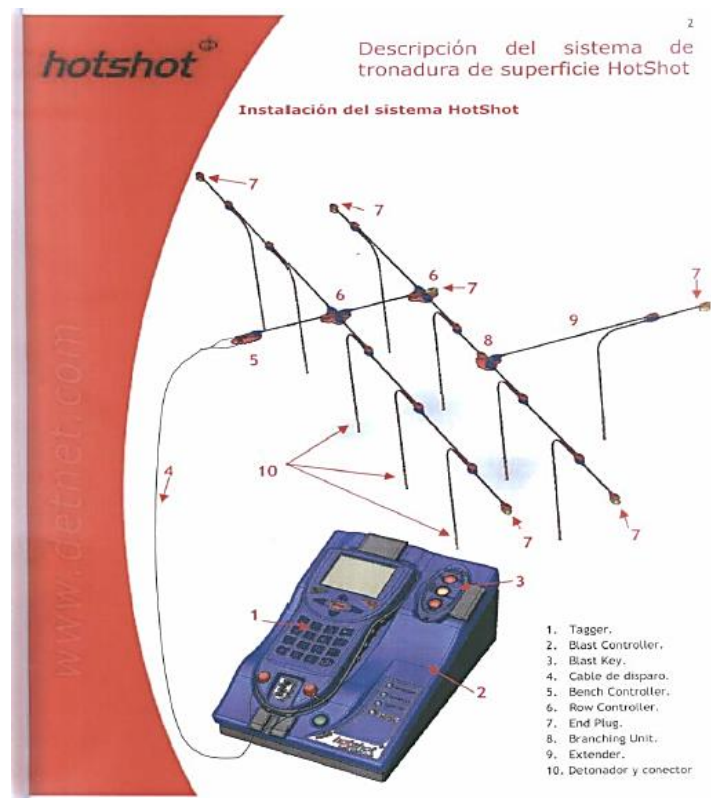


Figura N° 5: Instalación de un sistema electrónico

Fuente: Cintex (2005)

Otras características de los detonadores electrónicos son:

- No se puede explotar sin un código de activación única.
- Reciben energía de iniciación y el código de activación desde el aparato de programación y mando.
- Están dotados de protecciones frente a sobre tensiones, los pequeños excesos de carga se disipan internamente a través de circuitos de seguridad, mientras que los altos voltajes (>1000v.) se limitan por medio de un cortacorriente.
- Son insensibles a los efectos de tormentas, radio frecuencia y energía estática.
- Tensión de operación pequeña (<50 v.), lo cual es una ventaja considerando el riesgo de corrientes vagabundas.

#### 2.2.4.2 Máquina de disparo (Blasting box)

La máquina de disparo, consta de una unidad de programación y una unidad de energía (explosora), que permite energizar los capacitores de los detonadores



electrónicos. Además, ambos sirven para control de todo de los detonadores en cuanto a la continuidad eléctrica de cada uno, en el momento de iniciar el disparo.

El acceso al sistema de activación del disparo está restringido mediante un código secreto del usuario (password) sin el cual el equipo no funciona, además del contacto de llave.

El número de detonadores que es posible conectar a la unidad de disparo, varía según los fabricantes.

Tabla N° 1

*Número de detonadores*

Número de detonadores	Fabricantes
400	I-kon de Orica con Blaster 400
1600	I-kon de Orica con Blaster 1600
1200	Daveytronic de Tricomín
600	Hotshot de Dyno Nobel

Fuente: Cintex (2005)

La anterior dependerá de la longitud de los cables de los detonadores y de la línea de disparo.

El principal obstáculo que existe, es el factor económico, pues hasta que no se logre fabricarlos masivamente los costos de estos accesorios serán altos.

En las grandes obras y explotaciones mineras ese sobre costo quedara compensado con el aumento del diámetro a perforar, haciendo que la repercusión de accesorios sea cada vez menor por unidad de volumen de roca extraída y también por las exigencias de seguridad en los trabajos de envergadura o mayor complejidad.

#### **2.2.4.3 Fuentes de energía**

Algunas consideraciones técnicas sobre los explosores y como comprobar que la energía que se está suministrando es la correcta.

- Energía Total Disponible  $E_0$  en el explosor

$$E_0 = \frac{1}{2} CV^2$$

Siendo

C = La capacidad en faradios del explosor.

V = Es la tensión en voltios que alcanza el condensador en el momento de disparo.

- Energía Suministrada al Circuito  $E_d$  durante un corto período de tiempo que normalmente es de unos 5 ms.

$$E_d = E_0 (1 - e^{-0.01/(R_t \times C)})$$

$$R_t = R_L + n R_D$$

Donde

$R_t$  = Resistencia total del sistema

$R_L$  = Resistencia de la línea de iniciación

$R_D$  = Resistencia del filamento del detonador eléctrico

N = Número de detonadores electrónicos.

- Intensidad efectiva  $I_{EF}$  que será suministrada al circuito.

- Impulso de encendido  $S_i$

$$S_i = \frac{E_d}{R_t} = I_{EF}^2 * t$$

### 2.2.5 Teoría de la fragmentación

Muchas teorías han sido propuestas para mostrar como la roca se fragmenta resulta de una explosión. En general se pueden distinguir dos tipos de energía durante el proceso de fragmentación. Primero ocurre una energía de choque (ondas de esfuerzo) que se mueven por la roca a una velocidad cercana a la velocidad de onda compresional ( $V_p$ ). Después que este frente de esfuerzo ha pasado, la presión del gas (energía de gas) realiza el proceso de fragmentación de la roca.

Las diferentes teorías le dan diferentes importancias a la energía de choque y/o gas en la fragmentación de rocas de acuerdo a sus experiencias particulares y pruebas realizadas. En general, la importancia de la energía de choque o la energía de gas dependerá de muchos factores (algunos controlables), como, por ejemplo: tipo de explosivo, grado de confinamiento, parámetros de la roca, etc. Para poder tener claro que variables pueden incidir en mayor o menor grado, debemos tener claro que, para todo trabajo de voladura, existen variables controlables y variables no controlables.

### 2.2.5.1 Teoría de la reflexión

Sostiene que las ondas de compresión producidas por la detonación del explosivo se propagan mediante la roca y al alcanzar una cara libre, se reflejan como ondas de tracción. Las ondas de compresión agrietan mínimamente a la roca, mientras las ondas de tracción son las mayores responsables de la fragmentación y el desplazamiento del material.

### 2.2.5.2 Teoría de la expansión de los gases

Son dos puntos que destaca esta teoría producidos por la presión de los gases en expansión. Primero, las grietas se inician a una distancia de 2 taladros radiales fuera del taladro y estas grietas se extienden hacia el centro del taladro y hacia la cara libre.

Segundo, el desplazamiento del material fragmentado, por la acción de los gases en gran volumen, se da una vez que las grietas llegan a la cara libre.

### 2.2.5.3 Rotura por flexión

La rotura por flexión se explica tratando a la roca como una viga rectangular que se trata de doblar o quebrarlo. La presión de taladro por un pequeño intervalo de tiempo. Mientras que la presión de gas se sostiene más largamente y es el encargado del 90% de la energía para fragmentar a la roca.

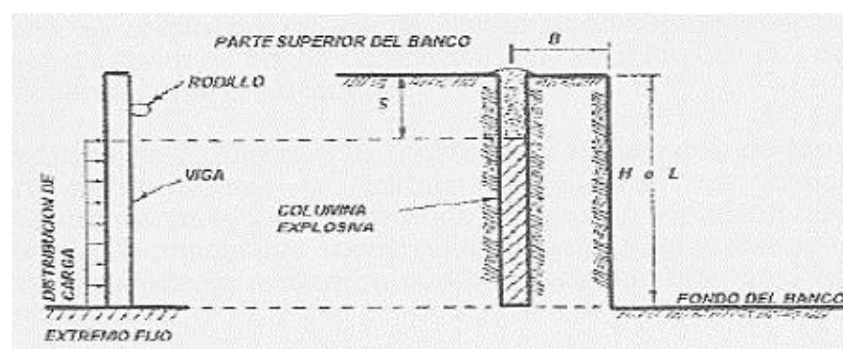


Figura N° 6: Modelo de flexión de la viga antes de la detonación

Fuente: Lara (2012).

### 2.2.5.4 Teoría combinada

Combina las teorías antes vistas en tres etapas:



- Primero, el explosivo detona ya la alta presión de taladro agrieta el área adyacente del taladro.
- Segundo, las ondas de compresión al alcanzar una cara libre se reflejan en ondas de tensión.
- Tercero, la presión de los gases en expansión amplía las grietas primarias y desplazan al material fragmentado.

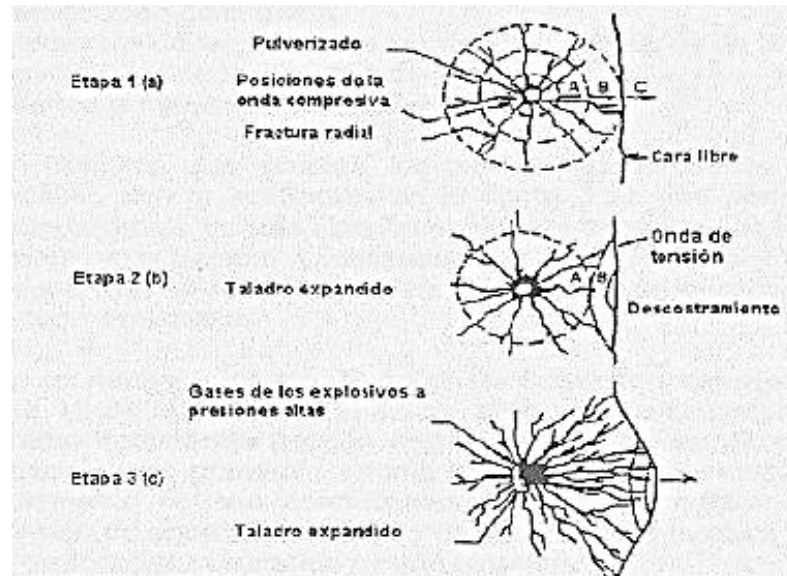


Figura N° 7: Teoría combinada; Ondas de tensión, rotura por flexión y expansión

Fuente: Lara (2012).

Sin embargo, en todas las teorías se pueden observar los siguientes efectos claramente identificables que suceden uno tras otro en paralelo con intervalos de tiempo imperceptibles.

#### 2.2.5.5 Detonación del explosivo

- Propagación de la onda de choque por el macizo rocoso
- Expansión de gas a alta presión y temperatura
- Movimiento de material o masa rocosa fragmentada

En la detonación de un único taladro aislado de alguna cara libre se pueden observar el mecanismo de fracturación de la roca. Entonces con este ensayo se distingue en primera instancia, que en las zonas cercanas radialmente se producen los siguientes fenómenos y

creación de fisuras generadas por el efecto de tracción de la onda de detonación; estas fisuras son de tipo radial y a veces muy difíciles de observar.



Figura N° 8: Tipos de fisuras en las proximidades del taladro

Fuente: Herrera (2013).

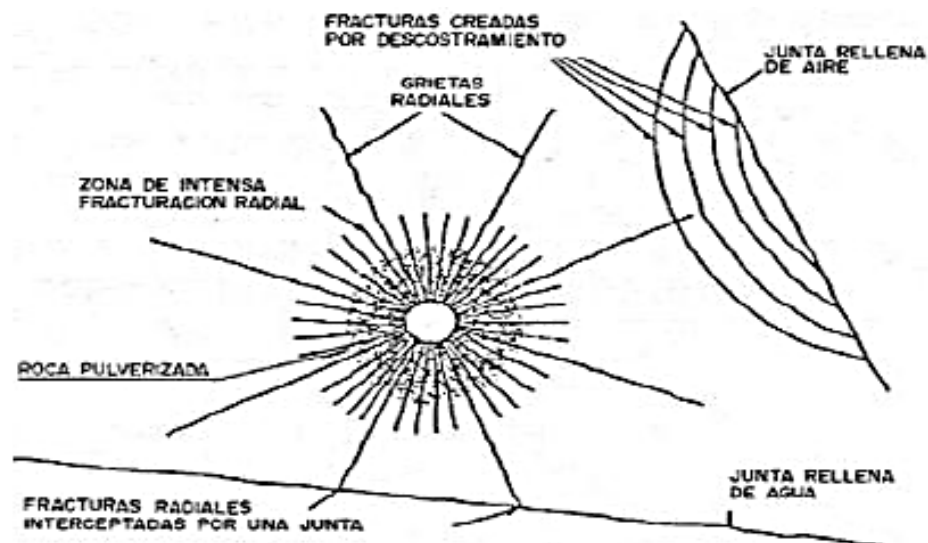


Figura N° 9: Agrietamiento y rotura por flexiones de la onda de choque

Fuente: López (2003).

### 2.2.5.6 Mejora de la fragmentación

Cuando la frecuencia de fracturas en la masa rocosa es alta, es más fácil de obtener fragmentación fina y los factores de energía asociados con la voladura tienden a ser bajos.



Rocas duras altamente diaclasadas o fracturadas se comportan muy similar a rocas más blandas y más débiles. La combinación de roca y discontinuidades se puede considerar y modelar como una ruma de bloques mantenidos juntos por una combinación de la cohesión de la superficie de las diaclasas, el coeficiente de fricción de las superficies de las diaclasas y los esfuerzos actuando en los bloques (ya seas esfuerzos hidrostáticos aplicaciones de superficie o una combinación de esfuerzos hidrostáticos o tectónicos en aplicaciones subterráneos profundas).

Autores como McKenzie (1984) y el ISEE (1998), han sugerido que para lograr la máxima utilización de la energía del explosivo en el proceso de fragmentación es necesario equiparar la impedancia del explosivo lo más cercana posible a la impedancia de la roca. La impedancia se define como el producto de la velocidad y la densidad. Para el explosivo, la impedancia se refiere al producto de la densidad en el taladro y a la velocidad de detonación, mientras que en la roca la impedancia se define como el producto de la velocidad de las ondas P y la densidad. Luego, para una máxima fragmentación. Basado en el deseo del igualamiento de las impedancias, rocas masivas y de alta resistencia (con velocidades P en el rango de 4,500 a 6,000 m/s) se fragmentan mejor con un explosivo con alta densidad y de alta velocidad de detonación.

#### **2.2.5.7 Control de fragmentación**

Los retardos ayudan a la fragmentación al introducir una acción de corte entre los taladros adyacentes. Si una fila de taladros se inicia simultáneamente, las grietas que crecen entre los taladros se favorecen, con poco crecimiento delante de los taladros hacia la cara libre. Bajo estas circunstancias, el burden tendera a moverse como un taladro adyacente, un taladro debe cortar un segmento de roca lejos de la masa principal de roca, proporcionando una fragmentación mejorada.

#### **2.2.5.8 Resultados de la fragmentación**

En muchos aspectos, este debe ser uno de los índices principales del funcionamiento del explosivo, ya que directamente mejora uno de los objetivos principales de la voladura: el requerimiento de fragmentar la roca para facilitar una excavación y remoción rápida.



Sin embargo, la medición de la fragmentación de la voladura es uno de los puntos más difíciles que encaran los técnicos en voladura. La tecnología moderna está investigando los métodos de fotografía automática y el escaneo de imagen de videos, pero a la fecha no existe un método barato o simple y pocos grupos técnicos están separados para cribar mecánicamente la pila completa de una voladura.

#### **2.2.5.9 Tipo de secuenciamiento**

Posiblemente no hay cuestión sobre la que exista mayor desacuerdo en el mundo de la voladura que el retardo para obtener la fragmentación más fina. Los retardos más importantes en lo que afecta a la granulometría de la roca fragmentada parecen los entre taladros y entre filas, dado que mediante ellas se pueden ajustar la intensidad de las tensiones en varias partes de la voladura “los retardos entre.

#### **2.2.6 Vibraciones**

##### **2.2.6.1 Fundamentos de las vibraciones**

##### **2.2.6.2 Naturaleza cíclica de las vibraciones**

Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión. Con respecto a las vibraciones por tronaduras inducidas en la roca, generalmente se considera que la vibración es producida en el frente de detonación del explosivo, en la zona donde el explosivo sólido es convertido en gas, y la densidad del gas es aún igual a la densidad del explosivo sólido (zona de plasma). Esta zona de choque generalmente se considera que produce la mayor parte de la fragmentación primaria que ocurre en el macizo rocoso y la mayoría de las vibraciones. Después que el frente de detonación ha pasado, el gas se expande en las zonas detrás del frente de detonación, creando energía de gas, la cual es responsable del movimiento de la roca.

Hacemos el ejemplo de un taladro de voladura con una carga de explosivo, cuando esta es detonada, la masa rocosa alrededor de la carga es inmediatamente sometida a compresión. Esto produce la componente de compresión del ciclo de vibraciones. Después de la fase de compresión, la roca sufre una fase de expansión en un intento a volver a su estado original. Una vez que la fuerza de compresión es removida, la roca se relaja y se vuelve a su estado inicial, pasando más allá del mismo por el esfuerzo de tensión inducido.

Como la roca se mueve más allá de su posición original, esta crea una fase de tensión del ciclo de vibraciones. Se muestra en la figura el ciclo de vibración. (fig.10)

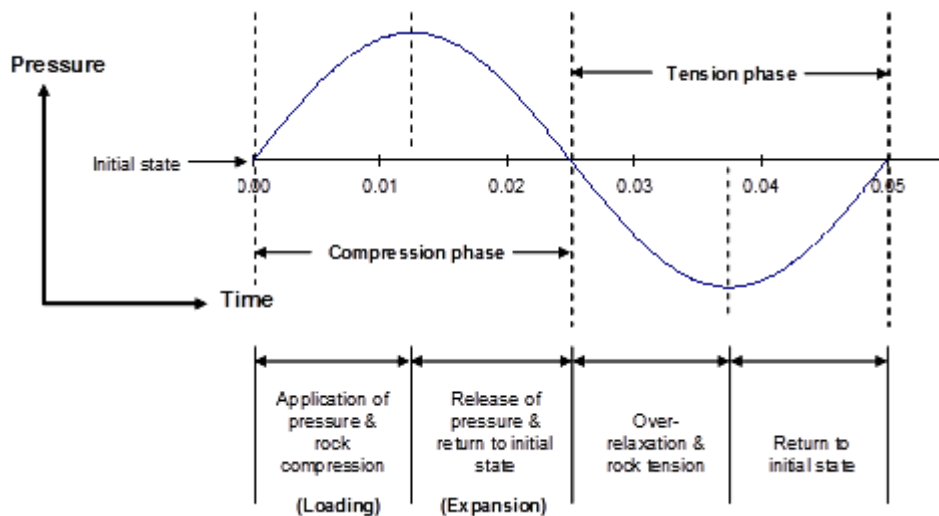


Figura N° 10: Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión

Fuente: Cintex (2005).

### 2.2.6.3 Propiedades básicas de las ondas

Las propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones son:

- **Frecuencia:** Cuantos ciclos de compresión y tensión se transmiten por segundo;
- **Amplitud:** El máximo nivel de esfuerzo a la cual el medio es expuesto (relacionado al movimiento de partículas individuales sujetas a esfuerzos);
- **Duración:** El tiempo total que el medio está expuesto a la vibración;
- **Longitud de Onda:** Distancia que viaja la onda en un ciclo completo de compresión y tensión;
- **Velocidad de propagación:** La velocidad con la cual la onda se mueve, distinta a la velocidad individual de movimiento de una partícula.

#### 2.2.6.3.1 Frecuencia de las ondas

La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión. El factor que tiene una gran influencia en esto es la dimensión de la carga, columnas grandes de carga tienden



a producir bajas frecuencias. Sin embargo, otros importantes factores incluyen los módulos de la roca y la razón de carga producida por la detonación (es decir la velocidad de detonación).

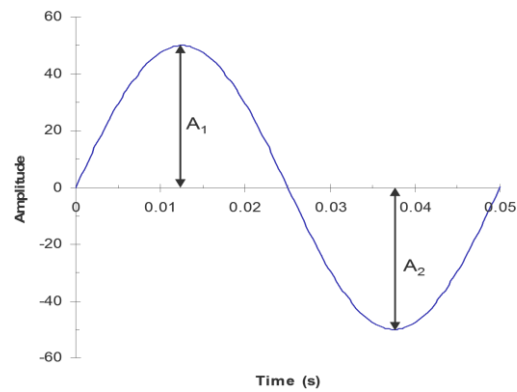
Coates (1970) basado en investigaciones previas indica que: La frecuencia de las vibraciones que se generan cercanas a un pozo de longitud de carga de 10 metros está probablemente en un rango de (1/0.008) a (1/0.014), es decir 125 Hz a 70 Hz, dependiendo del módulo de la roca. De los mismos cálculos, la frecuencia de vibraciones muy cercanas a cargas de 2 metros de largo está probablemente en un rango de 250 a 500 Hz.

Cada vez que una onda de vibración completa un ciclo de propagación (es decir una longitud de onda) una fracción constante de esta energía se pierde, debido a la disipación de energía friccional. A mayor número de ciclos de propagación más energía se pierde. Debido a que ondas con altas frecuencias tienen una longitud de onda corta, ellas se atenúan más rápidamente que ondas con bajas frecuencias sobre una misma distancia.

Se observará generalmente que las ondas de vibración registradas a grandes distancias tienden a tener bajas frecuencias en comparación a aquellas registradas a cortas distancias. Es importante saber que una onda con una frecuencia única, y que se propaga a través de un medio homogéneo, mantiene su frecuencia en toda su distancia de viaje y a través de todo tipo de roca. El hecho que las ondas registradas a grandes distancias tengan frecuencias menores a aquellas registradas a cortas distancias confirma que las ondas de vibraciones contienen un amplio rango de frecuencias, y que las ondas de altas frecuencias son atenuadas preferentemente, dejando un espectro dominado por componentes de bajas frecuencias.

#### **2.2.6.3.2 Amplitud de las vibraciones**

La amplitud de la vibración es una medida de su “Fuerza” y la energía de una onda de vibración es proporcional al cuadrado de su amplitud. En el caso de una vibración continua, en la cual cada ciclo de propagación tiene la misma forma, un valor único es suficiente para describir la “fuerza” de la vibración o la amplitud, es decir  $A_1$  o  $A_2$ .



*Figura N° 11:* El signo de las amplitudes simplemente indica la dirección del movimiento de las partículas

Fuente: Cintex (2005).

Es importante tener en cuenta, que, en la medición de vibraciones en macizos rocosos, no se hacen distinciones entre amplitudes positivas o negativa, siendo éstas reportadas sólo como positivas o su valor absoluto.

Cuando las amplitudes varían de ciclo en ciclo en una onda de vibración extendida, varias alternativas están disponibles para describir la amplitud: Amplitud Peak; promedio de amplitud; media de la raíz cuadrada (RMS) amplitud.

Las unidades de amplitud dependen del tipo de sensor utilizado para detectar el paso de la onda cíclica de esfuerzo. El paso de la onda de vibración resulta en un desplazamiento real de la partícula, y es posible medir ese desplazamiento real, la velocidad de la partícula en movimiento, o su aceleración. Ya que la frecuencia del movimiento de la partícula puede ser alta (cientos de Herz), en la práctica es fácil encontrar y usar dispositivos que tengan una adecuada respuesta a la frecuencia y sensibilidad para medir velocidad (geófonos) o aceleración (acelerómetros). Debido a que el desplazamiento, velocidad y aceleración están relacionados, la medida de cualquiera de éstas, teóricamente podría permitir el cálculo de las otras dos. Los dispositivos más baratos y fáciles de usar para medir las vibraciones son los geófonos, y con estos dispositivos la vibración es medida en términos de velocidad de partículas y tiene la unidad de mm/s (pulgadas/s en USA). La construcción y funcionamiento de los sensores es discutida en secciones posteriores de este manual.

La amplitud de la vibración, medida como velocidad de partícula, es universalmente considerada como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso, y por lo tanto considerado como el mejor indicador del potencial daño y el potencial efecto de fragmentación en la roca.

### 2.2.6.3.3 Duración de las vibraciones

La duración de la vibración depende de dos factores principales – la duración de la tronadura y la distancia del punto de monitoreo a la tronadura. Para asegurar que el peak de velocidad de vibraciones (generado por una tronadura) sea registrado y que la cantidad máxima de información pueda ser extraída de un registro de vibración, es importante que se registre completamente la duración de la onda. Un buen registro de vibración mostrará un tiempo quieto previo al comienzo del registro de vibración, un completo detalle de la onda de vibración, y un tiempo después del paso de la onda, cuando el terreno ha vuelto a su estado de quietud inicial.

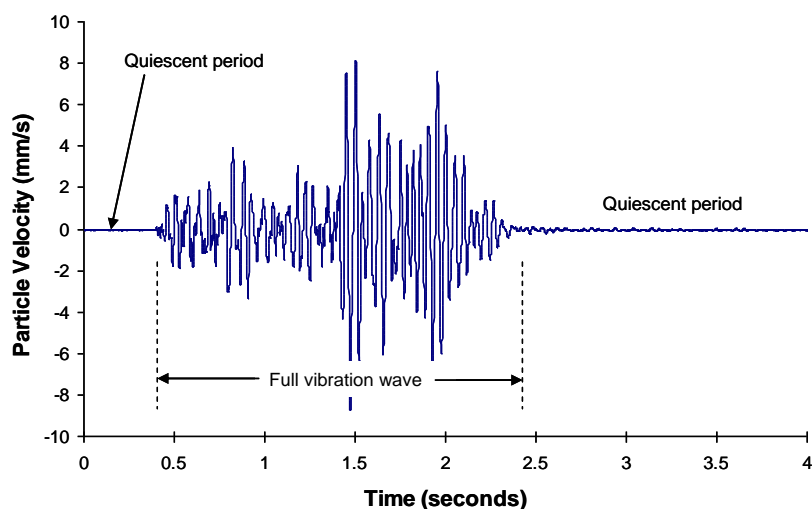


Figura N° 12: Onda completa de vibración

Fuente: Cintex (2005).

La onda total de vibración, que es medida a partir de una tronadura de producción, es el resultado de pulsos individuales producidos por cada pozo de tronadura combinados todos en el punto de medición. El modelo en el cual ellas se combinan para formar la onda resultante variará de acuerdo a la dirección y distancia de la tronadura, por lo tanto, dos registros de la misma tronadura no producirán la misma onda de vibración. La



duración de la vibración será un poco mayor que la duración de la tronadura (es decir el tiempo entre la detonación del primer y último pozo). Normalmente la duración de la vibración es alrededor de 200 a 300 ms más larga que la duración de la tronadura, debido al tiempo requerido para que la vibración llegue desde el último pozo detonado al punto de medición. La duración de la vibración se incrementa con el aumento de la distancia de propagación, ya que en grandes distancias, la refracción y reflexión de la onda se combinan con la onda directa, y un lento movimiento de ondas de superficie y ondas de corte comienzan a aumentar, separadas del rápido movimiento de las ondas de cuerpo. A 500 metros la onda de vibración puede ser de 500 a 1000 ms más larga que la duración de la tronadura.

#### 2.2.6.3.4 Longitud de onda de vibración

La longitud de onda de una vibración es la distancia recorrida por la onda de vibración durante un ciclo completo de compresión y tensión, es decir un Periodo de la Onda. La longitud de onda es un factor importante a considerar durante el modelamiento, y durante discusiones del potencial daño que pueden causar las ondas de vibraciones sobre las estructuras de la roca. La longitud de onda,  $\lambda$ , se puede calcular a partir de una onda de vibración con una frecuencia única,  $f$ , (es decir una onda armónica simple) por la

fórmula  $\lambda = \frac{V_p}{f}$  donde  $V_p$  es la velocidad de propagación de la onda P.

#### 2.2.6.3.5 Velocidad de propagación

La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda se desplaza a través de la roca. Esta velocidad puede ser medida utilizando dos geófonos ubicados a diferentes distancias de la tronadura, y mediante la medición de la diferencia de tiempo de arribo de cada señal.

Cuando se usan múltiples geófonos para medir velocidad de propagación, la distancia de separación de los geófonos debe ser lo suficientemente grande para permitir un cálculo más preciso.

En la figura 14, los geófonos están separados 300 metros, y la diferencia de tiempo de arribo,  $\Delta t$ , es de 80 ms, correspondiendo a una velocidad de propagación de 3.750 m/s. La velocidad de propagación de onda P,  $V_p$ , se calcula usando la ecuación simple  $V_p = s/t$ , donde  $s$  es la distancia de propagación y  $t$  es el tiempo de propagación.

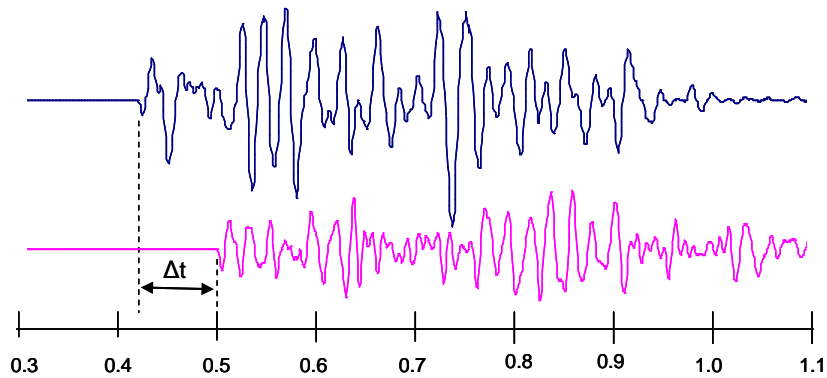


Figura N° 13: Estimación de la velocidad de propagación usando dos geófonos separados a 300 metros

Fuente: Cintex (2005).

La velocidad del sonido en el agua es aproximadamente de 1500 m/s, y la velocidad del sonido en el aire es de 334 m/s aproximadamente. La mayoría de las rocas tienen una velocidad de propagación entre 3000 m/s y 5000 m/s. Mediciones de la velocidad de propagación en roca menores que 1500 m/s son consideradas poco confiables, y se debe revisar cuidadosamente el sistema de medición antes de aceptar un valor tan bajo, ya que ellas implican un grado de fracturamiento muy alto y que las distancias de transmisión de vibración sean probablemente muy cortas. Mediciones de velocidades de propagación que excedan los 6000 m/s son consideradas también poco confiables, y nuevamente los sistemas de medición debieran ser cuidadosamente analizados antes de aceptar dichos valores tan altos.

## 2.2.6.4 Tipos de ondas de vibración

### 2.2.6.4.1 Ondas compresionales u ondas P

ISEE (2008) indica que: Es la más rápida de estas y la primera en llegar es una onda compresional u onda P (en los inicios de la sismología, se llamaba “Primare” en latín, es decir, onda primaria). Se trata del mismo tipo de onda que transmite el sonido a través del aire o del agua. En diferentes tipos de rocas viajan alrededor desde aproximadamente 1830m/s hasta alrededor 6100m/s. A menudo las ondas P tendrán la frecuencia más alta y el desplazamiento más corto.

Vásquez (2013) señala que: La onda que viaja a mayor velocidad, deformando volumétricamente la roca en la dirección de su propagación. A manera de ilustrar el movimiento que experimenta las partículas dentro de la onda P, consideramos una varilla de acero la cual es golpeada en un extremo, dando lugar al movimiento de las partículas de la barra hacia adelante y atrás mientras que el pulso de compresión viaja a lo largo de la barra; es decir, las partículas de la onda se mueven en la misma dirección de la onda. El movimiento de la onda P se ilustra en la figura 14.

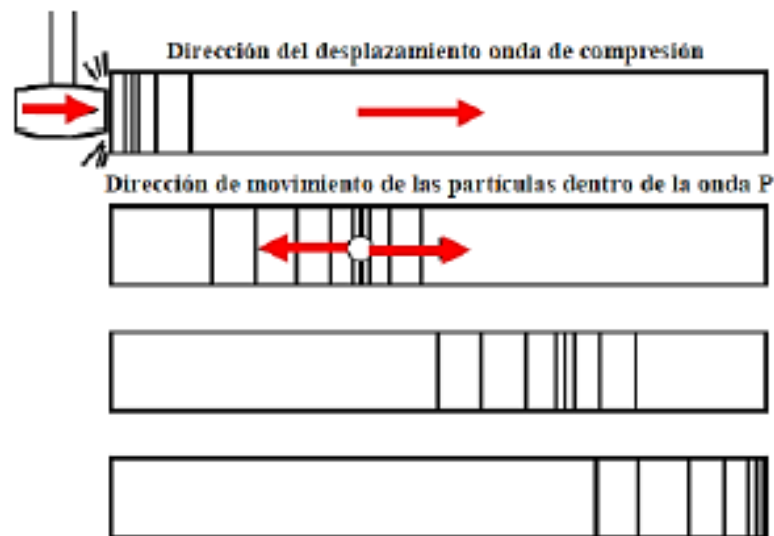


Figura N° 14: Movimiento de las partículas dentro de la onda P

Fuente: Vásquez (2013)

#### 2.2.6.4.2 Ondas transversales u ondas S

ISEE (2008) indica que: Luego de las ondas P viene las ondas Transversales u ondas S (en el inicio de la sismología, la S iba por “second” en latín, es decir, por llegadas secundarias) estas ondas se desplazan a aproximadamente  $3/5$  de la velocidad de las ondas P. Además de las ondas S generalmente tendrán frecuencias más bajas y desplazamientos más largos que las ondas P.

Vásquez (2013) también indica que: Luego de la onda P se propaga la onda S. esta onda provoca una deformación de la masa rocosa perpendicular (transversal) a la dirección de su propagación, sin modificar el volumen de los materiales a su paso. El movimiento de las partículas dentro de la onda S puede ser ilustrado mediante la agitación

de una cuerda por un extremo, dando lugar al desplazamiento de la onda a lo largo de la cuerda, sin embargo, las partículas dentro de la onda se mueven perpendicularmente a la dirección de movimiento de la onda. El movimiento de la onda S se ilustra en la figura 15.



Figura N° 15: Movimiento de las partículas dentro de la onda S

Fuente: Vásquez (2013)

Contreras (2009) señala que: Las ondas P pueden desplazarse a través de un sólido, un líquido o gas, porque que estas materias resisten compresión o cambios de volumen. En cambio, las ondas S viajan sólo en los sólidos, puesto que su existencia depende de módulos de corte o de la habilidad del material transmisor para resistir cambios de forma. Ambas ondas P y S viajan en trayectoria esférica desde el cráter, a través del cuerpo de los materiales, por dicha razón a esta clase de ondas también se les denomina ondas de cuerpo.

#### 2.2.6.4.4 Ondas rayleigh u ondas R

Vásquez (2013) nos indica que: Es la más importante y la más común de las ondas superficiales (llamada así en honor a Lord Rayleigh quien fue primero en escribirla 50 matemáticamente). Normalmente, las ondas Rayleigh se desplazan alrededor de 0.9 veces de la velocidad de las ondas S.

El movimiento de las partículas dentro de la onda es del tipo elíptico retrógrado en un plano vertical en el mismo sentido que la dirección de propagación. El movimiento de la onda S se ilustra en la figura 15.

#### 2.2.6.4.5 Ondas love u ondas L

Vásquez (2013) indica que: Existe otro tipo de ondas superficiales son las Love, cuyo tipo de oscilación es semejante al de las Rayleigh, elíptica, pero en un plano horizontal. Su velocidad es similar a la de las ondas Rayleigh.

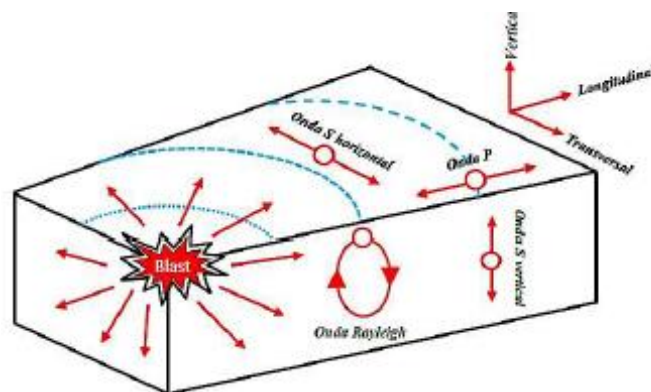


Figura N° 16: Movimiento de las partículas dentro de diferentes tipos de onda

Fuente: Vásquez (2013).

Contreras (2009) precisa que: Cuando las ondas de cuerpo alcanzan la superficie de la tierra, ésta experimenta movimientos verticales y horizontales. Las ondas así producidas son denominadas “elásticas de superficie”.

Vásquez (2013) señala que: Diversos estudios realizados han demostrado que la energía sísmica de alta frecuencia es absorbida más rápidamente que la de baja frecuencia, de modo que la energía contenida en las ondas sísmicas estará más concentrada en intervalos correspondientes a bajas frecuencias a medida que nos alejemos del foco generador. A pesar de todo lo dicho, hay que tener presente que en los análisis de vibraciones no suele llegarse a distinguir entre si los diferentes tipos de ondas que llegan al geófono (Pascual de Blas, 2000).

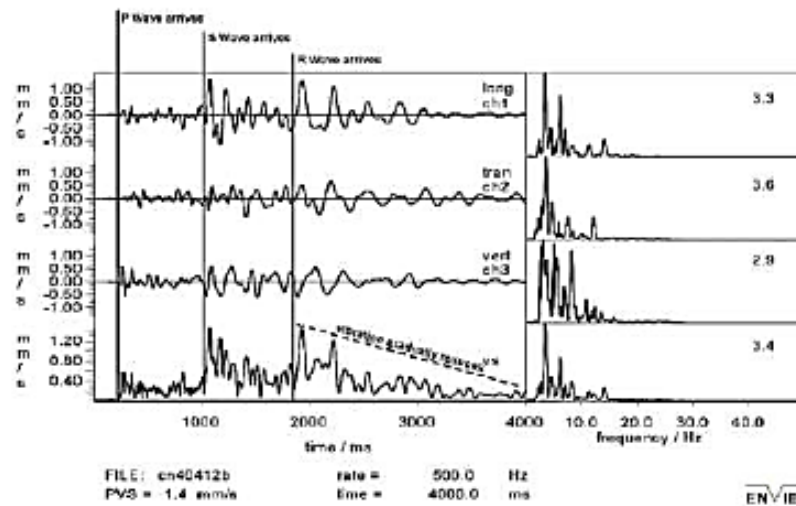
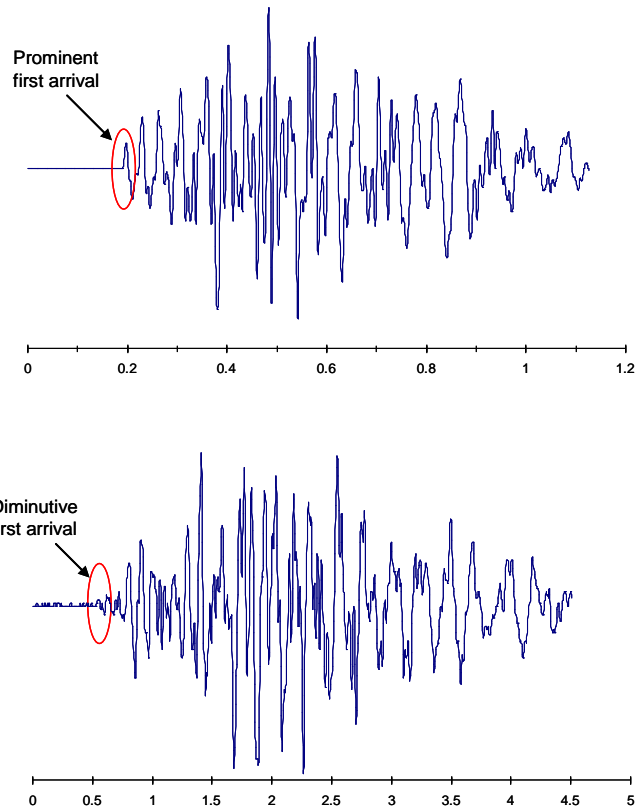


Figura N° 17: Registro de la llegada de las ondas P, S y R para la detonación de un único barreno (Richard & Moore)

Fuente: Vásquez (2013).

#### 2.2.6.5 Primer arribo de ondas

La primera onda que llega al monitor será siempre la onda P, ya que ésta, de todos los tipos de onda, es la que viaja más rápido. Sin embargo ésta puede no ser la onda con la mayor amplitud, de tal manera que no siempre es fácil de identificar. La Figura 18 presenta dos ondas de vibraciones, donde la primera indica un arribo destacado de la onda siendo su tiempo de llegada y amplitud fácil de determinar. El segundo diagrama muestra una diminuta llegada de la primera onda, donde se dificulta determinar el tiempo de arribo y su amplitud.



*Figura N° 18:* El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar

Fuente: Cintex (2005).

La primera onda en llegar será siempre la onda P la cual viaja una distancia más corta al geófono. Sin embargo, si la onda pasa a través de un material altamente fracturado, su amplitud puede ser muy pequeña, y otra onda que realice un recorrido más largo a través de una roca más competente llegará con un pequeño atraso y con una amplitud mucho mayor. Esto puede llevar a estimaciones erróneas de velocidad de propagación, cuando la amplitud del primer arribo es muy baja y difícil de identificar. Cuando estimamos velocidades de las ondas, el momento de la llegada de la primera onda es como se indica en la Figura 19.

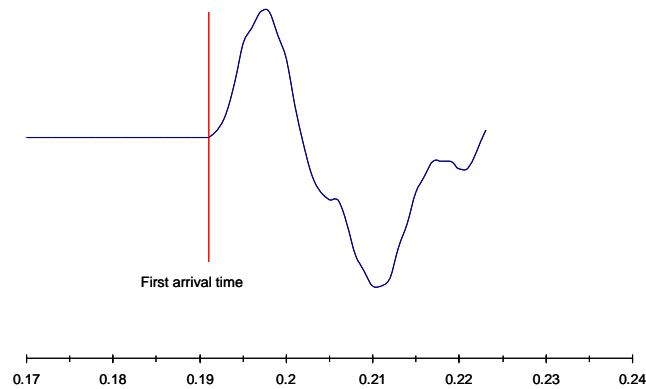


Figura N° 19: Momento de arribo de la onda

Fuente: Cintex (2005).

### 2.2.6.6 Las unidades de vibraciones

Debido a que la vibración es un campo de esfuerzos oscilantes, el movimiento resultante de la partícula es en las tres direcciones ortogonales, y puede ser detectado utilizando diferentes dispositivos. Cada dispositivo tendrá las características de vibración (amplitud, duración y frecuencia) de acuerdo a las características de respuesta del dispositivo de medición utilizado. La mayoría de los instrumentos utilizados para medir vibraciones utilizan geófonos, los cuales miden la velocidad del movimiento de las partículas, o acelerómetros los cuales miden la aceleración del movimiento de la partícula. Algunos sistemas de medición permiten medir desplazamiento de la partícula.

#### 2.2.6.6.4 Velocidad de las vibraciones

La mayoría de los instrumentos que monitorean vibraciones por tronaduras utilizan geófonos, y por lo tanto producen una señal de voltaje que varía con el tiempo,  $V(t)$ , proporcional a la velocidad del movimiento de la partícula,  $v(t)$ , la cual también varía con el tiempo. La constante de proporcionalidad depende de la sensibilidad del geófono usado para hacer la medición (ver sección 3). La velocidad es el método preferido de medición de las vibraciones generadas por tronadura, ya que la velocidad de vibración es proporcional al esfuerzo y por lo tanto al potencial daño.

Si la onda de vibración es continua y armónica simple, (es decir una única frecuencia sinusoidal,  $f$ ), ésta puede ser representada por una simple ecuación, donde  $A_0$  representa el peak de amplitud de la velocidad de partícula. En la práctica, el peak de amplitud está controlado fuertemente por la cantidad de explosivo por pozo, ya que esto controla la fuente de energía que generan posteriormente las vibraciones. El otro factor que tiene una



gran influencia en la amplitud de la vibración, a diferentes distancias, es la atenuación del macizo rocoso, ya que esto controla cuan rápidamente se disipa la energía. La atenuación del macizo rocoso depende de factores tales como la cantidad de fracturas o grietas en el macizo (las grietas generan una gran pérdida de energía) y el módulo de la roca. Rocas con un bajo Módulo tienden a presentar una deformación plástica, resultando en una gran pérdida de energía, mientras que rocas con un alto módulo se comportan de una manera elástica removiendo pequeñas cantidades de energía cuando pasa la onda.

### 2.2.6.7 Vibraciones y esfuerzos

El fundamento para usar el peak de velocidad de partículas, PPV, es debido a que la mayoría de los análisis consideran que el daño, o potencial daño, está relacionado con la velocidad de la onda P,  $V_p$ , y la deformación inducida,  $\varepsilon$ , es decir, la velocidad de vibración tiene una correlación directa con el esfuerzo cuando la onda está viajando como una onda plana y la deformación es elástica.

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

Si el macizo rocoso es duro y quebradizo, y presenta un comportamiento elástico hasta el momento de su ruptura, la velocidad máxima de partícula que la roca puede tolerar antes de su ruptura puede ser calculada a partir de:

$$PPV_{max} = \varepsilon_{max} V_p = \frac{\sigma_{max} V_p}{E}$$

Puesto que las vibraciones viajan con una componente sinusoidal de compresión y tensión aproximadamente iguales y la resistencia a la tensión es siempre mucho menor que la resistencia a la compresión, el máximo esfuerzo que la roca puede resistir es el esfuerzo a la tensión. Este valor es difícil de medir, por lo tanto, es normal estimar la resistencia a la tensión a partir de la resistencia a la compresión, UCS, (típicamente en el rango de 1/10 a 1/20 de la resistencia a la compresión), o a partir de una medición indirecta tal como el Índice de Resistencia Brasileño. Como resultado de esto, uno puede estimar la velocidad de partícula que probablemente causará una ruptura por tensión, utilizando la siguiente ecuación:



$$PPV_{max} = \varepsilon_{max} V_p = \frac{\sigma_t V_p}{E} \approx \frac{UCS \times V_p}{12 \times E}$$

Precaución: En la ecuación anterior, el factor de 12 se ha usado como la razón entre la resistencia a la compresión y la tensión. Altos valores generan estimaciones de PPV críticos más conservadores (es decir bajos valores de PPV) y pueden ser más apropiados en zonas donde la estabilidad es crítica y donde existe incertidumbre acerca del valor real de la resistencia a la tensión.

Una onda planar es una onda que tiene un frente de onda plano, condición que se aproxima a grandes distancias de la tronadura (en campo lejano), pero la cual no es aplicable cercano a las tronaduras, donde el frente de onda es curvo (campo cercano). A pesar de esta limitación muchos autores, incluyendo Holmberg y Persson y Dowding, utilizan la relación para obtener un valor aproximado de la probable velocidad crítica de partícula que quiebre el macizo rocoso cercano a los pozos de tronadura.

Como una indicación, el quiebre del concreto de 40 MPa generalmente es esperado por los ingenieros civiles que ocurra alrededor de los 80 microstrain es decir  $\varepsilon = 80 \cdot 10^{-6}$ . La velocidad de onda P (3930 m/s) y el módulo de Young (37 GPa) son también bien conocidos para el concreto Portland, llevando a estimar velocidades críticas entre 180 mm/s y 320 mm/s, dependiendo de la antigüedad del concreto. Esta velocidad crítica estimada, parece estar de acuerdo con los datos encontrados en la literatura. Además estudios por Holmberg & Persson encontraron que el agrietamiento ocurre en el granito cuando se alcanzan niveles de vibración del orden de los 700 a 1000 mm/s. Usando valores de UCS = 200 MPa, E = 90 GPa, y  $V_p = 5200$  m/s para el granito (valores de laboratorio obtenidos de un estudio en una cantera de granito), a partir de estos valores se obtiene un valor estimado de la velocidad crítica de 960 mm/s, por lo que se puede ver que la ecuación que considera un plano de onda único, genera una estimación razonable de la velocidad de partículas crítica.

## 2.2.7 CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES

### 2.2.7.1 Vibraciones de un solo taladro

La respuesta de vibración de un pozo único de tronadura representa la forma de onda más simple que puede ser analizada en una operación normal de tronadura; sin embargo, puede ser interesante comparar la onda de un pozo único de tronadura con la onda generada por una carga esférica (una carga de longitud igual al diámetro). En tronaduras que tienen muchos pozos, se considera generalmente que cada pozo genera una onda “elemental” igual, separadas en el tiempo por los retardos y en el espacio por las dimensiones del burden y espaciamiento. En la figura se presenta la onda generada por la detonación de un pozo de aproximadamente 15 metros de Anfo (4” de diámetro) medida a una distancia aproximada de 15 a 20 metros, en roca dura.

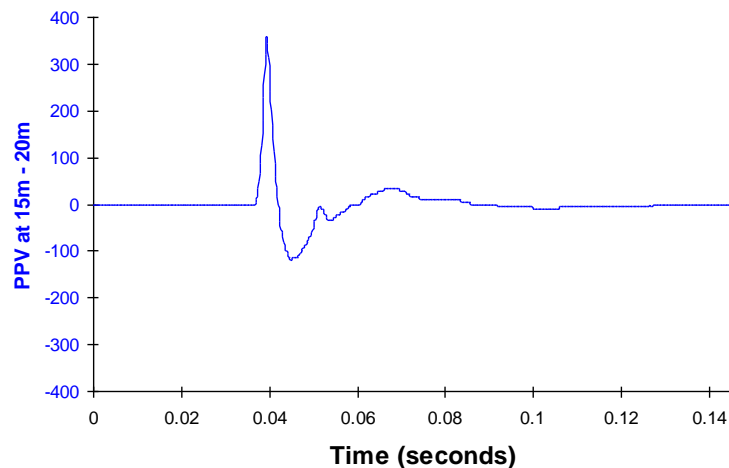


Figura N° 20: onda de un pozo a 20 metros

Fuente: Cintex (2005).

El pulso tiene una forma única, pero a pesar de que ésta es una oscilación natural no se asemeja a una onda sinusoidal, siendo más representativa a una forma de onda no simétrica. Es posible que la diferencia en la frecuencia entre la componente de compresión (+) y la tensión (-) de la onda pueda indicar la diferencia entre el grado de compresión (controlado por la longitud de carga y la velocidad de detonación), y el grado de relajación (controlado por el módulo de elasticidad de la roca y la presión de confinamiento de los gases) de la roca después que la presión de detonación se haya disipado. Características importantes de la forma de onda se pueden resumir en:



- Diferentes frecuencias en las componentes de compresión (alta frecuencia) y tensión (baja frecuencia);
- Diferentes amplitudes en la componente de compresión (360 mm/s) y tensión (115 mm/s);
- Duración de la señal (aprox. 50 ms), comparado con el tiempo de detonación de la columna de explosivo (aprox. 3,5 ms).

## 2.2.8 Instrumentos para monitorear las vibraciones

La instrumentación que se utiliza para medir las vibraciones de la roca inducidas por tronadura, consiste de los siguientes componentes:

- **TRANSDUCTORES:** Geófonos o Acelerómetros que se instalan en forma solidaria a la roca
- **UN SISTEMA DE CABLES:** encargados de llevar la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo
- **UN EQUIPO DE ADQUISICIÓN:** el cual recibe la señal y la guarda en memoria
- **UN COMPUTADOR:** el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo Monitor, y su análisis posterior

### 2.2.8.1 Transductores de vibraciones

Existe una gran variedad de transductores disponibles comercialmente; estas unidades tienen la capacidad para medir velocidad o aceleración de partículas. Estos convierten un pequeño movimiento físico, generado durante el paso de la vibración, a una señal de voltaje equivalente según sea su sensibilidad. Los transductores deben reunir algunas consideraciones prácticas, como son:

- **Costo:** En muchos casos es necesario instalar transductores permanentemente en el macizo rocoso, lo que evita efectos superficiales y permite un análisis completo de la tronadura. Bajo estas circunstancias, los transductores no son recuperables, y el costo de cada unidad debe ser minimizado.



- **Precisión:** Gran parte del tiempo, esfuerzo y recursos están dedicados a la instalación de los transductores de vibración, es importante entonces que ellos sean confiables en el largo plazo.
- **Relación señal ruido:** Si la salida del transductor es grande en relación a los niveles de ruidos, los problemas detectados en minas subterráneas respecto de campos magnéticos pueden ser minimizados.

En la práctica, la selección de los transductores es un compromiso ya que no existen unidades disponibles que reúnan todas las especificaciones indicadas previamente. Transductores de velocidad del tipo usado en prospecciones geofísicas y sismológicas son baratos, confiables y tienen una alta relación señal-ruido, pero soportan un rango dinámico muy limitado. Los dos tipos básicos de transductores usados para medir las vibraciones del terreno son: el acelerómetro y el geófono.

#### 2.2.8.1.1 Acelerómetros

Los acelerómetros del tipo piezo - eléctrico tienen una alta frecuencia natural y una respuesta lineal bajo su frecuencia resonante. La señal de salida es proporcional a la aceleración, la cual debe por lo general ser amplificada previamente a su grabación. Los acelerómetros reúnen los datos especificados, por lo general son livianos, robustos, pero caros. Son más complejos de usar ya que requieren equipamiento auxiliar tal como fuente de poder y pre amplificadores, los que además pueden inducir problemas de ruidos eléctricos significativos.

Los acelerómetros pueden ser recomendables cuando los transductores son instalados en superficies, siendo necesario indicar, sin embargo, que es necesaria cierta experiencia para la interpretación de los registros de aceleración, en particular a bajas frecuencias.

#### Características generales:

- Mejor respuesta en un amplio rango de frecuencias (1Hz a 20.000Hz).
- Su unidad de medida es el g ( $1g=9.8 \text{ m/s}^2$ ), con rangos de 0-250g.
- No poseen partes móviles, lo que resulta en una mayor fiabilidad.



- La deformación del cristal piezoeléctrico genera voltajes muy pequeños que deben amplificarse con elementos externos.
- Son de pequeño tamaño.
- Alto costo (aprox. US\$ 1.000)

#### **2.2.8.1.2 Geófonos**

Los geófonos dan una medición directa de la velocidad, y consisten por lo general de un sistema de bobina móvil soportadas por resorte, y un imán fijo. Al contrario que el acelerómetro, el geófono opera sobre su frecuencia natural. Cuando se miden frecuencias muy bajas, la salida se ve influenciada por sus características de respuesta a la frecuencia, y la señal resultante en términos del nivel de vibración debe ser corregida adecuadamente.

El geófono no es tan robusto como el acelerómetro, por lo que puede eventualmente dañarse si es maltratado o mal manipulado. Los geófonos son relativamente baratos y su señal de salida es simple de analizar, no requieren fuente de poder adicional y normalmente no es necesario pre amplificar su señal, previa a su grabación.

Cuando los transductores a instalar no son recuperables, es preferible utilizar geófonos sensibles a la velocidad. Poco es lo que se puede hacer para mejorar el rango de respuesta dinámica de éstos, por lo tanto, debe tenerse el cuidado de no usarlos donde sus especificaciones probablemente puedan ser excedidas.

Mediante la comparación entre la señal obtenida por un geófono y la señal integrada registrada por un acelerómetro en el mismo punto, se ha demostrado que los geófonos están inhabilitados para responder a altas frecuencias, lo que sin embargo no es impedimento en su capacidad para medir velocidad de partículas según los requerimientos de los datos antes mencionados. Como regla general se puede establecer que resulta inadecuado usar un transductor de velocidad del tipo bobina móvil, cuando las frecuencias dominantes sean probablemente muy superiores a los 500Hz.

En primera instancia el equipo de vibraciones debe ser tal que los geófonos asociados a la medición sean los adecuados para medir el nivel de vibraciones esperado, es decir si su sensibilidad es la adecuada. Para tal efecto se debe conocer los niveles máximos



esperados en la medición, tanto en frecuencia como velocidad, para determinar si los geófonos son aptos para ello.

#### **Características generales:**

- Su unidad de medida es el Volt/mm/s
- Entregan una medición directa de la velocidad
- Miden bien en el rango de 1mm/s hasta 1200mm/s
- Su respuesta a la frecuencia varía entre 4.5 a 1000 Hz
- La sensibilidad varía entre 0.003Volts/[mm/s] a 0.041Volts/[mm/s]
- Bajo costo (aprox. US\$ 100).

#### **2.2.8.2 Equipo de adquisición**

Los transductores son comúnmente instalados en un arreglo triaxial, y la señal de cada uno es recolectada separadamente. En algunos casos, se requieren múltiples canales, cada uno de los cuales puede ser amplificado o atenuado. Después de esta amplificación (o atenuación), las señales de salidas de los transductores son grabadas como una señal analógica o convertidas en señal digital y grabadas.

Se han empleado comúnmente tanto grabadoras como un Monitor de Vibraciones del tipo BLASTRONICS HMX de 8 a 16 canales

El tipo de equipo seleccionado debe en general poseer las siguientes características principales:

- Múltiples canales de adquisición
- Diferentes rangos de entrada para cada canal
- Cubrir un ancho de banda entre 1Hz a 5kHz
- Velocidad de conversión (AD) y almacenamiento.
- Bajo consumo de energía que facilite su independencia
- Algún grado de portabilidad (tamaño y peso)
- Iniciación remota o automática (según un umbral o circuito abierto)
- Adecuada protección física para el trabajo en terreno



### 2.2.8.3 Equipo de análisis

La información de vibraciones es comúnmente realizada en un computador personal del tipo IBM-PC Compatible.

El análisis de los datos requiere de un conjunto Computador y Software con capacidades para un manejo integral de la forma de onda, y donde las principales tareas que deben realizar, son las siguientes:

- Desplegar múltiples señales
- Amplificación de partes de la señal total (efecto zoom)
- Cursor móvil sobre la señal para un análisis acucioso de los tiempos y amplitudes
- Derivación, Integración de Inversión de las ondas
- Generar el vector suma de tres componentes ortogonales
- Despliegue de las señales en el dominio de la frecuencia
- Filtro de frecuencia
- Comunicación externa hacia impresora o plotter

## 2.2.9 VELOCIDAD PICO PARTÍCULA

### 2.2.9.1 Ley de transmisividad

La velocidad de vibración (V), o nivel de vibración en un punto, se encuentra en función directa con la carga del explosivo (Q) y en función inversa de la distancia (D) entre el punto de disparo y de registro, esta relación se expresa en la siguiente ecuación.

$$V = K \cdot Q^{\alpha} \cdot D^{\beta}$$

Donde:

K,  $\alpha$  y  $\beta$ : Son constantes empíricas que dependen de la geología del terreno, la eficiencia del explosivo utilizado, la geometría de la malla de perforación y voladura y la secuencia de voladura.

Por lo que es importante tener en cuenta que pasa cada zona de estudio los valores de estas constantes diferirán una de otra.



### 2.2.9.2 Modelamiento de la velocidad pico partícula

Una de las etapas fundamentales en el estudio y control de las vibraciones generadas por voladuras es la constituida por la determinación de las leyes que gobiernan la amortiguación de las mismas.

Una de las primeras ecuaciones de propagación fue sugerida por Morris (1950) y obedece a la expresión:

$$A = K \cdot \frac{\sqrt{Q}}{D}$$

Donde:

$A$ : Es la amplitud máxima de partícula en mm,

$Q$ : Es el peso de la carga en kg,

$D$ : Es la distancia desde la voladura al punto de registro en m,

$K$ : Es la constante característica del lugar que varía desde 0.57 a 3.40.

Leconte (1967) sugiere: En una revisión de las técnicas de control de las vibraciones, la sustitución de la amplitud máxima de la partícula de la fórmula de Morris por el vector suma de la velocidad de partícula, tomando la ecuación anterior la forma siguiente:

$$V = K_v \cdot \frac{\sqrt{Q}}{D}$$

En un sentido general y tomando como parámetro más característico de las vibraciones la velocidad de partícula, se afirmaba que la intensidad de las ondas sísmicas y la distancia escalada (cociente de la distancia y la carga elevada a un exponente) seguían la siguiente ley:



$$V = K \cdot \left( \frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-\alpha}$$

Donde:

$V$ : Es la velocidad pico de partícula en mm,

$Q$ : Es la carga máxima por retardo en kg,

$D$ : Es la distancia desde la voladura al punto de registro en m,

$K$  y  $\alpha$ : Son constantes empíricas.

Si se utilizan cargas de explosivo cilíndricas, se ha visto por análisis dimensional que las distancias deben de ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga, Devine (1962), Devine y Duvall (1963), llegándose a definir la siguiente ley de amortiguación:

$$V = K \cdot \left( \frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-\alpha}$$

Esta expresión ha sido una de las más usadas hasta la actualidad por numerosos investigadores, organismos oficiales, usuarios y empresas fabricantes de explosivos. Otros autores como Atewel et al (1965), Holmberg y Persson (1978), Shoop y Daemen (1983) no consideran una simetría de carga particular y utilizan la siguiente expresión general:

$$V = K \cdot Q^{\alpha} \cdot D^{\beta}$$

En puntos muy próximos a las cargas de explosivo, un captador de vibraciones no recibe la igual contribución de energía de todas las porciones elementales de la carga. Por lo que para estimar la vibración resultante en puntos muy próximos a la carga, se aplica el modelo matemático de campo cercano propuesto por Holmberg y Persson (1979), que lo detallaremos más adelante.



La escuela Sueca, encabezada por Langerfors, Kilhström y Gustfsson, relaciona los niveles de carga,  $Q/D^{3/2}$ , con la velocidad de partícula utilizando la expresión:

$$V = K. \left( \frac{Q}{DS^{3/2}} \right)^{1/2}$$

Lundborg (1971), basándose en datos del U.S. Bureau of Mines (Nicholls et al, 1971), encontró una ley  $V=f(D)$ , llegando a proponer la siguiente ecuación:

$$\log V = 4.08 + 0.14 \log Q - 2.06 \log D + 0.22 \log Q \cdot \log D$$

Cuya representación es una superficie tridimensional. Una simplificación consiste en la adaptación de dicha superficie en un plano, obteniéndose la expresión:

$$\log V = 2.86 + 0.66 \log Q - 1.54 \log D$$

Las investigaciones efectuadas en los últimos años han permitido realizar una mejor predicción que con las rectas típicas representadas en gráficos bilogarítmicos, utilizando regresiones lineales y múltiples siguiendo las tendencias de las parejas de datos, Just y Free (1980), López Jimeno, et al (1985).

Aunque la caída exponencial fue desde hace tiempo reconocida, e.g. Duvall y Petkof (1959), no ha sido considerada en los estimadores hasta épocas recientes.

Just y Free (1980) basándose: En observaciones de voladuras controladas, proponen la siguiente ley de propagación:

$$V = K. \left( \frac{Q}{D^{1/3}} \right)^{-1} \cdot e^{-\alpha(D/Q^{1/3})}$$

Suponen que las ondas internas son las que predominan y que existe divergencia esférica.

En nuestro caso los modelos matemáticos que utilizaremos para modelar nuestra ley de vibración es el modelo de Devine o modelo de campo lejano y el modelo de Holmberg y Persson o modelo de campo cercano, que lo formularemos utilizando las constantes empíricas halladas con el modelo de Devine. A continuación describimos cada uno de ellos:

### 2.2.9.2.1 Modelo de campo lejano

Cuando nos referimos a Campo Lejano nos estamos refiriendo a puntos de monitoreo cuyas distancias a la fuente de vibración son mayores a tres veces la longitud de la carga del explosivo ( $D > 3Lc$ ), donde  $Lc$  representa la longitud de la carga del explosivo distribuido cilíndricamente; por lo que el modelo de Devine se ajusta mejor a aquellos puntos alejados a las voladuras, donde la carga máxima por retardo se corrige por análisis dimensional por la raíz cuadrada.

De todos los modelos matemáticos que predicen el nivel de vibración en puntos alejados a la voladura, el modelo de Devine es uno de los más utilizados a nivel mundial por las empresas fabricantes de explosivos, dicho modelo está expresado por la Ecuación:

$$VPP = K. \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha}$$

Donde:

$VPP$ : Es la velocidad pico de partícula expresada en mm/s.

$D$ : Es la distancia desde el punto de monitoreo hasta la fuente de vibración en m.

$Q$ : Es la carga máxima por retardo en kg.

$K$  y  $\alpha$ : Son las constantes empíricas que dependen de las características del macizo.

El término  $(D/\sqrt{Q})$  es lo que se conoce como la distancia escalar (DE), de este modo reemplazando  $DE$  en la ecuación anterior se tiene lo siguiente:



$$VPP = K. (DE)^{-\alpha}$$

Esta ecuación es la que utilizaremos para predecir el nivel de vibración y que nos permitirá obtener las constantes  $K$  y  $\alpha$  para cada labor monitoreada.

A pesar de que éste modelo tiene buenos resultados en el campo lejano, presenta las siguientes restricciones:

- No es recomendable utilizar el modelo en macizos altamente fracturados y con estructuras predominantes.
- No considera la secuencia de salida de los tiros ni la efectividad de los retardos.
- Los valores de las constantes  $K$  y  $\alpha$  son muy variables para distintos tipos de roca y distintas faenas mineras. Esta gran variabilidad de la constante  $K$  (de 99 hasta un máximo de 703) y para la constante  $\alpha$  (desde 1.54 hasta 2.49), determinan que el uso indiscriminado de estos modelos y la transferencia de estos datos desde una mina a otra o desde un sector a otro en la misma mina puede significar estimar un gran margen de error.

Por lo tanto, para obtener resultados satisfactorios de la predicción de la velocidad pico de partícula se deben realizar campañas de monitoreo independientes para cada tipo de mina e incluso para cada tipo de roca.

#### **2.2.9.2.2 Modelo de campo cercano**

Investigaciones pasadas han establecido que el modelo de distancia escalar (modelo de campo lejano) generalmente sobre estima los valores de la velocidad pico de partícula en zonas muy cercanas a la voladura, debido que considera la carga explosiva total como una fuente instantánea.

Por esta razón, Holmberg y Persson (1979) introdujeron un modelo modificado que: Al contrario del modelo de campo lejano, considera que la velocidad pico de partícula en un punto cercano a la columna de carga de un taladro es el resultado de la sumatoria de las velocidades pico de partícula de cada una de las cargas infinitesimales, de densidad

lineal constante, sobre toda la longitud de carga; remplazando de esta manera el término de la carga operante del modelo de Devine por el de densidad lineal de carga explosiva.

Desde ese entonces muchos investigadores e ingenieros han adoptado el modelo de campo cercano como un modelo aceptable para predecir la vibración en distancias muy cercas a la fuente de vibración.

La geometría de la aproximación del modelo y la forma de la ecuación general que lo define se muestra a continuación:

$$VPP = K \left[ l \int_{x_s}^{x_s+H} \frac{dx}{[r_0^2 + (x - x_0)^2]^{\beta/2\alpha}} \right]^{-\alpha}$$

La Ecuación 1.30 se formulará utilizando las constantes  $K$  y  $\alpha$  halladas experimentalmente con el modelo de Devine, por las limitaciones que se tiene con el equipo de medición. A partir de dicha ecuación y con el criterio de daño en puntos próximos a la excavación, se podrá simular el daño generado al macizo rocoso circundante después de cada voladura y diseñar nuestros parámetros de perforación y voladura que originen el menor daño posible.

La aplicación del modelo de Holmberg y Persson (1979) requiere que: En cada caso la determinación de las constantes específicas del lugar en el que se vaya a disparar. Estas constantes se obtienen midiendo in situ y a muy corta distancia, near-field, las vibraciones generadas por el disparo de taladros cargados con cierta mezcla explosiva. Algunos valores de  $K$  y  $\alpha$  obtenidos en diferentes macizos rocosos (Mckenzie et al., 1995), (Villaescusa et al., 1997), (García Bermúdez y López Jimeno, 1999); se refleja en tabla líneas abajo.

Una aspecto que dificulta la medición de las vibraciones en el campo cercano es la distancia que debería ser aplicada entre la fuente de vibración y el punto de monitoreo. En monitoreo de voladuras complejas en el campo lejano, un punto localizado dentro del centro de la voladura puede ser designado como el punto de la fuente, ya que la distancia entre cargas es mucho menor que la distancia desde la fuente hasta el punto de monitoreo.

Bajo estas circunstancias un solo pico de forma de onda es seleccionado para representar la forma de onda de todos los taladros disparados.

Tabla N° 2

*Valores de las constantes  $K$  y  $\alpha$  para distintos tipos de roca*

Tipo de roca	K	$\alpha$
Granito masivo de Suecia	700	0.7
Granito masivo de Madrid	575	0.66
Granito diaclasado	190	0.86
Andesita	200	0.9
Arenisca resistente	400	0.78
Pizarra resistente	175	1.25
Pizarra estratificada resistente	470	1.09

(valores transversales a la estratificación)

Fuente: López (2003)

En voladuras de campo cercano, las cargas individuales contribuyen a menudo con únicas y discretas formas de onda y un rango de orientación de carga puede existir. Teóricamente, un número de distancias carga - transductor favorables puede ser elegido para determinar el modelo de regresión. Estas distancias incluyen las distancias desde el punto de observación a la carga de fondo, al punto medio de la columna de carga, o la mínima distancia a un punto dentro de la columna de carga, ocurriendo con frecuencia en el collar de carga. La intuición nos sugerirá que la distancia que más contribuye a la velocidad pico de partícula debería ser la mínima distancia.

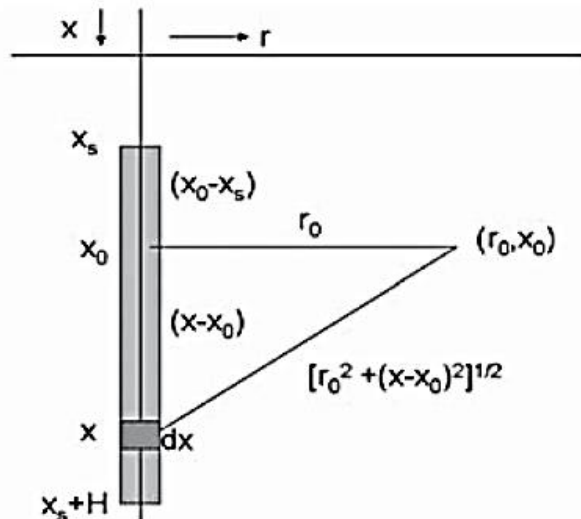


Figura N° 21: Forma geométrica del modelo de Holmberg y Persson, near-field

Fuente: Fleetwood, Villaescusa, Varden & Fragblast (2009).

### 2.2.9.2.3 Comparación entre el modelo lejano y cercano

Para el modelamiento en el campo cercano se requiere primero de datos vibracionales adquiridos lo más cercano posible a una carga explosiva típica, con geófonos o acelerómetros de un alto rango dinámico de respuesta, capacitados para medir los niveles más altos de vibración.

Por otra parte, en el proceso de análisis se ajustan los datos de vibraciones al modelo de campo cercano propuesto por Holmberg y Persson, que considera la carga explosiva en forma distribuida, cobrando especial importancia los aspectos geométricos de distancia a la carga, longitud del taco, densidad lineal del explosivo, etc., a diferencia del modelo tradicional propuesto por Devine que utiliza una sola distancia para el total de la carga explosiva, es decir, concentrada en un punto, consideración válida para distancias de más de 2 ó 3 veces la longitud de la carga explosiva.



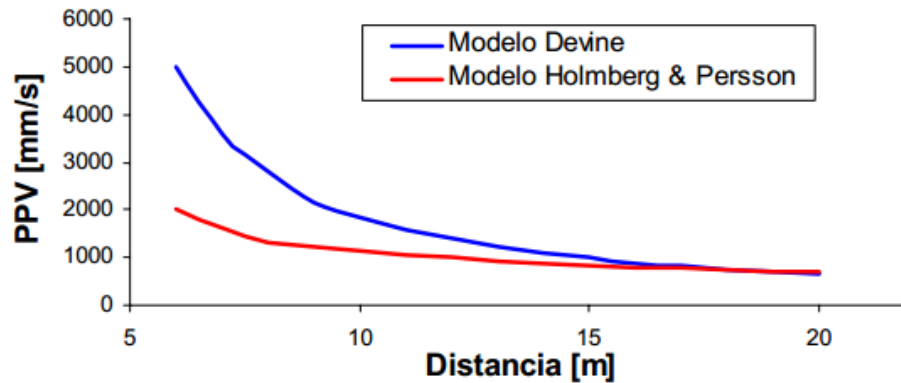


Figura N° 22: Comparación de modelos Devine y Holmberg & Persson

Fuente: Scherpenisse (1999).

En la Figura N° 25 se observa la diferencia entre ambos modelos, especialmente en la zona más cercana a la fuente donde se aprecia como el modelo de Devine sobre estima la velocidad pico de partícula.

## 2.2.10 Monitoreo de vibraciones

### 2.2.10.1 Objetivo del monitoreo de vibraciones

Monitorear las vibraciones es detectar y registrar el movimiento vibratorio de la tierra.

Estas medidas deben describir de la mejor forma el evento de vibraciones, para lo cual se requiere medir tres componentes ortogonales que definan su amplitud, velocidad y aceleración en función del tiempo.

El monitoreo de vibraciones se puede realizar para determinar sólo el nivel máximo de partículas, o si se requiere, un registro de toda la onda para determinar un modelo de vibraciones, en ambos casos es de especial interés tener consideraciones referentes al registro que se obtiene.

El registro obtenido entrega una onda producto de la vibración, medida en sus tres componentes (longitudinal, transversal y vertical), donde cada una se representa en un gráfico, donde la magnitud de la velocidad de partícula en mm/s ocupa el eje vertical y el tiempo expresado usualmente en ms el eje horizontal.

La figura muestra un registro de vibraciones donde podemos observar la gráfica de la componente longitudinal, transversal y vertical de la onda respecto al tiempo.

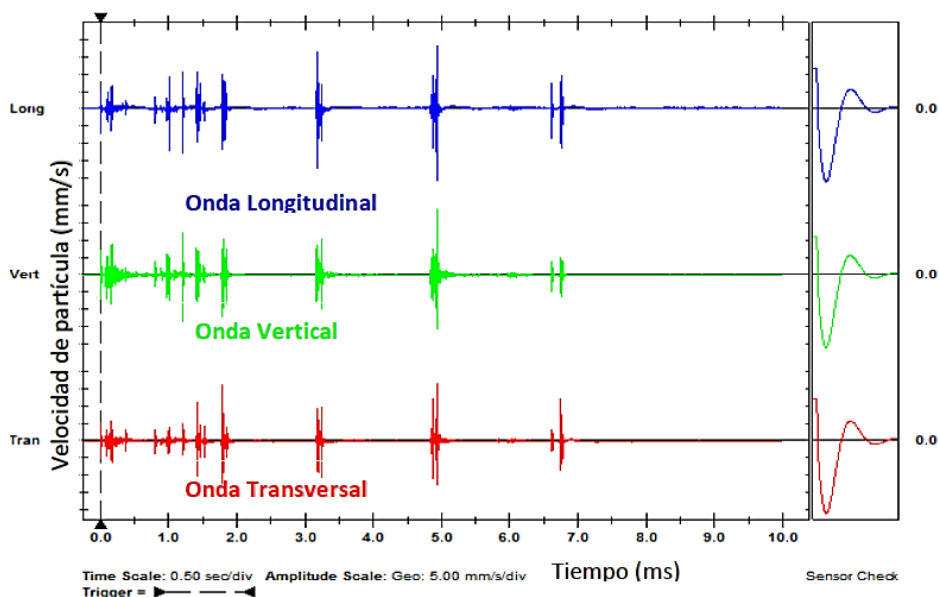


Figura N° 23: Registro de tres componentes de una forma de onda

Fuente: Cintex (2005).

## 2.2.10.2 Obtención de datos a partir de monitoreo de vibraciones

### 2.2.10.2.1 Verificación del máximo desplazamiento

A partir de estos registros se puede obtener información del nivel de vibraciones que se obtiene en cierto tiempo de la onda, lo cual puede ser asociado a un taladro o a varios taladros detonados en forma simultánea.

Sin embargo, a este nivel de vibraciones que se identifique, se debe verificar que el desplazamiento del geófono no haya superado el nivel máximo permitido (2 mm) lo cual se puede verificar mediante la integración de la onda.

### 2.2.10.2.2 Eficiencia relativa del explosivo

La magnitud de las vibraciones terrestres y aéreas en un punto varía según la carga del explosivo y la distancia de dicho punto al lugar de la voladura. La señal vibracional por la voladura consiste en un número discreto de paquetes de ondas. Cada uno de estos corresponde a cargas o grupos de cargas detonando en un determinado tiempo.



La primera etapa del análisis de la señal es determinar qué carga representa cada paquete de vibración. De ello depende la capacidad de determinar la diferencia entre la detonación real y la secuencia diseñada. La forma y amplitud de un paquete de vibración da a conocer la efectividad relativa de la detonación de las cargas en una voladura. La amplitud de vibración es una medición de la energía transferida por el explosivo al macizo rocoso.

Una detonación con baja eficiencia puede producirse por diferentes causas, algunas de las cuales son: Tiros con burden y/o espaciamiento muy pequeño, cargas con algún grado de insensibilización, proyección del material del taco, etc. En estos casos se registran niveles de velocidad de partícula bastante más bajo de lo esperado. El caso extremo de este fenómeno es la ausencia de detonación, que en el registro se identifica por la falta del pulso correspondiente al retardo.

Si una lectura del sismógrafo nos muestra picos de velocidad de partícula bastante elevados, estamos en un posible caso de un elevado confinamiento de la carga, ocasionado principalmente por la excesiva distancia desde el taladro a la cara libre, lo que origina que la energía del explosivo no sea utilizada eficientemente en fragmentar la roca, sino al contrario, se disipe en forma de vibración a través del macizo rocoso circundante.

### **2.2.10.2.3 Traslape entre los tiempos de retardos**

El intervalo de retardo entre la detonación de taladros puede referirse al tiempo de retardo nominal o al tiempo de retardo efectivo. El primero es la diferencia entre los tiempos nominales de iniciación, mientras que el tiempo de retardo efectivo es la diferencia de los tiempos de llegada de los pulsos generados por la detonación de los taladros disparados con períodos consecutivos. En el caso simple de una fila de taladros estos parámetros están relacionados por la Ecuación:

La Figura muestra el caso de una fila de taladros con diferentes posiciones relativas de los transductores.

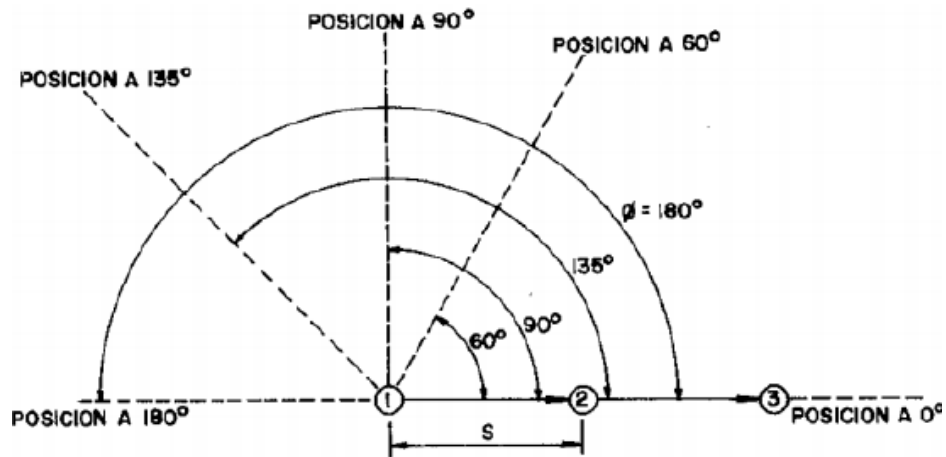


Figura N° 24: Posiciones relativas de los puntos de registro (Wiss y Linehan)

Fuente: López (2003)

$$t_e = t_n - \frac{S \cdot \cos \varnothing}{VC}$$

Donde:

$t_e$ : Es tiempo de retardo efectivo en s.

$t_n$ : Es el tiempo de retardo nominal en s.

$S$ : Es el espaciamiento entre taladros m.

$VC$ : Es la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en m/s.

$\varnothing$ : Es el ángulo entre la línea de progresión de la voladura y la posición del captador en grados sexagesimales.

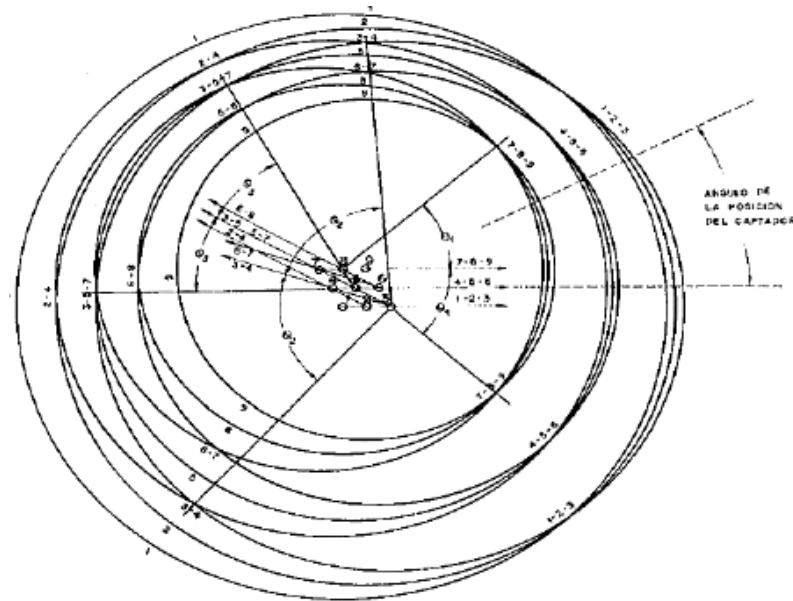


Figura N° 25: Direcciones preferentes de cooperación de ondas en una voladura múltiple

Fuente: López (2003)

El ángulo crítico de la posición relativa donde las ondas llegan al mismo tiempo y por lo tanto, pueden producirse una cooperación entre dichas ondas sísmicas, será aquel para que  $t_e = 0$  y puede determinarse a partir de:

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{S \cdot t_n}{VC} \right)$$

En la Figura N° 28 se representa una voladura múltiple y las direcciones para las que existe una mayor probabilidad de refuerzo o cooperación de las ondas de acuerdo con la salida teórica de los taladros.

En lo relativo al tiempo mínimo de retardo para eliminar las interferencias constructivas o con efectos sumatorios, en los primeros estudios realizados por (Duvall et al. 1963) se proponían intervalos de 8 ms y 9 ms, calculados a partir de los experimentos llevados a cabo en canteras de caliza.

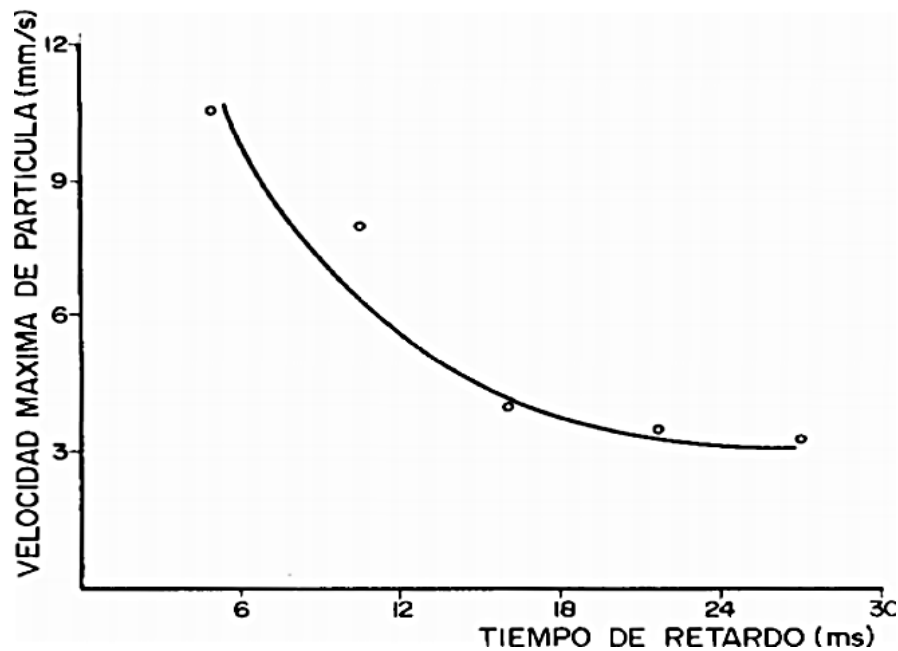


Figura N° 26: Influencia de intervalo de retardo en el nivel máximo de vibración

Fuente: López (2003)

Langerfors (1963) señala que: Con intervalos mayores a 3 veces el periodo de vibración puede suponerse que no existe colaboración entre taladros adyacentes detonados de manera secuenciada, debido a la amortiguación de las señales.

Wiss y Linehan (1978) sugieren: Un tiempo de retardo nominal entre periodos de retardo sucesivos de 17 ms, para eliminar el efecto sumatorio de las vibraciones. En otro estudio de la Nobel's Explosives Co. de Gran Bretaña sobre voladuras secuenciadas, con tiempo de retardo entre cargas operantes inferiores a los 25 ms se confirma las existencias constructivas en el nivel máximo de vibración.

#### 2.2.10.2.4 Dispersión entre el tiempo de retardo y el iniciador

La dispersión en los tiempos de retardo de los iniciadores es la desviación del tiempo real de disparo con respecto al tiempo nominal. Muchos, en el pasado, han asumido que los iniciadores dispararán precisamente en el tiempo nominal de disparo, de hecho, las normas indican que siempre y cuando haya una diferencia de por lo menos 8 ms entre periodos de iniciadores (esto entre tiempos nominales de disparo), se considera que los iniciadores dispararán de manera retardada uno del otro. Uno debe de ser consiente que



estos iniciadores, ya sean eléctricos o no eléctricos no dispararán precisamente en el tiempo nominal de disparo.

En general, uno puede asumir que dispararán con una distribución normal, donde la media estaría cercana al tiempo nominal de disparo. ¿Cuál es entonces el efecto de la dispersión de los iniciadores en el tiempo real de disparo de los iniciadores?

Los iniciadores deben tener, bajo buenas condiciones, una desviación o dispersión entre 1 a 15% de tiempo nominal de disparo, dependiendo de qué periodos de retardos se esté considerando. Ya que diferentes iniciadores tienen diferentes elementos pirotécnicos de retardo, la desviación de entre 1 y 15% del periodo se mide en iniciadores nuevos al salir de la fábrica. ¿Qué sucede con iniciadores viejos que fueron fabricados uno, dos o hasta tres años de que fueran utilizados?, se sabe que el tiempo cambia el periodo de retardo y de hecho, la mayoría de la gente probablemente ha sido testigo de iniciadores que disparan fuera de secuencia.

La dispersión de los iniciadores puede provocar severos problemas en las voladuras. Las desviaciones de los tiempos nominales pueden causar problemas y traslapes en el tiempo de retardo que son tanto inesperados como desapercibido. Los traslapes, pueden causar niveles de vibración altos, sin embargo, no necesariamente iguales en todas direcciones. El mismo fenómeno puede ocurrir también con las ondas en el aire si los taladros se retardan de tal manera que la onda de sonido de uno alcance a la otra al tiempo que la segunda descarga su energía a la atmósfera.

## 2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**2.3.1 Explosivo:** Son sustancias químicas que están compuestos por un oxidante, combustible y sensibilizador, bajo la acción de un iniciador (fulminante) u otro estímulo externo reaccionan instantáneamente con gran violencia liberando gases a temperaturas y presiones muy elevadas.

**2.3.2 Columna de carga:** Es la ubicación espacial del explosivo dentro un taladro con una determinada altura con respecto a la altura del taladro, generalmente es el 70% con respecto a la altura del taladro.



**2.3.3 Acoplamiento del explosivo:** Es la adherencia del explosivo a la pared del taladro, se calcula con la relación del diámetro del explosivo entre el diámetro del taladro, en los explosivos a granel el acoplamiento es al 100% y en los explosivos encartuchados el acoplamiento es menor dependiendo del diámetro del explosivo.

**2.3.4 Confinamiento del explosivo:** Es el grado de aislamiento del explosivo de una superficie, se aplica para retener más tiempo la energía del explosivo y evitar su pérdida, en un taladro el confinamiento se da mediante el uso de material inerte (detritus de perforación, stemming, arcilla) en la parte superior de la columna con una determinada altura al cual se conoce como Taco.

**2.3.5 Detonación:** El proceso de detonación de un explosivo se describe como la propagación de una onda de choque, que viaja a través de la columna de carga y la velocidad a la que se desplaza se le llama Velocidad de Detonación que se expresa en m/s.

**2.3.6 Vibración:** Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo, en voladura de rocas se produce por la onda de choque producto de la interacción del explosivo al momento de detonar con el macizo rocoso.

**2.3.7 Carga operante:** Es la mayor cantidad de explosivo que detona en un determinado tiempo durante el proceso de voladura, se considera como tiempo máximo de 8 ms para acoplamiento de taladros, es decir es la mayor sumatoria de kilos de explosivos detonados de varios taladros en un tiempo de 8 ms.

**2.3.8 Distancia escalada:** Conocida también como la distancia reducida que es la relación de la distancia de voladura al punto de monitoreo entre la raíz cuadrada o cubica de la carga operante de la voladura, se aplica raíz cuadrada cuando la columna de carga del taladro es cilíndrica y raíz cubica es esférica.

**2.3.9 Regresión múltiple:** Es un procedimiento mediante el cual se trata de determinar la posible relación de dependencia entre dos o más variables. Es decir, conociendo los valores de una variable independiente (predictoras), se trata de estimar los valores, de una o más variables dependientes.

**2.3.10 Macizo rocoso:** Es el conjunto de bloques de matriz rocosa y de discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente hablando son medios discontinuos, anisótropo y heterogéneos. Prácticamente pueden considerarse que presentan una resistencia a la tracción nula.





**2.3.11 Matriz rocosa:** Conocido también como roca intacta, es el material rocoso exento de discontinuidades, o bloques de roca intacta que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente hablando queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad.

**2.3.12 Resistencia a la compresión:** Es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento, también se define como la resistencia de un material a su deformación ante un esfuerzo de compresión, sus unidades de medida son (psi y MPa).

**2.3.13 Resistencia a la tracción:** Es el máximo esfuerzo de tracción que un cuerpo puede soportar antes de romperse mientras se estira, también se define como la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

## 2.4 HIPÓTESIS

### 2.4.1 Hipótesis general

Con la aplicación de los detonadores duales se optimiza el proceso de voladura de rocas obteniendo resultados satisfactorios e incluso mejores de lo que se viene dando, en compañía minera Santa Luisa – Mina Huanzalá.

### 2.4.2 Hipótesis específica

- A. Con la aplicación de los detonadores duales en los frentes en breasting, mejorará el grado de porcentaje de fragmentación obtenido en las labores de la compañía minera Santa Luisa - Mina Huanzalá.
- B. Los detonadores duales permitirán un nivel de vibración controlado y la eliminación del uso del cordón detonante en las labores de la compañía minera Santa Luisa – Mina huanzalá.



## CAPITULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN DE LA COMPAÑÍA MINERA SANTA LUISA – MINA HUANZALÁ

La compañía minera Santa Luisa – Mina Huanzalá, está ubicado en el distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, departamento de Ancash, a una distancia de 8km en línea recta y 12km por vía asfaltada, al NW del pueblo más cercano, Huallanca, y a 440km de distancia de la ciudad de Lima. Geográficamente la mina se halla entre la prolongación de la cordillera Blanca y la cordillera Huayhuash, al sur del cerro huanzalá y al NE de un valle glaciar por donde discurre el rio torres; a una altitud comprendida entre 3800 y 4000 msnm. Sus coordenadas UTM y geográficas son: 8908650 Norte y 280400 Este.

La mina es accesible partiendo de Lima de la siguiente forma:

- Desde la ciudad de Lima mediante la Carretera Panamericana Norte hasta Pativilca, luego la Vía de Penetración a Huaraz con un desvío a la altura de Conococha / Antamina con un tramo final a la mina con una distancia de 420 Km en un promedio de 6 a 7 horas.
- Desde la ciudad de Lima a Pativilca carretera asfaltada 284 Km; llegando a Pachacoto carretera asfaltada a 166 Km más; finalmente a Huanzala carretera afirmada a 40 Km más; haciendo un total 490 Km En aproximadamente 8 horas.
- Desde la ciudad de Lima a Pativilca, Conococha, Chiquian, Aquia, Pachapaqui, Huanzala, con un recorrido total de 510 Km.

- Desde la ciudad de Lima – Cerro de Pasco – Huánuco – La Unión – Huallanca – Huanzala.

Tabla N° 3

*Rutas de acceso a la Compañía minera Santa Luisa – Mina Huanzala*

	Ruta	Distancia	Tiempo	Tipo de vía
1	Lima-Pativilca-desvio conococha/Antamina-Mina	420 km	7 horas	Afirmada y asfaltada
2	Lima-Pativilca-Pachacoto-Mina	490 km	8 horas	Afirmada
3	Lima-Pativilca-Conocha- Chiquian-Aquia-Pachapaqui- Mina	510 km	10 horas	Afirmada
4	Lima-Cerro de pasco-Huánuco-La Unión-Huallanca-Mina			Afirmada

Fuente: Elaboración propia

**3.1.1. Referencias**

El yacimiento de Huanzala es conocido desde el año 1925, siendo investigada geológicamente en 1961 por la MITSUI MINING SMELTING CO. del Japón, en el año 1,964 se formó la COMPAÑÍA MINERA SANTA LUISA S.A. que prosiguió las exploraciones en el yacimiento (mapeo geológico detalladas en superficie, perforaciones Diamond – Drill y construcción de túneles) en forma sistemática, posteriormente comenzó sus operaciones productivas entre abril y mayo de 1968, explotándose Pb, Zn, Cu y Ag, con una producción de 500 TM/día. Se inscribió en el Registro Público de Minería el 05 de agosto de 1964. Se obtuvo una producción de 270000 toneladas para el año de 1982, con 900 TM/día, con ley de cabeza de: 0.4% Cu, 10.3% Zn, 4.3% Pb y 5.1 Onz/TM Ag; para el año 1984, la producción fue alrededor de 950 TM/día. Actualmente la producción es de 1500 TM/día, este mineral es tratado en la planta concentradora, obteniendo luego concentrados de zinc, plomo y cobre, los cuales son luego comercializados. Se decide implementar el Sistema de Gestión Ambiental según la Norma ISO 14001: 2004 y el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud Ocupacional OHSAS 18001:2007 en Compañía Minera Santa Luisa S. A; con la finalidad de mantener en el futuro altos niveles de eficiencia y competitividad, para hacer frente a las crecientes



exigencias del mercado, asumiendo como parte de su política la protección del medio ambiente y la prevención y control de los riesgos de seguridad y salud ocupacional de su personal.

### 3.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

**Investigación descriptiva:** La población considerada y las muestras que se obtendrán con los datos solo permiten la descripción o identificación de cada uno de los componentes en el proceso de la investigación.

### 3.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Kerlinger (2002) sostiene: Generalmente se llama diseño de investigación al plan y a la estructura de un estudio, es decir el plan y estructura de una investigación concebidas para obtener respuestas a las preguntas de un estudio. El diseño de investigación señala la forma de conceptualizar un problema de investigación y la manera de colocarlo dentro de una estructura que sea guía para la experimentación (en el caso de los diseños experimentales) y de recopilación y análisis de datos. En efecto, diremos que es un plan, estructura y estrategia de la investigación.

- **Plan**, se entiende como un esquema general o programa de la investigación.
- **Estructura**, paradigma llamado también modelo de las operaciones viables.
- **Estrategia**, métodos para recopilar y analizar los datos, para dar una respuesta a la pregunta de estudio.

### 3.4 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

**El nivel de investigación es descriptivo** por que describe las características de unos nuevos elementos y métodos de iniciación en voladura, su finalidad estimar parámetros, límites y promedios, con el uso de detonadores no eléctricos de doble retardo.

### 3.5 POBLACIÓN

Wigodski (2010) precisa que la población es el conjunto total de individuos, objetos o medidas que poseen algunas características comunes observables en un lugar y en un momento determinado. Para el presente estudio de investigación la población del proyecto viene a ser las labores de producción en breasting de la Compañía Minera Santa luisa – mina Huanzalá.



### 3.6 MUESTRA

Wigodski (2010) define a la muestra como un subconjunto fielmente representativo de la población. Hay diferentes tipos de muestreo. El tipo de muestra que se seleccione dependerá de la calidad y cuán representativo se quiera sea el estudio de la población. Para el presente estudio de investigación la muestra se elegirá de manera no probabilística, mediante un muestreo intencional, la que está conformada por sus labores del tipo Breasting como R200/V4, U250/V2, etc.

### 3.7 IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE VARIABLES.

#### 3.7.1 Variable independiente

X= Detonadores no eléctricos de doble retardo.

#### 3.7.2 Variable dependiente

Y1= Fragmentación de la voladura

Y2=Nivel de vibraciones producidas por las voladuras

### 3.8 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Se refiere a la forma de desintegrar y evaluar cada una de la variable en sus indicadores e índices para poder ejecutar las mediciones posibles.

Tabla N° 4

#### *Operacionalización de variables*

Variables	Dimensiones	Indicadores	Escalas de medición
*Variables independientes			
	Tiempos de retardo	Dispersión de tiempos	MS



Detonador no eléctrico de doble retardo	Secuencia de iniciación	Tipo de salida	
	Distribución	Tiempo de carguío	Min.
*Variables dependientes			
Fragmentación de voladura	Análisis de fragmentación	Porcentaje de D90	Pulg.
Nivel de vibraciones producidas por las voladuras	Registro de vibración	Velocidad Pico Partícula (VPP)	mm/s

Fuente: Elaboración propia

### 3.9 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.9.1 Técnicas de recolección de datos

Técnica de recolección de datos observación sistemática o estructurada, donde se utiliza reportes de calidad de fragmentación, nivel de vibraciones, esto para su análisis posterior.

Técnica de recolección de datos observación documental, donde se cuenta con la información técnica de los detonadores de doble retardo y también los diseños y estándares de perforación y voladura que nos brinda a la CIA. Santa Luisa – Mina huanzalá.

#### 3.9.2 Instrumentos de recolección

Los instrumentos utilizados en la presente investigación se definen a continuación:

- Equipo para el monitoreo de vibraciones, Instatel Minemate con respectivo software Blastware.
- Software Wipfrag, para monitoreo y control de fragmentación de roca.
- Programa para procesamiento de datos Excel.
- Una computadora personal.
- Una cámara fotográfica.
- Medios de transporte vehículos.
- Libros, Manuales, Tesis, etc.



### **3.10 PROCESAMIENTO DE DATOS**

- Selección y representación por variables.
- Los datos serán presentados como informaciones en forma de gráficos, cuadros resúmenes a las cuales se formularán datos objetivos.
- Procesador sistematizado computarizado.
- Los resultados obtenidos se procesarán mediante softwares específicos para cada uno de las variables.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS VOLADURAS MONITOREADAS

Durante el desarrollo de las pruebas realizadas en las labores de la mina Huanzalá, utilizando los detonadores no eléctricos de doble retardo “MUKI”, Dichas pruebas se realizaron en las fechas 05.10.2015 hasta 29.10.2015, donde se ha podido ejecutar unas pruebas de voladuras las cuales fueron satisfactorias, como consecuencia del buen funcionamiento del producto, refiriéndose a cero tiros cortados. En cuanto a la fragmentación y al nivel de vibraciones los resultados obtenidos a continuación.

##### 4.1.1 Diseño de perforación de taladros

La perforación se ejecutó con jumbos Tamrock con barra de 14' y/o Boomer con barras de 16' de 51mm y 64mm de diámetro de taladro, las labores de tajeo en breasting se deja una cara libre de 0.5m, el burden y el espaciamiento de 0.80 x 0.80 respectivamente. También se perfora taladros de alivio en los techos y hastiales con el fin de cuidar y/o controlar el daño inducido al macizo rocoso remanente, a continuación, detallamos el diseño de perforación y voladura en donde se participó con la innovación de un nuevo sistema de iniciación en sus labores.

Tabla N° 5

*Especificación del diseño de perforación*

Tipo	Total tal	Material	Sección	B	E	Long. Tal	Roca	M3
Breasting	35	Mineral	4.0mX4.0m	0.8m	0.8m	3.5m	IIIB	56

Fuente: Elaboración propia



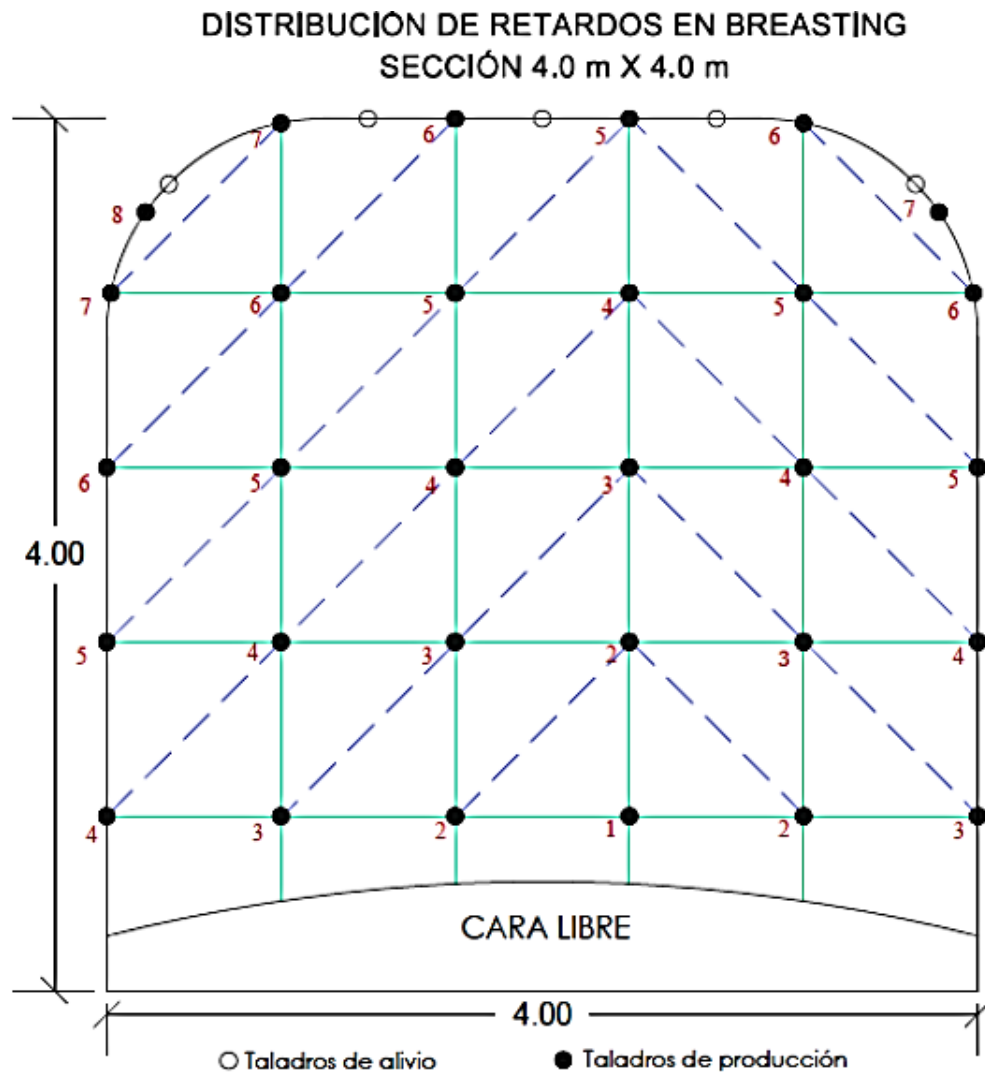


Figura N° 27: Diseño de perforación de taladros – tajeo en Breasting

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2 Diseño de amarre de voladura

Para el carguío y disparos en Breasting, el sistema de iniciación no eléctrico provisto de un retardo de profundidad y de otro de superficie, en este caso se usará 1000ms de retardo de profundidad, 50ms de retardo de superficie y PUENTE MUKI de 50ms de retardo, la longitud de acuerdo a la profundidad de taladro en este caso de 6m, estos accesorios serán con los que se generaran una secuencia de salida en “V”, con la que se garantiza la obtención de un buen grado de fragmentación, destacando que ya no usaremos el cordón detonante. A continuación, se muestra en la figura 28, el sistema de conexión con el uso o innovación del sistema de iniciación de doble retardo “Muki”.

En cuanto al diseño de carga el explosivo de fondo o iniciador de la columna explosiva se utilizó el emulnor 3000. A continuación, las características técnicas del explosivo.

Tabla N° 6

*Características técnicas del emulnor 3000*

	<b>Emulnor 500</b>	<b>Emulnor 1000</b>	<b>Emulnor 3000</b>	<b>Emulnor 5000</b>
Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> )	0.90 ± 0.15	1.13 ± 0.1	1.14 ± 0.1	1.16 ± 0.1
Velocidad de detonación (m/s)				
Confinado *	4400 ± 300	5800 ± 300	5700 ± 300	5500 ± 300
s/confinar **	3500 ± 300	4500 ± 300	4400 ± 300	4200 ± 300
Presión de detonación (Kbar)	44	95	93	88
Energía (kcal/kg)	628	785	920	1010
Volumen normal de gases (l/kg)	952	920	880	870
Potencia relativa en peso (%) (***)	70	87	102	112
Potencia relativa en volumen (%) (***)	77	120	142	159
Sensibilidad al fulminante	N° 8	N° 8	N° 8	N° 8
Resistencia al agua	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Categoría de humos	Primera	Primera	Primera	Primera

\* Velocidad de detonación en tubo de 1 1/2 pulgadas de diámetro.

\*\* Velocidad de detonación como cartucho de 1 pulgada de diámetro.

\*\*\* Potencias relativas referidas al ANFO con potencia convencional de 1000

Fuente: Elaborado por Famesa explosivos.

Como columna de carga explosiva de los taladros se utilizó el Anfo premium Nitrochem, un agente de voladura fabricado a partir del AN “PRILLEX” nitrato de amonio poroso grado ANFO, merece mencionar su baja densidad de dicho Anfo (0.78 g/cc).

Y en el sistema de iniciación se utilizó los detonadores no eléctricos de doble retardo en este caso de la marca Enaex, el cual es denominado con el nombre de MUKI. Un sistema de iniciación provisto de un retardo de profundidad y de otro de superficie, concebido para realizar voladuras en labores de 2 “caras libres”, como breasting, realces y taladros largos, en este caso en breasting y la combinación de tiempo de retardos por taladro fue de 1000ms/50ms, cabe mencionar que este producto permite ejecutar voladuras silenciosas, dado que ya no se usa el cordón detonante.



Tabla N° 7

*Accesorios, explosivos y diseño de carga utilizados en los tajos en breasting*

Tal.	Ubicación	L. Tal.	Carga Fondo	Ca nt.	Muki 1000/ 50	KG. Anfo	Long. Carga	Long. Taco
1	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
2	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
3	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
4	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
5	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
6	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
7	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
8	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
9	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
10	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
11	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
12	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
13	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
14	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
15	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
16	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
17	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
18	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
19	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
20	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
21	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
22	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
23	Producción	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
24	Hastial	4	Emul. 3000	1	1	3.81	3.00	1.00
25	Corona	4	Emul. 3000	1	1	0.64	0.50	2.50
26	Corona	4	Emul. 3000	1	1	0.64	0.50	2.50
27	Corona	4	Emul. 3000	1	1	0.64	0.50	2.50
28	Corona	4	Emul. 3000	1	1	0.64	0.50	2.50
29	Corona	4	Emul. 3000	1	1	0.64	0.50	2.50
30	Corona	4	Emul. 3000	1	1	0.64	0.50	2.50
Metros perforados		140	m		Factor avance		25.49 Kg./m.	
Pies Perforados		459.2	pies		Factor de carga		1.66 Kg/m3.	

Emul.3000(11/4"x8")	30	cart	Factor de potencia	0.49 Kg/tn.
Kilos de Anfo	95.3	Kg.	Cordón detonante	0.00 m
Kilos Total de explosivo	100.6	Kg.	Guías Fulminante	2.00 Und.

Fuente: Elaboración propia

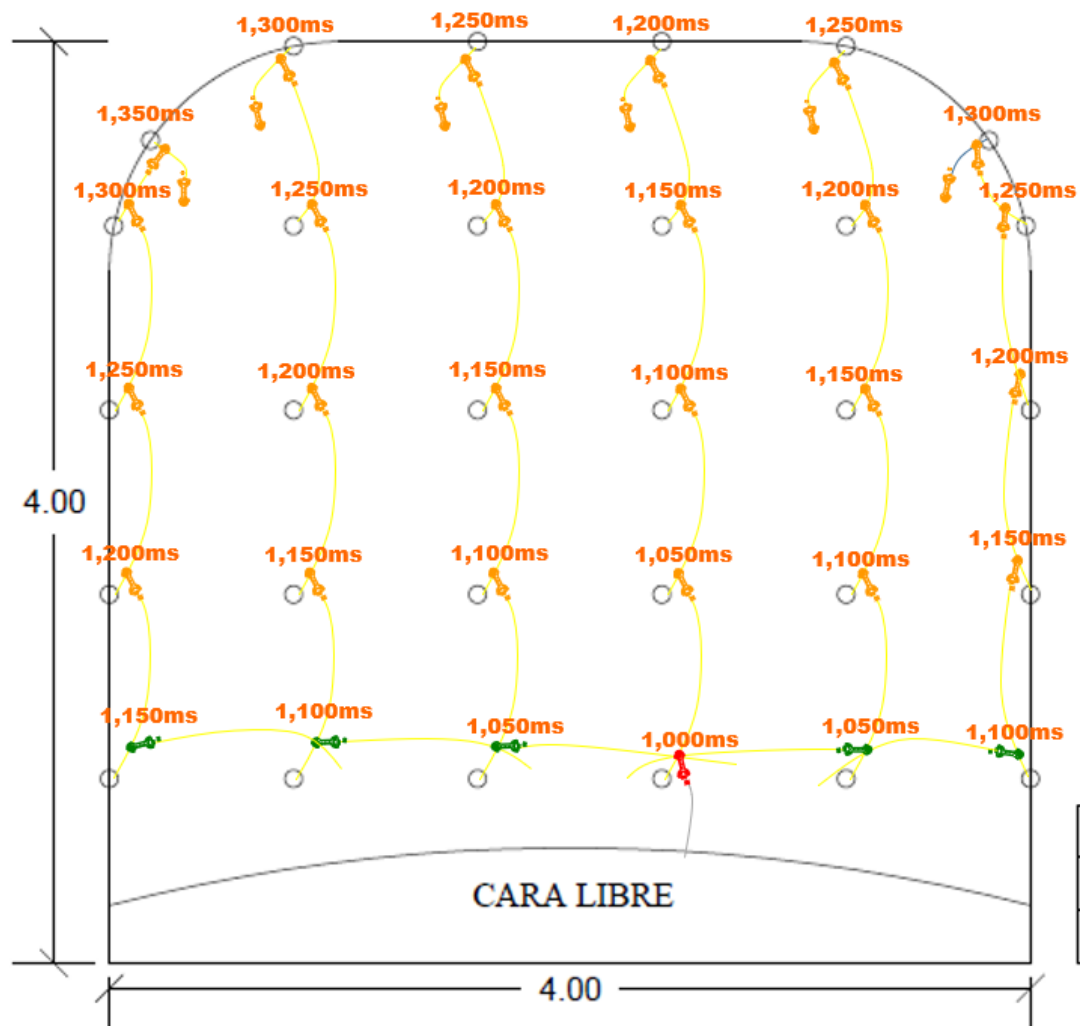


Figura N° 28: Sistemas de conexión del detonador Muki

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 29: Sistemas de conexión del detonador Mukhi en un frente en brasting

Fuente: Fotografiada por el autor

#### 4.1.3 Voladuras con el nuevo sistema de iniciación

A continuación, se detalla las voladuras realizadas con el nuevo sistema de iniciación MUKI, cada una de estas voladuras se monitorearon con equipos y software de medición como; sismógrafos para medir el nivel de vibración producido en las detonaciones y programas como el WipFrag para medir el grado de fragmentación de la roca detonada.

Tabla N° 8

*Resumen de disparos realizados con el nuevo sistema de iniciación MUKI.*

Labor	Material	N° de Tal.	Total, Expl. (Kg)	Toneladas (Tn)	F.P. (Kg/Tn)
R200/V4	Mineral	32	104	183	0.56
C650/V2	Mineral	20	92	142	0.65
R200/V4	Mineral	31	105	202	0.52
V800/V1P	Mineral	42	182	402	0.45



U250/V6	Mineral	25	79	151	0.52
R200/V4	Mineral	35	106	178	0.59
R200/V4	Mineral	35	106	168	0.63
U250/V2	Mineral	25	79	158	0.5
C250/V2	Mineral	31	105	206	0.51
P500/V5	Mineral	30	95	174	0.55
P050/V2	Mineral	28	105	220	0.48
V800/V1	Mineral	39	182	407	0.45
V100/V7	Mineral	35	155	344	0.45
B1450/V1	Mineral	21	74	153	0.48
P050/V2	Mineral	32	116	202	0.57
U250/V4	Mineral	27	74	127	0.58
C650/V2	Mineral	29	85	156	0.54
<b>TOTAL</b>		<b>517</b>	<b>1844</b>	<b>3573</b>	<b>0.53</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.4 Tiempo de carguío de un frente en breasting

A continuación, se muestra los tiempos que demanda el carguío y conexión de los detonadores de superficie o externos, tanto utilizando los accesorios de voladura de uso habitual (Fanel MS de 4.8 y cordón detonante 3p), y los nuestros como el Muki de 6.0m y el puente Muki, detalle en el siguiente cuadro.

Tabla N° 9

*Tiempo demora en carguío de frente en breasting*

Productos	FANEL PC MS (del 1 al 16) y cordón detonante 3P			Muki 1000ms/50ms y puente Muki		
	AnfoTruck			AnfoTruck		
N° de taladros	30			30		
Equipo	AnfoTruck			AnfoTruck		
Actividad	Inicio	Final	Total (min)	Inicio	Final	Total (min)
Cebado y distribución	10:28	11:03	35	16:28	16:54	26
Carguío de taladros	11:04	11:27	23	16:55	17:14	19
Conexión de detonadores	11:28	11:49	21	17:15	17:33	18
<b>Total, tiempo (min)</b>			<b>79</b>			<b>63</b>

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Análisis de fragmentación

Para analizar la granulometría de las cargas derribadas por las voladuras, se utilizó el “WipFrag”, software especializado que convierte las imágenes de los fragmentos en una net de tamaños de roca para luego determinar estadísticamente los porcentajes según el grado de división de la roca, con la innovación del nuevo sistema de iniciación en las labores de mina Huanzalá, con una nueva configuración de tiempos de retardos y una secuencia de salida, ya que el retardo tiene la habilidad de influenciar casi en toda la voladura, incluyendo la fragmentación, estabilidad, excavación o limpieza y sobre rotura o daño al macizo rocoso remanente. Una secuencia de salida en “V” permite también que la fragmentación sea producto de colisión ya que todo el material roto es desplazado hacia la parte media de la labor, de tal manera que al chocar entre si los bloques grandes minimicen su tamaño.

En esta sección mostramos los resultados de la voladura en cuanto al grado de fragmentación, también cabe recalcar que se hizo una comparación ya que se tomó en cuenta los resultados de voladuras obtenidas con el sistema de iniciación que se venía trabajando que son los Faneles simples MS, haciendo el versus con las pruebas que se realizó con la innovación de un nuevo sistema de iniciación con detonadores no eléctricos de doble retardo, obteniendo buenos resultados que a continuación mostramos en la siguiente tabla los datos obtenidos en campo.

Tabla N° 10

*Resultados del grado de fragmentación obtenida y comparativa*

Ítem	Labor	Material	FAMESA (PULG)	ENAEX (PULG)
1	R200/V4	Mineral	10.25	7.12
2	R200/V4	Mineral	13.33	7.36
3	V800/V1P	Mineral	10.91	9.47
4	R200/V4	Mineral	9.81	6.67
5	U250/V2	Mineral	7.93	6.33
6	P050/V2	Mineral	8.43	6.64
7	B1450/V1	Mineral	10.01	7.89
8	P050/V2	Mineral	12.04	6.45
Total.promedio			10.34	7.24

Fuente: Elaboración propia

Entonces se obtuvo un grado de fragmentación promedio de 7.30 pulgadas, de tal manera demostramos que se obtuvo mejora en este sentido, cabe recalcar que con la aplicación de los detonadores no eléctrico de doble retardo se modificó los tiempos de secuencia de salida con respecto a los que ya se usaban. Se presenta imágenes del proceso de análisis de fragmentación mediante el WipFrag,

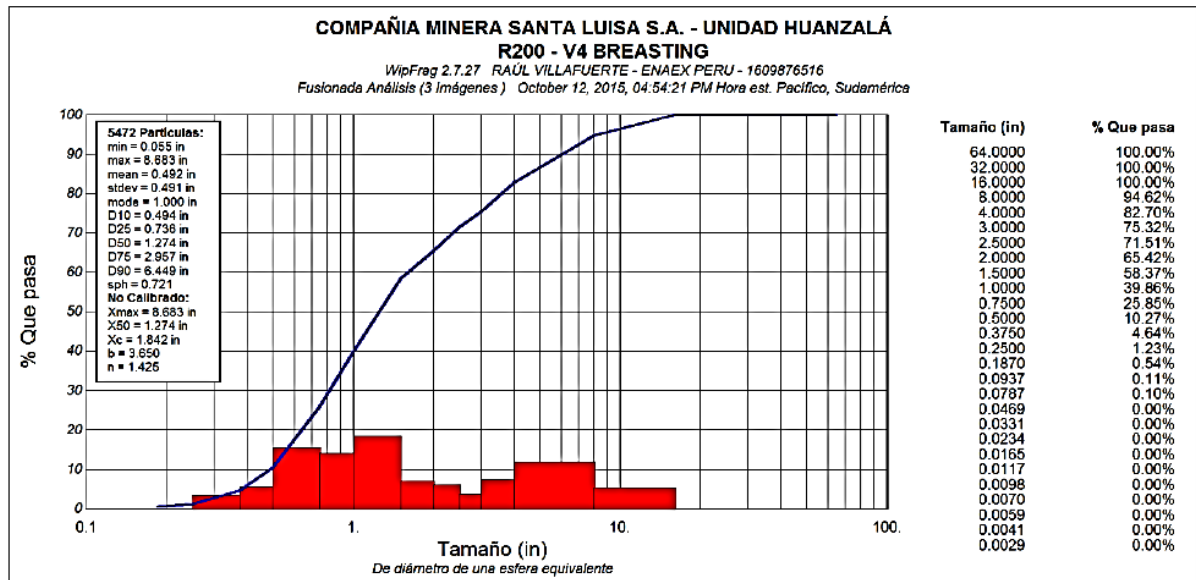


Figura N° 30: Análisis de fragmentación en – R200/V4

Fuente: Gabinete Asistencia técnica- Enaex Perú

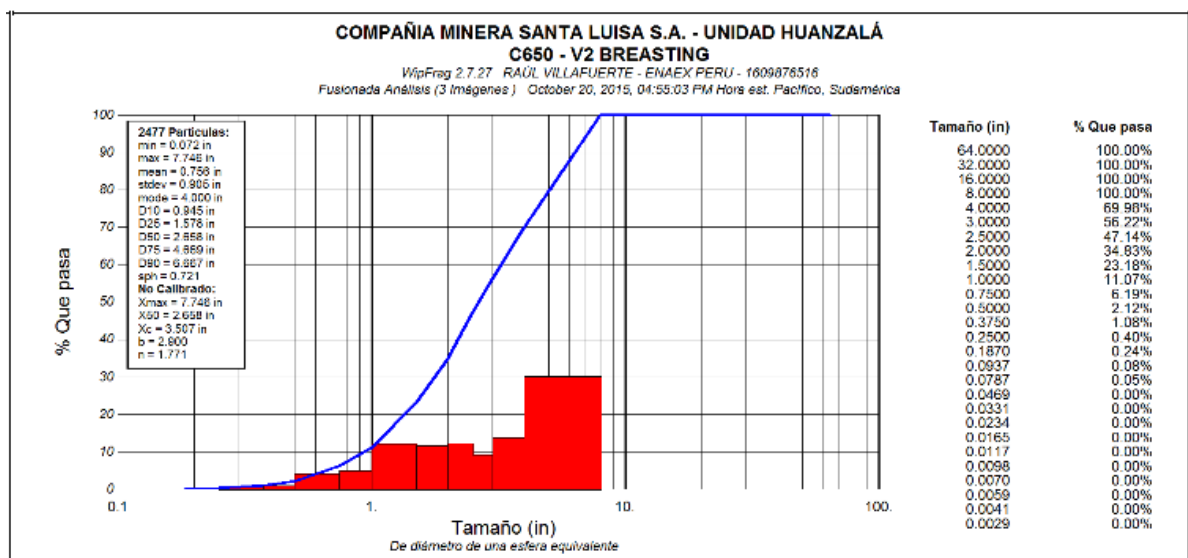


Figura N° 31: Análisis de fragmentación en – C600/V2

Fuente: Gabinete Asistencia técnica- Enaex Perú



### 4.3 Monitoreo de vibraciones

En cada una de las voladuras ejecutadas se hizo monitoreo de vibraciones, donde se utilizó un sismógrafo, equipo para medir el nivel de vibraciones producidas por las detonaciones, cuyos resultados se verán analizados de acuerdo a los máximos permisibles según las normas establecidas en cuanto al monitoreo del nivel de vibraciones.

Detallamos los datos obtenidos con el equipo instalado en campo, como la distancia del punto de monitoreo al punto de voladura y el resultado de la velocidad pico partícula (PPV).

Tabla N° 11

*Resultados de las VPP de cada una de las voladuras monitoreadas*

Ítem	Labor	Material	N° de Tal.	Dist. Disp.	VPP (mm/s)
1	R200/V4	Mineral	32	25	18.11
2	C650/V2	Mineral	20	33	17.21
3	R200/V4	Mineral	31	35	16.38
4	V800/V1P	Mineral	42	30	13.17
5	U250/V6	Mineral	25	25	17.2
6	R200/V4	Mineral	35	24	15.01
7	R200/V4	Mineral	35	28	19.32
8	U250/V2	Mineral	25	30	16.24
9	C250/V2	Mineral	31	27	22.87
10	P500/V5	Mineral	30	33	16.47
11	P050/V2	Mineral	28	31	21.31
12	V800/V1	Mineral	39	34	15.17
13	V100/V7	Mineral	35	22	20.2
14	B1450/V1	Mineral	21	29	15.47
15	P050/V2	Mineral	32	25	17.52
16	U250/V4	Mineral	27	21	14.09
17	C650/V2	Mineral	29	22	13.41
<b>TOTAL</b>			<b>517</b>	<b>27.88</b>	<b>17.01</b>

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo como resultado promedio de VPP de 17.01 mm/s en una distancia promedio de 27.88 m, estos resultados fueron obtenidos con la innovación de nuevo sistema de iniciación en mina subterránea, como los detonadores no eléctricos de doble retardo MUKI, también como cebo o emprimado se usó el EMULNOR 3000 y como carga de columna se usó el ANFO premium Nitrochem, la siguiente figura muestra la data obtenida del sismógrafo en cuanto a las vibraciones producidas por la detonación de una de las voladuras ejecutadas.

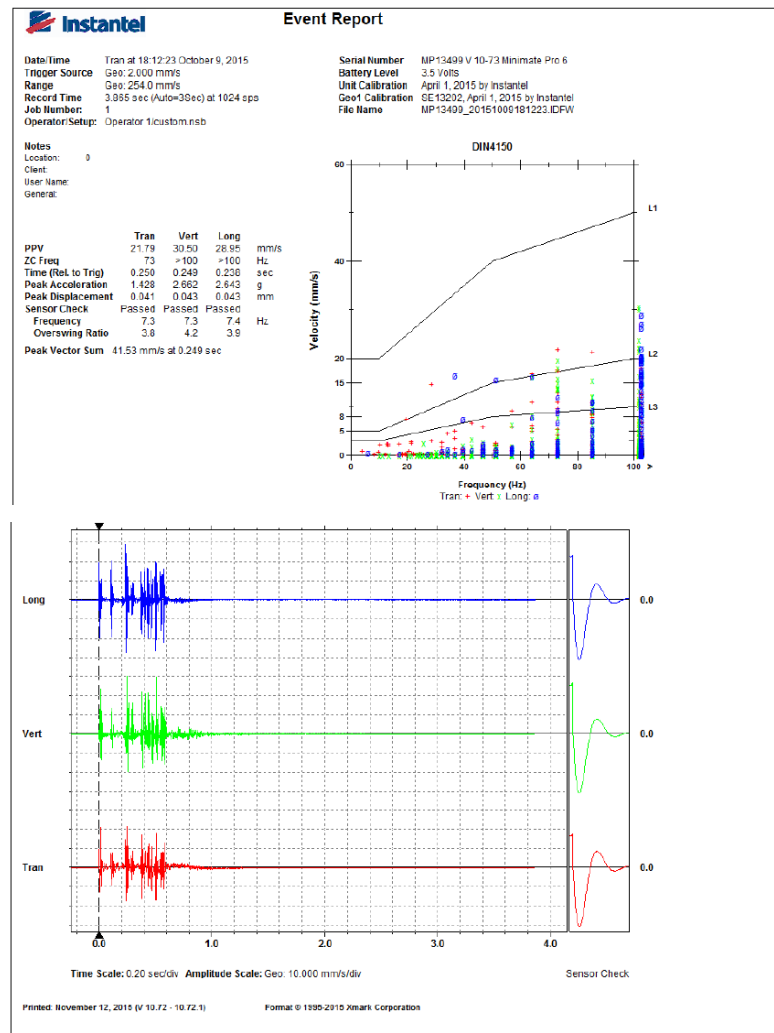


Figura N° 32: Análisis de vibraciones con uso del Muki

Fuente: Gabinete asistencia técnica- Enaex Perú



#### 4.4 DISCUSIONES

Con la aplicación de los detonadores no eléctricos duales y el análisis de fragmentación con el software “WipFRAG” los resultados obtenidos en cuanto a la fragmentación fue de 7.28 pulgadas, estos resultados se obtuvieron en base a todas las voladuras ejecutadas con la innovación del detonador no eléctrico de doble retardo.

Quispe (2015) en su tesis “Aplicación del detonador no eléctrico de doble retardo en la U.E.A san juan de Arequipa – Cia. Century Mining Perú S.A.C”, donde también con la aplicación del detonador de doble retardo obtuvo 12.95 pulgadas en promedio de roca fragmentada.

De este resultado obtenido podemos deducir que con la aplicación o innovación con el uso del Muki, se puede ver una mejora significativa, también cabe recalcar que esto repercute en las siguientes actividades como la facilidad de limpieza con equipo y la minimización de la actividad de voladura secundaria o plasteo esto producto de la cantidad de bloques o bancos que puedan quedar después de la voladura.

Huanuqueño (2014) en sus tesis “Costos de voladura usando detonador no eléctrico dual en las labores subterráneas U.E.A. Chungar, Compañía Minera Volcan S.A.A.” en sus conclusiones describe que con el uso de detonadores duales elimina la necesidad de tener intervalos de varios retardos, también elimina el consumo de cordón detonante y por consiguiente la vibración producida por esta, ya que los tiempos de exposición con detonadores duales son de tres a cuatro segundos, a comparación del fanel que es de seis a ocho segundos.

De esta conclusión podemos deducir que al aplicar el uso de sistema de iniciación convencional simple producimos más vibración y el cordón detonante que genera vibración y ruido, que con la innovación de los detonadores no eléctrico de doble retardo Muki, aparte de la eliminación del uso cordón detonante, donde los resultados obtenidos con la aplicación de los detonadores no eléctricos duales los niveles de vibraciones provocadas por las voladuras en un determinado punto respecto de la ubicación de cada voladura y que para esto se utilizó un sismógrafo “INSTANTEL PRO6”, cuyos registros nos permitieron alcanzar los siguientes:



## CONCLUSIONES:

- El logro obtenido con el uso de los detonadores duales con una nueva configuración de tiempos de retardo 1000ms/50ms, sistema de amarre de malla y tipo de secuencia de salida en “V”. Todo esto para optimizar el grado de fragmentación y minimizar la cantidad de bancos o bloques grandes que traen consigo un trabajo adicional que es la voladura secundaria. Con los resultados obtenidos se mejoró en un 12.5 %, teniendo como promedio de porcentaje de 7.24 pulgadas, tamaños óptimos requeridos tanto en la limpieza de material con equipo y en minimizar la ejecución de plasteo de bancos o voladura secundaria.
- El control y monitoreo de la vibración del daño producido al macizo rocoso circundante producto de la voladura en una mina subterránea es de vital importancia, de tal manera obtener labores entre techos y hastiales estables que generen seguridad en los trabajadores, de tal manera evitar la caída o estallido de rocas ya que por estadística se sabe que el mayor porcentaje de accidentes fatales en minería subterránea es por caída de rocas. En este caso para el monitoreo de vibraciones se usó un sismógrafo con sus respectivos geófonos el cual fue instalado en determinadas distancias del punto de la voladura, los resultados de estas pruebas fueron las siguientes: en 27.88 metros el vector suma fue 17.01 mm/s.
- Finalmente se concluye que con la innovación de uso de los detonadores no eléctricos de doble retardo en la compañía minera Santa Luisa – mina Huanzalá, permite altos rendimientos en la voladura, mejores resultados de fragmentación y buen control de vibraciones, también reducimos el tiempo del ciclo de carguío por facilidad de distribución y amarre del accesorio.



## RECOMENDACIONES:

- Se recomienda más control en la perforación en cuanto al paralelismo y simetría de la distribución de los taladros, ya que para obtener una buena fragmentación y el correcto funcionamiento de los explosivos y accesorios es de vital importancia la correcta perforación según el diseño de malla.
- En todo experimento mientras más ensayos se tenga mejor serán los resultados para poder llegar a un óptimo resultado, de la misma manera en el monitoreo de vibraciones mientras más datos tomados, siguiendo el protocolo de medición, se obtendrá una ley de vibraciones que se ajuste al tipo de explosivo usado y las características geológicas de la zona.
- Hacer capacitaciones permanentemente al personal sobre la importancia del uso de un sistema de iniciación como los detonadores duales y su funcionabilidad, también mejorar en cuanto a los parámetros de perforación ya que esto influye en los resultados de una voladura ya sea con cualquier tipo de explosivo y/o accesorio., también mejorar en cuanto a los parámetros de perforación ya que esto influye en los resultados de una voladura ya sea con cualquier tipo de explosivo y/o accesorio.
- Tener en cuenta que la selección de un accesorio de voladura no solo significa buscar el más barato, si no aquella que cumpla todas las expectativas en cuanto a eficiencia y seguridad.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lara, V. (2012). *Perforación y voladura de rocas*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- ASP BLASTRONICS. *Instrumentación, monitoreo e interpretación de vibraciones*. Curso de Voladura EXSA. Octubre del 2006, Lima, Perú.
- Bernaola, A. Castilla, J y Herrera, H. (2013). *Perforación y Voladura de rocas en Minería*. Madrid, España.
- Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex. (2005). *Manual de tronadura*, Chile.
- Cruz, W. (2013). *Selección del explosivo y carga máxima con retardo según el macizo rocoso en el análisis de vibraciones por modelamiento U.P. Titan*. Abancay, Perú.
- Contreras, W. (2009). *Selección del explosivo adecuado y carga máxima con retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Exsa S.A. (2009). *Manual práctico de voladura*, Lima, Perú.
- Hernández, H. (2006). *Metodología de la investigación*. Recuperado de [http://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n\\_Sampieri.pdf](http://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf)
- Huanuqueño, J. (2014). *Costos de Voladura usando detonador no eléctrico dual en labores subterráneas U.E.A. Chungar, compañía minera Volcan S.A.A.* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Huiza, E. (2013). *Pruebas técnicas de iniciación con detonador no eléctrico con doble retardo con Consorcio minero Horizonte*.
- Konya, J. C y Albarrán, E. (1998). *Diseño de voladuras*. México, Cuarta edición.
- López Jimeno, (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*, Madrid, España.



- Scherpenisse, C., Adamson, W., Diaz, J. (2000). *Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras de desarrollo horizontal*. 4° Seminario Internacional de Seguridad Minera. Lima, Perú.
- Quispe, H. (2015). *Aplicación del detonador no eléctrico de doble retardo en la U.E.A. san juan de Arequipa – Cia. Century Mining Peru*, Arequipa, Perú.
- Vásquez, N. (2013). *Predicción de la Ley de Atenuación, Frecuencia Dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladuras a Cielo Abierto*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. España.
- Garrido, A. (2013). *Diagnostico y optimización de disparos en desarrollo horizontal mina el teniente*. Chile.
- Langesfors, u y kihlstrom, b. (1973). *Técnica Moderna de voladura de rocas*. Edición Urmo. Bilbao. 1era edición
- Wigodski, J. (2010). *Población y muestra*. 28-05-2013. Recuperado de <http://metodologiaeninvestigacion.blogspot.com/2010/07/poblacion-y-muestra.html>
- International Society of Explosives Engineers. (2018). *Manual del especialista en Voladura 17 a edición*. Cleveland, Ohio EE.UU.



## ANEXOS

### ANEXO A. EQUIPOS UTILIZADOS PARA REALIZAR LAS PRUEBAS EN LAS LABORES DE MINA HUANZALÁ

#### A.1. Equipos utilizados para el trabajo

Característica	Equipos	Objeto de medición
Fragmentación	Cámara fotográfica digital, de serie WL4HA001487 y laptop con software Wipfrag.	Definir matemáticamente las curvas granulométricas de las cargas derribadas por los disparos.
Vibraciones	Sismógrafo INSTANTEL PRO6 con 2 geófonos y micrófono, de serie MP1499.	Medir la velocidad pico de partícula en diferentes puntos de la mina para evaluar el trabajo de las cargas operantes de explosivos.





## A.2. Disparos en las que se participó y la VPP

ITEM	LABOR	MATERIAL	N° DE TAL.	DIST. DISP.	VPP (mm/s)
1	R200/V4	MINERAL	32	25	18.11
2	C650/V2	MINERAL	20	33	17.21
3	R200/V4	MINERAL	31	35	16.38
4	V800/V1P	MINERAL	42	30	13.17
5	U250/V6	MINERAL	25	25	17.2
6	R200/V4	MINERAL	35	24	15.01
7	R200/V4	MINERAL	35	28	19.32
8	U250/V2	MINERAL	25	30	16.24
9	C250/V2	MINERAL	31	27	22.87
10	P500/V5	MINERAL	30	33	16.47
11	P050/V2	MINERAL	28	31	21.31
12	V800/V1	MINERAL	39	34	15.17
13	V100/V7	MINERAL	35	22	20.2
14	B1450/V1	MINERAL	21	29	15.47
15	P050/V2	MINERAL	32	25	17.52
16	U250/V4	MINERAL	27	21	14.09
17	C650/V2	MINERAL	29	22	13.41
<b>TOTAL</b>			<b>517</b>	<b>27.88</b>	<b>17.01</b>



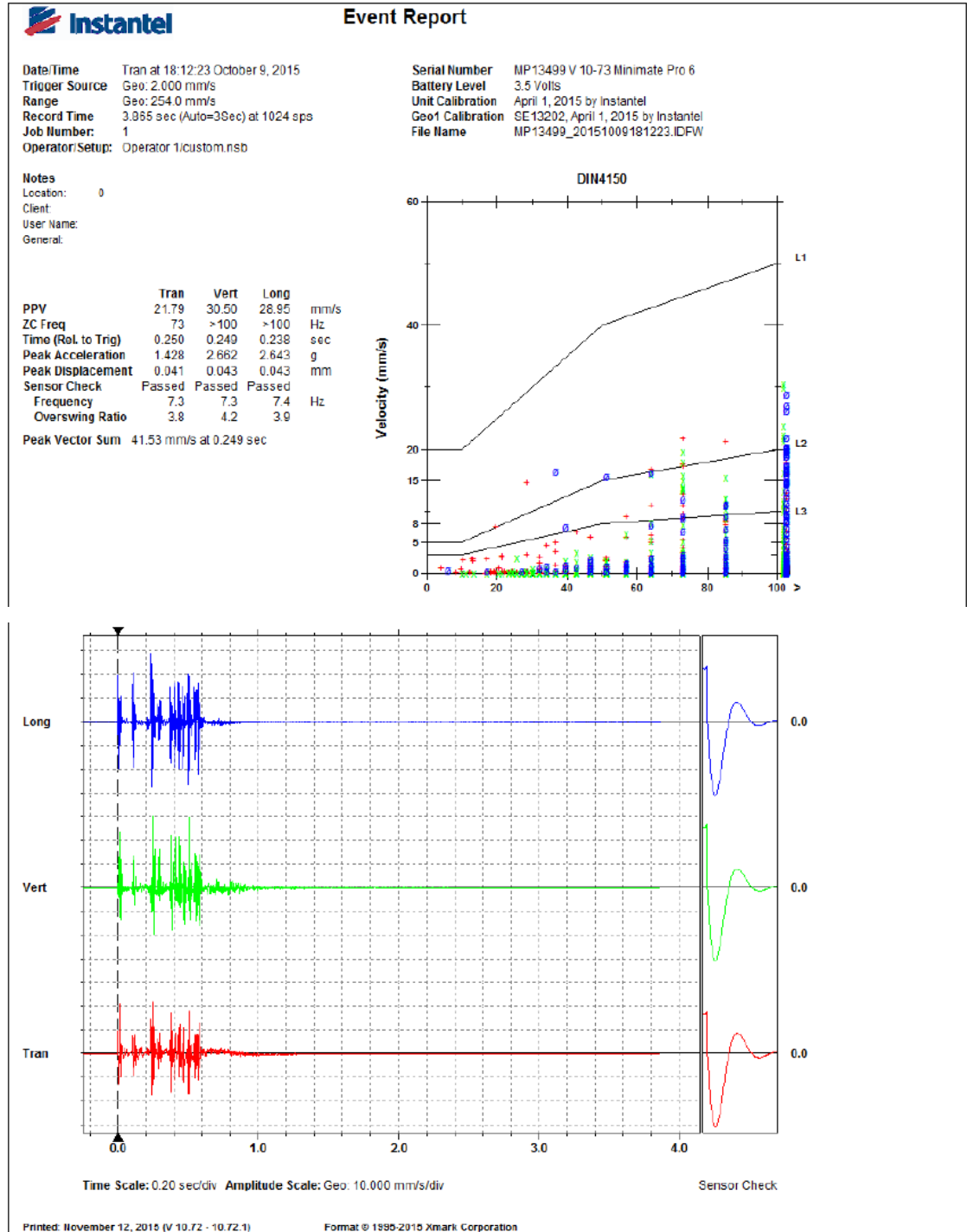
### A.3. Kpi's de las voladuras controladas

LABOR	MATERIAL	N° DE TAL.	TOTAL, EXPL. (Kg)	TONELADAS (Tn)	F.P. (Kg/Tn)
R200/V4	MINERAL	32	104	183	0.56
C650/V2	MINERAL	20	92	142	0.65
R200/V4	MINERAL	31	105	202	0.52
V800/V1P	MINERAL	42	182	402	0.45
U250/V6	MINERAL	25	79	151	0.52
R200/V4	MINERAL	35	106	178	0.59
R200/V4	MINERAL	35	106	168	0.63
U250/V2	MINERAL	25	79	158	0.5
C250/V2	MINERAL	31	105	206	0.51
P500/V5	MINERAL	30	95	174	0.55
P050/V2	MINERAL	28	105	220	0.48
V800/V1	MINERAL	39	182	407	0.45
V100/V7	MINERAL	35	155	344	0.45
B1450/V1	MINERAL	21	74	153	0.48
P050/V2	MINERAL	32	116	202	0.57
U250/V4	MINERAL	27	74	127	0.58
C650/V2	MINERAL	29	85	156	0.54
<b>TOTAL</b>		<b>517</b>	<b>1844</b>	<b>3573</b>	<b>0.53</b>

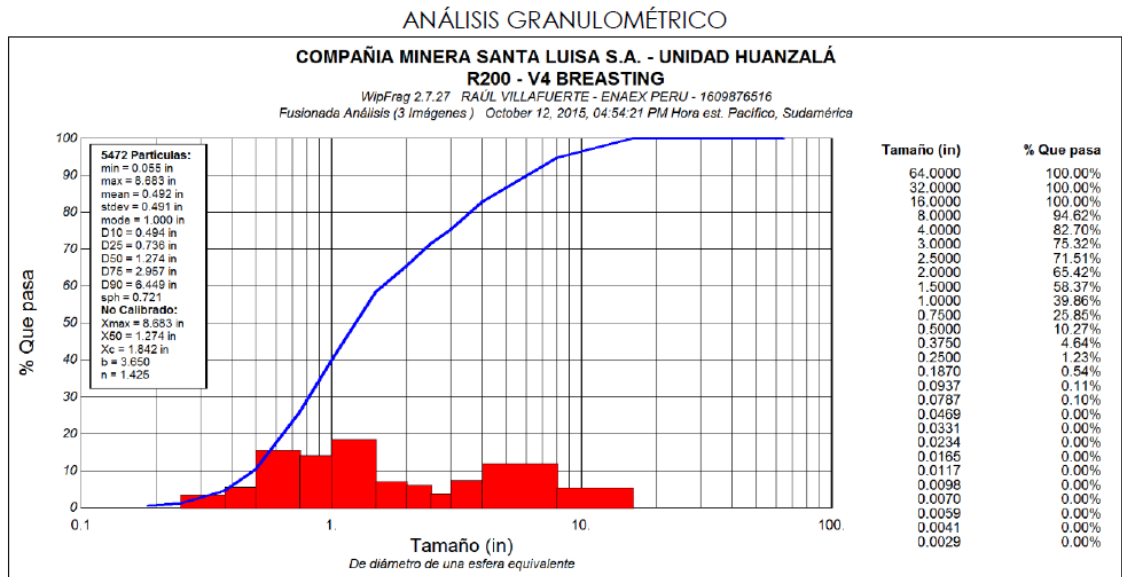


## ANEXO B.

### B.1. Reporte de vibraciones con el equipo sismógrafo InstanTEL Pro6



## B.2: Análisis de fragmentación con apoyo de software WipFrag



## B.3: Instalación de sismógrafo para monitoreo de vibraciones



#### **B.4: Resultado de la voladura, techos y hastiales**



#### **B.5: Capacitación al personal sobre el producto**



## B.6: Capacitación al personal sobre el producto en almacén

