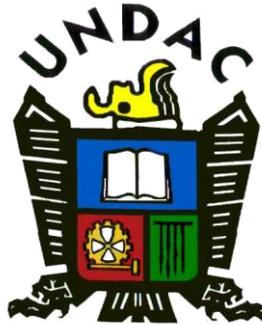


**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería de minas



**TESIS**  
**Estudio de vibraciones para la selección de explosivo**  
**Óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera**  
**Ares S.A.C. Filial de Hochschild**

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

**Autor: Bachiller: Jonatan Christian CANO MUCHA**

**Asesor: Dr. Agustín Arturo AGUIRRE ADAUTO**

**Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

Escuela de Formación Profesional de Ingeniería de minas



## **TESIS**

### **Estudio de vibraciones para la selección de explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild**

Sustentada y aprobada ante la comisión de Jurados:

-----  
**Mg. Teodoro Rodrigo SANTIAGO ALMERCÓ**  
**PRESIDENTE**

-----  
**Mg. Nieves Oswaldo GORA TUFINO**  
**MIEMBRO**

-----  
**Ing. Julio César SANTIAGO RIVERA**  
**MIEMBRO**

**Dedicatoria**

A Dios, a mis padres  
Esposa e hijo

### ***Reconocimiento***

A Dios, por el regalo de la vida y por permitir, a través de innumerables experiencias y valiosas personas, seguir adelante en mi vida personal y profesional.

A todas las personas de las diversas organizaciones en las que he laborado, quienes compartieron conmigo sus experiencias y conocimientos. Amigos que evidencian la tenacidad, la pasión y el esfuerzo para continuar adelante en una industria tan compleja como apasionante.

Y en especial agradecer a mi familia, esposa e hijo

A todos ustedes mi mayor reconocimiento y gratitud.

## Resumen

La voladura representa una de las operaciones unitarias de mayor relevancia en toda operación de extracción de mineral. El objetivo final es estudiar las vibraciones para seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene de Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild , de tal modo que sea mínimo el costo combinado de las operaciones de perforación, voladura, y consecuencia el transporte y chancado primario de la roca, produciendo a la vez el menor daño posible en las cercanías de la operación donde se sitúa la mina Selene. En efecto, la medición de los niveles de velocidad de partículas que provoca la detonación de cada carga explosiva, es un medio a través del cual es posible conocer su eficiencia relativa, su interacción con las cargas adyacentes y en definitiva el rendimiento general del diseño. Es así que, en primer lugar, estudiaremos las vibraciones que se producen en la Unidad Selene

Se describe en este trabajo la aplicación de la técnica de monitoreo de vibraciones particularmente en la Unidad Operativa Selene y su importancia en el diagnóstico, control, modelamiento y optimización del proceso de la voladura. Se analiza su potencial en términos de alcanzar substantivas mejoras técnico-económicas, aumentar los rendimientos y minimizar los costos operacionales en esta etapa de la explotación minera. luego de seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild , el objetivo es alcanzado como se demuestra en el presente estudio.

### PALABRAS CLAVES:

- Estudios de vibraciones
- Selección óptima de explosivos
- Minera Ares S.A.C.

## Abstract

Blasting represents one of the most relevant unit operations in any ore extraction operation. The final objective is to study the vibrations to select the optimum explosive in the Selene Operating Unit of Compañía Minera Ares S.A.C. subsidiary of Hochschild, in such a way as to minimize the combined cost of drilling, blasting operations, and consequently the primary transportation and crushing of the rock, while producing as little damage as possible in the vicinity of the operation where locates the Selene mine. In effect, the measurement of the velocity levels of particles that causes the detonation of each explosive charge, is a means through which it is possible to know their relative efficiency, their interaction with adjacent loads and ultimately the overall design performance. So, first of all, we will study the vibrations that occur in the Selene Unit

The application of the vibration monitoring technique is particularly described in the Selene Operating Unit and its importance in the diagnosis, control, modeling and optimization of the blasting process. Its potential is analyzed in terms of achieving substantive technical-economic improvements, increasing yields and minimizing operational costs at this stage of mining. after selecting the optimum explosive in the Selene Operating Unit - Compañía Minera Ares S.A.C. subsidiary of Hochschild , the objective is achieved as demonstrated in the present study.

### KEYWORDS:

- Vibration studies
- Optimum selection of explosives
- Minera Ares S.A.C.

## **Introducción**

Hochschild Mining es uno de los principales productores de metales preciosos de extracción subterránea, especializados en yacimientos de plata y oro de alta ley, con más de 50 años de experiencia operativa en el continente americano. Tienen una sólida base de activos, una gran cartera de proyectos en desarrollo y una clara estrategia. En la actualidad, operan cuatro minas, tres de ellas en el Perú, y una en el sur de Argentina.

Todas las operaciones se realizan por el método de minería subterránea. Las vetas de mineral son epitermales, lo que obliga a utilizar exclusivamente este tipo de minado. El mineral de las operaciones se procesa hasta convertirse en concentrado o lingotes de aleación de plata y oro, también conocido como Dore

Considerando que la mayor parte de los costos radica en las operaciones unitarias de perforación y voladura de rocas, se requiere mejorar cada vez más utilizando las técnicas modernas de voladura de rocas.

La presente tesis tiene por objetivo contribuir al desarrollo de los conocimientos actuales en Voladura de Rocas y su aplicabilidad en las Operaciones Mineras. La tesis está orientada básicamente a dos aspectos muy importantes: el primero, la elección del explosivo adecuado para la realización de un trabajo determinado minimizando el daño al macizo rocoso remanente y el segundo, determinar la cantidad máxima de explosivo permitido por retardo. Ambos trabajos se realizaron usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones.

Mediante el monitoreo de vibraciones se puede obtener diversos datos, entre los cuales se tiene las velocidades pico partícula en las tres direcciones para poder realizar una base de datos, modelar, analizar y evaluar el daño potencial que una voladura puede producir.

Los puntos más importantes que se deben considerar cuando se hacen voladuras son: lograr un adecuado grado de fragmentación de la roca, de tal modo que se obtenga un costo mínimo combinado de las operaciones de carguío, transporte, chancado y molienda de la roca. Minimizar el daño al macizo rocoso en su entorno permitiendo una operación sin riesgos.

Para poder lograr satisfacer esos dos requisitos contradictorios necesitamos de una correcta elección del explosivo, cuanto explosivo cargar por taladro o en su defecto, la cantidad de explosivo deberá causar el menor daño posible al entorno de la voladura, pero cumpliendo con los objetivos antes mencionados.

#### DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS

Para el desarrollo de la presente tesis he considerado (siete) 7 capítulos, siendo los siguientes:

- El capítulo uno, trata sobre los aspectos de la investigación, planteamiento del problema, delimitación; formulación de: problemas generales y específico, objetivos; justificación, importancia y alcances de la investigación y limitaciones.
- El capítulo dos, trata sobre el marco teórico que comprende antecedentes, bases teóricas-científicas, definición de términos, sistemas de hipótesis e identificación de variables.
- El capítulo tres, trata sobre la metodología de la investigación que comprende: tipo de investigación, diseño de investigación, población y muestra, métodos de la investigación, técnicas e instrumentos de recolección de datos.

- El capítulo cuatro, trata de sobre los aspectos generales de la mina; ubicación y accesibilidad de la mina, historia, geología, métodos de explotación y plan de minado.
- El capítulo cinco, trata sobre el estudio de vibraciones, obtenidos en la mina caso de estudio.
- El capítulo seis, selección del explosivo optimo, aquí presentamos los resultados de las pruebas y discusión de resultados
- Para terminar la tesis se presentan las conclusiones y recomendaciones y la bibliografía correspondiente.

Lo cual pongo a consideración de mis jurados calificadores para su evaluación correspondiente.

.

## Índice

	Pagina
<b>CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACION</b>	
1.1. Identificación y determinación del problema.	01
1.2. Delimitación de la investigación	02
1.2.1. Delimitación espacial	02
1.2.2. Delimitación temporal	02
1.2.3. Delimitación temática	02
1.3. Formulación del problema.	02
1.3.1. Problema Principal.	03
1.3.2. Problema Específicos.	03
1.4. Formulación de objetivos.	03
1.4.1. Objetivo General.	03
1.4.2. Objetivos Específicos.	03
1.5. Justificación de la Investigación.	04
1.6. Limitaciones de la Investigación.	04
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b>	05
2.1. Antecedentes de estudio.	05
2.2. Bases Teórico - Científicas.	07
2.3. Definición de Términos básicos.	17
2.4. Formulación de Hipótesis	19
2.4.1. Hipótesis general	19
2.4.2. Hipótesis específicas	19
2.5. Identificación de Variables.	19
2.5.1. Variables para la hipótesis general	19
2.5.2. Variables para las hipótesis específicas	19
2.6. Definición operacionalización de variables e indicadores	20
<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA Y TECNICAS DE INVESTIGACION</b>	21
3.1. Tipo de Investigación.	21
3.2. Métodos de Investigación.	21
3.3. Diseño de Investigación.	21
3.4. Población y Muestra.	22
3.5. Técnicas e Instrumento de Recolección de Datos.	22
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.	23
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	24
4.1. Descripción del trabajo de campo	24
4.1.1. Trabajos de monitoreo	26
4.1.1.1. Ubicación del equipo	26
4.1.2. Instalación del geófono	27

4.1.3. Resultados obtenidos	27
4.1.4. Modelamiento de vibraciones – campo lejano	29
4.1.5. Datos de laboratorio	30
4.1.6. Coeficiente o Relación de Poisson	31
4.1.7. Módulo de Young	32
4.1.8. Cálculo de la Velocidad de Onda P	32
4.1.9. Cálculo de la velocidad pico de partícula crítica (VPPC)	32
4.1.10. Modelamiento de vibraciones	33
4.1.11 Análisis de los daños originados por la voladura de rocas	40
4.1.12. Técnicas usadas para reducir las vibraciones	41
4.1.13. Cálculo de la carga máxima por retardo	43
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados	45
4.2.1 Resultados de las pruebas	45
4.3 Prueba de hipótesis	47
4.3.1. Hipótesis de Investigación	47
4.3.2 Hipótesis de estadísticas	48
4.3.3. Tipo de prueba de Hipótesis	48
4.4. Discusión de resultados	50
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXOS	
INSTRUMENTOS Y EQUIPOS DE RECOLECCION DE DATOS	
MATRIZ DE CONSISTENCIA	

**Lista de tablas**

	Pagina
Tabla 01. Operacionalización de variables e indicadores	20
Tabla 02. Resultados del monitoreo usando dinamita (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.	27
Tabla 03. Resultados del monitoreo usando dinamita (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.	28
Tabla 04. Resultados del monitoreo usando dinamita (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.	28
Tabla 05. Resultados del monitoreo usando emulsiones (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.	28
Tabla 06. Resultados del monitoreo usando emulsiones (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.	29
Tabla 7. Resultados del monitoreo usando emulsiones (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.	29
Tabla 8. Ensayo de Propiedades Físicas - Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2216 – 98. Tajo 775 - Veta Tumuri.	30
Tabla 9. Ensayo de Compresión Simple - Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2938. Tajo 775 - Veta Tumuri.	30
Tabla 10. Ensayos de Compresión Triaxial - Se ha ensayado 3 testigos por cada muestra entregada. Los ensayos se realizaron según la norma ASTM 2664 – 95. Tajo 775 - Veta Tumuri.	31
Tabla 11. Ensayos de Propiedades Elásticas. Tajo 775 - Veta Tumuri.	31
Tabla 12. Calculo de la velocidad de la Onda P para los frentes de estudio. Tajo 775 - Veta Tumuri.	32
Tabla 13. Carga máxima por retardo. Tajo 775 - Veta Tumuri.	43
Tabla 14. Cargas operantes usadas para las pruebas. Tajo 775 - Veta Tumuri.	44
Tabla 15. Carga mínima usada para las pruebas. Tajo 775 - Veta Tumuri.	47

**Lista de figuras**

	Pagina
Figura 01. Diagrama Original de Perforación en el tajo 775 - Veta Tumuri	25
Figura 02. Registro emitido por el sismógrafo en el tajo 775 - Veta Tumuri	25
Figura 03. Ubicación del equipo sismógrafo respecto a los frentes del tajo 775 - Veta Tumuri.	26
Figura 04. Esquema de cómo se realizó la toma de datos en los frentes del tajo 775 - Veta Tumuri.	27
Figura 05. Modelamiento de vibraciones - Usando dinamita (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.	34
Figura 06. Modelamiento de vibraciones - Usando dinamita (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.	35
Figura 07. Modelamiento de vibraciones - Usando dinamita (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.	36
Figura 08. Modelamiento de vibraciones - Usando emulsiones (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.	37
Figura 09. Modelamiento de vibraciones - emulsiones (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.	38
Figura 10. Modelamiento de vibraciones - Usando emulsiones (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.	39
Figura 11. Gráfico de los resultados obtenidos respecto a la prueba de hipótesis - La distribución de T se llama ahora la distribución-t de Student. / Para dinamita.	49
Figura 12. Gráfico de los resultados obtenidos respecto a la prueba de hipótesis - La distribución de T se llama ahora la distribución-t de Student. / Para emulsión.	50

## CAPITULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACION

#### 1.1. Identificación y Determinación del problema.

El Grupo Hochschild es un importante conglomerado minero de origen peruano, dedicado a la explotación de yacimientos subterráneos de metales preciosos. El grupo está conformado por varias empresas que cuentan con operaciones mineras en Perú y Argentina, además de varios prospectos mineros para nuevas operaciones en México y Chile.

La Compañía Minera Ares, Unidad Operativa Selene es una empresa productora de un bien físico, de tipo conversión (extractiva), donde se realiza el cambio físico de la materia prima, por el tipo de volumen de producción es masivo. La empresa pertenece al segmento de mediana minería, por el volumen de tratamiento de mineral que procesa (hasta 5,000 toneladas métricas por día). En cuanto a la voladura, todas las labores de avance tienen en común la utilización de explosivos para la rotura. Se utiliza dinamita SEMEXSA de 65% de 7/8" x 7" y dinamita SEMEXSA de 80%

Considerando que dentro de la explotación minera la perforación y voladura representa una de las operaciones unitarias más costosas de la producción, se requiere mejorar cada vez más utilizando las técnicas modernas de voladura de rocas. La energía de los explosivos desde hace mucho es utilizada para cumplir diferentes tipos de trabajo, por ejemplo: en la minería su objetivo principal es quebrar la roca. Sin embargo, mediante el análisis de la eficiencia resultante de una voladura, podemos observar, que la energía no es utilizada en su totalidad en el momento de realizar su trabajo, como resultado, parte de esta energía será liberada en forma de vibraciones.

Por lo mencionado se realizó un estudio de las vibraciones en la etapa de voladura con la finalidad de seleccionare explosivos óptimos, lo cual ha permitido identificar y proponer mejoras significativas, que ayudarán a incrementar la competitividad, sostenibilidad y rentabilidad de la Compañía Minera Ares, Unidad Operativa Selene.

## **1.2 Delimitación de la Investigación**

**1.2.1. Delimitación espacial.** La presente investigación se limitará a las operaciones de voladura en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild .

**1.2.2. Delimitación temporal.** Toda la realización del presente estudio fue en el año 2016.

**1.2.3. Delimitación temática.** El motivo del presente trabajo radica en estudiar vibraciones para la selección del explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild .

## **1.3. Formulación del problema.**

La investigación realizada tiene como principal objetivo no solo de evitar que los niveles de vibraciones excedan a los límites permisibles preestablecidos sino también con el fin de poder evitar daños a la masa rocosa, reducir costos en explosivos y por ende incrementar la rentabilidad de la empresa.

Es por esta razón que la presente investigación plantea estudiar las vibraciones y seleccionar explosivos óptimos mejorando así la fragmentación producto de la voladura el

cual traerá grandes beneficios a la operación en el chancado y molienda, obteniendo mejores resultados en el costo global mina.

### **1.3.1. Problema General.**

¿Mediante el estudio de vibraciones se podrá seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ?

### **1.3.2. Problema Específicos.**

- a) ¿Se podrá estudiar las vibraciones en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ?
- b) ¿Cuál será el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ?

## **1.4. Formulación de objetivos.**

### **1.4.1. Objetivo General.**

“Seleccionar el explosivo óptimo mediante el estudio de vibraciones en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ”

### **1.4.2. Objetivos Específicos.**

- a) “Estudiar las vibraciones en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ”
- b) “Seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ”

## **1.5. Justificación de la Investigación.**

Razones de carácter particular, vinculadas a mi actividad actual en el campo de la perforación y voladura que me han llevado a iniciar esta tesis.

Es importante dicho trabajo de investigación no solo económicamente para la empresa que explota la materia prima, sino predecir los niveles de vibración por intermedio de un modelo matemático de estimación en las zonas circundantes, de esta manera evitaremos daños en estructuras aledañas. Así mismo se pretende obtener los siguientes resultados con la presente investigación:

Obtener una granulometría homogénea y con la geometría necesaria para mejorar el rendimiento del equipo de carguío.

Mayor exactitud en el control del uso de los explosivos.

Mejorar la seguridad en las voladuras.

La presente investigación también se justifica plenamente ya que será un aporte que servirá para la toma de decisiones a nivel de la organización de esta empresa minera, como también se hará extensiva a otras minas del ámbito nacional e internacional.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación.**

En el desarrollo de la presente investigación, prácticamente no hubo limitaciones en lo referente a la obtención de los datos, debido a las facilidades otorgadas .

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio.**

Habiendo realizado una revisión de la literatura sobre vibraciones en las diversas minas encontramos la existencia de información sobre este tema. así tenemos algunos estudios realizados:

#### **MANUAL TÉCNICO PARA EL USO DE EXPLOSIVOS UTILIZADOS EN VOLADURAS A CIELO ABIERTO EN VÍAS TERRESTRES, por:**

Francisco Rubén Romero Naranjo, 2009. Tesis de grado previa la obtención del título de magister en vías terrestres en la Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Ecuador - Ambato,

Concluye que: Un riesgo que existe en la carga mecanizada, tanto con cartuchos explosivos como con ANFO a través de mangueras, es que se producen cargas electrostáticas causadas por el transporte del material explosivo dentro de la manguera. Esto puede producir una iniciación involuntaria por lo cual se hace necesario utilizar una manguera que sea adecuada y aprobada para este tipo de operaciones. Esto significa que para un equipo cargador de cartuchos la manguera debe ser antiestáticamente tratada y para el cargador de ANFO la manguera debe ser conductiva.

#### **MONITOREO DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR LA VOLADURA DE ROCAS EL MODELO DE VIBRACIÓN COLQUE, por:**

Alberto Hermogenes Anicama Lujan, 2010. Tesis para optar el grado académico de

maestro en ciencias con mención en: ingeniería de minas, en la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.

Concluye que: El análisis de vibraciones, permite establecer una ecuación de comportamiento como función de la distancia y la carga por retardo, con la cual se puede estimar las vibraciones máximas para las próximas voladuras. Con las regresiones que se hacen para hallar la VPP se puede hallar las correlaciones que hay entre las variables independientes.

**DISEÑO DE LAS MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZANDO LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS, por:**

Victor Alejandro Ames Lara, 2008. Tesis para optar el grado de maestro en ciencias con mención en: ingeniería de minas, en la Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.

Concluye que: el cambio del ANFO PESADO por el ANFO ha llevado a obtener resultados satisfactorios en el aspecto técnico porque se puede apreciar que en la primera prueba el 69% de los fragmentos tenían dimensiones menores a 0,15 m y en la segunda prueba el 90,7% de los fragmentos eran menores que dicho tamaño, los cuales son adecuado para el tratamiento por lixiviación del mineral fragmentado.

Respecto a los resultados económicos la diferencia de US\$/ton es 0,014 a favor del ANFO PESADO y si el movimiento de material es 36 500 TM/día el ahorro sería de US\$ 183 960.

## **2.2. Bases Teórico - Científicas.**

Una de las primeras investigaciones relacionadas a las vibraciones producto de voladuras consistió en hacer detonar cierta cantidad de explosivo en un desmote de rocas, para posteriormente, medir los daños causados en las estructuras cercanas. Este fue el inicio de un programa de investigaciones por el USBM en 1930. El primer trabajo que realizó este equipo fue el de desarrollar un tipo de sismógrafo que se pudiera adaptar a la tarea de captar vibraciones producidas durante las operaciones normales de explotación de minas. Luego de estudiar los aparatos utilizados en la captación de vibraciones originadas por movimientos telúricos, y a varios proyectos, se fabricaron algunos modelos, los cuales fueron los precursores de los modernos sismógrafos de ingeniería.

Los explosivos usados en la minería generan ondas que se transmiten en todas las direcciones desde la fuente. Estas vibraciones superficiales causadas por el paso de las ondas de Rayleigh (principalmente) pueden ser registradas en dos componentes horizontales y una vertical en forma de registros contra el tiempo de aceleración, velocidad o desplazamiento. Estas vibraciones pueden afectar las edificaciones cercanas a la zona de operación de la mina.

Asimismo, de acuerdo con Dowding y McKenna (2005) y Gad et al. (2005) es importante diferenciar los daños inducidos por las vibraciones de las voladuras de aquellos inducidos por otros fenómenos como los cambios de temperatura o de humedad, gradientes de temperatura entre la noche y el día, asentamientos diferenciales, sobrecargas estructurales, cambios químicos en los materiales, durabilidad de los materiales, entre otros aspectos. Esto es particularmente importante si se tiene en cuenta que en Dowding y

McKenna (2005) se menciona que movimientos del terreno con velocidades pico de 1.5 mm/s originados en voladuras generan un movimiento de grietas 10 veces menor que el asociado con fenómenos atmosféricos. El primer autor (Ruiz Valencia) coordinó un estudio en el que aparecieron fisuras y grietas en edificaciones de un piso que la comunidad asociaba con las voladuras en una mina cercana. Después de una exhaustiva investigación se logró demostrar que estos daños en realidad se debían a fenómenos expansivos del suelo de cimentación de las viviendas, los cuales generaban una serie de esfuerzos en los muros superaban ampliamente la resistencia a tensión de la mampostería. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario instrumentar en el tiempo las grietas, ya que con la medición continua es posible tener luces sobre el real aporte de los diferentes fenómenos naturales (por ejemplo, el clima) y los antrópicos en la evolución de procesos de figuración.

### **2.2.1. Normativas Internacionales**

Trabajos realizados en diversos países Europeos, en Canadá, USA y en Australia propusieron diferentes valores de velocidad máxima de partícula, tratando de esta manera evitar daños a construcciones. Los valores propuestos se sitúan usualmente entre el rango de 10 – 50 mm/s. Las normas internacionales de los países del entorno europeo más destacadas son las siguientes:

Alemania: DIN 4150

Francia: GFEE

Gran Bretaña: BS 7385

Suecia: SS460 48 66

Portugal NP-2074

Internacional: ISO 2631

Estados Unidos: USBM RI 8507

Norma Unión Europea

Otros

### **2.2.2. Fundamentos De Vibraciones**

Un elemento importante en el proceso de evaluación y optimización de la operación de voladura, es poder predecir a través de un modelo, las consecuencias y beneficios al introducir cambios en los parámetros más relevantes de una voladura, sin que ello deba necesariamente tener que realizarse a escala real. Se pueden distinguir diferentes enfoques asociados al modelamiento de vibraciones, los cuales tienen como objetivo final predecir los niveles de vibración (velocidad de partículas), en un punto específico de acuerdo a un diseño de voladura dado.

Se utilizan frecuentemente los modelos empíricos tradicionales, que permiten con datos obtenidos en terreno establecer modelos o ecuaciones generales de comportamiento, que representan la velocidad de partículas en función del explosivo detonado, y la distancia de la voladura al lugar de interés.

Además de la acción de reducir el tamaño y mover la roca, la energía de una voladura genera ondas sísmicas que pueden causar un daño significativo a la roca a grandes distancias, pudiendo afectar a fallas o estructuras principales como también a instalaciones industriales y edificaciones. Las ondas de vibraciones pueden ocasionar un daño potencial

mayor cuando se presenta con altos niveles de vibraciones y frecuencia dominante más bajas, lo que determina mayores desplazamientos y mayor riesgo de daño al macizo rocoso.

#### **a) 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 voladuras inducidas en la roca, generalmente se considera que las vibraciones son producidas por la detonación del explosivo.

#### **b) Propiedades básicas de las ondas**

- Frecuencia de las vibraciones
- Amplitud de las vibraciones
- Duración de las vibraciones
- Longitud de onda de las vibraciones
- Velocidad de Propagación
- Tipos de ondas en vibraciones
- Primer arribo de ondas
- Unidades de vibraciones
- Velocidad de las vibraciones
- Aceleración de las vibraciones
- Vibraciones y esfuerzo
- Pérdida friccional
- Monitoreo de vibraciones

- Obtención de datos a partir del monitoreo de las vibraciones

### **2.2.3. 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 (2mm) lo cual se puede verificar mediante la integración de la onda.

Para realizar la integración de la onda se puede realizar en forma directa con el software Blastware del Minimate Plus, utilizando la función Integrate sobre la onda de velocidad, la cual entrega los valores de desplazamiento de la onda completa.

### **2.2.4. Eficiencia Relativa del Explosivo**

La magnitud de las vibraciones terrestres y aéreas en un punto determinado varía según la carga de explosivo y la distancia de dicho punto al lugar de la voladura. Frente a problemas de vibraciones, algunos usuarios plantean reducir el consumo específico de explosivos en las voladuras en un 20% con respecto al óptimo. Los resultados de los niveles de vibración medidos se han multiplicado por 2 y por 3, como consecuencia del gran confinamiento y mala distribución especial del explosivo que origina una falta de energía para desplazar y esponjar la roca fragmentada.

- **Cargas detonando en una secuencia determinada**

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 periodos consecutivos.

- **Dispersión de los tiempos de encendido de los retardos**

Cuando en la voladura existen varios taladros con detonadores que poseen el mismo tiempo de retardo nominal, la carga máxima operante suele ser menor que la total, debido a la dispersión en los tiempos de salida de los detonadores empleados, siempre que el intervalo de retardo sea suficientemente grande para que no existan interferencias constructivas entre las ondas generadas por los distintos grupos de taladros.

Vamos a considerar el total de detonadores con el mismo tiempo de retardo nominal debido a que hay probabilidad de que todos detonen en simultáneo y es la posibilidad más crítica para originar mayor vibración y daño.

- **Modelo de Campo Lejano**

Como se ha mencionado, los modelos de vibraciones que permitan predecir el nivel de vibraciones se pueden determinar a partir de mediciones de terreno, de estas mediciones se deben obtener principalmente tres antecedentes, a saber:

- El nivel de vibraciones que genera la detonación de una carga de explosivo.
- La cantidad de explosivo que genera cierto nivel de vibraciones, y
- La distancia a de la carga al punto a la cual se mide el nivel de vibraciones.

Los factores que controlan la transferencia de la energía del explosivo desde el taladro a la roca son la densidad y la VOD del explosivo, producto que representa la Característica de Impedancia,  $Z$ .

- Cuando la Característica de Impedancia de la roca es igual a la Característica de impedancia del explosivo, el 100% de la energía de choque en el taladro se transmite a la roca, (es decir no hay energía reflejada devuelta al taladro).
  - Cuando la Característica de Impedancia de la roca es mayor que la del explosivo ( $z < 1$ ) el esfuerzo reflejado a las paredes del taladro es compresivo, y el esfuerzo inducido en la masa rocosa es mayor que la presión en el taladro, con un máximo esfuerzo del doble de la presión de taladro cuando  $z = 0$ .
  - Cuando la Característica de Impedancia de la roca es menor que la del explosivo ( $z > 1$ ), el esfuerzo reflejado a las paredes del taladro es de tensión ( $\sigma_{\text{reflected}}$  es negativo), y el esfuerzo inducido en la masa rocosa es menor que la presión en el taladro.
  - La onda transmitida es siempre compresiva (el termino  $\sigma_{\text{rock}}$  es siempre positivo).
- Las implicaciones prácticas de estas relaciones, con respecto a las vibraciones son:
- El aumento de la densidad del explosivo y/o VOD incrementará el esfuerzo inducido en la roca circundante.
  - El aumento del esfuerzo inducido en la roca incrementará el valor de  $K$  usado en la ecuación de Devine.

- Si una voladura contiene diferentes cargas y diferentes taladros, entonces se deberían usar valores diferentes de  $K$  para estimar los niveles de vibración producidos por taladros individuales.
- **Modelo de Campo Cercano**

En el campo cercano (muy cerca de los taladros donde ocurre el fracturamiento), la ecuación se debe modificar para tomar en cuenta la forma cilíndrica larga de la carga. La ecuación para la predicción de vibración en el campo cercano, como se muestra en la siguiente ecuación, fue desarrollada por Holmberg & Persson (1979).

Donde  $K$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son las mismas constantes que se muestran en la ecuación de Devine y  $\gamma$  es la carga lineal cargada en el taladro (kg. /m). Holmberg & Persson (1979) dieron valores de  $K$ ,  $\beta$  y  $\alpha$  de 700, 1.5 y 0.7 respectivamente para las condiciones de roca dura en Suecia.

La ecuación de H&P indica que el factor que tiene el mayor impacto en la vibración peak y en el daño no es el peso de la carga por retardo como es evidente en la ecuación de Devine, sino que más bien la carga lineal, que se controla por una combinación de diámetro del hoyo y densidad de carga.

Esta relación muestra que la Velocidad de Partícula Peak (PPV), en un punto del espacio, está dada por la ubicación de este punto respecto de la carga, el tipo de explosivo y la geometría del taladro definida por la concentración de carga lineal " $\gamma$ " (Kg/m), y más importante, por las características de atenuación de cada macizo rocoso en particular (constantes  $K$  y  $\alpha$ ).

- **Comparación entre los Modelos de Devine y Holmberg & Persson**

Para el modelamiento en el campo cercano, se requieren primero de datos vibratoriales adquiridos lo más cercano posibles a una carga explosiva típica, con geófonos o acelerómetros de un alto rango dinámico de respuesta, capacitados para medir niveles más altos de vibración. Por otra parte, en el proceso de análisis, se considera la carga explosiva en forma distribuida, tomando especial importancia los aspectos geométricos y de distancia a la carga, longitud del taco, densidad lineal del explosivo, etc., a diferencia del modelamiento tradicional con Devine que utiliza una sola distancia para el total de la carga explosiva, es decir, ésta como concentrada en un punto, consideración válida para distancias de más de 2 ó 3 veces la longitud de la carga explosiva.

- **Estimación de la velocidad pico de partícula crítica**

Los altos niveles de vibración, pueden dañar al macizo rocoso, produciéndose fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto, puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.

Con bajos niveles de vibración, tales como los presentes a grandes distancias de las voladuras, los niveles de deformación son muy pequeños para inducir un fracturamiento del macizo rocoso. A menores distancias, las vibraciones son suficientemente altas para extender las fracturas preexistentes, pero insuficientes para inducir nuevo fracturamiento. Muy cerca de las cargas explosivas, sin embargo, los niveles de vibración son lo suficientemente altos como para afectar a la matriz de roca y producir diferentes grados de fracturamiento a su alrededor.

- **Modelos de la velocidad pico de partícula**

Experimentalmente se ha llegado a establecer modelos que describen la velocidad de partícula peak (vibración), como una función de la carga detonada por retardo y la distancia entre cada detonación y el punto de medición. A continuación, se señalan algunos de estos modelos.

El término “D” o Distancia Escalar, describe la influencia de la distancia en metros y el peso de la carga de explosivo detonado en kilogramos. Con relación a esta formulación matemática existen varios criterios de los cuales se pueden señalar los siguientes:

*Criterio General Exponencial*

$$D = \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right) * e^{\left( \frac{d*\beta}{\alpha} \right)}$$

*Criterio General*

$$D = \left( \frac{d}{W^{\beta/\alpha}} \right)$$

*Langerfors (1963)*

$$D = \left( \frac{d}{W^{3/2}} \right)$$

*Hendron (Bulletin 656)*

$$D = \left( \frac{d}{W^{1/3}} \right)$$

*Devine (1962)*

$$D = \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)$$

Si son utilizadas cargas de explosivo cilíndricas, se ha visto por análisis adimensional que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la distancia, Devine (1962) y Devine y Duvall (1963), (López Jimeno et al 1987).

Teóricamente este criterio es el que mejor representa el comportamiento de la vibración en el campo lejano para cargas cilíndricas, donde el análisis dimensional sugiere que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la carga.

### **2.3. Definición de Términos básicos.**

#### **Vibraciones. -**

Las vibraciones vienen a ser un fenómeno de transmisión de energía que se refleja en la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. La detonación de un explosivo contenido en un taladro localizado en un macizo rocoso genera de una forma casi instantánea un gran volumen de gases a altas temperaturas y elevadas presiones.

#### **Voladura. -**

Es la acción de fracturar o fragmentar la roca, el suelo duro, el hormigón o de desprender algún elemento metálico, mediante el empleo de explosivos. Las mismas se realizan para lograr un objetivo predeterminado, pueden ser controladas, o no, puede ser a cielo abierto, en galerías, tules o debajo del agua.

#### **Densidad. -**

Se define como el peso por unidad de volumen y normalmente se expresa en términos de gramos por centímetro cúbico (g/cc). La densidad de un explosivo es una propiedad muy importante, porque, determina su sensibilidad, su velocidad de detonación y su diámetro crítico de carga.

#### **Explosivo. -**

Según Ames (2012), “Un explosivo es un compuesto químico o una mezcla de compuestos químicos a los cuales cuando se les da un estímulo correcto o incorrecto ellos sufren una reacción química violenta exotérmica.”.

**Vibración por voladura. -**

Las voladuras generan vibraciones del terreno que pueden tener diferentes efectos sobre las estructuras de la masa rocosa (discontinuidades como fallas, diaclasas, juntas, contactos), pudiendo ocasionar deslizamientos, causando en consecuencia, efectos graves, como por ejemplo el cierre de acceso hacia otras zonas de la mina y/o afectar equipos o personal.

**Velocidad de detonación. -**

Es la velocidad de propagación de la onda de detonación que viaja a través de la columna explosiva. La velocidad de detonación se expresa en m/s. Por definición es mayor a la velocidad del sonido. Es importante, porque, se emplea para calcular la presión de detonación. Muchos son los factores que afecta la velocidad de detonación, por ejemplo; tipo de explosivo, diámetro de la columna explosiva, prima o cebo, confinamiento, temperatura, entre otros.

**Presión de detonación. -**

Es la presión al inicio de la zona de reacción. Cuando un explosivo detona, inmediatamente libera una presión tremenda traducida en forma de una onda de choque. Se expresa en kilobares (kbar). La presión de detonación es afectada, principalmente, por la velocidad de detonación y la densidad.

**Presión de explosión o de taladro. -**

Es la presión sobre las paredes del taladro que ejercen los gases en expansión. Esta presión es también conocida como la presión de explosión de volumen constante.

International Society of Explosives Engineers (2008), indica que “La presión de explosión, en teoría representa el 45% de la presión de detonación”.

## **2.4. Formulación de Hipótesis.**

### **2.4.1. Hipótesis general**

“Si estudiamos las vibraciones producidas por voladura, entonces se podrá seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild .”

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- a) “Si estudiamos las vibraciones entonces podremos controlar que no excedan a los límites permisibles preestablecidos en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ”
- b) “El explosivo óptimo seleccionado será el que genere vibraciones que no excedan a los límites permisibles preestablecidos en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ”

## **2.5. Identificación de las Variables**

### **2.5.1. Variables para la hipótesis general**

*Variable Independiente:*

- Estudio de vibraciones producidas por la voladura.

*Variables Dependientes:*

- Selección de explosivo óptimo.

### **2.5.2. Variables para las hipótesis específicas.**

Para la hipótesis A*Variable Independiente:*

- Vibraciones.

*Variable Dependiente:*

- Masa rocosa.

Para la hipótesis B*Variable Independiente:*

- Vibraciones.

*Variable Dependiente:*

- Explosivo óptimo.

**2.6. Definición operacionalización de variables e indicadores***Tabla 01. Operacionalización de variables e indicadores*

VARIABLE	INDICADOR	TÉCNICA	INSTRUMENTO	MEDICIÓN
<u>Variable independiente:</u>	Tipos de ondas	Medición	Análisis de datos	Numeral
Estudio de	Generación de las vibraciones	Medición	Análisis de datos	Numeral
Vibraciones producidas por la voladura	Medición de las vibraciones	Medición	Análisis de datos	Numeral
<u>Variable dependiente:</u>	Velocidad de detonación	Medición	Análisis de datos	Numeral
Selección de	Daños a estructuras	Observación	Libreta de notas	Numeral
explosivo óptimo	Eficiencia del disparo	Medición	Análisis de datos	Numeral

*Fuente: Elaboración propia*

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo de Investigación.**

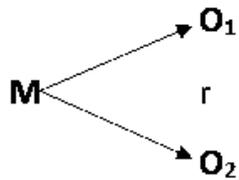
El presente trabajo de investigación es de carácter APLICATIVO conforme al propósito y naturaleza del proyecto. La investigación se ubica en el nivel descriptivo, explicativo y de correlación, pues analizaremos la diferencia entre la dinamita y emulsión, a través de las vibraciones que producen estos en los diferentes frentes los cuales se codificaron como frente muestra 01, frente muestra 02 y frente muestra 03.

#### **3.2. Métodos de la Investigación.**

Se ha realizado una revisión bibliográfica muy minuciosa, para analizar, investigar y conocer las investigaciones y los modelos matemáticos postulados recientemente que sean aplicables a las operaciones mineras de la minería peruana. Luego se eligieron los modelos respectivos que fueron aplicados en la presente investigación, después se monitorearon las vibraciones inducidas por la voladura de varios disparos llevados a cabo en una operación minera. Luego los resultados de los monitoreos mencionados anteriormente se compararon con los diversos criterios de daños aplicables a los resultados de la presente investigación. También, los resultados obtenidos de la presente investigación fueron analizados teniendo en cuenta las diversas normativas internacionales.

#### **3.3. Diseño de la Investigación.**

El diseño que se usará es de acuerdo a los objetivos y las hipótesis con el esquema siguiente:

**DISEÑO CORRELACIONAL:**

M = Muestra

O<sub>1</sub> = Observación 1

O<sub>2</sub> = Observación 2

r = Relación

**3.4. Población y Muestra.**

La población está constituida por los frentes de explotación en la mina Selene de Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild .

La muestra está constituida por frentes del tajó 775 - Veta Tumuri., exactamente por 3 frentes del tajó 775, que fueron tomados para utilizar dinamita y emulsión; y estudiar las vibraciones resultantes de estos.

**3.5. Técnicas e Instrumento de Recolección de Datos.**

Para la recolección de datos y la posterior evaluación del análisis de costos, se tomó en cuenta: los rubros siguientes:

Análisis documentario, observación, medición, clasificación de archivos (informes y datos estadísticos), etc.

Y como instrumentos: Cuestionario, técnicas de procesamiento y análisis de datos, registros de evaluación, etc.

### **3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.**

Se revisará sistemáticamente toda la información recopilada a efectos de determinar su calidad y el grado de confianza y se someterá a un tratamiento estadístico y uso de hojas Excel.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Descripción de trabajo de campo.

Respecto al estudio de vibraciones para la selección del explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild y sabiendo que la señal de vibraciones producida por una 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. El primer paso en el análisis de la señal, es determinar que carga representa cada paquete de vibración. De la capacidad para realizar esto depende determinar la diferencia entre la detonación real y la secuencia diseñada. Por esto con el objetivo de recopilar información se estableció el tajo 775 - Veta Tumuri

Con el monitoreo y análisis de las ondas de vibraciones fue posible determinar y calcular lo siguiente en el tajo 775 - Veta Tumuri:

- Tiempo real de detonación de una carga o cargas (Dispersión)
- Velocidad de partículas de cada carga en la voladura.
- Detonación de cargas con baja eficiencia o no detonadas.
- Detonación instantánea de cargas; detonación de cargas por simpatía, acoplamiento por insuficiente tiempo entre retardo de los taladros.
- Eficiencia relativa en la detonación de cargas similares.
- Diferencia entre Cargas Explosiva de Producción y Contorno.
- Diferencia entre cargas detonadas con distinto confinamiento.

- Análisis de Frecuencia, etc.

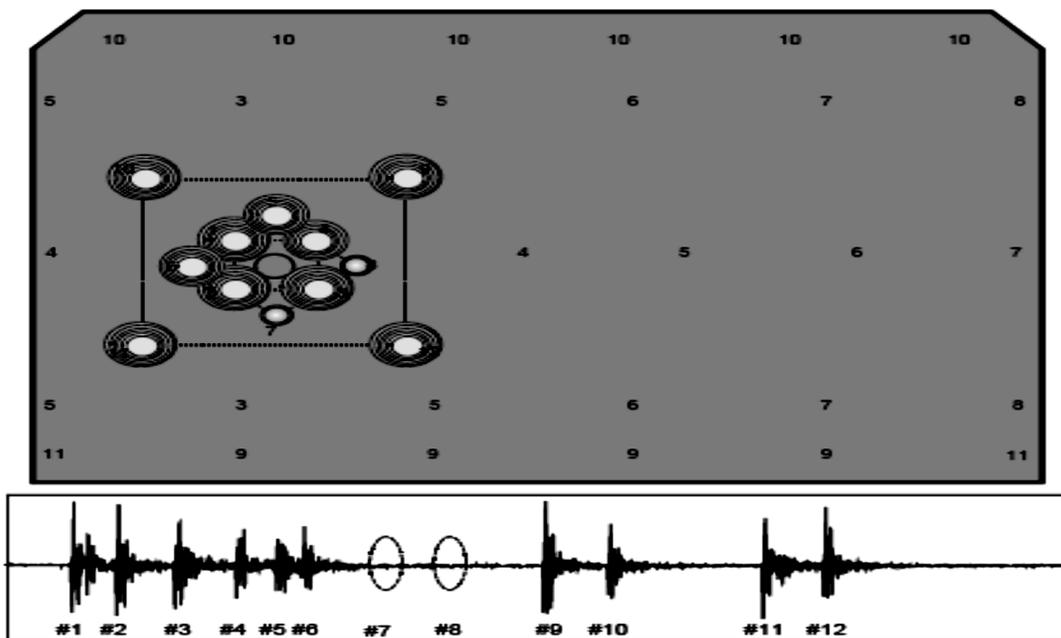


Figura 01. Diagrama Original de Perforación en el tajo 775 - Veta Tumuri  
 Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

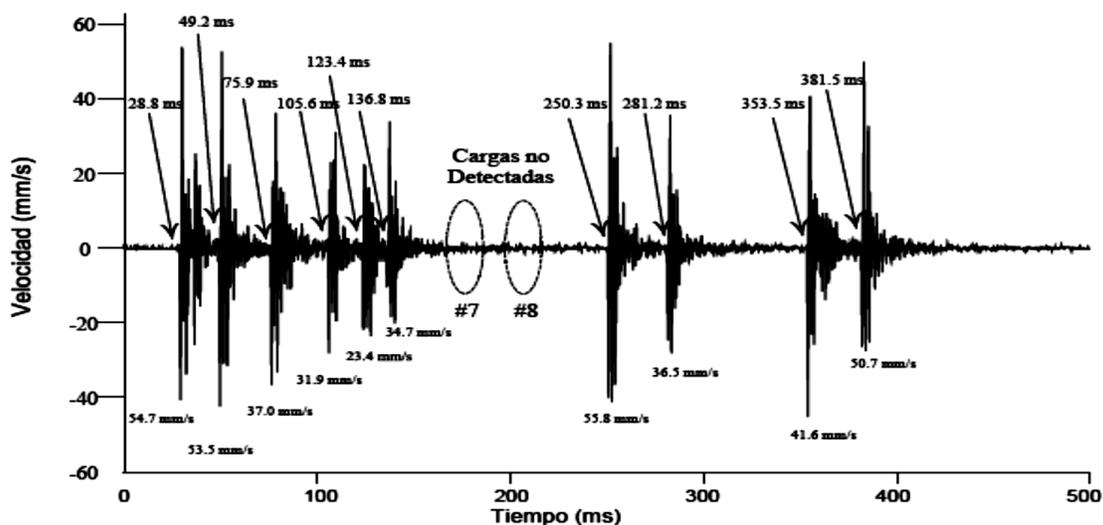


Figura 02. Registro emitido por el sismógrafo en el tajo 775 - Veta Tumuri  
 Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

La mayoría de los registros emitidos por el sismógrafo, grabaron los efectos de las vibraciones en unidades de velocidad de partícula, aunque éste parámetro es usado desde hace muchas décadas es aún un concepto de difícil entendimiento. Otra manera de cuantificar la vibración en un terreno, es el desplazamiento y la aceleración de la partícula. Esta última es raramente usada, pero juega un papel importante en la evaluación de los efectos de las vibraciones.

#### **4.1.1. Trabajos de monitoreo**

##### **4.1.1.1. Ubicación del equipo**

La ubicación del punto de monitoreo es fundamental para la toma de datos, que en nuestro caso y por la accesibilidad se ubicó en un punto estratégico dándonos una buena confiabilidad en la toma de datos, es decir en el tajo 775 - Veta Tumuri.

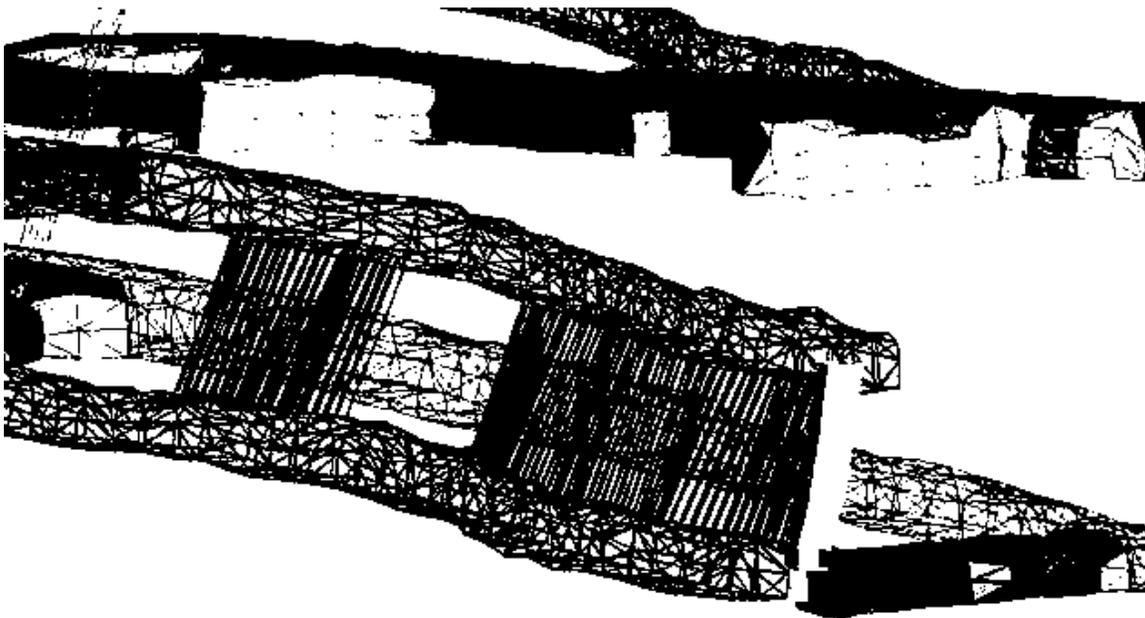


Figura 03. Ubicación del equipo sismógrafo respecto a los frentes del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

#### 4.1.2. Instalación del geófono

La ubicación del geófono en el tajo 775 - Veta Tumuri, se tomaron 3 frentes y se codifico como frente 01, frente 02 y frente 03, para lo cual se tomó en consideración la técnica de plancha empernada a la roca a través de un split set y cuyo objetivo principal fue mantener fijo el geófono simulando el comportamiento vibracional del macizo rocoso, obteniendo los siguientes resultados.

#### 4.1.3. Resultados obtenidos

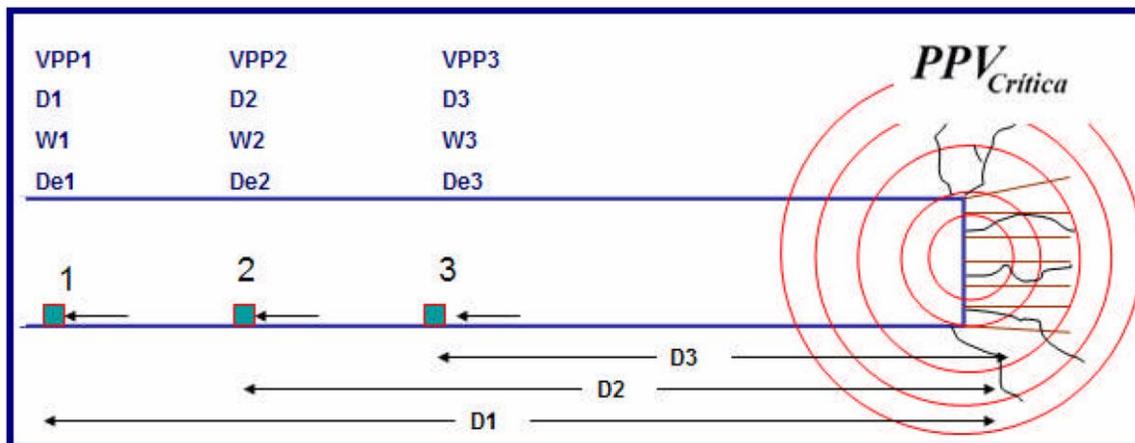


Figura 04. Esquema de cómo se realizó la toma de datos en los frentes del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 02. Resultados del monitoreo usando **dinamita** (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Datos de monitoreo			
Distancia (m)	W (peso max. / retardo) Kg	Distancia escalar	Vpp
25.300	2.4	16.3	41.23
26.800	3.2	15.0	46.57
28.750	2.4	18.6	33.25

30.250	2.8	18.1	38.62
32.100	2.8	19.2	32.67
35.150	2.4	22.7	29.54
36.850	2.8	22.0	30.06

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 03. Resultados del monitoreo usando **dinamita** (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Datos de monitoreo			
Distancia (m)	W (peso max. / retardo) Kg	Distancia escalar	Vpp
22.500	2.4	14.52	91.45
24.100	2.8	14.40	95.78
27.200	3.2	15.21	89.23
30.000	2.8	17.93	72.89
31.550	2.4	20.37	68.56
34.700	3.2	19.40	70.08

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 04. Resultados del monitoreo usando **dinamita** (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Datos de monitoreo			
Distancia (m)	W (peso max. / retardo) Kg	Distancia escalar	Vpp
24.800	3.2	13.9	71.77
28.100	3.2	15.7	62.87
29.600	2.4	19.1	53.67
32.500	2.4	21.0	49.79
34.100	3.2	19.1	51.01
37.100	2.8	22.2	41.33
38.700	2.4	25.0	35.65

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 05. Resultados del monitoreo usando **emulsiones** (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Datos de monitoreo			
Distancia (m)	W (peso max. / retardo) Kg	Distancia escalar	Vpp
23.800	3.24	13.22	61.44
24.300	4.32	11.69	73.45
27.200	3.24	15.11	51.74
28.650	3.78	14.74	47.69

32.050	3.78	16.48	42.31
33.470	3.24	18.59	39.31
34.920	3.78	17.96	43.58

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 06. Resultados del monitoreo usando **emulsiones** (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Datos de monitoreo			
Distancia (m)	W (peso max. / retardo) Kg	Distancia escalar	Vpp
21.550	3.24	12.0	125.08
23.000	4.32	11.1	158.32
26.450	4.32	12.7	123.21
28.100	3.78	14.5	112.35
29.750	3.24	16.5	102.91
31.250	3.78	16.1	101.44
32.800	3.78	16.9	99.23

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 7. Resultados del monitoreo usando **emulsiones** (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Datos de monitoreo			
Distancia (m)	W (peso max. / retardo) Kg	Distancia escalar	Vpp
22.500	4.0	11.3	82.66
25.700	3.0	14.8	68.34
27.200	4.0	13.6	65.78
29.800	3.5	15.9	57.66
30.300	4.0	15.2	54.98
32.400	3.0	18.7	43.42

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

#### 4.1.4. Modelamiento de vibraciones – campo lejano

Un gran problema para la obtención de los modelos de vibraciones, es la calidad de la información que se utiliza para ello, principalmente cuando se obtienen datos a partir de mediciones de vibraciones realizadas en voladuras regulares de la mina, ya sean en

voladuras de producción o amortiguadas, la problemática en cuestión es identificar claramente a que taladro o taladros están asociados los diferentes peak de vibraciones que se obtienen en cada registro.

#### 4.1.5. Datos de laboratorio

Muestras de bloques rocosos han sido llevadas de la Veta Tumuri para su análisis y evaluación al laboratorio. Estas muestras fueron seleccionadas respecto a

- Ensayo de propiedades físicas
- Ensayo de compresión simple
- Ensayos de compresión triaxial
- Ensayos de constantes elásticas

*Tabla 8. Ensayo de Propiedades Físicas - Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2216 – 98. Tajo 775 - Veta Tumuri.*

Densidad seca gr/cm <sup>3</sup>	Densidad húmeda gr/cm <sup>3</sup>	Porosidad aparente %	Absorción %	Peso específico aparente KN/m <sup>3</sup>
2.07	2.46	39.75	19.25	20.26
2.09	2.42	33.23	15.93	20.47
1.85	2.56	70.88	38.36	18.13
2.43	2.46	3.58	1.48	23.80

*Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild*

*Tabla 9. Ensayo de Compresión Simple - Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2938. Tajo 775 - Veta Tumuri.*

Diámetro cm.	Altura cm.	Carga Kgf	Resistencia a la compresión simple Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia a la compresión simple Mpa
2.93	6.21	300	44.81	4.39
3.01	6.1	500	70.38	6.9

3.12	6.12	250	84.66	8.3
3.05	6.17	7100	973.16	95.37

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 10. Ensayos de Compresión Triaxial - Se ha ensayado 3 testigos por cada muestra entregada. Los ensayos se realizaron según la norma ASTM 2664 – 95. Tajo 775 - Veta Tumuri.

Muestra	Diámetro Cm.	Longitud Cm.	Carga Kg.	Confin. Mi	Angulo de fricción interna	Cohesión Mpa
1	2.61	5.86	740	2		
2	2.69	6.00	960	4	2.5	3.2
3	2.69	5.72	1200	6		
1	3.12	5.85	1020	2		
2	3.00	6.17	1205	4	3.2	3.2
3	3.14	6.06	1700	6		
1	3.21	6.03	710	2		
2	2.92	6.29	830	4	3.5	1.8
3	2.96	6.22	1105	6		
1	3.05	6.08	7205	2		
2	3.04	5.91	8550	4	28.8	12.2
3	3.04	6.22	10050	6		

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Tabla 11. Ensayos de Propiedades Elásticas. Tajo 775 - Veta Tumuri.

Diámetro Cm.	Altura Cm.	Módulo de Young Gpa	Relación de Poisson
2.67	5.55	1.17	0.22
2.86	6.35	1.51	0.14
3.07	6.07	1.69	0.13
3.06	6.09	7.63	0.27

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

#### 4.1.6. Coeficiente o Relación de Poisson

Es el radio de contracción transversal a expansión longitudinal de un material sometido a esfuerzos de tensión, o sea, es una medida de su fragilidad. Cuanto menor el radio de Poisson, mayor la propensión a rotura.

#### 4.1.7. Módulo de Young

Es una medida de la resistencia elástica o de la habilidad de una roca para resistir la deformación. Cuanto mayor el módulo de Young mayor dificultad para romperse.

#### 4.1.8. Cálculo de la Velocidad de Onda P

Es la velocidad a la cual una roca transmitirá las ondas de compresión. Como a este tipo corresponden las ondas sonoras, también se le refiere como velocidad de onda longitudinal. Es una función del Índice de calidad del túnel (Bieniawski 1979)

*Tabla 12. Calculo de la velocidad de la Onda P para los frentes de estudio. Tajo 775 - Veta Tumuri.*

RMR	Q	Resistencia a la compresión	Módulo de young (GPa)	Vp (m/s)
25	0.13	4.39	1.17	2579.18
35	0.35	6.9	1.51	30.68.2
40	0.67	8.3	1.69	33.618

*Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild*

#### 4.1.9. Cálculo de la velocidad pico de partícula crítica (VPPC)

Para realizar el modelamiento de las vibraciones antes vamos a realizar el cálculo de la Velocidad Pico Partícula Crítica (VPPC) de los tajos en evaluación tanto con el uso de dinamitas como con el uso de emulsión.

$$V_{ppc} = \frac{0.439 * 2579.18}{1.17} = 967.74 \text{ mm / s}$$

$$V_{ppc} = \frac{0.69 * 3068.20}{1.51} = 1402.03 \text{ mm / s}$$

$$V_{ppc} = \frac{0.83 * 3306.18}{1.69} = 1623.75 \text{ mm / s}$$

#### 4.1.10. Modelamiento de vibraciones

Como se ha mencionado anteriormente, los modelos de vibraciones que permitan predecir el nivel de vibraciones se pueden determinar a partir de mediciones de terreno, de estas mediciones se deben obtener principalmente tres antecedentes, a saber:

- El nivel de vibraciones que genera la detonación de una carga de explosivo.
- La cantidad de explosivo que genera cierto nivel de vibraciones, y
- La distancia a de la carga al punto a la cual se mide el nivel de vibraciones.

Con los datos obtenidos en los monitoreos de los frentes, usando emulsión y dinamita se obtuvieron los siguientes modelos matemáticos basados en el criterio de Devine.

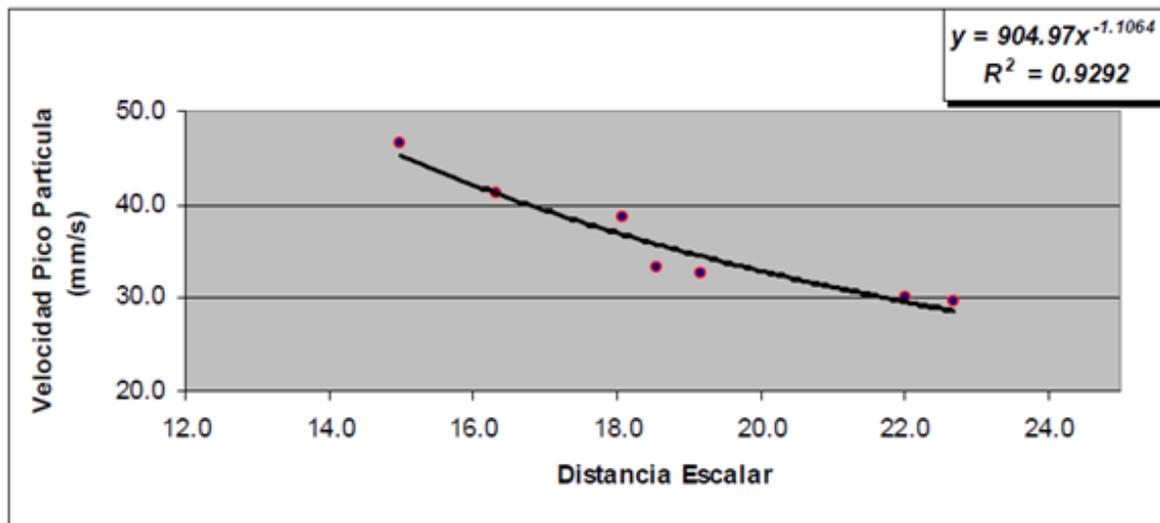


Figura 5. Modelamiento de vibraciones - Usando **dinamita** (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para frente muestra 01 con el uso de dinamita.

$$V_{pp} = 904.97 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.1064}$$

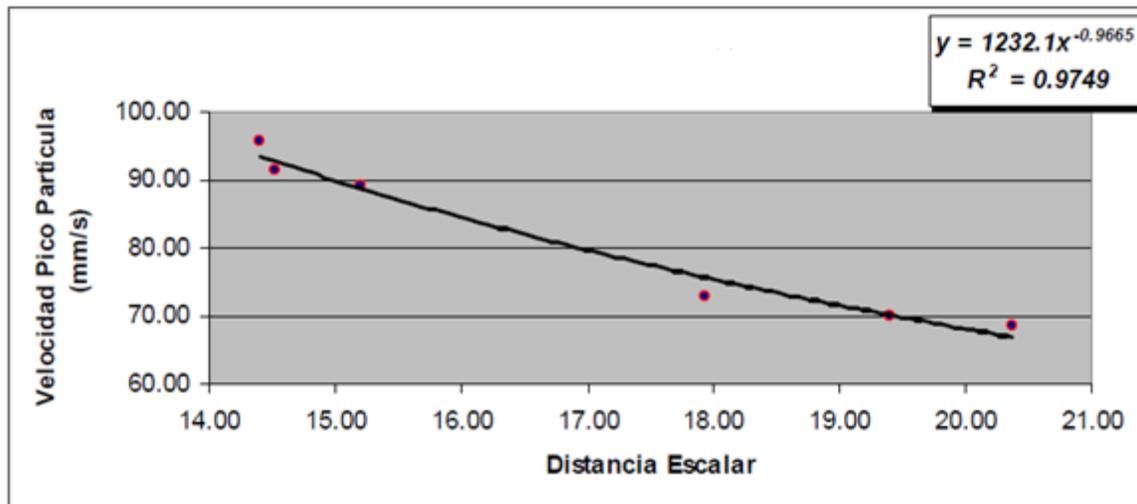


Figura 6. Modelamiento de vibraciones - Usando **dinamita** (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para frente muestra 02 con el uso de dinamita:

$$V_{pp} = 1232.1 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-0.9665}$$

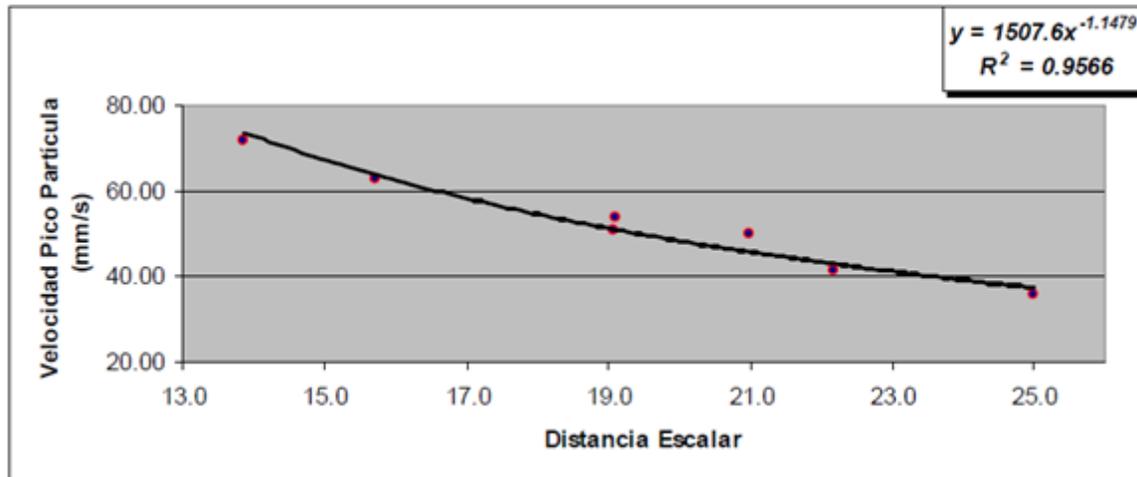


Figura 7. Modelamiento de vibraciones - Usando **dinamita** (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para frente muestra 03 con el uso de dinamita:

$$V_{pp} = 1507.6 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.1479}$$

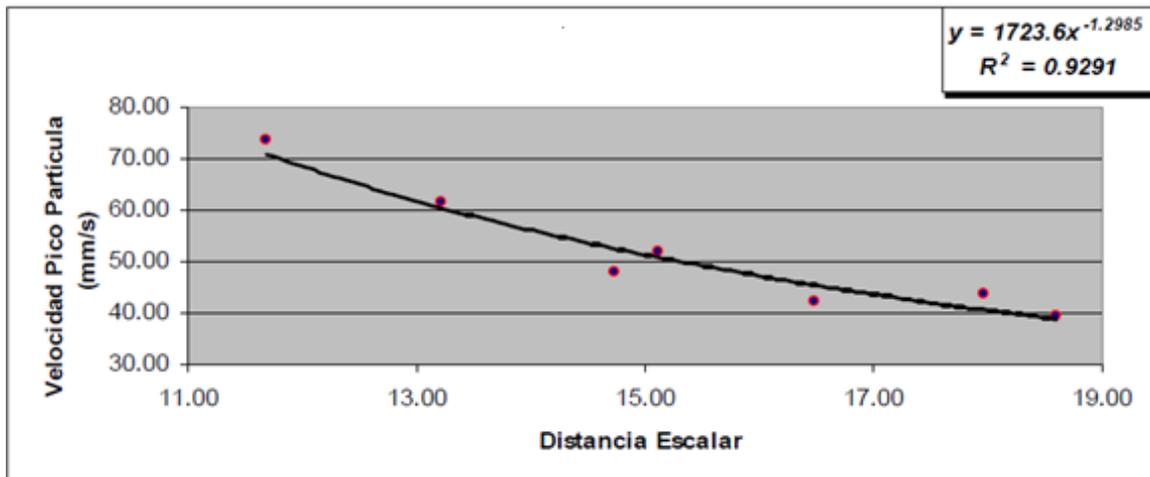


Figura 8. Modelamiento de vibraciones - Usando **emulsiones** (código de frente: frente 01) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para frente muestra 01 con el uso de emulsión:

$$V_{pp} = 1723.6 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.2985}$$

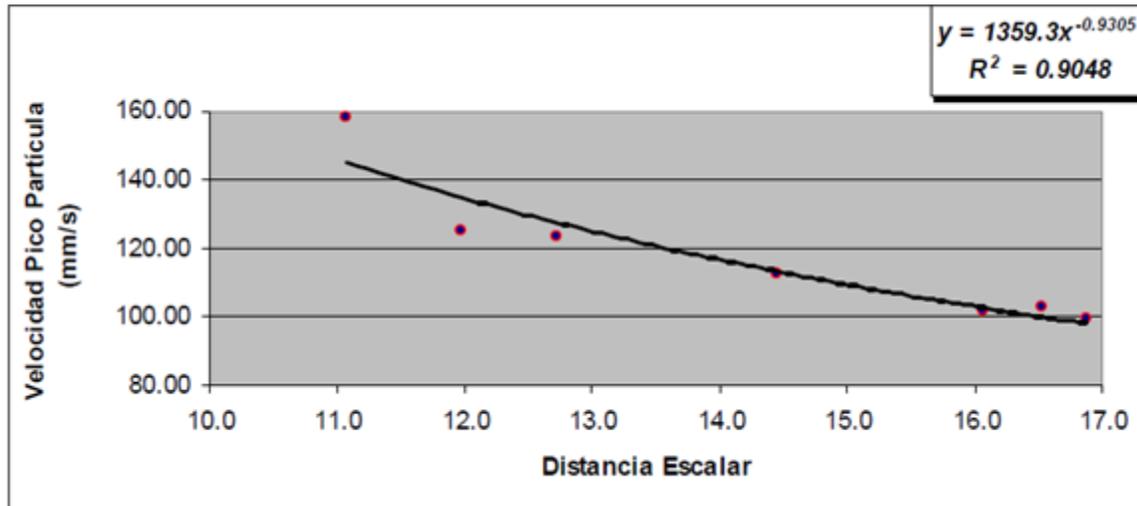


Figura 9. Modelamiento de vibraciones - **emulsiones** (código de frente: frente 02) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para frente muestra 02 con el uso de emulsión:

$$V_{pp} = 1359.3 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-0.9305}$$

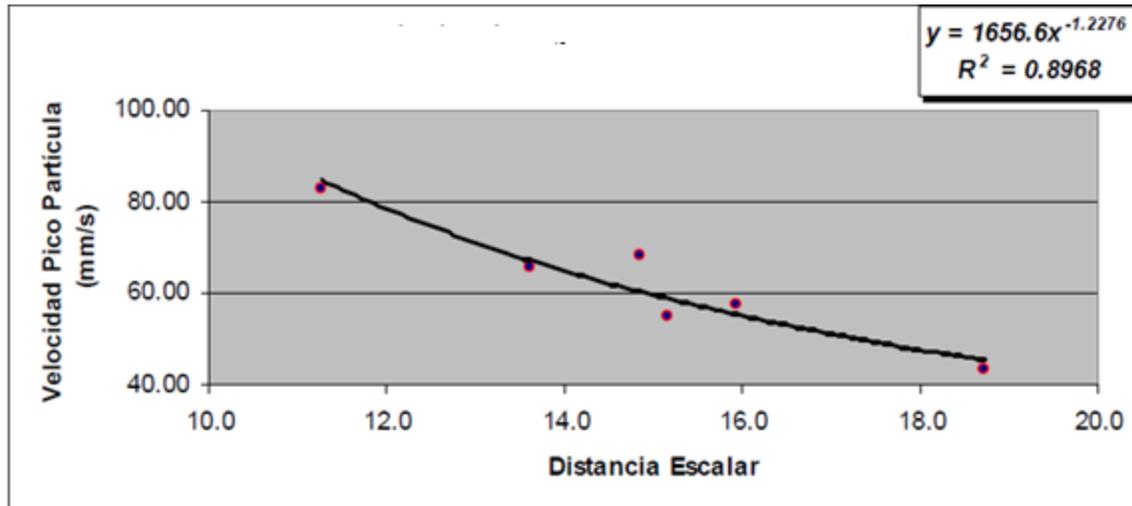


Figura 10. Modelamiento de vibraciones - Usando *emulsiones* (código de frente: frente 03) del tajo 775 - Veta Tumuri.

Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild

Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para el frente muestra 03 con el uso de dinamita:

$$V_{pp} = 1656.6 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.2276}$$

#### **4.1.11. Análisis de los daños originados por la voladura de rocas**

Hoy en día el control de los efectos adversos de vibraciones causadas en la Ingeniería Civil y Minera, se logra mediante el acatamiento de los niveles sugeridos en las normas específicas, así como mediante el diseño y manejo apropiado de los respectivos equipos y procesos causantes de las vibraciones. Por ejemplo, los niveles de vibración causados por voladuras se pueden reducir mediante la limitación de las cargas o secuenciando las voladuras de tal forma que la energía transmitida al suelo sea distribuida en el tiempo, lo cual disminuye las velocidades máximas de vibración. Hoy en día hay técnicas aún más sofisticadas, que mediante una secuenciación muy controlada (y previamente diseñada) logran fenómenos de interferencia destructiva y directividad en el campo de ondas generado por la voladura.

Los valores máximos de velocidades de partícula permitidos o recomendados varían de una norma a otra. Quizás el valor indicativo que más se ha implantado es el de 2 pulg/s (50.8 mm/s), que se fundamenta en voluminosas observaciones de Langefors y Kihlström (Bollinger, 1980; Persson et al., 1994), quienes en 1963 establecieron, para diversos tipos de suelos, valores de la velocidad de partícula pico y sus efectos asociados.

Por otro lado, es importante evaluar las vibraciones en 3 direcciones ortogonales (como algunas normas lo exigen), con el fin de observar asimetría de radiación en las voladuras, propiedades de los diferentes tipos de onda generadas, así como observar particularidades de la transmisión de ondas elásticas en el suelo.

#### **4.1.12. Técnicas usadas para reducir las vibraciones**

En base a los resultados de los controles y estudios de vibraciones (de mayor o menor complejidad), con el conocimiento de las técnicas básicas de voladuras y empleando los nuevos explosivos y sistemas de iniciación (detonadores secuenciados, incluso de tipo electrónico), es posible realizar diseños de voladuras que reduzcan a niveles imperceptibles (para las estructuras y para las personas) las vibraciones generadas en las voladuras. Aunque es imposible definir una receta universal, ya que cada caso es singular, sí es posible definir unas pautas generales de reducción de vibraciones actuando sobre el diseño de las voladuras que, en la mayor parte de los casos, son de aplicación.

Estas pautas son:

En primer lugar, reducción de la carga operante de las voladuras, a través de las siguientes opciones:

- La reducción del diámetro de perforación de los taladros.
- La reducción de la altura de banco en la excavación (taladros largos).
- Cuando ni lo uno ni lo otro sea posible, por causas operativas (altura de banco definida de antemano en una explotación o diámetro de perforación fijado por la maquinaria disponible o por los niveles de producción requeridos), es posible llevar a cabo el seccionado de cargas dentro de un taladro, haciéndolas detonar en tiempos distintos.

- Una herramienta imprescindible para lograr la reducción de la carga operante es el empleo de detonadores secuenciadores, que permiten la detonación de todas y cada una de las cargas que componen una voladura en un tiempo distinto.
- Es importante no confundir la reducción de la carga operante con la carga máxima de la voladura, ya que es posible realizar una voladura de gran tamaño con cargas operantes reducidas.
- También es importante no confundir la carga operante con la carga específica; si ésta se reduce mucho, puede ocurrir que no se produzca arranque de material y la mayor parte de la energía se emplee en generar vibraciones, produciéndose el resultado inverso al buscado, cuanto más confinada esté una voladura, más vibraciones generará ésta.

A continuación, ajustar la secuenciación a las frecuencias predominantes del terreno. Los detonadores secuenciadores ofrecen una versatilidad suficiente (mejorada con los detonadores electrónicos) como para adaptar la secuencia de detonación de las cargas de las voladuras a la frecuencia predominante del terreno en el punto de medida. Una variante de esta medida correctora es focalizar el tren de ondas en el sentido inverso a la posición de la estructura.

Otra medida preventiva es crear o aprovechar pantallas o discontinuidades entre el macizo rocoso donde se lleva a cabo la voladura y la estructura a proteger. En este sentido, se está extendiendo la técnica del precorte para crear ese tipo de discontinuidad (si bien tiene otros inconvenientes de confinamiento de cargas que

hay que tener en cuenta al diseñarlo, para no provocar males mayores con el precorte que con la voladura principal). También se pueden aprovechar las caras libres de los bancos, orientando la salida de la voladura de tal manera que las vibraciones viajen preferentemente en sentido contrario a la posición de la estructura a preservar.

Por último, de forma genérica, indicar que esquemas de perforación y voladura equilibrados con cargas ajustadas al arranque y fragmentación deseado y con secuenciaciones adecuadas suelen ser sinónimo de voladuras de calidad y con escasas vibraciones generadas, siendo preciso emplear los criterios y fórmulas de cálculo internacionalmente usadas para llegar a estos diseños.

#### **4.1.13. Cálculo de la carga máxima por retardo**

Los intentos de modelar el comportamiento de las estructuras, debido a las vibraciones originadas por voladuras han demostrado su ineficacia, debido a la enorme variabilidad y complejidad de los parámetros que intervienen en la propagación de las ondas. Por esa razón, generalmente se busca cuantificar los criterios de daño estructural, a partir de datos experimentales.

*Tabla 13. Carga máxima por retardo. Tajo 775 - Veta Tumuri.*

Muestra	Wmax calculado
Código de frente: Frente 01 - Dinamita	2490 gr.
Código de frente: Frente 01 - Emulsión	2220 gr.
Código de frente: Frente 02 - Dinamita	2890 gr.
Código de frente: Frente 02 - Emulsión	2340 gr.
Código de frente: Frente 03 - Dinamita	2510 gr.
Código de frente: Frente 03 - Emulsión	2110 gr.

*Para el cálculo de la carga máxima por retardo se considera  $d = 1.5$  m. debido a que es la separación entre los cuadros de madera.*

*Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild*

Como describimos anteriormente las cargas operantes usadas para las pruebas fueron las siguientes y podemos apreciar que sólo en la prueba con las dinamitas no se sobrepasa las cargas máximas por retardo, por consiguiente, no se sobrepasa la  $V_{ppc}$ .

*Tabla 14. Cargas operantes usadas para las pruebas. Tajo 775 - Veta Tumuri.*

Muestra	Wmax calculado	Wmax usado	Wmin usado
Código de frente: Frente 01 - Dinamita	2490 gr	3150 gr	<b>2400 gr</b>
Código de frente: Frente 01 - Emulsión	2220 gr	4280 gr	<b>3210 gr</b>
Código de frente: Frente 02 - Dinamita	2890 gr	3150 gr	<b>2400 gr</b>
Código de frente: Frente 02 - Emulsión	2340 gr	4290 gr	<b>3210 gr</b>
Código de frente: Frente 03 - Dinamita	2510 gr	3150 gr	<b>2400 gr</b>
Código de frente: Frente 03 - Emulsión	2110 gr	3960 gr	<b>2960 gr</b>

*Debajo de la carga máxima calculada*

*Encima de la carga máxima calculada*

*Fuente: Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild*

## 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

### 4.2.1. Resultados de las pruebas

Monitorear el Tajo 775 - Veta Tumuri y evaluar adecuadamente las vibraciones producidas por las voladuras en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild, contribuyo con múltiples ventajas en términos de poder examinar en detalle el proceso de la voladura, constituyéndose en una muy buena herramienta para el diagnóstico, ya que la adecuada interpretación del registro de vibraciones permitió determinar el grado de interacción entre las variables de una voladura, pudiéndose evaluar por ejemplo: cargas detonando en una secuencia de encendido incorrecta; dispersión en los tiempos de encendido de los retardos; detonación deficiente de cargas; detonaciones instantáneas; detonación de cargas adyacentes por simpatía; además de la cuantificación de los niveles de velocidad, frecuencia, aceleración y desplazamiento de las partículas de roca. En definitiva, el rendimiento general del diseño.

Con los datos recolectados en campo se pudo realizar el modelamiento para cada uno de los frentes en estudio tanto para dinamitas como para emulsiones.

#### Código de frente: Frente muestra 01:

Dinamita

$$V_{pp} = 904.97 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.1064}$$

Emulsión

$$V_{pp} = 1723.6 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.2985}$$

**Código de frente: Frente muestra 02:**

Dinamita

$$V_{pp} = 1232.1 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-0.9665}$$

Emulsión

$$V_{pp} = 1359.3 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-0.9305}$$

**Código de frente: Frente muestra 03:**

Dinamita

$$V_{pp} = 1507.6 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.1479}$$

Emulsión

$$V_{pp} = 1656.6 * \left( \frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.2276}$$

Con estos modelamientos podemos predecir cuál sería la  $V_{pp}$  del frente antes de realizar la voladura. La vibración obtenida ( $V_{pp}$ ) no debiera sobrepasar la  $V_{PPc}$  calculada para cada frente, de lo contrario estaremos contribuyendo a la creación de nuevas fracturas.

**Código de frente: Frente muestra 01**

$$V_{ppc} = \frac{0.439 * 2579.18}{1.17} = 967.74 \text{ mm / s}$$

**Código de frente: Frente muestra 02**

$$V_{ppc} = \frac{0.69 * 3068.20}{1.51} = 1402.03 \text{ mm / s}$$

**Código de frente: Frente muestra 03**

$$V_{ppc} = \frac{0.83 * 3306.18}{1.69} = 1623.75 \text{ mm / s}$$

De todas las pruebas realizadas en los frentes en estudio, las únicas que no sobrepasaron las cargas máximas por retardos y por consiguiente no hubo creación de nuevas fracturas fueron las que se detonaron con dinamita (usando la carga mínima), como máximo 8 taladros por retardo (2400 gr). Las otras demás alternativas sobrepasaron la carga máxima por retardo. Finalmente se obtienen los siguientes resultados:

*Tabla 15. Cargas mínima usadas para las pruebas. Tajo 775 - Veta Tumuri*

Muestra	Wmin usado
Código de frente: Frente 01 - Dynamita	<b>2400 gr</b>
Código de frente: Frente 01 - Emulsión	<b>3210 gr</b>
Código de frente: Frente 02 - Dynamita	<b>2400 gr</b>
Código de frente: Frente 02 - Emulsión	<b>3180 gr</b>
Código de frente: Frente 03 - Dynamita	<b>2400 gr</b>
Código de frente: Frente 03 - Emulsión	<b>2960 gr</b>
<b>Debajo de la carga máxima calculada</b>	
<b>Encima de la carga máxima calculada</b>	

### 4.3. Prueba de hipótesis

Con los datos obtenidos en el capítulo 5 y luego de procesar los resultados en el Excel 2013 y aplicativo geogebra realizamos la prueba de hipótesis, La distribución de T se llama ahora la distribución-t de Student, se seleccionó esta distribución por la cantidad de muestras para cada opción, es decir la dinamita y emulsión. Para valorar el resultado usaremos lo que se describe a continuación:

#### 4.3.1. Hipótesis de la investigación

*Hipótesis de investigación (H<sub>i</sub>)*, Si estudiamos las vibraciones producidas por voladura, entonces se podrá seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild.”

### 4.3.2. Hipótesis estadísticas

*a) Hipótesis nula ( $H_0$ ).* La vibración obtenida (Vpp) sobrepasa la (VPPc), calculada para el promedio de los frentes muestras.

*b) La hipótesis alternativa, ( $H_1$  ó  $H_a$ ).* La vibración obtenida (Vpp) será el mismo que (VPPc), calculada para el promedio de los frentes muestras, en este caso serán 2, prueba t para la dinamita, y prueba t para emulsión.

### 4.3.3. Tipo de Prueba de Hipótesis: Una cola ( $\mu < H_0$ ) – T de student

Valor de significación elegido: 0.1 %

$H_0 : \mu \leq 1331.1733$ ,  $H_1 : \mu > 1331.1733$  Prueba a una cola (derecha)

*a.1) Prueba T para muestra única (dinamita).* En esta prueba se evalúa la hipótesis nula de que la media de la población estudiada es igual a un valor especificado  $\mu_0$ , se hace uso del estadístico:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}}$$

donde  $\mu_0$  es la media muestral, s es la desviación estándar muestral y n es el tamaño de la muestra. Los grados de libertad utilizados en esta prueba se corresponden al valor n – 1

*b.1) Estadístico de prueba. -0.818*

*c.1) Valor crítico. 2.92*

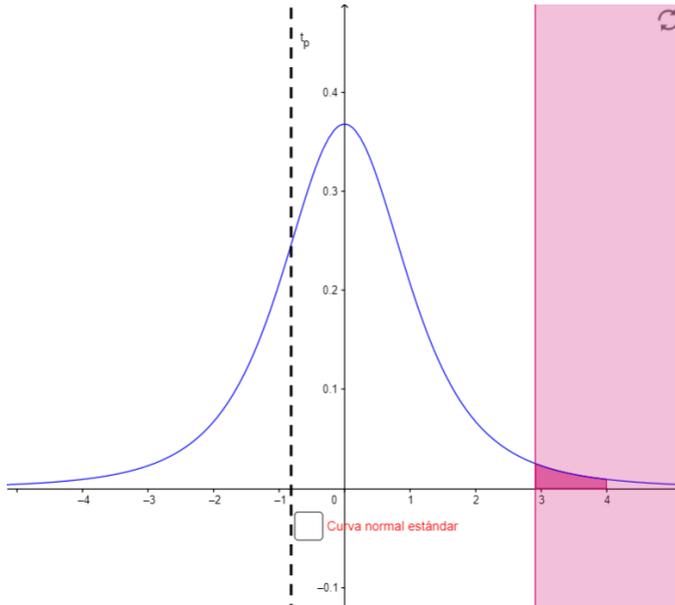


Figura 11. Gráfico de los resultados obtenidos respecto a la prueba de hipótesis - La distribución de T se llama ahora la distribución-t de Student. / Para dinámica

Rechazamos la hipótesis nula. El puntaje z de puntuación -9,27 está en el área de rechazo

**d.1) Explicación.** El punto de corte es 2,92. Cualquier puntaje z inferior a 2,92 será rechazado. Dado que -0,818 es menor que 2,92, rechazamos la hipótesis nula.

**a.2) Prueba T para muestra única (emulsión).** En esta prueba se evalúa la hipótesis nula de que la media de la población estudiada es igual a un valor especificado  $\mu_0$ , se hace uso del estadístico:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}}$$

donde  $\mu_0$  es la media muestral, s es la desviación estándar muestral y n es el tamaño de la muestra. Los grados de libertad utilizados en esta prueba se corresponden al valor n - 1

**b.2) Estadístico de prueba. 2.72**

**c.2) Valor crítico. 2.92**

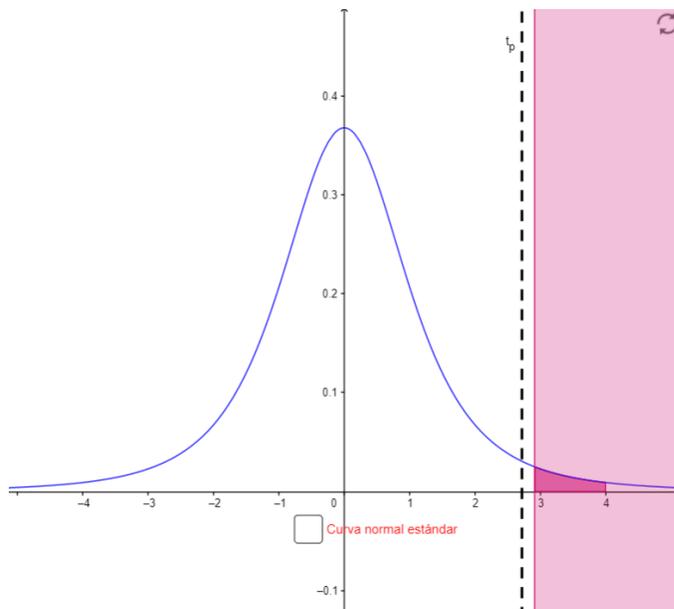


Figura 12. Gráfico de los resultados obtenidos respecto a la prueba de hipótesis - La distribución de T se llama ahora la distribución-t de Student. / Para emulsión

Rechazamos la hipótesis nula. El puntaje z de puntuación 2,72 está en el área de rechazo

**d.2) Explicación.** El punto de corte es 2,92. Cualquier puntaje z inferior a 2,92 será rechazado. Dado que 2,72 es menor que 2,92, rechazamos la hipótesis nula.

**4.4. Discusión de resultados**

De los resultados obtenidos en la prueba de hipótesis podemos concluir que, por la cantidad de muestras realizadas, es decir por la cantidad de voladuras realizadas en los tres frentes (1 sola voladura por frente), la desviación estándar esta entre 1579.8333 y 246.3234, lo ideal sería realizar más voladuras para tener una desviación menor. A razón de esto se Rechazas la hipótesis nula en ambos casos, es decir con la dinamita y la emulsión, pero también observamos que el estadístico de prueba es de **-0.818** con la dinamita y **2.72** con

la emulsión, en ambos casos no sobrepasa el punto de corte que es **2,92**, entonces lo ideal es usar la dinamita. Esto es la conclusión en referencia a las vibraciones y fracturas que causarían en el macizo rocoso, es importante considerar otros factores como el costo de cada uno, también, la ventilación ya que es determinante para la elección del mejor elemento para la voladura.

Los parámetros de ajuste de estos modelos son directamente dependientes del comportamiento de las vibraciones en cada tipo de roca, los que presentan un amplio rango de variabilidad, y lo que influye fuertemente en los niveles de vibración predichos por cada uno de ellos, restringiéndose su aplicación al sector donde fueron obtenidos.

Las vibraciones producidas por las voladuras y el conocimiento de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permiten estimar la probabilidad de ocasionar daño en dicho macizo. Los altos niveles de vibración pueden dañar la roca, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto, puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso. Se muestra también en este trabajo un conjunto de datos representativos de diferentes tipos de rocas y los valores calculados para la Velocidad de Partícula Crítica (PPVc), valor que se puede usar inicialmente como referencia a partir del cual la vibración produce daño a nivel de la matriz de roca, los valores presentados, también dan cuenta de una importante variación en las magnitudes de vibración que es capaz de resistir cada tipo de roca, debiendo en consecuencia tomarse mucha precaución respecto de los valores promedios manejados tradicionalmente.

Otro aporte importante del empleo de ésta tecnología, es el de obtener los niveles de velocidad de partícula absolutos, para cada una de las cargas explosivas, las que asociadas a las distancias en que se registra dicha detonación conforman una buena base de datos, que permite construir modelos confiables de predicción de vibración, con los cuales se pueden evaluar diferentes modificaciones a los distintos parámetros de la voladura, tales como tipo y cantidad de explosivo según distancia y evaluar el daño potencial que esa vibración puede producir.

A medida que se realizaban los cambios en cada prueba, estos respondían a una mejora en los avances, el uso de tacos de arcilla en los taladros permitió utilizar la energía máxima de la masa explosiva en los taladros de producción, se usó en los taladros de contorno menos cartuchos que las que se usaba, una sola carga de columna y los resultados fueron más uniformes y con mejoras en la fragmentación y sección.

La variación en los parámetros de perforación (reducción de malla en el burden y espaciamiento) son los parámetros necesarios para lograr los cambios que se buscan en el proceso.

La evaluación cuantitativa de una voladura de contorno se basa en el cálculo del factor de Cañas Visibles “FCV”, Los factores de media caña son los porcentajes del total de medias cañas que son visibles después de que la roca ha sido en roca masiva el 100% de los barrenos producen medias cañas; El aumento de la aparición de medias cañas en las voladuras controladas realizadas reflejan que la sobre excavación disminuyó considerablemente comparada con la observada en el levantamiento del caso base.

### **Seguimiento y control operativo**

- Cumplimiento del Diseño de la Malla de Perforación para cada aplicación de voladura.
- Optimizar la malla de perforación y/o voladura, que cumpla con el burden, espaciamiento, inclinación, longitud del taladro, longitud de carga en los taladros de producción y contorno.
- Perforación eficiente y según la demarcación de la malla en el campo.
- Adecuada distribución de la energía del explosivo en los taladros de contorno (voladura controlada).
- En voladura se realizó un adecuado consumo de explosivos que se vea reflejado en un factor de carga y/o potencia establecido y que es técnicamente acorde con el diámetro de la broca, burden, espaciamiento, longitud del taladro, condición del terreno (presencia de agua), características de la roca. Del mismo modo se está entendiendo y tomando en cuenta claramente las propiedades y características de los explosivos y accesorios de voladura.
- Producto de la optimización de la perforación y voladura, se obtuvo un incremento en los indicadores de productividad tales como toneladas rotas por disparo, TM/disparo, toneladas rotas por taladro (TM/taladro), metros avanzados por disparo (ML/disparo), factor de carga (kg/m<sup>3</sup>), factor de avance (kg/ML), toneladas rotas por metro perforado (TM/m), eliminación de la posibilidad de la existencia de

tiros cortados o soplados, eliminación de bancos o bolones que necesitan ser movidos y corregidos mediante voladura secundaria; y eliminación de tacos.

## CONCLUSIONES

1. En la prueba de hipótesis, por la cantidad de muestras realizadas, es decir por la cantidad de voladuras realizadas en los tres frentes (1 sola voladura por frente), la desviación estándar está entre 1579.8333 y 246.3234, lo ideal sería realizar más voladuras para tener una desviación menor. A razón de esto se Rechaza la hipótesis nula en ambos casos, es decir con la dinamita y la emulsión, pero también observamos que el estadístico de prueba es de -0.818 con la dinamita y 2.72 con la emulsión, en ambos casos no sobrepasa el punto de corte que es 2,92, entonces lo ideal es usar la dinamita. Esto es la conclusión en referencia a las vibraciones y fracturas que causarían en el macizo rocoso, es importante considerar otros factores como el costo de cada uno, también, la ventilación ya que es determinante para la elección del mejor elemento para la voladura.
2. A pesar del menor costo por caja de las Emulsiones (\$52.65) en comparación con las Dinamitas (\$55.78), al obtener el costo de cada cartucho, encontramos que la dinamita es más barata (0.19 \$/cart en comparación con la emulsión que es de 0.25 \$/cart), esto es debido al número de cartuchos que viene por caja. Además, en ambos casos se carga con la misma cantidad de cartuchos por taladro lo que hace que el costo por frente sea mayor con emulsión a pesar de haber reducido taladros. Siendo el costo en explosivos del frente con dinamita más barato (33.80 \$/Tj) que con emulsiones (38.90 \$/Tj).

3. En la aplicación de taladros largos, en base a estos estudios y parámetros geomecánicos, se propuso el diseño de carguío en el que se menciona el uso de decks intermedios el cual reduce el factor de carga, minimizando la vibración y por ende el daño a la roca creando un ambiente de trabajo seguro para los equipos. Asimismo, buscamos minimizar la dilución presente en este tipo de explotación.
4. Las vibraciones producidas por las voladuras y el conocimiento de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permiten estimar la probabilidad de ocasionar daño en dicho macizo. Los altos niveles de vibración pueden dañar la roca, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto, puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.
5. Los resultados obtenidos serán confiables sólo si la técnica es empleada correctamente, mereciendo especial atención los aspectos de: ubicación, orientación y acoplamiento de los geófonos utilizados como sensores, según y cómo el instrumento empleado como capturador y analizador de la onda ha sido configurado para la medición, particularmente en relación a la resolución de tiempo de muestreo, rangos de velocidad y procedimientos de análisis.
6. En las pruebas realizadas se encontró que los factores de carga son menores con el empleo de dinamitas que con el uso de emulsiones a pesar de haber reducido el número de taladros cargados, esto se da debido a la diferencia de densidades que hay entre uno y otro explosivo.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar más voladuras en los 3 frentes, con emulsión y dinamita pues en la prueba de hipótesis se obtuvo un alto valor en la desviación estándar, el cual merma la confiabilidad, esto no quita validez al estudio, pero ayudaría a obtener mejores resultados en otras vetas de la mina Selene de Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild .
2. Buscar no siempre el explosivo más barato, sino el cual pueda realizar un determinado trabajo eficientemente con el menor costo y que además no incurra en costos adicionales. Hay que tener en cuenta el costo global y no solo el costo del explosivo.
3. Establecer puntos de monitoreo fijos cuando se desee realizar el control de vibraciones para estructuras importantes en la operación (el caso de piques, compresoras, estaciones de bombeo, etc.)
4. Los monitoreos de vibraciones deben ser realizados por personal entrenado y experimentado para poder recabar información confiable y poder tomar decisiones correctamente.
5. Utilizar modelos matemáticos, a fin de compatibilizar con las pruebas de uso de retardos
6. Se recomienda la realización de monitoreos constantes en un frente de explotación durante las voladuras permiten analizar la velocidad de la partícula como de onda

- aérea las cuales reconocen la posibilidad que esté por encima o por debajo de los umbrales de daño estipulados
7. Desarrollar una mayor cantidad de proyectos de investigación que involucren el registro de las vibraciones debidas a fenómenos naturales y antrópicos en conjunto con mediciones de las fisuras.
  8. Influye también en los resultados el comportamiento del macizo rocoso a lo largo del recorrido de la onda desde el punto de detonación hasta la zona del geófono, esto debido a la atenuación de su velocidad ya sea el medio de transporte; roca, arena, grava, etc.
  9. Se debe usar el método de la velocidad pico partícula (PPV), para evaluar y cuantificar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, porque este método ha demostrado dar resultados confiables, para evaluar los diferentes criterios de daños postulados por varios investigadores.

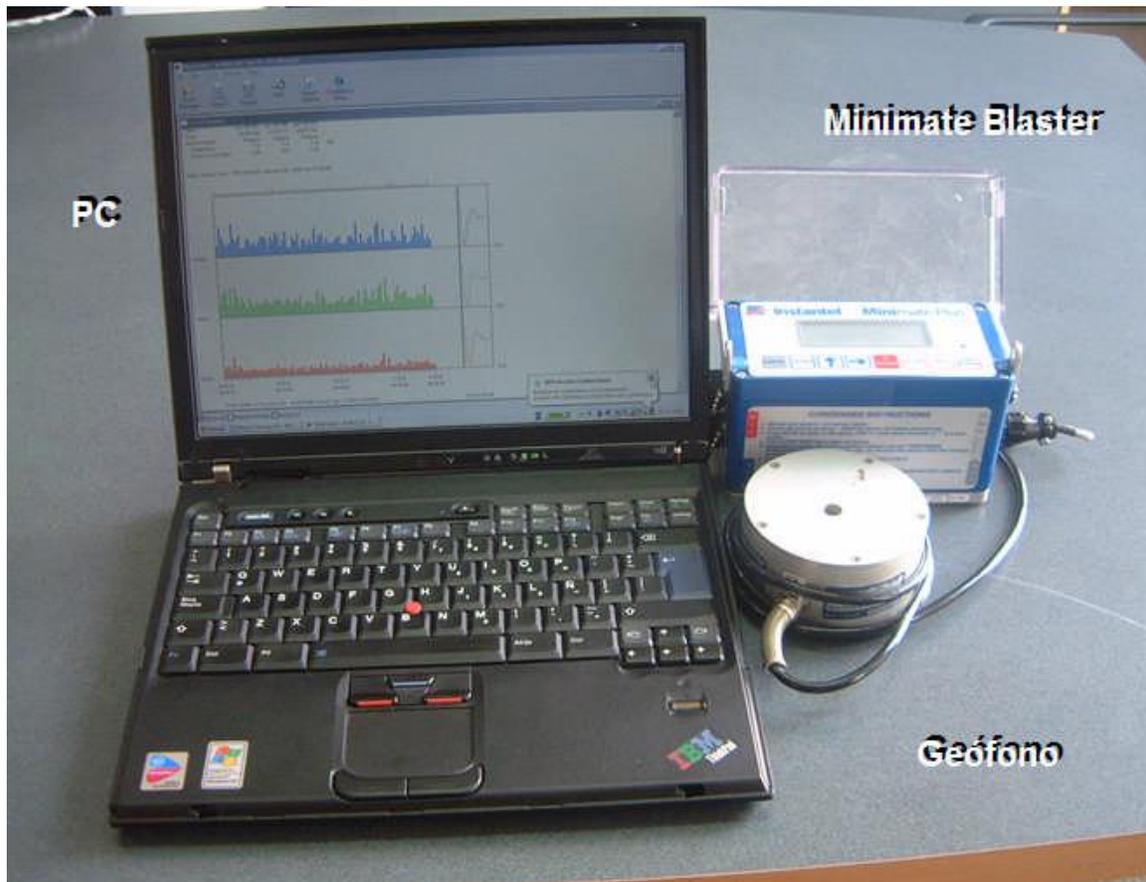
## BIBLIOGRAFÍA

- Aliaga Aliaga, W. L. (2016). Reducción del daño al macizo rocoso circundante ocasionado por la voladura de rocas, usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones, caso mina Uchucchacua.
- Carlos, R. S., & ING, W. R. A. (2000). PHD, "Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras de desarrollo horizontal". ASP BLASTRONICS SA febrero.
- Contreras, W. (2009). Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: San Marcos.
- Del Valle, C. (2000). Estudio de vibraciones de terreno generadas por voladuras en la mina La Calera, Estudio de emplazamiento para la estación Mulaló. Observatorio Sismológico del SurOccidente-OSSO-, Universidad del Valle, Cali.
- Gutierrez, D., & Wilfredo, J. (2018). Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179. Compañía Minera Kolpa SA.
- Hoek, E., Brown, E. T., & Barradas, A. B. (1980). Excavaciones subterráneas en roca. McGraw-Hill.
- Holgado, P., & Raymundo, L. (2015). Análisis de vibraciones inducidos por la voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones.
- Jáuregui A. (2009). En la tesis titulada "Reducción de los Costos Operativos en mina, mediante la optimización de los estándares de las operaciones unitarias de Perforación y Voladura"
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Bermúdez, P. G. (2003). Manual de perforación y voladura de rocas. Carlos López Jimeno.
- Konya, C. J., & Albarran, E. (1998). Diseño de voladuras. Cuicatl.
- Leyva Pajuelo, G. C. (2015). Consideraciones de seguridad en el manipuleo de explosivos en la actividad minera.
- Loza Carazas, R. A. (2013). Aplicación del método de Holmberg para el mejoramiento de la malla de voladura en la Empresa Minera Aurífera Retamas SA.
- Orihuela Castillo, S. M., Vizcarra, D., & Raúl, J. Diseño de un modelo predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una mina modelo.
- Pascual de Blas, J. Á. (2000). Problemática de las vibraciones en las voladuras, medición, control y regulación legal.
- Robles, N. (1994). Excavación y sostenimiento de túneles en rocas. CONCYTEC.
- Romero Naranjo, F. R. (2009). Manual técnico para el uso de explosivos utilizados en voladuras a cielo abierto en vías terrestres (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Vías Terrestres).
- Romero Paúcar, R. (2016). Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho–Minera Chinalco Perú SA.
- Ruiz, M. R. (2002). Nuevas recomendaciones de excavación y sostenimiento para túneles y boquillas.

- SA, O. I. Q. E. E. (2005). Manual Práctico para Desmonte de Rocha con Explosivos. Departamento de Servicios Técnicos.
- Salinas Quevedo, E. J., & Villarreal Crespo, M. F. (2013). Plan para la implementación de un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional en la explotación minera subterránea de la empresa PRODUMIN SA (Master's thesis).
- Sarria, A. (1996). Métodos Geofísicos con Aplicaciones a la Ingeniería Civil, Ediciones Uniandes, Bogotá, Colombia.
- Sarria, A. (2004). Investigación No Destructiva y Cargas Extremas en Estructuras, Ediciones Uniandes, Bogotá, Colombia.
- Scherpenisse, C. (2005). Monitoreo y Modelamiento de Vibraciones para el control y evaluación del daño por Voladuras. curso Voladura–Lima.
- Sena Leite, F. (2013). Desarrollo de una Herramienta para el Diseño de Voladuras en Túneles.
- Urrunaga López, H. E. Análisis de distancias críticas a campo lejano para vibraciones usando quantex73 y emulsión 100%, en Minera Yanarrumi, y su control en el CC. PP. Shuctuloma (Tesis Parcial).
- Valencia, D. R., Sánchez, C. O., & Ordóñez, J. A. R. (2007). Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 7.
- Zuta Vidal, F. J. (2009). Experiencia en la Compañía ENAEX SA sobre servicio integral de voladura en compañía minera Los Pelambres.

## **ANEXOS**

**Geófono y demás equipos utilizado para el monitoreo.**



### Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables
<p><b>Problema general</b> ¿Mediante el estudio de vibraciones se podrá seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ?</p> <p><b>Problemas específicos</b> ¿Se podrá evitar daños a la masa rocosa en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild ?</p> <p>¿Cuál será el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Seleccionar el explosivo óptimo mediante el estudio de vibraciones en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild .</p> <p><b>Objetivos específicos</b> Evitar daños a la masa rocosa en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild</p> <p>Seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild</p>	<p><b>Hipótesis general</b> Si estudiamos las vibraciones producidas por voladura, entonces se podrá seleccionar el explosivo óptimo en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild</p> <p><b>Hipótesis específicas</b> Evitaremos daños a la masa rocosa si las vibraciones no excedan a los límites permisibles preestablecidos en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild</p> <p>El explosivo óptimo seleccionado será el que genere vibraciones que no excedan a los límites permisibles preestablecidos en la Unidad Operativa Selene - Compañía Minera Ares S.A.C. filial de Hochschild</p>	<p><u>Variable Independiente:</u> Estudio de vibraciones producidas por la voladura.</p> <p><u>Variables Dependientes:</u> Selección de explosivo óptimo</p> <p><b>Población</b> La población está constituida por los frentes de explotación en la mina Selene de Compañía Minera Ares S.A.C. Filial de Hochschild .</p> <p><b>Muestra</b> La muestra está constituida por frentes del tajo 775 - Veta Tumuri., exactamente por 3 frentes del tajo 775, que fueron tomados para utilizar dinamita y emulsión; y estudiar las vibraciones resultantes de estos.</p>