



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

---

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“ANÁLISIS DE LA MÁXIMA CARGA OPERANTE EN LAS VIBRACIONES A CAMPO LEJANO GENERADAS POR VOLADURA, EN MINERA CERRO NEGRO S.A., CAJAMARCA – 2017”.

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero de Minas**

**Autores:**

Bach. Fredy Bertier Cruzado Mendoza

Bach. Kevien Alexander Diaz Choroco

**Asesor:**

Ing. Javier Angel Salazar Ipanaque

Cajamarca – Perú

2017

## **APROBACIÓN DE LA TESIS**

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por los Bachilleres **Fredy Bertier Cruzado Mendoza, Kevien Alexander Diaz Choroco**, denominada:

**“ANÁLISIS DE LA MÁXIMA CARGA OPERANTE EN LAS VIBRACIONES A  
CAMPO LEJANO GENERADAS POR VOLADURA, EN MINERA CERRO  
NEGRO S.A., CAJAMARCA – 2017”**

---

Ing. Javier Angel Salazar Ipanaque  
ASESOR

---

Mg. Ing. Richard Wagner Figueroa Alfaro  
**JURADO**  
PRESIDENTE

---

Ing. Rolando Iván Ramos Morante  
**JURADO**

---

Ing. Jorge Luis Salazar Ríos  
**JURADO**

## DEDICATORIA

A Fredy y Hormecinda, Julio y Angela, nuestros padres,  
por el constante apoyo y motivación,  
A nuestros hermanos.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por darnos la salud que tenemos.  
Al Ing. Javier Ángel Salazar Ipanaque, quien nos apoyó  
y aportó tiempo para la realización de la presente tesis.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
1.1. Realidad problemática .....	13
1.2. Formulación del problema.....	13
1.3. Justificación.....	14
1.3.1. <i>Justificación teórica.</i> .....	14
1.3.2. <i>Justificación aplicativa o práctica.</i> .....	14
1.3.3. <i>Justificación valorativa.</i> .....	14
1.3.4. <i>Justificación académica.</i> .....	14
1.4. Limitaciones .....	14
1.5. Objetivos .....	15
1.5.1. <i>Objetivo general.</i> .....	15
1.5.2. <i>Objetivos específicos.</i> .....	15
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
2.1. Antecedentes .....	15
2.2. Bases teóricas.....	16
2.2.1. <i>Zona de estudio.</i> .....	16
2.2.2. <i>Explosivos en Voladura.</i> .....	19
2.2.3. <i>Accesorios Para Voladura.</i> .....	24
2.2.4. <i>Mecánica de rotura en Voladura.</i> .....	26
2.2.5. <i>Diseño de Voladuras.</i> .....	28
2.2.6. <i>Cálculo y distribución de la carga explosiva.</i> .....	38
2.2.7. <i>Ondas Sísmicas.</i> .....	44
2.3. Hipótesis .....	65
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>65</b>
3.1. Operacionalización de variables .....	65
3.2. Diseño de investigación .....	66
3.3. Unidad de estudio .....	66
3.4. Población .....	66
3.5. Muestra .....	66
3.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos .....	66
3.6.1. <i>Diseños preliminares.</i> .....	66
3.7. Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos .....	67
<b>CAPÍTULO 4. Desarrollo .....</b>	<b>69</b>
4.1. Diseño de Malla para las condiciones más críticas .....	69
4.1.1. <i>Diámetro de Taladro.</i> .....	69
4.1.2. <i>Burden.</i> .....	69
4.1.3. <i>Espaciamiento.</i> .....	69
4.1.4. <i>Taco.</i> .....	69

4.1.5.	<i>Distancia escalada del burden “SD”</i> .....	69
4.1.6.	<i>Pasadura</i> .....	70
4.1.7.	<i>Relación de rigidez</i> .....	70
4.2.	Cálculo de la Carga explosiva para las condiciones más críticas .....	70
4.2.1.	<i>Longitud de Carga (LC)</i> .....	70
4.2.2.	<i>Carga Lineal (CL)</i> .....	70
4.2.3.	<i>Cantidad de Explosivo (We)</i> .....	71
4.2.4.	<i>Carga Operante (COp)</i> .....	71
4.2.5.	<i>Factor de carga (FC)</i> .....	71
4.3.	Diseño de carga en dureza crítica para taladros secos y con agua en Archivo Excel. ....	72
4.4.	Resumen del diseño de Carga en Cerro Negro. ....	72
4.5.	Recolección de Datos en Campo .....	73
4.6.	Análisis de datos .....	74
4.6.1.	<i>Estimación de Vibraciones según Modelo de Campo lejano - Devine y Duvall...</i>	74
4.6.2.	<i>Estimación de Vibraciones según JKBENCH</i> .....	79
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS</b> .....		<b>81</b>
<b>CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN</b> .....		<b>84</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....		<b>85</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		<b>85</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....		<b>86</b>
<b>ANEXO</b> .....		<b>87</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n° 1: Clasificación del macizo rocoso en el área de Voladura Cerro Negro .....	18
Tabla n° 2: Esquema para determinar el burden .....	36
Tabla n° 3: Constantes para los tiempos de retardo entre Taladros .....	42
Tabla n° 4: Constantes para los tiempos de retardo entre Filas.....	42
Tabla n° 5: Normativa peruana de vibraciones.....	58
Tabla n° 6: Norma Alemana DIN4150.....	60
Tabla n° 7: Valores representativos de la directriz, Alemana. ....	61
Tabla n° 8: Norma UNE 22.381.93. ....	62
Tabla n° 9: Valores representativos de la normativa Americana (USBM). ....	64
Tabla n° 10: Valores representativos del office of Surface Mining (OSM).....	64
Tabla n° 11: Operacionalización de variables.....	65
Tabla n° 12: Resumen del Diseño de Carga en Cerro Negro.....	72
Tabla n° 13: Datos obtenidos en campo.....	73
Tabla n° 14: Logaritmos de la Distancia Escalar y el PPV. ....	75
Tabla n° 15: Estimación del PPV, aplicando los modelos de Campo Lejano al 50% y 90% de confiabilidad.....	77
Tabla n° 16: Estimación del PPV, aplicando el modelo de Campo Lejano al 90% de confiabilidad. .....	81
Tabla n° 17: Modelo Predictivo de vibraciones a Campo lejano por medio de regresión Lineal.....	87
Tabla n° 18: Medición de Vibraciones a Campo Lejano. ....	88
Tabla n° 19: Estimación del PPV en talados secos y talados con agua. ....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura n° 1: Mapa de Localización.....	16
Figura n° 2: Esquema de reacción de un explosivo.....	19
Figura n° 3: Distribución de la energía potencia de un explosivo en voladura. ....	21
Figura n° 4: Propagación de la onda de compresión y tensión. ....	27
Figura n° 5: Expansión de los gases.....	27
Figura n° 6: Movimiento del material. ....	28
Figura n° 7: Nomenclatura del Diseño de Voladura.....	29
Figura n° 8: Esquema de la Altura del Banco. ....	30
Figura n° 9: Broca tónica. <i>Fuente, fotografía de la base de datos Cerro Negro.</i> .....	31
Figura n° 10: Esquema de la longitud de un taladro.....	32
Figura n° 11: Esquema de la sobre-perforación .....	33
Figura n° 12: Esquema de la profundidad del taladro y la importancia de la sobre perforación. ....	33
Figura n° 13: Esquema de Taco.....	34
Figura n° 14: Geometría de la malla triangular .....	37
Figura n° 15: Geometría de la malla cuadrada .....	37
Figura n° 16: Esquema de carga continua y segmentada.....	39
Figura n° 17: Simulación de iniciación en Cuña y movimiento del material. ....	43
Figura n° 18: Simulación de iniciación en Echelon y movimiento del material .....	43
Figura n° 19: Simulación de iniciación en Diamante y movimiento del material.....	43
Figura n° 20: Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión.....	44
Figura n° 21: Nivel de Frecuencia.....	45
Figura n° 22: Amplitudes de onda.....	46
Figura n° 23: Onda completa de vibración.....	46
Figura n° 24: Longitud de Onda.....	47
Figura n° 25: Velocidad de Propagación en el InstanTel.....	47
Figura n° 26: Ondas vibratorias (Ondas Internas y Superficiales). ....	48
Figura n° 27: Calculando la Velocidad Peak de la Partícula.....	49
Figura n° 28: Modelo de campo cercano de Holmberg and Persson.....	50
Figura n° 29: Monitoreo de Evento.....	51
Figura n° 30: Monitoreo de las vibraciones en las tres dimensiones.....	52
Figura n° 31: Transductor, equipo de monitoreo de vibraciones.....	53
Figura n° 32: Micrófono, equipo de monitoreo InstanTel.....	53
Figura n° 33: Sistema de Cables, equipo de monitoreo InstanTel.....	54
Figura n° 34: Equipo de Adquisición InstanTel.....	54
Figura n° 35: Instrumentación para monitorear.....	55

Figura n° 36: Monitoreo de Voladura en tiempo real. ....	55
Figura n° 37: Interpretación de Vibraciones. ....	56
Figura n° 38: Interpretación de la velocidad pico de partícula en la onda sísmica. ....	57
Figura n° 39: Interpretación de la onda sísmica en las tres componentes. ....	57
Figura n° 40: Norma Alemana DIN4150. ....	60
Figura n° 41: Norma UNE 22.381.93. ....	62
Figura n° 42: Normativa Sueca SS 460 48 66 1991 ....	63
Figura n° 43: Archivo en Excel del Diseño de carga en dureza crítica para taladros secos y con agua. ....	72
Figura n° 44: Modelo de Campo Lejano Ajustado a una ecuación lineal por mínimos cuadrados. ....	74
Figura n° 45: Modelo de Campo Lejano ajustada a una ecuación línea en archivo Excel, ....	76
Figura n° 46: Estimación del PPV, aplicando los modelos de Campo Lejano al 50% y 90% de confiabilidad en archivo Excel. ....	78
Figura n° 47: Diseño de Secuencia. ....	79
Figura n° 48: Diseño de Detonación. ....	79
Figura n° 49: Estimación del número de talados acoplados y el nivel de PPV. ....	80
Figura n° 50: Movimiento del Material. Fuente. ....	80
Figura n° 51: Estimación del PPV, aplicando el modelo de Campo Lejano al 90% de confiabilidad. ....	82
Figura n° 52: Estimación y Medición de Vibraciones a campo lejano según: Modelamiento, JKBENCH y Mediciones en Campo. ....	83
Figura n° 53: Primer Reporte de Evento. ....	89
Figura n° 54: Segundo Reporte de Evento. ....	90
Figura n° 55: Tercer Reporte de Evento. ....	91
Figura n° 56: Cuarto Reporte de Evento. ....	92
Figura n° 57: Estimación del PPV en Taladros Secos, con tres talados acoplados. ....	94
Figura n° 58: Estimación del PPV en Taladros Secos, con dos talados acoplados. ....	94
Figura n° 59: Estimación del PPV en Taladros Con Agua, con tres talados acoplados. ....	95
Figura n° 60: Estimación del PPV en Taladros Con Agua, con dos talados acoplados. ....	95

## RESUMEN

Actualmente, uno de los problemas más desafiantes que enfrentan la mayoría de empresas mineras en nuestro país está relacionado a las vibraciones originadas por las voladuras de rocas; las cuales pueden generar molestia y daño tanto en la población como en estructuras aledañas a la operación minera. Bajo este contexto, la presente tesis tiene como objetivo principal encontrar la máxima carga operante para obtener un nivel de vibraciones a campo lejano generadas por voladura, dentro de los parámetros establecidos en Minera Cerro Negro S.A.

La investigación realizada se basa en la cantidad de explosivo detonado por taladro y en la secuencia de detonación que determina la cantidad de explosivo detonado en un instante o Carga Operante, según el diseño de Carga. Para el monitoreo de vibración en la zona de estudio se consideran datos como la carga operante y las características dinámicas o leyes de atenuación del terreno según el modelo de Campo Lejano de Devine y Duvall.

Como resultado al encontrar la máxima carga operante, las vibraciones obtenidas por la modelación para la fase operativa no llegan a afectar la condición de estabilidad de las estructuras aledañas, aún para el caso más crítico, que es cuando el radio de influencia a las estructuras se encuentra a 1000 metros de distancia. Los valores que se obtienen para la mayor carga operante de 864 kg equivalente a tres taladros acoplados, llega a generar una vibración de 2.99 mm/s a una distancia de 780m; el nivel de vibración se considera bajo los parámetros establecidos por la Norma Alemana DIN 4150 que sugiere hasta una velocidad de 3 mm/s y según la Normativas Peruanas de Vibraciones (Guía Ambiental para perforación y voladura), sugiere hasta una velocidad de 1 pulg/s, para obras que presentan una sensibilidad especial, tal es el caso las estructuras aledañas a Minera Cerro Negro S.A.

Finalmente, se recomienda una distancia límite y el número de taladros acoplados, para que la máxima carga operante detonada no exceda el nivel de vibración según el modelo predictivo a los umbrales de vibración propuestos por la Norma empleada.

## ABSTRACT

Nowadays, one of the most challenging problems facing most mining companies in our country is related to the vibrations caused by rock blasting; the causes can generate annoyance and damage both in population and structures of the mining operation. In this context, this thesis has as main objective find the maximum operative load to get a level of vibrations to far field generated by blasting, within the parameters established in Minera Cerro Negro S.A.

The research is based on the amount of explosive detonated per bore and on the detonation sequence that determine the amount of explosive detonated in an instant or Operative Load, according to the Load design. For vibration monitoring in the study area, consider data such as the operant load and the dynamic characteristics or ground attenuation laws according to Devine and Duvall's Far Field model.

As a result of finding the maximum operative load, the vibrations obtained by the modeling for the operational phase do not affect the stability condition of the surrounding structures, even for the most critical case (radius of influence to the structures is 1000 meters of distance). The values obtained for the highest operating load of 864 kg equivalent to three coupled bores, generate a vibration of 2.99 mm/s at a distance of 780m; the vibration level is considered under the parameters established by the German Standard DIN 4150 which suggests up to a speed of 3 mm/s and according to Peruvian Vibration Standards (Environmental Guide for drilling and blasting), it suggests up to a speed of 1 in/s to jobs which have a special sensitivity, such as the structures surrounding the Cerro Negro Minera SA

Finally, a limiting distance and the number of coupled bores are recommended, so that the maximum detonating operating load does not exceed the level of vibration according to the predictive model at the vibration thresholds proposed by the Standard used.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la mayoría de empresas mineras poseen operaciones aledañas a algún poblado lo que conlleva a tener que afrontar demandas y protestas, debido a las vibraciones generadas por voladura de rocas. En los últimos años las demandas han causado graves daños a la imagen de la minería, una imagen que se intenta cambiar, debido a esto se han visto afectados muchos proyectos. Ante esta realidad, diferentes proyectos mineros monitorean y controlan el impacto ambiental producido por vibraciones.

El proceso de voladura se basa en la liberación de energía de un explosivo, generando fragmentación y desplazamiento del macizo rocoso. Esta liberación también genera ondas internas y ondas superficiales, a medida que las ondas se alejan del taladro la energía se propaga en diferentes direcciones.

En la voladura de rocas se consideran puntos importantes tales como:

- Lograr un adecuado grado de fragmentación de la roca, de tal modo que se obtengan costos unitarios mínimo en las operaciones de carguío, transporte, chancado y molienda de la roca.
- Minimizar el daño al macizo rocoso en su entorno y estructuras aledañas, permitiendo una operación sin riesgos.

Para lograr los puntos anteriores, una variable importante es la cantidad de explosivo o carga operante, definida como la cantidad total de explosivo detonado en un mismo instante. Esta cantidad deberá causar el menor daño posible al entorno de la voladura.

En la presente tesis se encontrará la máxima Carga Operante en las vibraciones a campo lejano en Minera Cerro Negro S.A., para explicar dicho estudio se explorará el proceso de monitoreo de vibraciones, y por ende obtener el modelo predictivo que ayuda a entender y controlar el nivel de vibraciones.

## 1.1. Realidad problemática

En general la Ingeniería de Minas es una carrera considerada como práctica, por lo que generalmente no es factible el tiempo y los costos para realizar evaluaciones detalladas de los componentes a predecir.

La voladura de rocas es un proceso de fragmentación de la roca, que busca la precisión y eficiencia para obtener la mejor producción. Para realizar una buena voladura y lograr con los objetivos de fragmentación se consideran diferentes variables, una de las variables importantes es el diseño de carga, mediante el cual se obtiene la cantidad de explosivo por taladro, esta influye directamente en las vibraciones a campo lejano.

Las vibraciones de voladura representan un estado de esfuerzos inducido en el macizo rocoso producido por la detonación de explosivo de los taladros de voladura, resultando en la fragmentación de la roca; pero también en daño a la estabilidad y macizo rocoso en las paredes del Pit.

Estas vibraciones en su mayoría pueden generar molestias es las poblaciones aledañas a la operación y daños en sus estructuras. La Cantidad de explosivo o Carga Operante máxima detonada en un instante, influye directamente en el resultado de las vibraciones a campo lejano. Estas vibraciones que originan las voladuras de roca, es uno de los problemas más importantes que enfrentan hoy en día la Minería, y las áreas pobladas próximas a las explotaciones.

En Minera Cerro Negro S.A., sin embargo, se rige por normas internacionales, debido a que en nuestro país los parámetros que determinan se basan en la distancia del evento a la estructura, no a la frecuencia que podría soportar la estructura. Este estudio busca determinar límites aceptables, al detonar proyectos en las condiciones más críticas y lograr un mejor control en las vibraciones.

## 1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la máxima carga operante para obtener un nivel de vibraciones a campo lejano, dentro de los parámetros establecidos, en Minera Cerro Negro S.A., Cajamarca – 2017?

### **1.3. Justificación**

#### **1.3.1. Justificación teórica.**

Los conocimientos desarrollados en voladura de rocas y el estudio de vibraciones existentes, no se han logrado desarrollar a detalle la fecha. En el presente estudio se describen diferentes factores y variables que intervienen para encontrar la cantidad de explosivo detonado en un instante y su influencia en las vibraciones a campo lejano.

#### **1.3.2. Justificación aplicativa o práctica.**

La importancia de esta tesis es encontrar la máxima Carga Operante en las Vibraciones a campo lejano generadas por Voladura, para minimizar daños a las viviendas y población, logrando de esta forma una mejor relación entre la comunidad y la actividad minera.

#### **1.3.3. Justificación valorativa.**

El valor que representa este estudio es el motivo por un afán de superación personal y formación permanente en nuestra carrera profesional, en este estudio nos ayuda a complementar nuestra formación en el área de perforaciones y voladuras dentro de la ingeniería de minas.

#### **1.3.4. Justificación académica.**

El presente trabajo de investigación justifica la necesidad de la aplicación de diferentes modelos matemáticos para el diseño de malla, de carga y un análisis de vibraciones; debido a que la zona de estudio se encuentra cerca a poblaciones. De esta manera contribuir con bibliografía para estudios posteriores en vibraciones a campo lejano.

### **1.4. Limitaciones**

Las limitaciones que se presentan al desarrollar este trabajo de investigación, están relacionadas al difícil acceso a los materiales y limitada información de la base de datos, para determinar el monitoreo con diferentes geófonos en una misma voladura y determinar los factores  $K$  y  $\alpha$  que se utilizaran en el modelo predictivo. Para lograr superar los obstáculos se considera la información brindada por el asesor, y su experiencia en diferentes empresas.

Cabe mencionar que el nombre de la Mina de la cual se están tomando los datos no será mencionado en esta tesis, debido a que estos datos son estrictamente confidenciales por políticas de la empresa, y por consiguiente se va a optar a mencionar a la unidad Minera Cerro Negro S.A. como empresa ficticia.

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo general

Encontrar la máxima carga operante para obtener un nivel de vibraciones a campo lejano generadas por voladura, dentro de los parámetros establecidos en Minera Cerro Negro S.A.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- Elaborar un modelo predictivo de vibraciones, con las mediciones de vibraciones producidas por voladuras en la Minera Cerro Negro.
- Analizar las posibles secuencias de detonación, que nos permitan predecir el número de taladros acoplados, para determinar el nivel de vibraciones a campo lejano en Minera Cerro Negro.
- Evaluar la relación de la Velocidad pico de partícula vs la Cantidad de Explosivo o Carga Operante a utilizar.
- Comparar el nivel de vibraciones obtenido en el modelo predictivo según la norma DIN 4150 y la Guía Ambiental para perforación y voladura, establecida por la empresa.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1 A nivel internacional

El análisis de vibraciones generadas por tronadura es llevado a cabo en las minas de Chile más que en cualquier otro país, de las palabras de (CINTEX, 2006) del (Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento), donde sostienen que: *“La razón por la que el personal de Enaex realiza monitoreo de vibraciones en las minas de Chile, es debido a que las vibraciones de tronadura representan un estado de esfuerzos inducido en el macizo rocoso producido por la detonación de explosivo de los pozos de tronadura, resultando en la fragmentación de la roca; pero también en daño al macizo rocoso adyacente (Campo Lejano), incluyendo las paredes del pit. (Campo Cercano)”*. (pág. 7)

### 2.1.2 A nivel nacional

En el Perú, (Minera Chinalco Perú, 2013), las voladuras que se realizaron en el tajo abierto Toromocho cercanas a la carretera Central, presentaron probables efectos de vibraciones y ruidos. Para determinar el efecto se desarrolló en minera Chinalco la modelación de vibraciones para la fase operativa, donde concluyen que no llegan a afectar las condiciones de estabilidad de la carretera Central, aun para el caso más crítico, que es cuando el tajo abierto se encuentra a 200 metros de distancia de la carretera.

En (GeoBlast, 2014) En (Mina Cerro Corona), para el desarrollo de la operación y el convivir con la población de la zona de influencia al proyecto Cerro Corona (Gold Fields la Cima). Realizaron la implementación de la campaña de monitoreo participativo de vibraciones y onda, teniendo como principal punto de monitoreo la estación permanente ubicada en el pueblo de Hualgayoc, de esta forma Cerro Corona desarrolla su operación de la mejor manera, sin ocasionar daños a sus estructuras y molestias a sus pobladores.

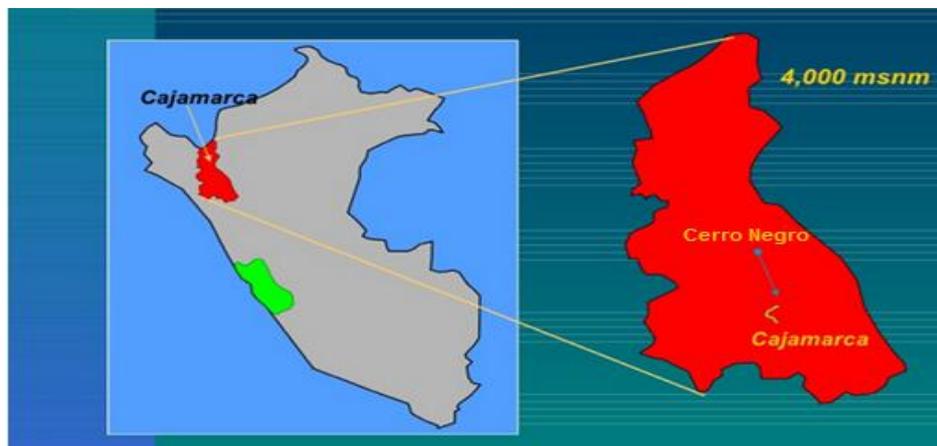
## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Zona de estudio

#### 2.2.1.1. Ubicación

La operación de Minera Cerro Negro S.A. se ubica en la región Cajamarca, provincia de Hualgayoc, en la vertiente oriental de la cordillera occidental de los Andes peruanos, hacia la vertiente continental del Atlántico, entre los 3,600 y 4,000 m de altitud.

Figura n° 1: Mapa de Localización.



Fuente, extraída de los datos de Cerro Negro.

#### **2.2.1.2. Entorno geológico y mineralización**

En el proyecto minero Cerro Negro predomina un yacimiento de cobre y oro, es típico de una mineralización de tipo pórfido y alberga mineralización abundante de tipo epitermal, pórfido y polimetálico. La zona minera se caracteriza por presentar un terreno montañoso moderado a moderadamente empinado, con alturas que fluctúan entre los 3,600 y 4,000 msnm, aproximadamente.

#### **2.2.1.3. Geología local**

El yacimiento de cobre y oro se alberga en un pórfido de diorita, emplazado en rocas calcáreas, margas y siliclásticas del Cretáceo medio. Dentro del pórfido, la mineralización de cobre y oro se asocia principalmente a zonas que poseen un sistema de vetillas de cuarzo (stockwork).

Existen dos fases de intrusión de dioritas, pero solo una se encuentra mineralizada. La diorita no mineralizada se considera la más reciente, y se le denomina "testigo estéril". El modelamiento geológico reciente sugiere que el pórfido se encuentra compuesto, probablemente, de cuatro o cinco satélites, de los cuales los últimos dos son estériles. La mineralización temprana se encontraba acompañada de una alteración potásica moderada a avanzada, comúnmente superpuesta por una alteración argílica tardía y semi-extendida.

El sistema de fallas dominante, que va del noreste al sudoeste y que recorre el intrusivo, se denomina "Falla Mariela", y tiene una relación importante con la distribución de mineralización. Existen tres zonas mineralizadas distintas dentro del yacimiento, identificadas como la Zona del Anillo, la Zona Norte y la Zona Sur. Cada una de estas zonas se trata por separado para efectos del modelamiento geológico y de recursos. Además de las zonas mineralizadas, el yacimiento se caracteriza por presentar varios dominios de acuerdo con el grado de oxidación e oxidación supergénica.

#### **2.2.1.4. Propiedades del Macizo Rocoso.**

Las propiedades del macizo rocoso que influyen directamente en el diseño de voladura son:

- Resistencia dinámica de las rocas
- Espaciamiento y orientación de las discontinuidades
- Tipo de relleno y apertura de las discontinuidades.
- Velocidad de propagación de la onda
- Propiedades elásticas de las rocas

Sin duda la obtención de todas de estas propiedades por métodos directos, o de laboratorio, resultaría muy difícil y costoso; para la dificultad y el tiempo que se tiene que invertir en obtener todas estas propiedades de la roca y del macizo rocoso que parte de un estudio realizado por la empresa Minera. Por tal razón y dado el caso que las propiedades de la roca y el macizo rocoso son temas muy amplios; no siendo parte del estudio, se procede a optar por utilizar las mediciones en campo y los resultados de laboratorio realizado por Minera Cerro Negro S.A.

En Cerro Negro, en el área de voladura clasifican el macizo rocoso en cuatro parámetros de acuerdo a la resistencia a la compresión.

Tabla n° 1: Clasificación del macizo rocoso en el área de Voladura Cerro Negro

<b>DUREZA - 3</b>	<b>R3 25 - 50 Mpa</b>
<b>DUREZA - 4</b>	<b>R4 50 - 100 Mpa</b>
<b>DUREZA - 5</b>	<b>R5 100 - 175 Mpa</b>
<b>DUREZA CRITICA</b>	<b>MAYOR 175 Mpa.</b>

*Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.*

#### 2.2.1.5. Voladura de Rocas

Se entiende por voladura de rocas en superficie, a los trabajos de explotación en bancos de canteras y tajos abiertos, obras de ingeniería civil y vial como: excavaciones, canales, zanjas, cortes a media ladera y trabajos especiales como rotura secundaria de pedrones, demoliciones y voladuras controladas pero fundamentalmente se concreta en bancos.

El objetivo de la voladura de rocas en minería superficial es, fracturar y remover el material requerido en el proceso de producción, a una granulometría adecuada para su posterior manejo (carguío, transporte, chancado o botaderos). *“La voladura de roca es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento”* (Departamento Técnico Exsa S.A., 2014).

Según Konya (1998) considera que, *“Cuando los explosivos reaccionan químicamente, se liberan dos tipos principales de energía. El primero se llama energía de choque y el segundo energía de gas. Ambos tipos de energía se liberan durante el proceso de detonación”* (pág. 3).

Figura n° 2: Esquema de reacción de un explosivo



Fuente, extraída de (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013).

### 2.2.2. Explosivos en Voladura

“Los explosivos son una mezcla de sustancias: Una combustible y otra oxidante, que al ser iniciadas dan lugar a una reacción exotérmica altamente rápida generando productos gaseosos a alta temperatura, los que ocuparán un volumen mucho mayor”. (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 9). El volumen del explosivo alojado en el taladro varía en el momento de la detonación, este aproximadamente aumenta en 1 000 a 10 000 veces mayor que el volumen. Las principales sustancias que forman los explosivos en la actividad minera tenemos.

#### Combustibles

Aceites (Diésel)  
Carbón  
Aluminio  
T.N.T.

#### Oxidantes

Nitrato de Amonio  
Nitrato de Sodio  
Nitrato de calcio

#### 2.2.2.1. Propiedades de los explosivos

Las características que tienen los explosivos son importantes para entender la utilidad potencias de un explosivo específico para una utilidad es especial.

- A. Velocidad de Detonación.** Es una medida cuando la reacción de la detonación procede por la columna del explosivo. Típicamente, el VOD variará entre 3000 m/ s para ANFO en pozos de tronadura de diámetros pequeños y 6000 m/ s para emulsión en pozos de tronadura de diámetros más grandes.
- B. Densidad.** Es una unidad importante en el diseño de barrenos, mide los kilogramos de explosivo por unidad de volumen en g/cc.
- C. Fuerza o Potencia.** Se considera como la capacidad de trabajo útil de un explosivo.

- D. Inflamabilidad.** Se define como la facilidad con la que un explosivo puede iniciarse por medio de calor.
- E. Resistencia al agua.** La capacidad o resistencia del explosivo que puede soportar en horas, cuando se encuentra cargado en agua y aun sin ser detonado.
- F. Presión de detonación.** Es considerada como la presión en la zona de choque delante de la zona de reacción.
- G. Diámetro Crítico.** Es el diámetro mínimo al cual un explosivo puede ser detonado.
- H. Sensitividad.** Es la propiedad de un explosivo para ser detonado por iniciadores convencionales, ya sea cordón detonante, fulminantes, iniciadores no eléctricos.
- I. Sensibilidad.** Es la facilidad de iniciación de los explosivos por la mínima energía o potencia que se necesita.
- J. Emanaciones.** se denomina emanaciones a los gases tóxicos, que se origina de la detonación de explosivos, tales como, bióxido de carbono, nitrógeno, vapor de agua.

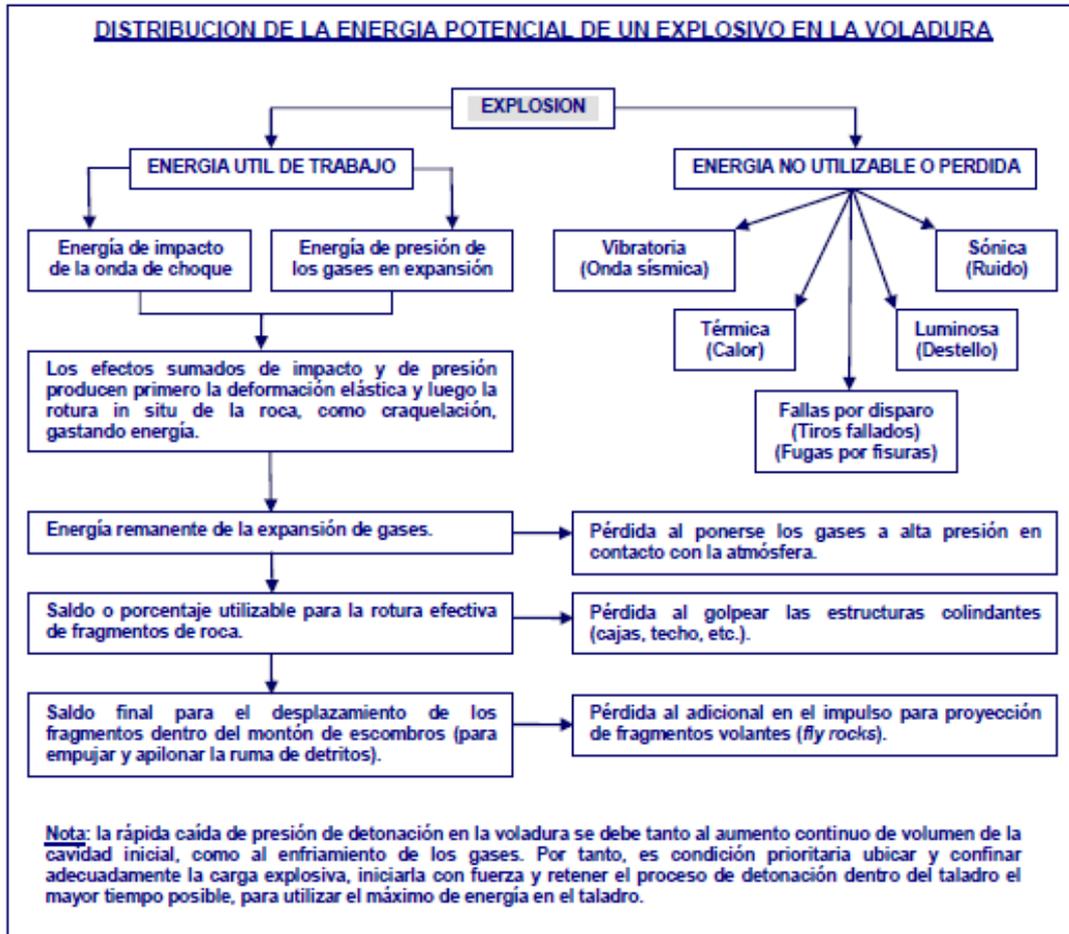
#### 2.2.2.2. Los procesos de reacción en los explosivos

- A. Combustión.** Puede definirse como tal a toda reacción química capaz de desprender calor pudiendo o no ser percibida por nuestros sentidos, y que presenta un tiempo de reacción bastante lento.
- B. Deflagración.** Es un fenómeno superficial en el que el frente de deflagración se propaga por el explosivo en capas paralelas, a una velocidad baja, que generalmente no supera los 1 000 m/s.
- C. Detonación.** Es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción y por la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva.

*“En la detonación la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan rápida que no ceden su calor por conductividad a la zona inalterada de la carga, sino que los transmiten por choque, deformándola y produciendo la explosión con la generación de nuevos gases” (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 11). El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y que se denomina “onda de choque”, la que se desplaza a velocidades entre 1 500 a 7 000 m/s según la composición del explosivo y sus condiciones de iniciación.*

*“La energía almacenada en un explosivo se encuentra en forma de energía potencial, latente o estática. La energía potencial liberada a través del proceso de detonación se transforma en energía cinética o mecánica”. (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 11).*

Figura n° 3: Distribución de la energía potencia de un explosivo en voladura.



Fuente, extraída de (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013).

La Tronadura induce Fracturamiento

Vibración = Esfuerzo

Esfuerzo induce		Fracturamiento
Dentro del disparo	→	Fragmentación
Fuera del disparo	→	Daño (Vibración)

### 2.2.2.3. Tipo de explosivos

En la actualidad los explosivos son clasificados en tres tipos: Químicos, Mecánicos y Nucleares, donde en la Actividad Minera los explosivos que se utilizan son químicos.

*“Los explosivos químicos son compuestos o mezclas de sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, que por medio de reacciones químicas de óxido-reducción, son capaces de transformarse en un tiempo muy breve, del orden de una fracción de microsegundo, en productos gaseosos y condensados, cuyo volumen inicial se convierte en una masa gaseosa que llega a alcanzar muy altas temperaturas y en consecuencia muy elevadas presiones”* (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 9).  
Además se clasifican en:

Explosivos Primarios: Se consideran sensibles a la detonación, son los siguientes:

- Detonadores
- Pentolitas
- TNT
- Cordón Detonante
- HMX, Azida de Plomo
- Pentrita

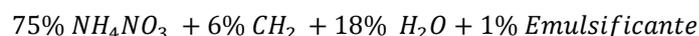
Explosivos Secundarios: Requieren de un reforzador o iniciador para detonar.

- Anfos
- Anfos Pesados
- Emulsiones
- Quantex
- Emulsiones gasificadas
- Slurries

Siendo los explosivos químicos los que nos interesan, están a continuación.

#### **A. Emulsiones**

Es una mezcla entre dos fases, la primera es una fase acuosa, está compuesta por sales inorgánicas oxidantes (nitrato de Amonio) que son disueltas en agua y una segunda la fase aceitosa está compuesta básicamente por hidrocarburo (Diésel 2), para que tenga un periodo de duración se utiliza un emulsificante.



Las emulsiones se usa por dos razones, la primera es resistente al agua, la segunda eleva la velocidad de detonación del explosivo (VOD).

## B. Anfo

Es una mezcla de nitrato de amonio en un 94,3 % en peso y aceite combustible (diésel) en un 5,57% en peso. Cuando el porcentaje de diésel varia, ya sea positivo o negativo, hay un efecto de perdida de energía y generación de gases nocivos, por lo cual es de suma importancia su proporcionamiento adecuado.

En la operación y en la práctica se considera 94% de Nitrato de Amonio y 6% de Diésel.

## C. Heavy Anfo (Anfo Pesado)

Es una mezcla de Emulsión y Anfo, que reúne las principales propiedades de ambos componentes: alta energía, buena generación de gases, alta densidad y, en algunos casos, resistencia al agua. Tenemos mezclas en proporciones Emulsión y Anfo, 28, 37, 46, 55, 64 los más comerciales.

- a. **Anfo Pesado 28**, (20% de emulsión y 80% de ANFO), este es un explosivo que no es resistente al agua, pero tiene mayor potencia que el ANFO simple.

Características:

- Densidad: 0.90 (gr/cc)
- VOD máx.: 4500 (m/s)
- Resistencia al agua: Nula

- b. **Anfo Pesado 37**, (30% de emulsión y 70% de ANFO), este es un buen explosivo para utilizarlo en roca de dureza media a dura, 100 a 150 Mpa tiene muy buena VOD.

Características:

- Densidad: 1.01 (gr/cc)
- VOD máx.: 4800 (m/s)
- Resistencia al agua: Nula

- c. **Anfo Pesado 46**, (40% de emulsión y 60% de ANFO), esta es la mejor mezcla, tiene la más alta VOD y se usa en rocas muy duras, tiene baja resistencia al agua.

Características:

- Densidad: 1.21 (gr/cc)
- VOD máx.: 5000 (m/s)
- Resistencia al agua: Baja

- d. **Anfo Pesado 55**, (50% de emulsión y 50% de ANFO), esta es una mezcla que tiene regular resistencia al agua, sin embargo es un explosivo de mayor Velocidad de Detonación, también se considera más caro por tener una mayor proporción de emulsión.

Características:

- Densidad: 1.28 (gr/cc)
- VOD máx.: 5250 (m/s)
- Resistencia al agua: Regular

- e. **Anfo Pesado 64**, (60% de emulsión y 40% de ANFO), esta mezcla muy cara tiene muy alta densidad, se usa en zonas con agua, su característica principal es su resistencia al agua hasta 72 horas, razón por la cual tiene gran utilización en minería tajo abierto.

Características:

- Densidad: 1.31 (gr/cc)
- VOD máx.: 4900 (m/s)
- Resistencia al agua: optima

Las Voladuras que realiza el área de Perforación y Voladura en Minera Cerro Negro, se basa en explosivos Heavy Anfo, según las condiciones en campo:

- Según Condiciones Climáticas: Taladros con Agua (HA 64), Taladros Secos (HA 28, HA 46, HA 55)

### 2.2.3. Accesorios Para Voladura

Los accesorios de voladura son productos utilizados en las etapas de iniciación, amarre y secuencia de salida de un proyecto de voladura, para obtener resultados eficientes bajo condiciones de seguridad, fragmentación y estabilidad de paredes finales. Se clasifican por sistemas en base a la variedad de productos y su uso.

#### 2.2.3.1. Clasificación de los sistemas de iniciación.

A. **Sistemas convencionales.** Se activan por una chispa de ignición a través de la guía. El sistema se basa en:

- a. **Fulminante común nº 8.** Es una cápsula de aluminio, que contiene un explosivo primario (Azida de plomo) muy sensible a la chispa de la mecha de seguridad. Es usado para iniciar a las dinamitas, emulsiones y cordón detonante.



- a. **Software de Diseño.** Simulación de la voladura, además descarga la programación al Logger.
- b. **Detonador programable con Chip.**
- c. **Logger.** Identifica los ID de cada detonador y registra los periodos de retardo de los detonadores.
- d. **Blaster.** Determina la iniciación de los detonadores con alta seguridad.

El Sistema de iniciación Electrónica es uno de los mejores, ofrece aplicaciones potenciales que se ajustan al medio de trabajo, por lo tanto en la empresa Minera Cerro Negro en sus operaciones de voladura, considera este sistema, brindando mayor fragmentación y control de Vibraciones. Los accesorios por taladro se consideran:

- I-Kon: Detonador Electrónico Programable con un Logger e iniciado con un Blaster, de la empresa Orica.
- Exanel: Detonador no eléctrico de 600ms de la empresa Exsa (Funciona como Back Up).
- Booster: De 1 Lb de la empresa Enaex.

#### 2.2.4. Mecánica de rotura en Voladura

##### 2.2.4.1. Proceso de Fracturamiento

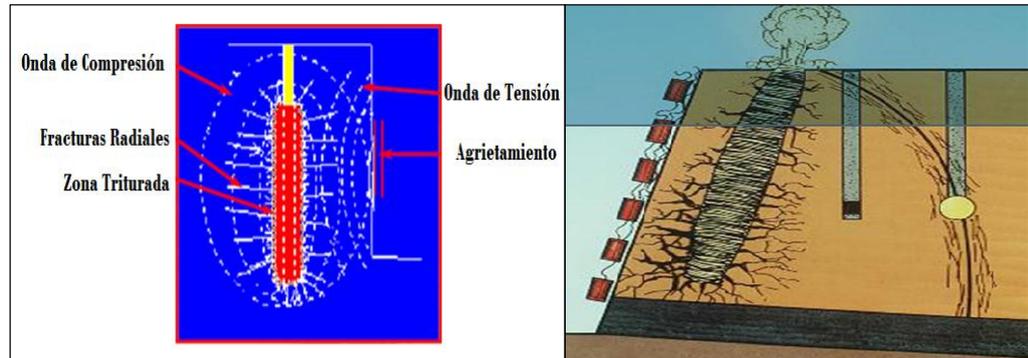
Fragmentar la roca en tamaños adecuados, desplazarla y soltarla en una pila para que sea excavable con facilidad, minimizar el daño a la estabilidad de los bancos y de las paredes, así como a edificaciones contiguas, evitar la dilución del mineral, proporcionando un producto que satisfaga las operaciones de los procesos posteriores y que permita liberar los equipos en forma segura.

*“La fragmentación de rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción”. (GeoBlast, 2015)*

##### 2.2.4.2. Propagación de las ondas de choque y/o de esfuerzo.

*“Esta alteración u onda de presión, transmitida a través del macizo rocoso, es resultado en parte, de la rápida expansión del gas y las altas presiones, lo cual produce el impacto en las paredes del pozo. La geometría de la dispersión depende de la ubicación del punto de iniciación, VOD y velocidad de la onda de choque en la roca” (ENAEX, 2014, pág. 13).*

Figura n° 4: Propagación de la onda de compresión y tensión.



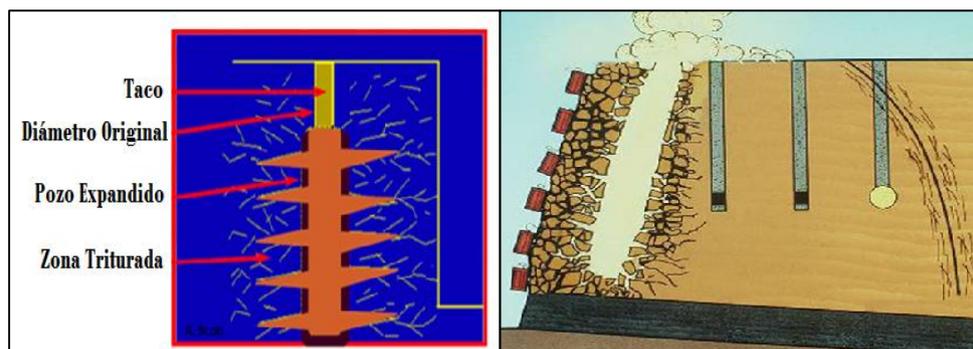
Fuente, extraída de (CINTEX, 2006, pág. 14).

#### 2.2.4.3. Expansión del gas a presión

“Durante, y/o después de la propagación de la onda de esfuerzo, los gases a alta temperatura y presión, producen un campo de esfuerzo alrededor del pozo que puede expandir el pozo original, extendiendo grietas radiales y penetrando en cualquier discontinuidad” (ENAEX, 2014, pág. 14).

Esto significa que los gases primero emigran a las grietas, diaclasas, fallas y discontinuidades existentes. También los tiempos de confinamiento para los gases en un macizo rocoso varían significativamente dependiendo de la cantidad y tipo de taco y del burden.

Figura n° 5: Expansión de los gases.



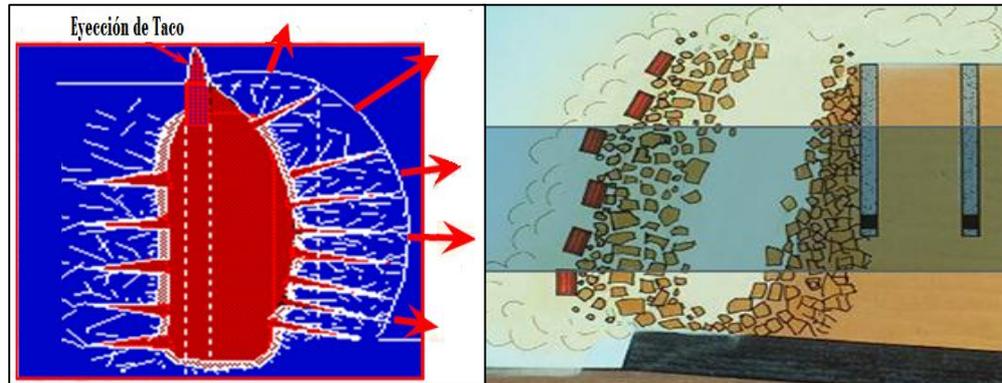
Fuente, extraída de (CINTEX, 2006).

#### 2.2.4.4. Movimiento del material

La mayor parte de la fragmentación ya se ha completado a través de ondas compresionales y de tensión, de la presurización del gas o una combinación de ambos. “Sin embargo, algún grado de fragmentación ocurre a través de colisiones en el aire y cuando el material impacta al suelo. Generalmente, mientras más alto es el

*banco mayor es la fragmentación, debido al aumento de la velocidad de impacto de los fragmentos individuales cuando caen al piso del banco". (ENAEX, 2014, pág. 14)*

Figura n° 6: Movimiento del material.



Fuente extraída de (CINTEX, 2006).

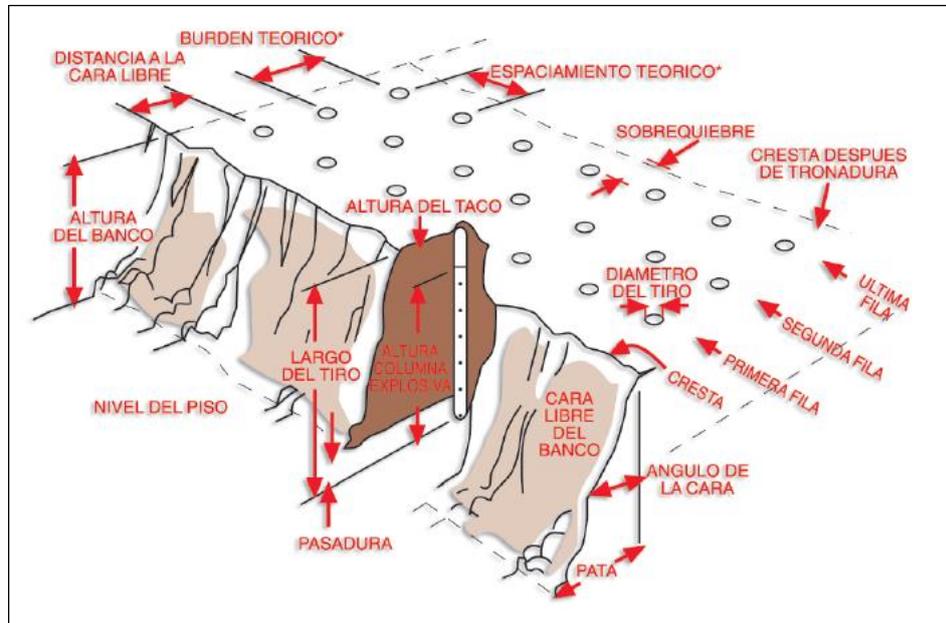
## 2.2.5. Diseño de Voladuras

### 2.2.5.1. Variables físicas controlables

El diseño de una voladura debe comprender todos los conceptos fundamentales de una voladura ideal. Las variables que intervienen en una voladura y sobre las cuales podemos tener control son:

- Diámetro del barreno
- Profundidad del barreno
- Sub- barrenación
- Tamaño del taco
- Material del taco
- Espaciamiento entre barrenos
- Numero de barrenos por voladura
- Dirección del movimiento de la roca

Figura n° 7: Nomenclatura del Diseño de Voladura.



*Fuente, extraída de (ENAEX, 2014).*

Además de estas dimensiones físicas, también podemos controlar el tiempo de voladura; para esto el encargado de la voladura puede:

- Seleccionar retardos para lograr una voladura geométrica
- Seleccionar el sistema de iniciación para lograr secuencia apropiada de la salida de barrenos
- Diseñar un patrón que controle las voladuras
- Diseñar los tiempos adecuados para lograr la máxima fragmentación, mínimo golpe de aire, reducir el fly rock y tener un control sobre la pared trasera.

Por ultimo para tener mejores resultados debe considerar que el proveedor de explosivos ofrezca, un sistema de iniciación seguro, confiable y un explosivo que se adecue a las condiciones ambientales que soluciones problemas de agua, libere energía, además, de decidir si se compra envasado o en granel.

#### 2.2.5.2. Variables no controlables

Las variables sobre las cuales podemos tener poco o ningún control son:

- Geología local
- Características de la roca
- Disposiciones legales y sus reglamentos
- Cercanías de las estructuras a proteger

### 2.2.5.3. Parámetros utilizados en el diseño de Mallas

#### A. Altura de banco (H)

Distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso).

“La altura esta función del equipo de excavación y carga, del diámetro de perforación, de la resistencia de la roca de la estructura geológica y estabilidad del talud, de la mineralización y de aspectos de seguridad” (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 154).

Normalmente los cargadores frontales a ruedas se emplean en bancos de 5 a 10 m de altura, con taladros de 65 a 100 mm (2 ½” a 5”) de diámetro, mientras que las excavadoras y grandes palas a oruga, en bancos de 10 a 15 m y más, con taladros de 100 mm (4” a 12”) o de diámetro, pudiéndose estimar la altura de banco con la siguiente fórmula:

$$L = 10 + 0,57 (C - 6)$$

Donde:

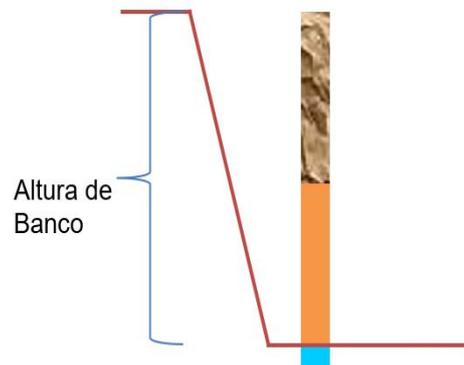
- C: es la capacidad del cucharón de la excavadora en m3.

Por otro lado el diámetro máximo de taladro sugerido (en mm) para una altura de banco conocida, debería ser igual a la altura en metros por 15.  $\varnothing \text{ max} = (15 \times \text{HB})$

Figura n° 8: Esquema de la Altura del Banco.

Donde:

- $\varnothing$ : diámetro máximo de taladro (mm)
- HB: altura de banco (m).



Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

#### B. Diámetro de taladro ( $\varnothing$ )

“La selección del diámetro de taladro es crítica considerando que afecta a las especificaciones de los equipos de perforación, carga y acarreo, también al Burden, Espaciamiento distribución de la carga explosiva, granulometría de la fragmentación, tiempo a emplear en la perforación y en general a la eficiencia y economía de toda la operación” (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 153). Para determinar el diámetro óptimo en la práctica, se consideran cinco aspectos:

- Costo de la voladura (\$/m<sup>3</sup> de roca volada).
- Fragmentación y la relación entre el espaciamiento de los taladros y de las fracturas.
- Control de la exactitud de la perforación, y su efecto en la fragmentación, seguridad e impacto ambiental.
- Tamaño de la perforadora y la accesibilidad al sitio.
- Altura del banco y la proporción del taladro requerido para el taco.

Con diámetro pequeño los costos de perforación y el planeamiento del disparo normalmente son altos, se emplea mucho tiempo y personal, pero se obtiene mejor distribución y consumo específico del explosivo, permitiendo también efectuar voladuras selectivas. El incremento de diámetro, aumenta y mantiene la velocidad de detonación (VOD) de la carga explosiva, incrementa el rendimiento de la perforación y también de los equipos de acarreo, disminuyendo el costo global de la voladura.

En bancos de canteras y minería superficial los diámetros habituales varían entre 50 y 125 mm (2" a 5") mientras que en la minería por tajos abiertos varían entre 150 a 310 mm (6" a 12") y llegan hasta 451 mm (15"). El máximo diámetro a adoptar depende de la profundidad del taladro y, recíprocamente, la mínima profundidad a la que puede ser perforado un taladro depende del diámetro, lo que usualmente se expresa con la igualdad:

$$L = 2 \varnothing$$

Donde:

- L: la mínima longitud del taladro, en pies.
- $\varnothing$ : es el diámetro del taladro, en pulgadas.

Como una guía empírica y parte de la experiencia se determina por:

$$\varnothing = \frac{HB}{k}$$

Donde

- HB: Es la altura del banco (m)
- $\varnothing$ : Es el diámetro del taladro (pulg) o diámetro de la broca.
- k = 1.2 a 1.7



Figura n° 9: Broca ticonica. Fuente, fotografía de la base de datos Cerro Negro.

### C. Longitud o profundidad de taladro (L)

La longitud de taladro tiene marcada influencia en el diseño total de la voladura y es factor determinante en el diámetro, burden y espaciamiento.

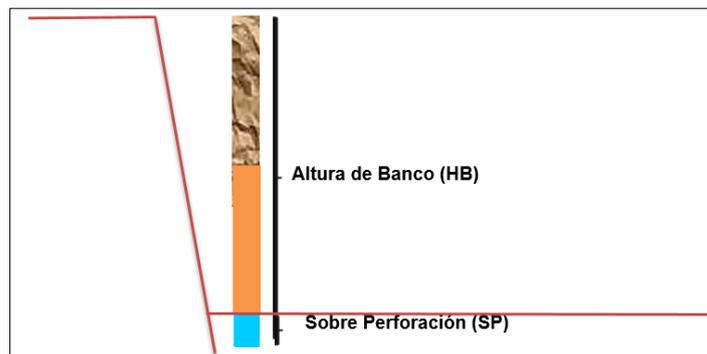
*“Es definida como la suma de altura de banco más la sobre perforación necesaria por debajo del nivel o rasante del piso para garantizar su buena rotura y evitar que queden lomos o resaltos (toes), que afectan al trabajo del equipo de limpieza y deben ser eliminados por rotura secundaria” (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 153).*

$$L = HB + SP$$

Donde:

- H: Altura del banco (m).
- SP: Sobre-perforación (m).

Figura n° 10: Esquema de la longitud de un taladro



*Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.*

### D. La Sobre-Perforación (SP)

*“Se define como la profundidad a la cual se perforará el taladro por debajo del nivel del piso propuesto para asegurar el rompimiento ocurra a nivel” (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 154).*

En la práctica, teniendo en cuenta la resistencia de la roca y el burden de la malla, se estima los siguientes rangos:

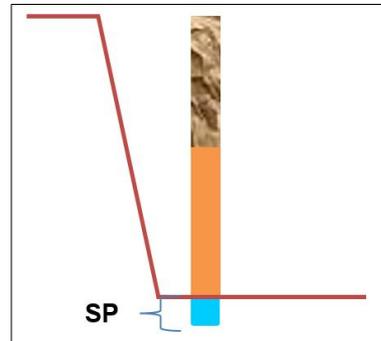
$$SP = 0.2 \text{ a } 0.3 * B$$

Donde:

- SP: Sobre perforación
- B: Burden (m)

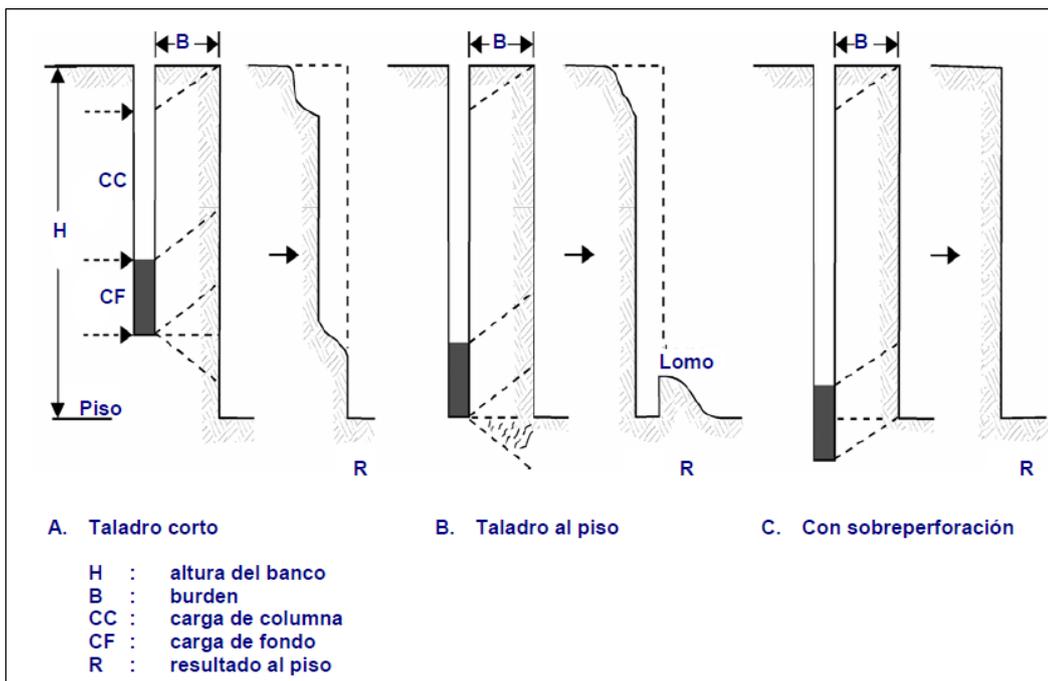
Figura n° 11: Esquema de la sobre-perforación

Tipo de Roca	Sobre perforación
Blanda a media	$0.2 * B$
Dura a muy dura	$0.3 * B$



Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

Figura n° 12: Esquema de la profundidad del taladro y la importancia de la sobre perforación.



Fuente, extraída de (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013).

### E. Longitud de taco (T)

Material inerte añadido en la parte superior del taladro para efectuar el confinamiento de los gases de la explosión y prevenir la proyección de rocas y sobrepresión excesiva.

“Si no hay taco los gases se escaparán a la atmósfera arrastrando un alto porcentaje de energía, que debería actuar contra la roca. Si el taco es insuficiente, además de la fuga parcial de gases se producirá proyección de fragmentos, craterización y fuerte ruido por onda aérea. Si el taco es excesivo, la energía se concentrará en fragmentos al fondo del taladro, dejando gran cantidad de bloques o bolones en la parte superior, especialmente si el fisuramiento natural de la roca es muy espaciado, resultando una fragmentación irregular y poco esponjada y adicionalmente se generará fuerte vibración”, (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 154).

En la práctica se relaciona el taco con respecto al diámetro con la resistencia a la compresión de la roca a volar:

$$T = (23 \text{ a } 30) * \phi$$

También se considera Tamaño óptimo de material (stemming)  $(1/10 \text{ a } 1/15)*\phi$ .

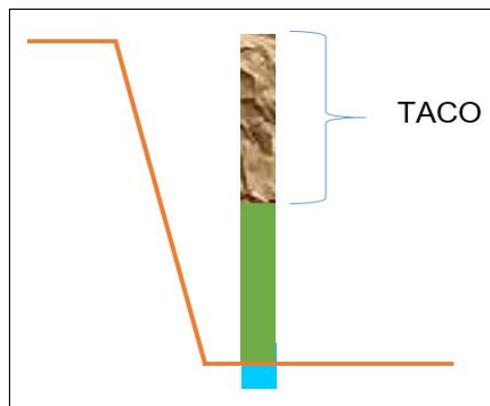
Si se usa un tamaño óptimo:

$$T = (20 \text{ a } 25) * \phi$$

Dónde:

- T= Taco (m)
- $\phi$  = Diámetro (m)

Figura n° 13: Esquema de Taco.



Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

#### F. Distancia escalada del burden “SD”.

“Determina la cantidad de explosivo en la columna de carga que influye directamente sobre el taco, también considerada como factor de seguridad. Por cuestiones prácticas en campo se considera un SD entre 1 y 2. Un SD menor a 1 puede generar fly rock o inyección del taco, un SD Mayor a 2 no considera una mejor fragmentación generando bolones en la parte superior del Taladro” (Chiappetta, 2014). Donde se determina por:

$$SD = \frac{D}{W^{1/3}}$$

Donde:

- W (kg): peso del explosivo ocupado en la parte alta de la columna, que influye directamente en el Taco.

$$W = Lw * LC$$

$$Lw = 10 * \emptyset$$

- Lw (m): Longitud de la carga explosiva que influye directamente en el Taco.
  - LC: Carga Lineal (kg/m)
  - $\emptyset$  : Diámetro del Taladro o Carga explosiva (m)
- D (m): Distancia desde la parte superior de Taladro al centro de W.

Además:

$$D = T + Lw/2$$

- T: Taco (m)
- Lw (m): Longitud de la carga explosiva que influye directamente en el Taco.

#### G. Burden (B)

También denominada piedra, bordo o línea de menor resistencia a la cara libre. Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de taladros en una voladura.

Se considera el parámetro más determinante de la voladura. “Depende básicamente del diámetro de perforación, de las propiedades de la roca, altura de banco y las especificaciones del explosivo a emplear” (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 155).

En la práctica se relaciona el burden con el diámetro con la resistencia a la compresión de la roca:

$$B = 20 \text{ a } 40 * \emptyset$$

Donde:

- B: Burden (m)
- Ø: Diámetro del taladro (m)

Se consideran también formulas, segunda la resistencia y el explosivo a utilizar.

❖ **Formula de Ash.**

$$B = \frac{(Kb \times \phi)}{12}$$

Donde:

- B: Burden ( Pies)
- Ø: Diámetro de taladro (pulg)
- Kb: Constante, según el cuadro

Tabla n° 2: Esquema para determinar el burden

Clase de Roca	Densidad (g/m3)	Clase de roca		
		Blanda	Media	Dura
Baja Densidad y Potencia	0.8 - 0.9	30	25	20
Media Densidad y Potencia	1.0 - 1.2	35	30	25
Alta Densidad y Potencia	1.2 - 1.8	40	35	30

*Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.*

❖ **Formula de C. Konya**

Basada en las teorías del Dr. Ash. Determina el burden con base en la relación entre el diámetro de la carga explosiva y la densidad, tanto del explosivo como de la roca, según:

$$B = 3.15 \times \phi_e \times \sqrt[3]{\frac{\rho_e}{\rho_r}}$$

Donde:

- B: Burden, en pies.
- Øe: Diámetro del explosivo, en pulgadas.
- pe: Densidad del explosivo.
- pr: Densidad de la roca.

## H. Espaciamiento (E)

“Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila” (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 157).

La selección del espaciamiento de taladros de voladura está generalmente relacionada al burden. Evidencias teóricas y prácticas sugieren que la relación óptima E/B en bancos con mallas triangulares es 1.15.

Además, según cuestiones operativas también se consideran mallas triangulares, rectangulares y cuadradas, donde para calcular el espaciamiento consideran rangos.

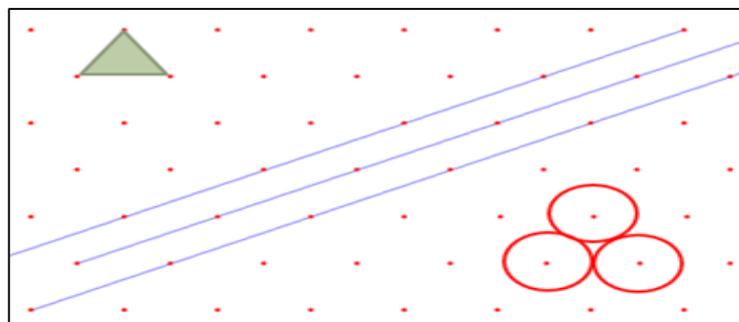
$$E = 1.15 * B$$

Donde:

- E: espaciamiento (m)
- B: burden (m).

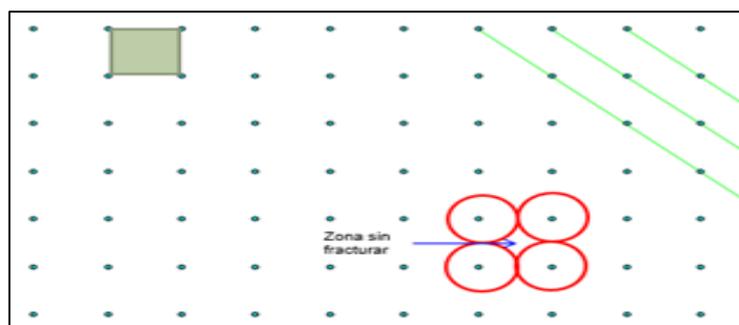
La geometría de una malla triangular proporciona mayor rompimiento debido a una mejor distribución de la energía, que una malla cuadrada o rectangular.

Figura n° 14: Geometría de la malla triangular



Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

Figura n° 15: Geometría de la malla cuadrada



Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

### I. Factor de Rigidez ( $Sf$ )

Describe la influencia de la geometría del disparo en el estado de confinamiento de una columna de explosivo, y se toma como la razón entre la altura del banco y el burden.

$$Sf = \frac{H}{B}$$

Donde:

- H = altura del banco (m)
- B = Burden (m)

## 2.2.6. Cálculo y distribución de la carga explosiva

### 2.2.6.1. Columna explosiva o Longitud de Carga (LC)

Es la parte activa del taladro de voladura, también denominada “longitud de carga” donde se produce la reacción explosiva y la presión inicial de los gases contra las paredes largo del taladro, según las circunstancias o condiciones de la roca. Usualmente comprende de 1/2 a 2/3 de la longitud total y puede ser continua o segmentada. En minera Cerro Negro se determina la longitud de carga basada en la resistencia a la compresión de la roca, la experiencia indica que a mayor resistencia se necesita mayor energía, esto indica mayor longitud de Carga.

$$LC = HB + SP - T$$

Donde:

- LC: Longitud de Carga (m)
- HB: Altura de Banco (m)
- SP: Sobre perforación (m)
- T: Taco (m)

“La columna continua normalmente empleada para rocas frágiles o poco competentes suele ser del mismo tipo de explosivo, mientras que para rocas duras, tenaces y competentes se divide en dos partes: La carga de fondo (CF) y la carga de columna (CC)”. (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 158). En Cerro Negro se considera Carga Continua para taladros de producción y para taladros buffer carga con cámara de aire.

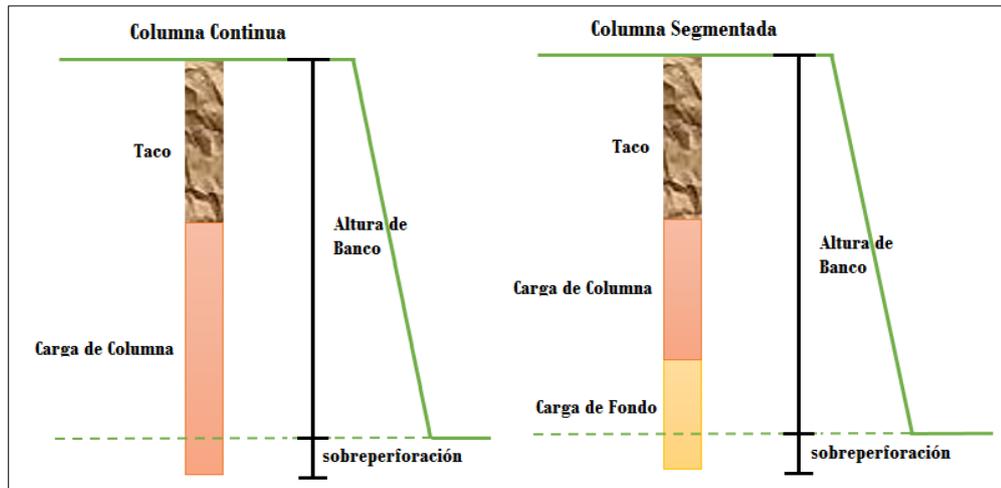
Para Carga Continua

$$LC = CC$$

Para Carga Segmentada

$$LC = CC + CF$$

Figura n° 16: Esquema de carga continua y segmentada.



Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

#### 2.2.6.2. Carga lineal (CL)

Se define como la cantidad de explosivo a utilizar por cada metro de columna de carga. Se expresa en kg/m o lb/yd.

“Es una excelente unidad referencial para el cálculo de la carga total de un disparo, pero no es el mejor parámetro de por sí, ya que la distribución de este explosivo en la masa de la roca mediante los taladros tiene gran influencia en los efectos de fragmentación y desplazamiento, es decir, en el resultado de la voladura”. (EXSA SOLUCIONES S.A., 2013, pág. 158)

$$CL = 0.5067 * (\phi)^2 * \rho_e$$

Donde:

- $CL$ : Carga Lineal (Kg / m)
- $\phi$ : Diámetro del bit ( pulg)
- $\rho_e$ : Densidad del explosivo (gr / cc)

#### 2.2.6.3. Cantidad de Explosivos ( $W_e$ )

Se define como la Carga lineal o específica por longitud de columna explosiva; donde se considera, columna continua o la suma de las cargas segmentadas en Kilogramos.

$$W_e = CL * LC$$

Donde:

- $W_e$ : Cantidad de explosivo por Taladro (Kg)
- $CL$ : Carga Lineal (Kg/m)

- LC: Longitud de Carga (m)

Además se considera la cantidad de explosivo por Proyecto.

$$We\ Total = We * \# Taladros$$

Donde:

- We Total: Cantidad de explosivo por Proyecto (kg)
- We: Cantidad de explosivo por Taladro (kg)

#### 2.2.6.4. Carga Operante (COp)

Se define como la cantidad de explosivo de un taladro por el número de talados detonados en un solo tiempo en Kg.

$$COp = We * NT$$

Donde:

- COp: Carga Operante (kg)
- We: Cantidad explosivo por Taladro (kg)
- NT: Número de Taladros detonado en un solo tiempo

#### 2.2.6.5. Volumen de Roca (Vr)

Es la cantidad de roca que se obtendrá con la voladura. Es calculada utilizando el Burden, Espaciamiento, altura de banco y el número de taladros en el proyecto.

$$Vr = B * E * HB$$

Donde:

- Vr: Volumen de roca por Taladro ( $m^3$ )
- B: Burden (m)
- E: Espaciamiento (m)
- HB: Altura de Banco (m)

Además se considera el volumen de rocas por Proyecto.

$$Vr\ Total = Vr * \# Taladros$$

Donde:

- Vr Total: Volumen de roca por Proyecto ( $m^3$ )
- Vr: Volumen de roca por Taladro ( $m^3$ )

#### 2.2.6.6. Tonelaje roto (Tn)

El tonelaje roto es igual al volumen del material roto multiplicado por la densidad de dicho material.

$$Tn = Vr * \rho_r$$

Donde:

- Tn: Toneladas rotas (Toneladas)
- Vr: Volumen de roca ( $m^3$ )

- $\rho_r$  : Densidad de la roca ( $Tn/m^3$ )

#### 2.2.6.7. Factor de carga (FC)

Indica la cantidad total de explosivo usado para romper un volumen o peso unitario de roca. El factor de Carga (FC) se expresa en Kg/m<sup>3</sup>.

$$FC = \frac{We}{V} \text{ Kg/m}^3$$

Donde:

- FC: Factor de Carga ( $Kg/m^3$ )
- We: Cantidad de explosivo por taladro (Kg)
- Vr: Volumen de roca por taladro ( $m^3$ )

#### 2.2.6.8. Secuencia de Detonación

*“Los tiempos de iniciación para la detonación entre taladros o filas en una malla con taladros cargados, influye directamente en la fragmentación, patas, disposición del material y las vibraciones”.* (ENAEX, 2014, pág. 94)

La iniciación debe ser completa antes que detone el primer tiro, además la secuencia de detonación debe ser tal que siempre el tiro que detone encuentre una cara libre, independientemente de la corrida a la cual pertenezca. Además se consideran tres aspectos:

- Tiempos cortos causan apilamiento alto cerca de la siguiente cara de banco.
- Tiempos cortos causan pateo, pueden crear más violencia en el disparo
- Tiempos Largos decremento la vibración, disminuye el pateo y esparce el material.

#### A. Tiempo de Retardo entre Taladros (TT)

El tiempo de iniciación entre taladros debe considerar el criterio para la selección de un tiempo adecuado. Se determinar por:

$$TT = TH * E$$

Donde:

- TT: Tiempo de retardo entre Taladros (ms)
- TH: Constante de Retardo entre Taladros (ms/ft)
- E: Espaciamiento (ft)

Tabla n° 3: Constantes para los tiempos de retardo entre Taladros

Tipo de Roca	TH (ms/ft)
Areniscas, Suelos consolidados, carbón	1.8 a 2.1
Calizas, Rocas de Sal, Esquistos	1.5 a 1.8
Calizas compactas, Mármol, Granitos, Basaltos, Cuarzos Y Gabros	1.2 a 1.5
Diabasa, Gneis Compactos, Micas y Magnetitas	0.9 a 1.2

Fuente, extraída de (ENAEEX, 2014).

### B. Tiempo de Retardo ente Filas (TF)

El tiempo de iniciación entre línea de taladros o filas, se considerar el criterio para la selección de un tiempo adecuado.

$$TF = TR * B$$

Donde:

- a. TF: Tiempo de retardo entre Filas (ms)
- b. TR: Constante de Retardo entre Filas (ms/ft)
- c. B: Burden (ft)

Tabla n° 4: Constantes para los tiempos de retardo entre Filas

TR (Ms/ Ft)	Resultado
2	Violencia, excesivo Golpe de aire, Pateo
2 a 3	Apilamiento moderado cera de la cara, golpe de aire , pateo en imites altos
3 a 4	Apilamiento promedio, control de golpe de aire, pateo y Vibración.
4 a 6	Rezaga esparcida con mínimo pateo.
6 a 14	Voladura Proyectada.

Fuente, extraída de (ENAEEX, 2014).

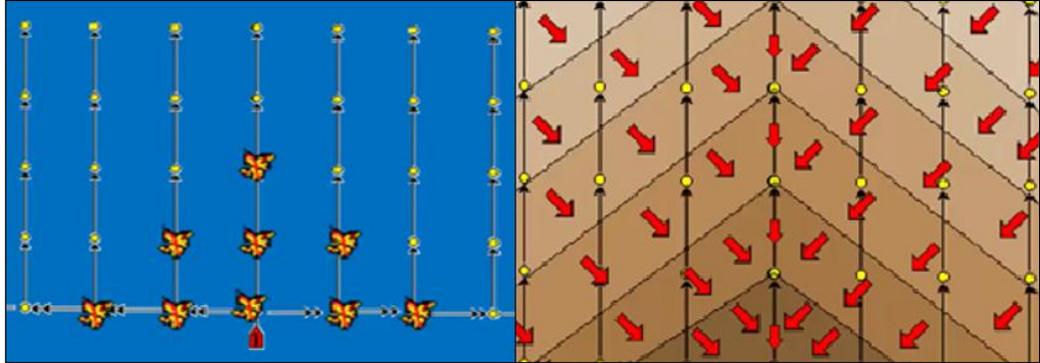
Además, cuando el control de pared es crítico en disparos de filas múltiples, (6 a más filas) el retardo entre filas se considera de 10 a 14 ms/ft de burden.

### C. Tipos de Secuencia de iniciación

Para determinar la secuencia de iniciación en un proyecto de voladura, se maneja con mucho criterio. Como puntos importantes esta la dirección del desplazamiento del material, y las estructuras a proteger. A continuación se consideran algunas secuencias:

**a. Configuración en “V” o Cuña**

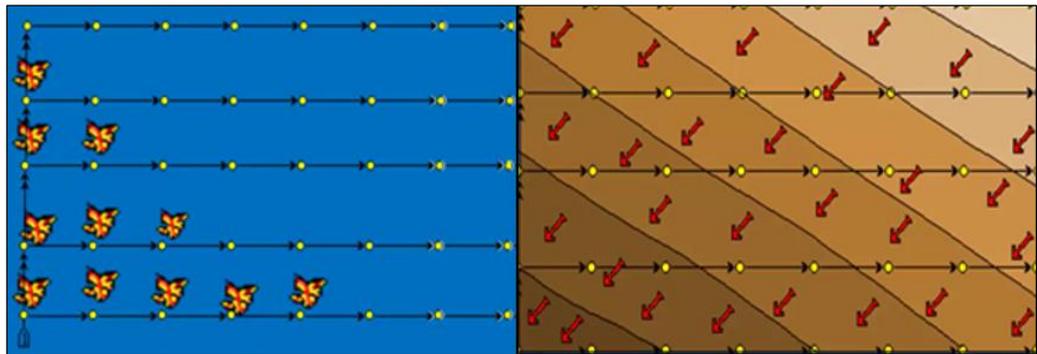
Figura n° 17: Simulación de iniciación en Cuña y movimiento del material.



*Fuente, extraída de base de datos Cerro Negro.*

**b. Configuración en Echelon o Diagonal**

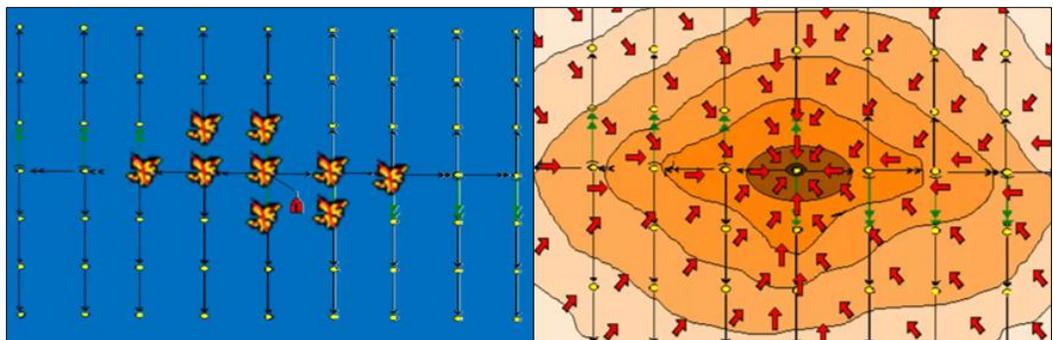
Figura n° 18: Simulación de iniciación en Echelon y movimiento del material



*Fuente, extraída de base de datos Cerro Negro.*

**c. Configuración en Diamante o Central**

Figura n° 19: Simulación de iniciación en Diamante y movimiento del material.



*Fuente, extraída de base de datos Cerro Negro.*

### 2.2.7. Ondas Sísmicas.

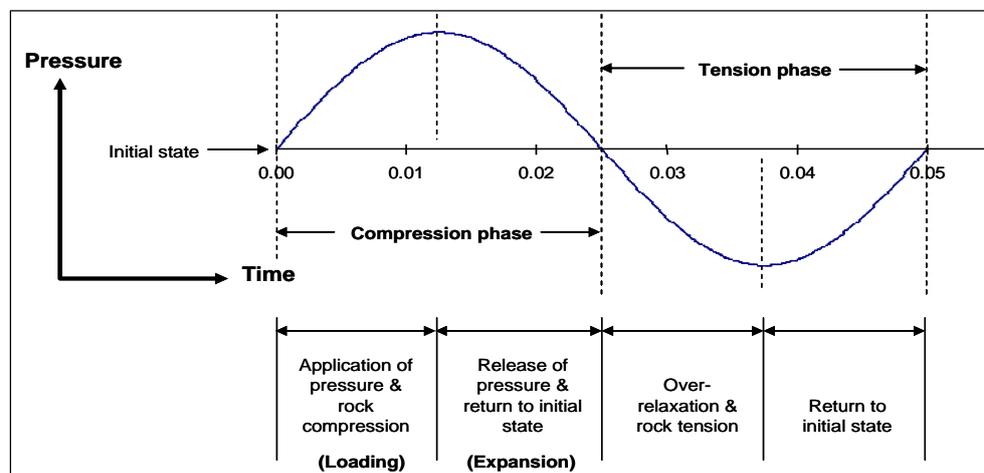
Es un movimiento ondulatorio tridimensional, puede considerarse también como un transporte de energía y de cantidad de movimiento de un punto del espacio a otro sin transporte de materia, este dependen de las propiedades elásticas del terreno que propaga la onda. *“Estas ondas sísmicas transmiten a la roca movimientos de partículas en distintas direcciones, con intensidades que dependerán del poder energético del explosivo y la geometría involucrada”* (GeoBlast, 2015).

Existen dos fuentes de formación de ondas sísmicas, los mecanismos naturales, entre los que destacan terremotos, mareas, etc.; y los artificiales, entre los que son relevantes voladuras y explosiones generadas por el hombre.

#### 2.2.7.1. Vibración

Se entiende por vibraciones un fenómeno de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. También se define que *“Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión”*. (CINTEX, 2006, pág. 8).

Figura n° 20: Ciclo de esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión.



Fuente, extraída de (CINTEX, 2006).

En el caso de las vibraciones generadas en voladuras, se trata de unas ondas que se generan en el interior del taladro, como consecuencia de la detonación del explosivo, y que se propagarán por el terreno circundante o puede también propagarse por el aire (en el caso de voladuras a cielo abierto). *“Las vibraciones en Voladura es producida en el frente de detonación del explosivo, en la zona donde el explosivo sólido es convertido en gas, y la densidad del gas es aún igual a la densidad del explosivo sólido”*. (CINTEX, 2006, pág. 8).

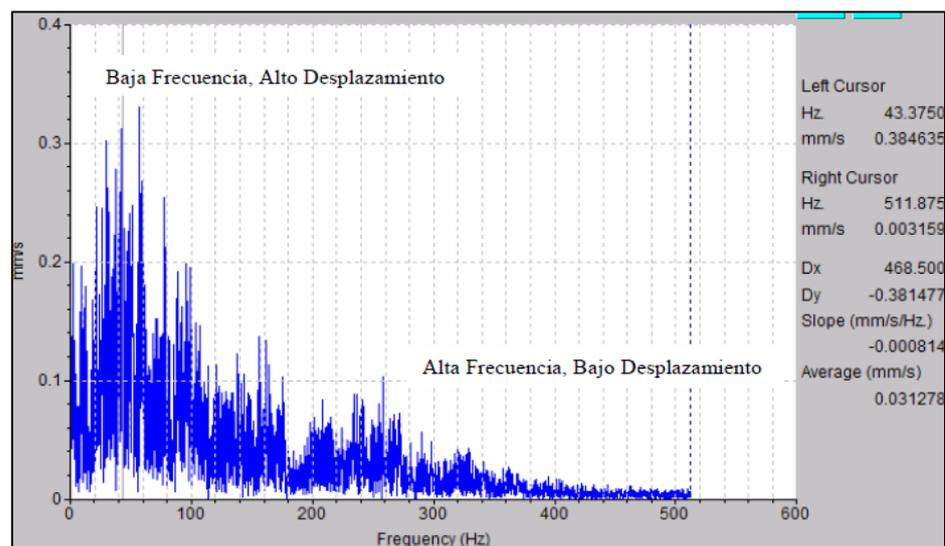
La Vibración al macizo rocoso inducido por voladura de rocas puede ser clasificado en dos categorías: vibraciones en campo lejano y vibraciones en campo cercano. El daño en campo lejano es definido como aquel que es capaz de generar apertura de fracturas pre-existentes, fuera de la zona donde el fracturamiento puede ser inducido, a distancias de decenas o centenas de metros de la tronadura.

### 2.2.7.2. Propiedades básicas de las ondas

Las propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones son:

- A. Frecuencia** – La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión.

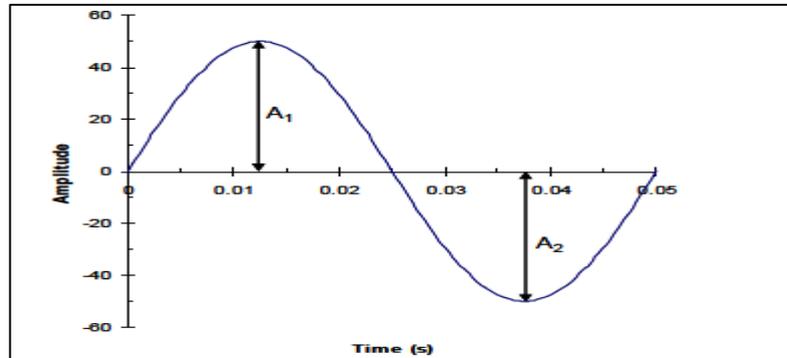
Figura n° 21: Nivel de Frecuencia.



Fuente, extraída de (Contreras, 2009).

- B. Amplitud** – Máximo desplazamiento desde la posición de reposo de un punto del material de terreno. *“La amplitud de la vibración, medida como velocidad pico de partícula, es universalmente considerada como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso, y por lo tanto considerado como el mejor indicador del potencial daño y el potencial efecto de fragmentación en la roca.”* (CINTEX, 2006, pág. 13).

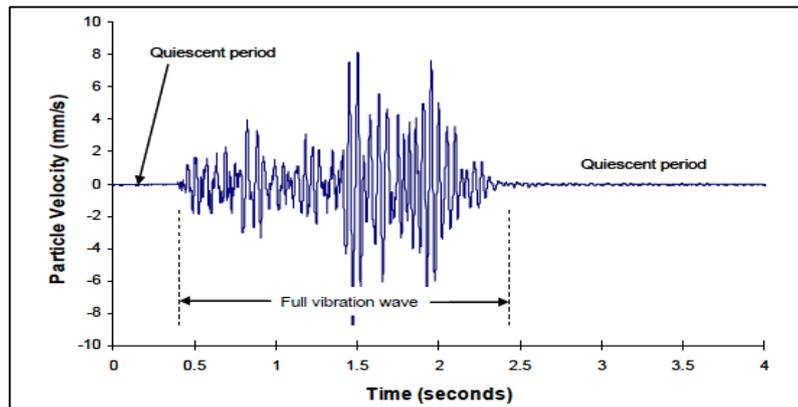
Figura n° 22: Amplitudes de onda.



Fuente extraída de (CINTEX, 2006)

- C. Duración** – El tiempo total que el medio está expuesto a la vibración. La duración de la vibración será un poco mayor que la duración de la voladura (es decir el tiempo entre la detonación del primer y último pozo). “Normalmente la duración de la vibración es alrededor de 200 a 300 ms más larga que la duración de la voladura, debido al tiempo requerido para que la vibración llegue desde el último pozo detonado al punto de medición”. (CINTEX, 2006, pág. 14).

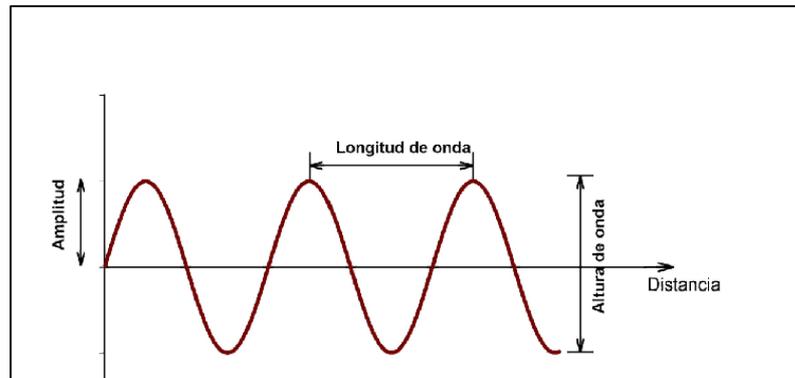
Figura n° 23: Onda completa de vibración



Fuente extraída de (CINTEX, 2006)

- D. Longitud de Onda** – distancia que viaja la onda en un ciclo completo de compresión y tensión. La longitud de onda es un factor importante a considerar durante el modelamiento, y durante discusiones del potencial daño que pueden causar las ondas de vibraciones sobre las estructuras de la roca.

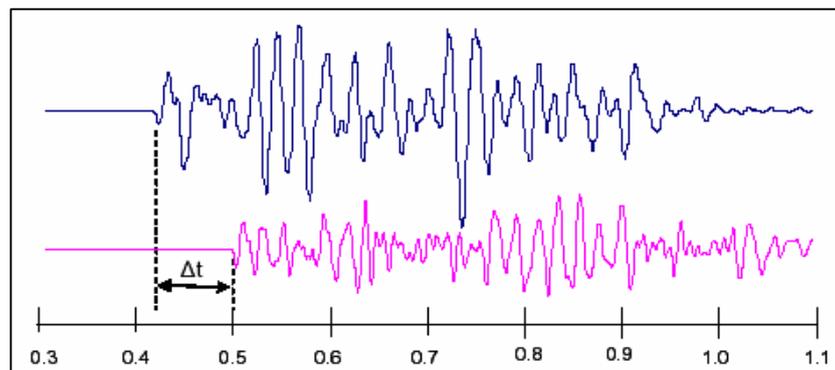
Figura n° 24: Longitud de Onda.



Fuente, extraída de (CINTEX, 2006)

**E. Velocidad de propagación** – La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda se desplaza a través de la roca. “Esta velocidad puede ser medida utilizando dos geófonos ubicados a diferentes distancias de la voladura, y mediante la medición de la diferencia de tiempo de arribo de cada señal” (CINTEX, 2006, pág. 16).

Figura n° 25: Velocidad de Propagación en el Instantel.



Fuente, extraída de (CINTEX, 2006).

### 2.2.7.3. Tipos de Ondas

#### A. Ondas Internas

##### a. Ondas de compresión (P)

Es la onda más rápida que viaja a una velocidad de entre 1800 a 6500 metros por segundo, tienen alta frecuencia, una longitud de onda corta y son longitudinales. La Onda “P” generalmente viaja a una velocidad 1.73 veces de las ondas S y pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido.

**b. Onda Transversales (S)**

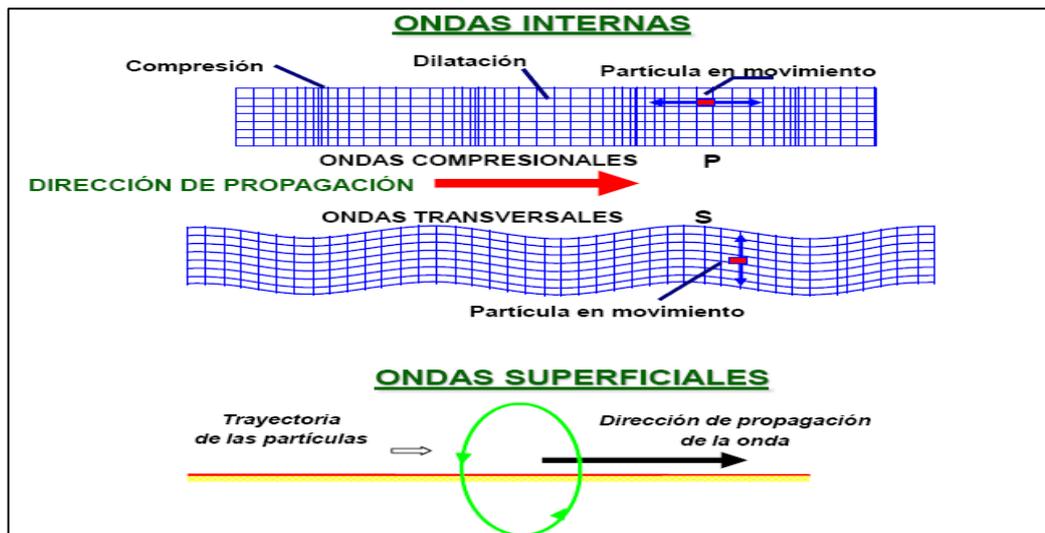
Son ondas en las cuales presentan un desplazamiento transversal, alcanzan aproximadamente 3/5 de la velocidad de la onda P y presenta menores frecuencias y mayores desplazamientos.

**B. Ondas Superficiales**

**a. Onda Rayleigh (R o superficial)**

Las ondas más lentas y las ultimas en llegar, son las ondas de “superficie” (generalmente conocidas como “Rayleigh” u ondas “R” que generalmente tienen la menor frecuencia y el mayor desplazamiento.

Figura n° 26: Ondas vibratoriales (Ondas Internas y Superficiales).



Fuente, extraída de (GeoBlast, 2015).

**2.2.7.4. Unidad de mitad de la vibración**

**A. Velocidad Pico de la Partícula (PPV)**

(GIRALDO, 2010). Sostiene que: “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 distintos cambios en los parámetros más relevantes, sin que ello deba necesariamente tener que realizar a escala real. Se pueden distinguir distintos enfoques asociados al Modelamiento de

vibraciones, los cuales tienen como objetivo final predecir los niveles de vibración en un punto específico de acuerdo a un diseño de voladura”. (pág. 34)

Modelo general

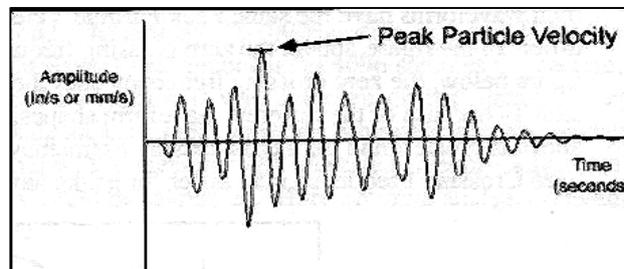
$$PPV = K * De^{\alpha}$$

Donde:

- PPV: Velocidad Pico Partícula (mm/s)
- De: Distancia Escalar
- K: Factor de Velocidad
- $\alpha$ : Factor de Atenuación

La Velocidad Pico de la Partícula indica la velocidad máxima a la cual viajan las partículas resultantes desde las vibraciones del suelo de un evento. El MiniMate Plus calcula la PPV para cada geófono.

Figura n° 27: Calculando la Velocidad Peak de la Partícula.



Fuente, extraída de (MineMate Plus, 2011).

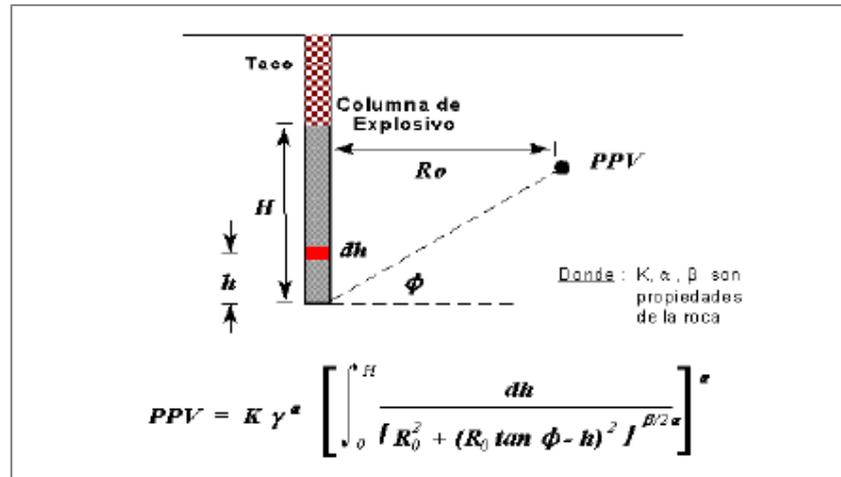
### 2.2.7.5. Modelos de Vibraciones

#### A. Modelo de Campo Cercano

El modelo de campo cercano, se considera a las vibraciones que afecta directamente a las estructuras alrededor del taladro, principalmente para medir el nivel de vibraciones que afecta la estabilidad del tajo.

“El análisis de los registros de vibraciones, permiten conocer la velocidad de partícula que genera cada carga o grupos de cargas en la voladura. Fue así como se obtuvieron datos de velocidad de partícula, distancia y carga por taladro, a la que se ajustó posteriormente la ecuación del modelo propuesto por Holmberg & Persson”. (CINTEX, 2006, pág. 73).

Figura n° 28: Modelo de campo cercano de Holmberg and Persson.



Fuente, extraída de (CINTEX, 2006).

## B. Modelo de Campo Lejano

El modelo de campo lejano, se considera a las vibraciones que afecta directamente a las estructuras fuera del tajado, como viviendas cercanas al proyecto, principalmente para medir el nivel de vibraciones para que no afecten la estabilidad de las estructuras.

Este modelo de vibraciones nos permite predecir el nivel de vibraciones a partir de mediciones en campo. En forma práctica se aplicara para distancias mayores de cinco veces la longitud de carga.

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.
- La distancia de la carga al punto a la cual se mide el nivel de vibraciones.

*“Teóricamente, el criterio que mejor representa el comportamiento de la vibración generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras de tajado abierto, es el de DEVINE puesto que al utilizar cargas explosivas con geometría cilíndricas, se tiene que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga”.* (CINTEX, 2006, pág. 71)

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^\alpha$$

Donde:

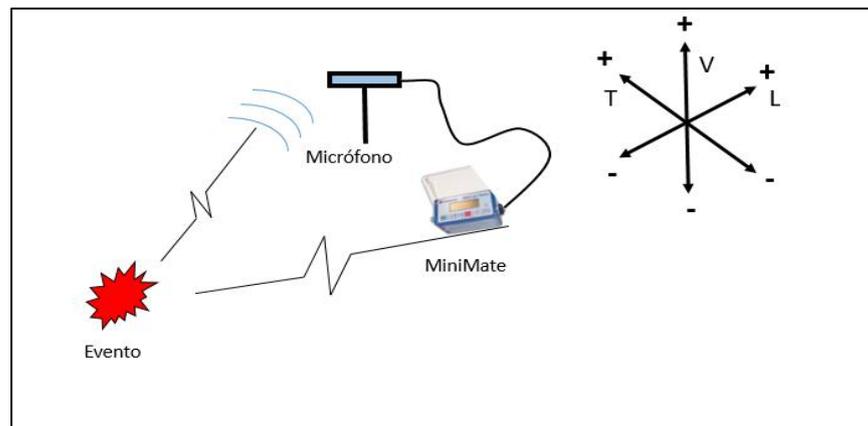
- PPV: Velocidad Pico de Partícula (mm/s)
- W: Peso de la carga explosiva detonada en un instante (Kg)
- d: Distancia entre el punto de medición y la carga explosiva detonando
- K: Factor controlado principalmente por el Explosivo, (Densidad del explosivo, VOD, cantidad de carga y el número de taladros, etc.)
- $\alpha$ : Factor de atenuación de la roca, (Características geológicas, litológicas, estructura del macizo por donde se transmite la onda.)

Para determinar los valores de  $\alpha$  y K, se obtiene a partir de una ecuación lineal o potencial, representada en un gráfico de dispersión. Donde el eje de las X estará representado por el logaritmo de la distancia escalada y el eje de las Y por el logaritmo de los valores de PPV medidos en campo.

#### 2.2.7.6. Monitoreo de Eventos

El monitoreo de eventos mide las vibraciones del suelo y la presión del aire. En el monitoreo de vibraciones obtenemos como resultado el nivel del PPV en tres direcciones: transversales, verticales, y longitudinales.

Figura n° 29: Monitoreo de Evento.

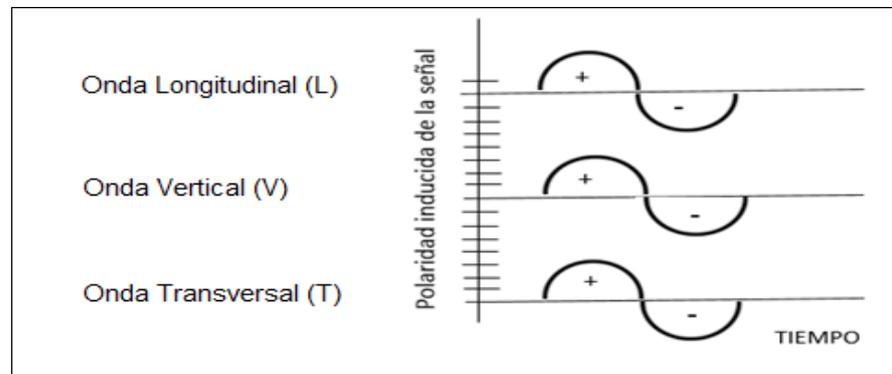


*Fuente Propia.*

- V: Onda Vertical
- T: Onda Transversal
- L: Onda Longitudinal

Las flechas indican el sentido de la ubicación del transductor al evento, el signo positivo indica que apunta en dirección del evento y negativo en dirección opuesta al evento. A continuación se representa de forma gráfica la onda en las tres dimensiones.

Figura n° 30: Monitoreo de las vibraciones en las tres dimensiones.



Fuente, extraída de (MineMate Plus, 2011)

#### 2.2.7.7. Equipo para el monitoreo de vibraciones

Para realizar el monitoreo en campo y realizar la toma de datos, que se utilizan en el cálculo del modelo predictivo, se realizó con equipos especializados los cuales constan de los siguientes componentes.

##### A. Transductores (Geófonos)

*“Gran parte de las capacidades y ventajas de la técnica de monitoreo de vibraciones descansa en la habilidad para recolectar datos de vibración de buena calidad. La característica de estos datos tiene directa relación con el tipo de transductor utilizado, la técnica empleada para su instalación y orientación”* (GeoBlast, 2015).

Existe una gran variedad de estos equipos disponibles en el mercado, que tienen la capacidad de medir velocidad o aceleración de partículas. Su función es convertir el movimiento físico generado durante el paso de la vibración, en una señal de voltaje equivalente, según sea su sensibilidad. Los transductores deben reunir algunas consideraciones prácticas, como son:

- Costo:** En muchos casos es necesario instalar transductores permanentemente en el macizo rocoso, lo que evita efectos superficiales y permite un análisis completo de la voladura. Bajo estas circunstancias, los transductores no son recuperables, y el costo de cada unidad debe ser minimizado.
- Precisión:** gran parte del tiempo, esfuerzo y recursos están dedicados a la instalación de los transductores de vibración, es importante entonces que ellos sean confiables en el largo plazo.

Figura n° 31: Transductor, equipo de monitoreo de vibraciones.



*Fuente, extraída de base de datos Cerro Negro*

### B. Micrófono

Su función principal es captar la onda sonora u onda aérea, que se produce producto de la voladura, se mide en decibeles.

Figura n° 32: Micrófono, equipo de monitoreo Instantel.



*Fuente, extraída de base de datos Cerro Negro*

### C. Sistema de cables

Son aquellos que llevan la señal captada desde el geófono al equipo de adquisición.

Figura n° 33: Sistema de Cables, equipo de monitoreo InstanTel.



*Fuente, extraída de base de datos Cerro Negro*

#### D. Equipo de adquisición

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

Figura n° 34: Equipo de Adquisición InstanTel.



*Fuente, extraída de base de datos Cerro Negro*

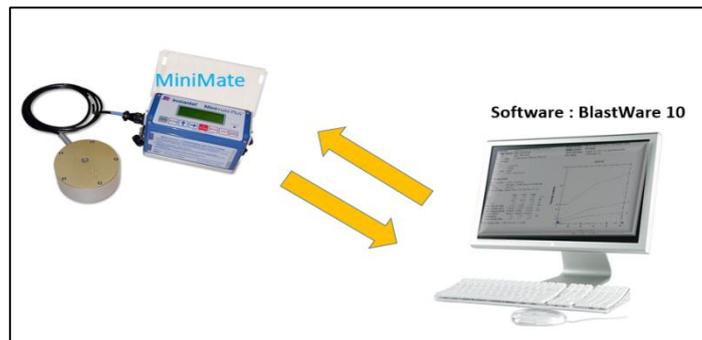
### E. Computador

La información de vibraciones es comúnmente realizada en un computador.

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

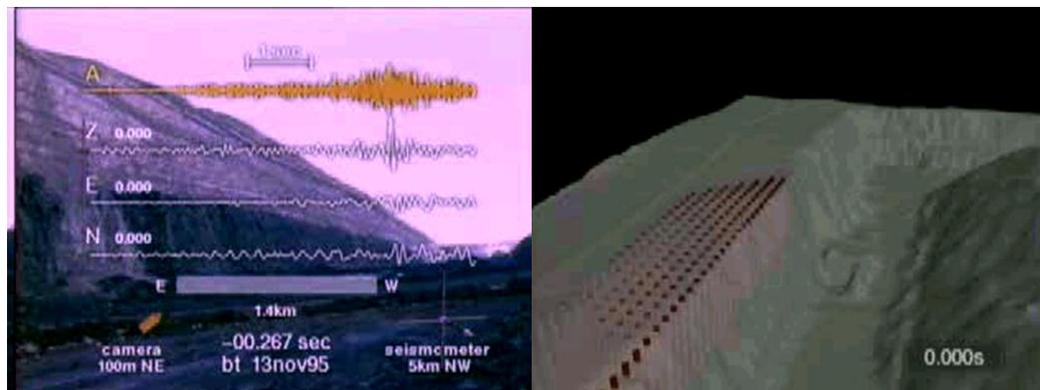
- Desplegar múltiples señales
- Amplificación de partes de la señal total (efecto zoom)
- Cursor móvil sobre la señal para un análisis acucioso de los tiempos y amplitudes
- Generar el vector suma de tres componentes ortogonales
- Despliegue de las señales en el dominio de la frecuencia
- Filtro de frecuencia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

Figura n° 35: Instrumentación para monitorear.



*Fuente: Propia*

Figura n° 36: Monitoreo de Voladura en tiempo real.



*Fuente, extraída de la data de Cerro Negro.*

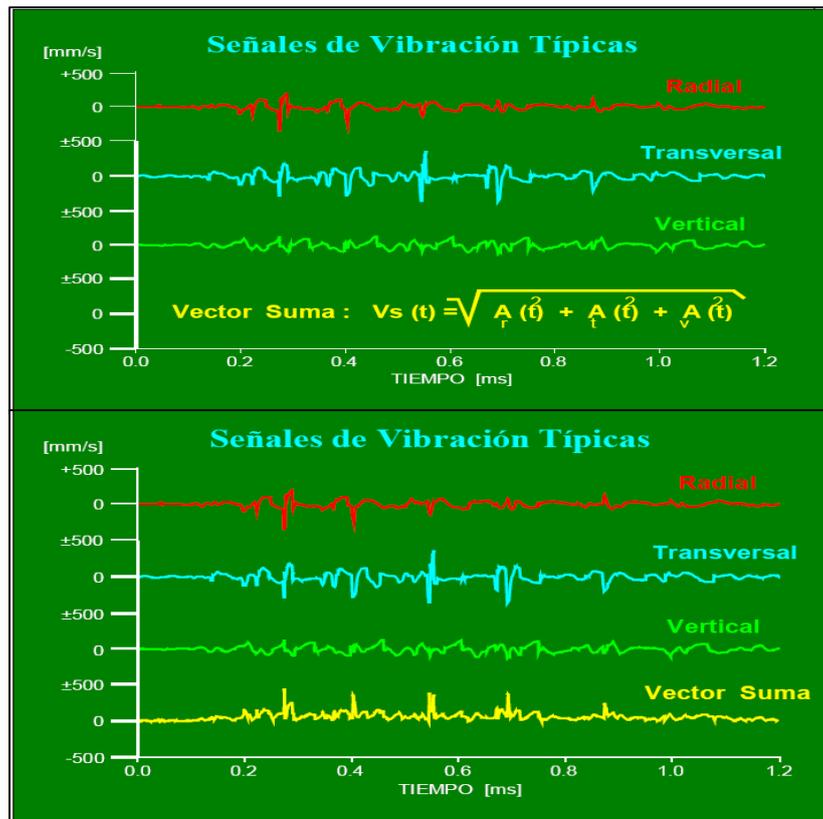
### 2.2.7.8. Interpretación de vibraciones

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.

Es posible determinar y calcular los siguientes:

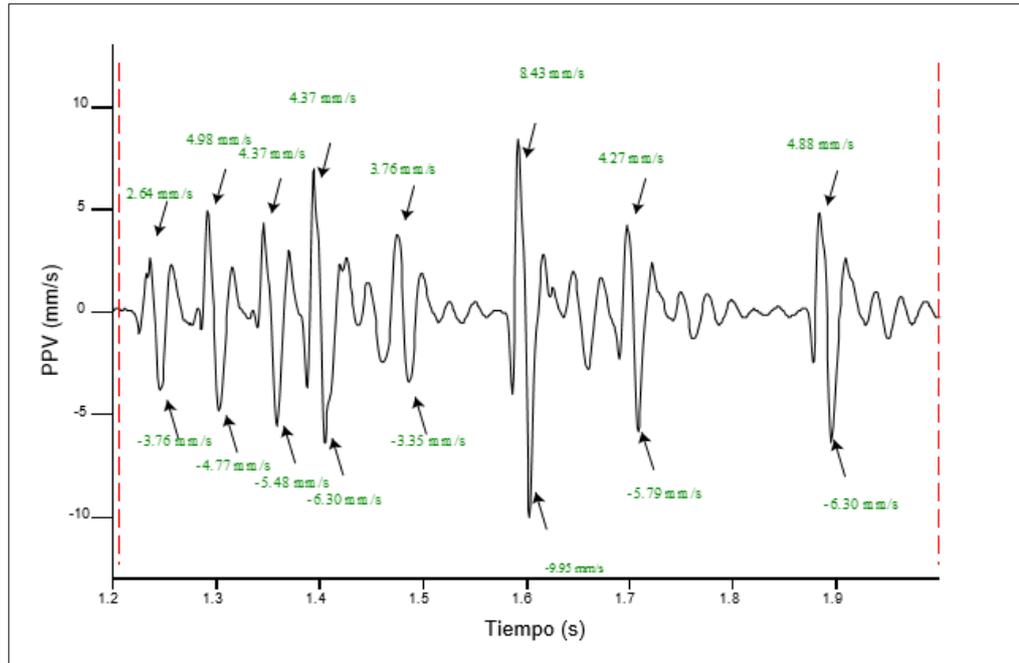
- Tiempo real de detonación de una carga o cargas (dispersión de tiempos de retardos)
- Desarrollo de la secuencia de iniciación del disparo.
- El acoplamiento de las vibraciones como consecuencia de la separación insuficiente en tiempo entre cargas con un mismo retardo.
- Detonación de cargas con baja eficiencia o no detonadas.
- Diferencia entre cargas explosiva de producción y contorno.
- Diferencia entre cargas detonadas con distinto confinamiento.

Figura n° 37: Interpretación de Vibraciones.



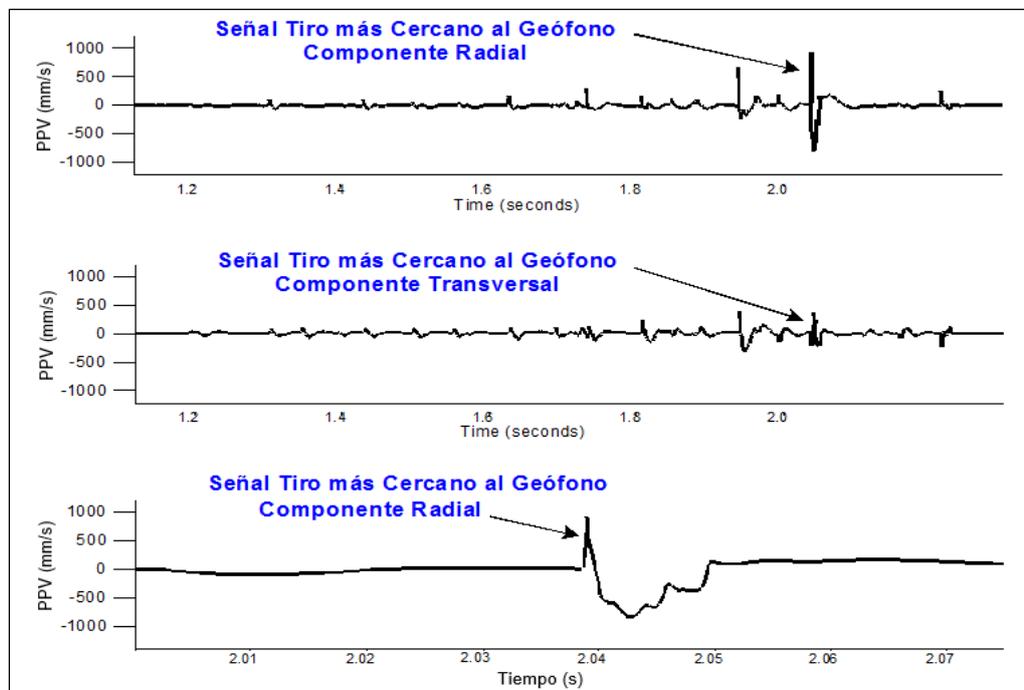
Fuente extraída de (GeoBlast, 2015)

Figura n° 38: Interpretación de la velocidad pico de partícula en la onda sísmica.



Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

Figura n° 39: Interpretación de la onda sísmica en las tres componentes.



Fuente extraída de basa de datos Cerro Negro.

### 2.2.7.9. Normativas para el Control de Vibraciones

En los países desarrollados aplican las normas según el tipo de estructuras, lo cual esto facilita a que las empresas mineras ubicadas en esos países puedan saber si sus voladuras en esa área generan daño a las estructuras. *“Los valores propuestos ha estado mayormente entre dos factores los muy conservadores como la Normativas DIN 4150 alemana que da valores hasta de 3 mm/s para zonas de edificación antigua o las normas americanas que brinda valores de hasta 50 mm/s para sus estructuras”*. (GIRALDO, 2010, pág. 53)

A continuación, describiremos las diferentes normativas existentes tanto internacionales como nacionales.

#### A. Normativas Peruanas de Vibraciones

##### a. Normativas Peruanas de Vibraciones ( Guía Ambiental para P&V)

La normativa peruana de vibraciones está basada en la Guía Ambiental para perforación y voladura en operaciones mineras. Dándonos la tabla inferior como nuestro limite máximos de vibración en función de la distancia.

Tabla n° 5: Normativa peruana de vibraciones.

Distancia (D) desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula pico máxima permitida (Vmax) para vibraciones de tierra en pulgadas / segundo.	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico
0 a 300	1.25	50
301 a 5000	1.00	55
5001 a mas	0.75	65

*Fuente, Tabla realizada en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica.*

#### B. Normativas Internacionales

Los países desarrollados siempre han tratado de tener el mejor control de vibraciones en sus operaciones para evitar problemáticas ambientales. Se han creado instituciones que mediante estudios han establecidos normas y leyes de protección en su entorno.

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
- Borrador de Norma Europea

Debemos así tomar en cuenta que la mayoría de estos análisis no predicen el comportamiento de una onda si solo nos brinda una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo.

#### **a. Normas de la Comunidad Europea**

##### ➤ **Normativa Alemana DIN4150**

La normativa alemana DIN 4150 en su tercera parte trata los efectos en edificios y sus elementos estructurales de vibraciones de carácter internas o externas.

*“Para esta normativa, el objetivo es marcar los límites en las vibraciones que no supongan para el edificio perder su uso habitual. La reducción del uso del edificio por efecto de las vibraciones incluye la afectación de la estabilidad del edificio o de alguno de sus componentes” (GIRALDO, 2010, pág. 61).*

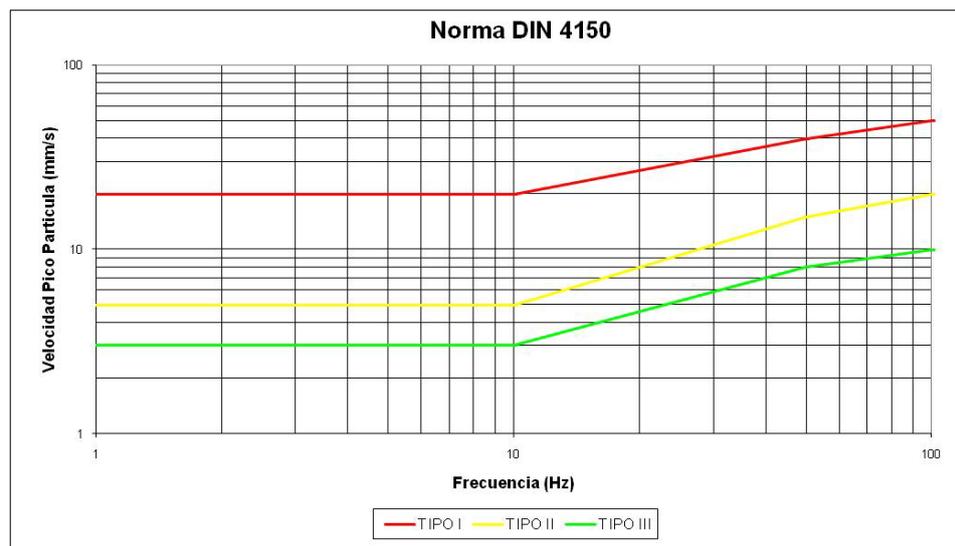
Para las estructuras incluidas en los tipos “Tipo 2” y Tipo 3” su uso se puede ver reducido si aparecen fisuras o grietas en las superficies de las paredes, empeoran fisuras o grietas existentes.

Tabla n° 6: Norma Alemana DIN4150.

Tipo de Edificación	FRECUENCIA (Hz)		
	<10 (Hz)	10 - 50 (Hz)	50 - 100 (Hz)
	VELOCIDAD (mm/S)	VELOCIDAD (mm/S)	VELOCIDAD (mm/S)
TIPO I: Edificios públicos o industriales	20	20 ... 40	40 ... 50
TIPO II: Edificios de viviendas o asimibles a viviendas	5	5 ... 15	15 ... 20
TIPO III: Edificios históricos o por su construcción son sensibles a la vibración	3	3 ... 8	8 ... 10

Fuente, Tabla realizada en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica.

Figura n° 40: Norma Alemana DIN4150.



Fuente, grafico realizado en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica.

➤ **Directriz Alemana**

La directriz alemana aplicada a las casas de tierra ubicaría las casas de tierra entre el Grupo I y el Grupo II por lo que los valores de vibraciones máximo permisibles estaría entre los 2 mm/s y los 5 mm/s de rango de vibración.

Tabla n° 7: Valores representativos de la directriz, Alemana.

Construcción Categoría	Vz,amd (mm/s)
I - Los monumentos históricos	2
II - La mitad - casas de madera	5
III - Construcción de la pared (por ejemplo, edificios de paredes de losa, bloques, mampostería)	10
IV - Construcción Enmarcado (por ejemplo, edificios de hormigón armado, temporizador)	30

*Fuente, Tabla realizada en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica.*

➤ **Norma UNE 22.381.93**

*“Esta Norma está estructurada en una serie de contenidos que permiten describir, limitar y estudiar las vibraciones producidas por las voladuras, de tal manera que facilitan tanto el trabajo de la ejecución del proyecto de voladuras como de la interpretación y evaluación del mismo por parte de la Autoridad Minera competente” (GIRALDO, 2010, pág. 57).*

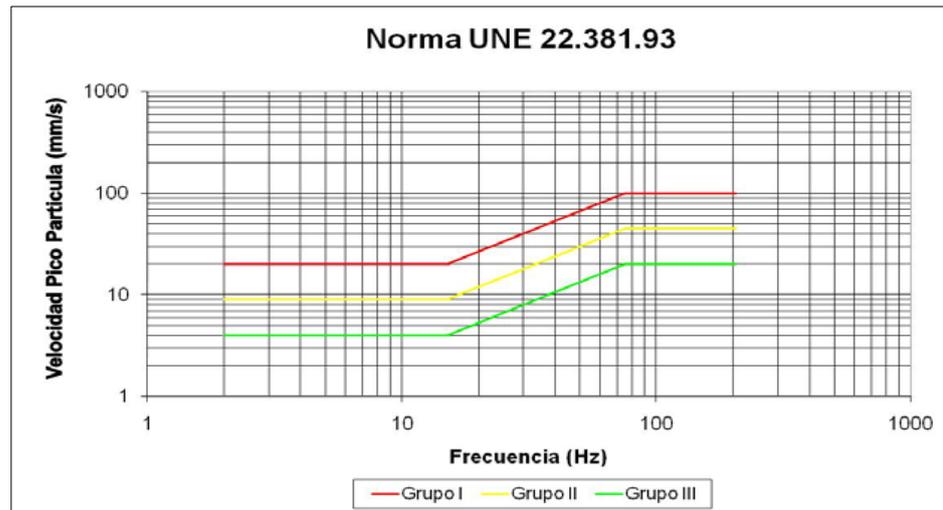
Velocidad pico, entendiéndose como tal la amplitud máxima de la componente principal de la onda de vibración, expresada en términos de velocidad de vibración y medida en mm/s. A continuación, distingue tres grupos de estructuras de origen antrópico:

- Estructura Grupo I Estructuras industriales.
- Estructura Grupo II Viviendas.
- Estructura Grupo III Monumentos y estructuras delicadas.

Para cada tipo de edificio y en función de la frecuencia, se tiene una velocidad límite de vibración, que crece proporcionalmente con ésta. En la Figura #38 se recoge el ábaco y la tabla #3 que representan el citado criterio de limitación de vibraciones. A continuación, la norma define el tipo de estudio requerido en

función de la carga de explosivo que se vaya a detonar y la distancia entre el punto de disparo y la estructura a preservar.

Figura nº 41: Norma UNE 22.381.93.



Fuente, Grafico realizado en archivo Excel – Asistencia Técnica Orica.

Tabla nº 8: Norma UNE 22.381.93.

VALORES LÍMITES DEL CRITERIO	FRECUENCIA (Hz)		
	2...15	15...75	>75
VELOCIDAD (mm/s)		DESPLAZ. (mm)	VELOCIDAD (mm/s)
GRUPO I	20	0.212	100
GRUPO II	9	0.095	45
GRUPO III	4	0.042	20

VALORES LÍMITES DEL CRITERIO	FRECUENCIA (Hz)		
	2...15	15...75	>75
DESPLAZ. (mm)		DESPLAZ. (mm)	DESPLAZ. (mm)
GRUPO I	0.212	0.212	0.212
GRUPO II	0.095	0.095	0.095
GRUPO III	0.042	0.042	0.042

VALORES LÍMITES DEL CRITERIO	FRECUENCIA (Hz)		
	2...15	15...75	>75
ACELERACION (g)		ACELERACION (g)	ACELERACION (g)
GRUPO I	0.188	0.188...4.712	4.712
GRUPO II	0.085	0.085...2.121	2.121
GRUPO III	0.038	0.038...0.042	0.942

Fuente, Tabla realizada en archivo Excel –Asistencia Técnica Orica.

➤ **Normativa sueca SS 460 48 66 1991**

“La norma sueca tampoco considera las molestias causadas a humanos, ni el riesgo de equipos sensibles a vibración, pues solo contempla el efecto de las vibraciones producidas por voladuras sobre las edificaciones.” (GIRALDO, 2010, pág. 66). Esta norma está sustentada en cientos o miles de observaciones en el lecho rocoso escandinavo, donde se han podido estimar con buena certeza niveles de daño en las estructuras.

Esto ha hecho que la norma tenga en cuenta varios tipos de estructuras geológicas, que otras normas no han tenido en cuenta; sin embargo, el no incluir información de frecuencias y de otras componentes diferentes a la vertical hace que sea desactualizada respecto a los estándares actuales.

Figura n° 42: Normativa Sueca SS 460 48 66 1991

<b><i>Norma Sueca SS 460 48 66 del año 1991</i></b>				
<b>PPV = Vo x Fb x Fm x Fd x Ft</b>				
<b>Vo</b>	Velocidad peak de partícula para la componente vertical sin corregir			
<b>Fb</b>	Factor descriptor del tipo de Edificio según tipo de Construcción			
<b>Fm</b>	Factor que considera el material de la construcción			
<b>Fd</b>	Factor que da cuenta del cambio de frecuencia de la vibración con la distancia			
<b>Ft</b>	Factor del tiempo de duración de la actividad de tronadura			
<b>TIPO DE TERRENO, Velocidad de partícula vertical sin corregir, Vo</b>				
	Rocas Blandas, Gravas, arenas			18
	Rocas Medias			35
	Rocas duras, Granitos, cuarcita			70
	Puede también ser calculado como : Vo = Vp [m/s] / 65			
<b>TIPO DE CONSTRUCCIÓN, Factor Fb</b>				
	Construcc. pesadas tipo puentes, portuarios			1.7
	Edificios industriales y de oficinas			1.2
	Edificios de viviendas estandar			1
	Edificios especialmente sensibles, iglesias, museos			0.65
	Edificios históricos en mal estado y ruinas			0.5
<b>TIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN, Factor Fm</b>				
	Hormigón armado, acero o madera			1.2
	Hormigón en masa, ladrillos o cemento			1
	Hormigón porosos prefabricado			0.75
	Tabiques prefabricados			0.65
<b>FACTOR DE DISTANCIA, Factor Fd</b>				
	Si 1<d<10	Fd =	1.91 x d ^	-0.28
Arcilla	Si 10<d<350	Fd =	1.56 x d ^	-0.19
Morrena	Si 10<d<350	Fd =	1.91 x d ^	-0.29
Roca	Si 10<d<350	Fd =	2.57 x d ^	-0.42
<b>TIPO DE ACTIVIDAD, Factor Ft</b>				
	Trabajos de construcción			1
	Trabajos estacionarios, tipo minería			0.75 - 1.0

Fuente, extraída de (GIRALDO, 2010).

## b. Normativas Americanas

### ➤ United States Bureau of Mines (USBM)

La normativa USBM colocaría las casas de tierra en el grupo de casas antiguas por lo que su vibración a bajas frecuencias sería de 12.5 mm/s como máximo de velocidad pico partícula a una frecuencia menor a 40 Hz.

Tabla n° 9: Valores representativos de la normativa Americana (USBM).

Tipo de estructura	Baja Frecuencia	Alta Frecuencia
Casas modernas con paredes revestidas de material diferente del revoque común (yeso, etc.)	19 mm/s	50 mm/s
Casas antiguas, con paredes revocadas	12.5 mm/s	50 mm/s
Baja Frecuencia	< 40 Hz, todo pico espectral que se produce por debajo de 40Hz y dentro de una faja de g Db (O sea, 5% de amplitud verificada a la frecuencia predominante) justifica el empleo del criterio de baja frecuencia.	
Alta Frecuencia	> 40 Hz	

*Fuente, Tabla de Excel - Asistencia Técnica Orica.*

### ➤ Office of Surface Mining (OSM)

La normativa OSM que es la misma que aplicar el Perú en su normativa peruana indica que las vibraciones para ese tipo de casas deben estar por debajo del rango de 19 mm/s a 25 mm/s de velocidad máxima.

Tabla n° 10: Valores representativos del office of Surface Mining (OSM).

Distancia al área de la voladura	Velocidad máxima de partícula (mm/s)	Distancia reducida que se aconseja cuando no se dispone de instrumentos (m /kg <sup>1/2</sup> )
0 a 90 m	32	22.30
90 a 1500 m	25	24.50
> 1500 m	19	29.00

*Fuente, Tabla de Excel - Asistencia Técnica Orica.*

## 2.3. Hipótesis

La máxima carga operante que produce un nivel de vibraciones a campo lejano dentro de los parámetros establecidos es de 900kg, en Minera Cerro Negro S.A.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Operacionalización de variables

Tabla n° 11: Operacionalización de variables.

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<b>Carga Operante</b>	Variable Independiente	Indica la cantidad total de explosivo detonado en un mismo instante.	En voladura, la cantidad de explosivo o Carga Operante detonado en un mismo instante, deberá ser muy próxima a lo mínimo necesario para fragmentar la roca y no exceda en la vibración a campo lejano.	masa	kg
<b>Vibraciones</b>	Variable Dependiente	Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión.	Las vibraciones en voladura representan un estado de esfuerzos inducido en el macizo rocoso producido por la detonación de los taladros cargados con explosivo, resultando en la fragmentación de la roca pero también en daño al macizo rocoso adyacente ( Campo lejano) , y las paredes del pit (Campo Cercano).	Velocidad vibracional	mm/s

*Fuente Propia.*

### 3.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación es Experimental y cuasi experimental, debido a que es un proceso lógico sistemático que corresponde a una incógnita; donde la variable independiente es manipulable de forma intencional para analizar la alteración de la variable dependiente.

### 3.3. Unidad de estudio

Carga Operante

### 3.4. Población

Toda las Voladura en Minera Cerro Negro

### 3.5. Muestra

Voladuras de Producción en Minera Cerro Negro aledañas a poblaciones.

### 3.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

En el estudio se consideraron, diseños preliminares, instrumentación y recolección de resultados.

#### 3.6.1. Diseños preliminares

**3.6.1.1. Diseño de Mallas.** En este diseño se determinaron diferentes parámetros, de acuerdo a las condiciones geológicas y características geomecánicas del macizo rocoso, donde se considera que, *“Para realizar un diseño exitoso, es necesario aplicar un diseño conocido, que haya sido utilizado en un lugar de características similares”*. (ENAEX, 2014, págs. 70-71). Los parámetros establecidos son:

- Diámetro de Taladro
- Burden
- Espaciamiento.
- Taco
- Distancia escalada del burden “SD”.
- Pasadura.
- Relación de rigidez.

Se utilizaron las formulas mencionadas en el literal 2.2.5 de bases teóricas.

**3.6.1.2. Diseño de carga.** En este diseño se logra determinar los parámetros desarrollados en el diseño de mallas, según (**EXSA SOLUCIONES S.A., 2013**), donde se encuentran los valores para:

- Longitud de Carga (LC)
- Carga Lineal (CL)
- Cantidad de Explosivo (We)
- Factor de carga (FC)
- Carga Operante (COp)

Se utilizaron las formulas mencionadas en el literal 2.2.6 de bases teóricas.

**3.6.1.3. Secuencia de iniciación.** En este proceso se simula las posibles secuencias de detonación usando el software (Jkbench), que se basa en diseño de malla, diseño de carga, tipo de secuencia; para determinar la secuencia de detonación, movimiento del material y el número de taladros acoplados.

**3.6.1.4. Equipos de Monitoreo.** Se considera un transductor para captar las vibraciones generadas por el evento, este estará conectado a un equipo de adquisición, en el cual se guarda los datos, que luego nos ayudaran a determinar un modelo predictivo. Los equipos utilizados se menciona en el literal 2.2.7.7 de bases teóricas.

### 3.7. Métodos, instrumentos y procedimientos de análisis de datos

Para el análisis de datos se considera el Modelo de campo lejano – Devine y Duvall, este modelo nos ayudara a determinar el modelo predictivo para medir el nivel de vibraciones. Se basa en la distancia de la voladura al punto de monitoreo, en la cantidad de explosivo detonado en un instante y las contantes determinadas por las propiedades del explosivo y la geología del terreno. El modelo es el siguiente.

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^\alpha$$

Para determinar los valores de K y alfa, el modelo de campo lejano se ajusta a una ecuación lineal mediante logaritmos, estos valores se procesan en una tabla Excel.

Como INPUT en la tabla Excel, se utilizan los datos obtenidos en campo: carga operante, nivel de vibración y distancia; al procesarlos se determina la distancia escalar (distancia entre la raíz de la carga operante), y el vector sumas (resultado del nivel de vibración en sus tres dimensiones).

Luego se calcula el logaritmo de la distancia escalar (x) y del vector suma (y), estos valores se utilizan para realizar la gráfica de dispersión x, y; posteriormente se ajusta

a una línea de tendencia (ecuación lineal), para determinar los valores de K y alfa con una confiabilidad al 50%.

En el modelo de campo lejano se obtienen diferentes valores para el coeficiente K, este dependen de la confiabilidad del modelo, por esta razón se recomienda un modelo con un nivel de confiabilidad del 80% al 95%, para poder lograrlo se utilizó la siguiente formula sólo para el valor de K:

$$K_a = \text{Antilog} (\text{Log } K + \text{Inv.Distr.Norm.Stand} (X\%) * E (t))$$

Donde:

- $K_a$ : Valor de K ajustado.
- $\text{Inv.Distr.Norm.Stand} (X\%)$ : Inverso de la Distribución Normal Estándar del porcentaje de mediciones por debajo de la recta de ajuste.
- Error Típico: Es el error típico de todas las mediciones que intervienen en el primer gráfico.

Este escalamiento se realiza principalmente cuando el modelo tiene como finalidad predecir los niveles máximos de vibraciones, lo que significa que si el modelo es correcto, el nivel registrado debe estar por debajo del valor predicho.

Para determinar el valor de K con una confiabilidad al 90%, se utilizan la ecuación anterior en una tabla en Excel. Para confirmar dicho valor se predice niveles de vibración al 50% y 90% de confiabilidad con los datos obtenido en campo (carga operante y distancia). Estos valores se utilizaran para realizar la gráfica de dispersión (Distancia escalar X, y nivel de vibración predicho Y), posteriormente se ajusta a una línea de tendencia (ecuación potencial). De esta forma se encuentra el valor de K al 90% de confiabilidad.

## CAPÍTULO 4. Desarrollo

### 4.1. Diseño de Malla para las condiciones más críticas

#### 4.1.1. Diámetro de Taladro

$$\phi = \frac{H}{K}$$

Donde:

- $\phi$  = Diámetro (pulg)
- H = 10 (m)
- k = 1.3

$$D = \frac{10}{1.3} = 7.7 \text{ Pulg} \text{ Se considera } 7 \frac{7}{8} \text{ pulg.}$$

#### 4.1.2. Burden

$$B = (20 \text{ a } 40) * \phi$$

Donde:

- $\phi = 0.2$  (m)

$$B = 20 * 0.2 \text{ m} = 4 \text{ m}$$

#### 4.1.3. Espaciamiento.

$$E = (1 \text{ a } 2) * B$$

Dónde: B = 4 m

$$E = 1.15 * 4 \text{ m} = 4.6 \text{ m}$$

#### 4.1.4. Taco

$$\text{Tamaño de stemming} = 1/10 * 0.2 \text{ m} = 0.02 \text{ m}$$

$$T = (20 \text{ a } 25) * \phi$$

Dónde:

$$\phi = 0.2 \text{ m}$$

$$T = 20 * 0.2 \text{ m} = 4 \text{ m}$$

#### 4.1.5. Distancia escalada del burden "SD".

$$SD = \frac{D}{W^{1/3}}$$

$$Lw = 10 * \phi$$

Donde:  $\phi = 0.2$  m

$$Lw = 10 * 0.2 \text{ m} = 2\text{m}$$

$$W = Lw * CL$$

$$CL = 0.5067 * \varnothing^2 * \rho_e$$

➤  $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$  Pulg

➤  $\rho_e \text{ HA } 64 = 1.31 \text{ gr/cc}$

$$CL = 0.5067 * (7 \frac{7}{8})^2 * 1.31 = 41.24 \text{ kg/m}$$

➤  $CL = 41.24 \text{ Kg/m}$

$$W = 2 \text{ m} * 40.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 82.48 \text{ kg}$$

➤  $T = 4 \text{ m}$

$$D = 4 \text{ m} + \frac{2\text{m}}{2} = 5 \text{ m}$$

$$SD = \frac{5}{(82.48)^{\frac{1}{3}}} = 1.1$$

#### 4.1.6. Pasadura.

$$J = (0.2 \text{ a } 0.3) * B$$

Dónde:  $B = 4 \text{ m}$

$$J = 0.25 * 4 \text{ m} = 1\text{m}$$

#### 4.1.7. Relación de rigidez.

$$Sf = \frac{HB}{B}$$

$$Sf = \frac{10 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 2.5$$

## 4.2. Cálculo de la Carga explosiva para las condiciones más críticas

### 4.2.1. Longitud de Carga (LC)

$$LC = HB + SP - T$$

Donde:

➤  $HB: 10 \text{ (m)}$

➤  $SP: 1 \text{ (m)}$

➤  $T: 4 \text{ (m)}$

$$LC = 10 + 1 - 4 = 7 \text{ m}$$

### 4.2.2. Carga Lineal (CL)

$$CL = 0.5067 * (\varnothing)^2 * \rho_e$$

Donde:

- D: 7 7/8 Pulg
- $\rho_e$  HA 64: 1.31gr/cc

$$CL = 0.5067 * (7 \frac{7}{8})^2 * 1.31 = 42.2 \text{ kg/m}$$

#### 4.2.3. Cantidad de Explosivo (We)

$$We = LC * CL$$

Donde:

- LC: 7 m
- CL: 41.2 kg/m

$$We = 7 * 41.2 = 288.32\text{kg}$$

#### 4.2.4. Carga Operante (COp)

$$COp = We * NT$$

Donde:

- We = 288 kg
- NT: 3 taladores

$$COp = 288 * 3 = 864 \text{ Kg}$$

#### 4.2.5. Factor de carga (FC)

$$FC = \frac{We}{V} \text{ Kg/m}^3$$

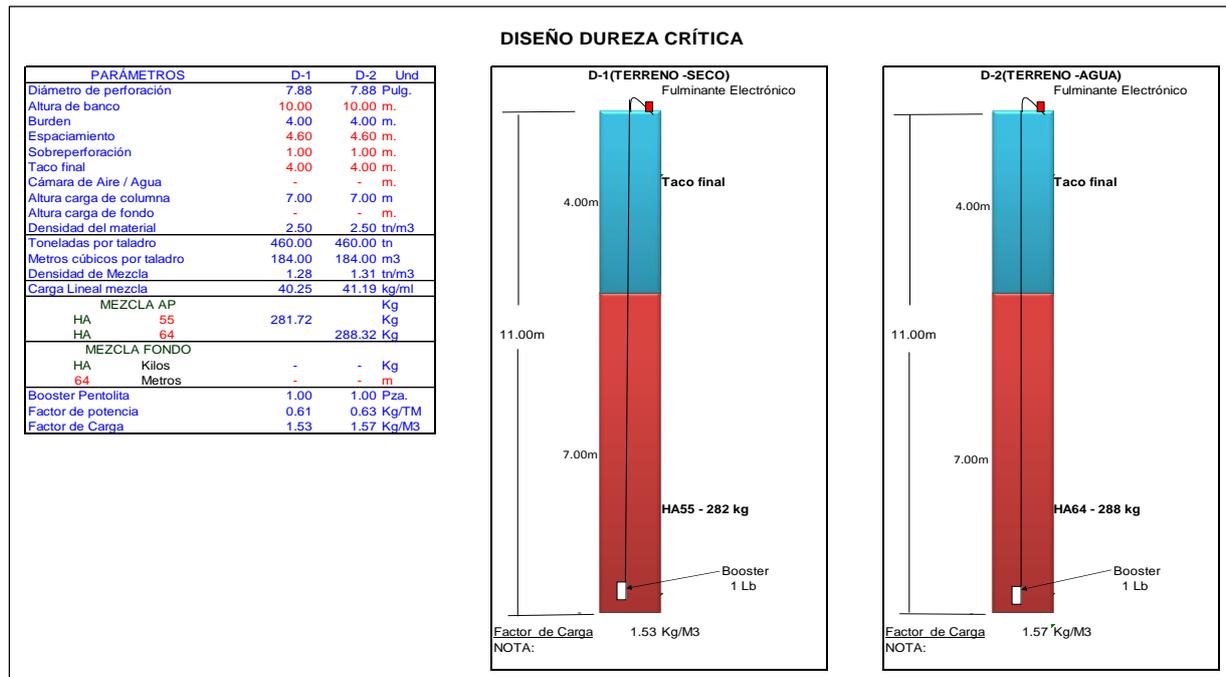
$$Vr = B * E * HB$$

$$Vr = 4 \text{ m} * 4.6 \text{ m} * 10\text{m} = 184 \text{ m}^3$$

$$FC = \frac{288}{184} = 1.57 \text{ Kg/m}^3$$

### 4.3. Diseño de carga en dureza crítica para taladros secos y con agua en Archivo Excel.

Figura n° 43: Archivo en Excel del Diseño de carga en dureza crítica para taladros secos y con agua.



Fuente, extraída de base de datos Minera Cerro Negro.

### 4.4. Resumen del diseño de Carga en Cerro Negro.

Tabla n° 12: Resumen del Diseño de Carga en Cerro Negro.

RESUMEN TALADROS MINERAL								
DUREZA	TALADRO	MEZCLA	TACO	TOTAL KG.	TALADRO	MEZCLA	TACO	TOTAL KG.
DUREZA - 3	SECO	HA 28	4.5	156	CON AGUA	HA 64	5.0	206
DUREZA - 4	SECO	HA 46	4.5	228	CON AGUA	HA 64	4.9	231
DUREZA - 5	SECO	HA 46	4.5	247	CON AGUA	HA 64	4.7	259
DUREZA CRITICA	SECO	HA 55	4	282	CON AGUA	HA 64	4.0	288
RESUMEN TALADROS DESMONTE								
DUREZA	TALADRO	MEZCLA	TACO	TOTAL KG.	TALADRO	MEZCLA	TACO	TOTAL KG.
DUREZA - 3	SECO	HA 28	5	141	CON AGUA	HA 64	5.0	206
DUREZA - 4	SECO	HA 46	4.7	221	CON AGUA	HA 64	4.9	231
DUREZA - 5	SECO	HA 46	4.5	247	CON AGUA	HA 64	4.7	259
DUREZA CRITICA	SECO	HA 55	4	282	CON AGUA	HA 64	4.0	288

Fuente, extraída de la base de datos Cerro Negro.

#### 4.5. Recolección de Datos en Campo

Los datos que a continuación se muestran como ejemplo; han sido resultado del monitoreo de vibraciones en voladura de producción.

Tabla n° 13: Datos obtenidos en campo.

DATA						
Blast #	Carga Taladro	Distancia	Carga Operante	PPV		
	kg	m	kg	mm/s	mm/s	mm/s
	Q	D	Q	L	T	V
1	228	1015.0	684.0	0.7	0.7	0.4
2	228	980.0	684.0	0.7	0.6	0.4
3	259	845.0	777.0	1.5	1.8	1.0
4	259	823.0	777.0	0.8	1.1	0.7
5	259	902.0	777.0	0.9	1.2	1.0
6	288	725.0	864.0	1.1	2.3	1.0
7	231	1086.0	693.0	0.8	0.8	0.6
8	259	977.0	777.0	0.7	0.7	0.6
9	259	926	777.0	0.9	0.6	0.4
10	259	836	777.0	1.4	0.9	0.6
11	231	765	693.0	1.4	0.9	0.6
12	231	1106	693.0	0.8	1.0	0.5
13	259	1048	777.0	0.8	1.0	0.5
14	231	605	693.0	1.8	2.5	1.4
15	288	888	864.0	0.6	1.0	0.9
16	231	797	693.0	1.8	0.8	0.7
17	288	858	864.0	0.6	1.4	0.8
18	231	692	693.0	1.5	2.1	1.2

*Fuente propia.*

## 4.6. Análisis de datos

### 4.6.1. Estimación de Vibraciones según Modelo de Campo lejano - Devine y Duvall

$$PPV = K * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^\alpha$$

Aplicamos logaritmo al modelo:

$$\text{Log}PPV = \text{Log} \left( K * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^\alpha \right)$$

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

$$\text{Log}PPV = \text{Log} K + \alpha \text{Log}(De)$$

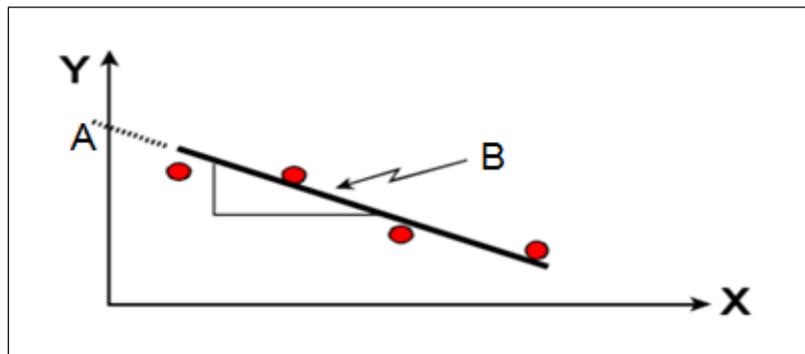
Ajustamos estos valores a una ecuación lineal, tenemos:

$$Y = A + BX$$

Donde:

- A = Log K      Intercepto con el eje Y
- B =  $\alpha$       Pendiente de la recta
- X = De        Distancia Escalada

Figura n° 44: Modelo de Campo Lejano Ajustado a una ecuación lineal por mínimos cuadrados.



Fuente, extraída de (GeoBlast, 2015)

Aplicamos logaritmo a los datos obtenido en Campo.

Tabla n° 14: Logaritmos de la Distancia Escalar y el PPV.

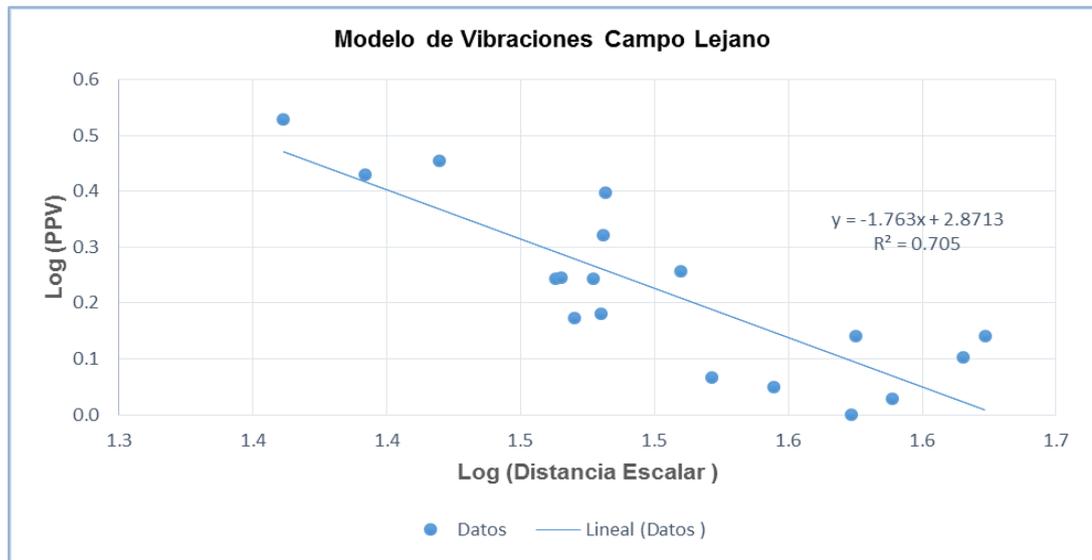
Blast #	De	Vector suma PPV	Log[De] (x)	Log[PPV] (y)
1	38.8	1.1	1.6	0.0
2	37.5	1.0	1.6	0.0
3	30.3	2.5	1.5	0.4
4	29.5	1.5	1.5	0.2
5	32.4	1.8	1.5	0.3
6	24.7	2.7	1.4	0.4
7	41.3	1.3	1.6	0.1
8	35.0	1.1	1.5	0.0
9	33.2	1.2	1.5	0.1
10	30.0	1.8	1.5	0.2
11	29.1	1.8	1.5	0.2
12	42.0	1.4	1.6	0.1
13	37.6	1.4	1.6	0.1
14	23.0	3.4	1.4	0.5
15	30.2	1.5	1.5	0.2
16	30.3	2.1	1.5	0.3
17	29.2	1.8	1.5	0.2
18	26.3	2.8	1.4	0.5

*Fuente Propia.*

Utilizando el logaritmo de la distancia escalar y el logaritmo de la velocidad pico de partícula (PPV), se ajusta a una ecuación lineal en un archivo Excel, se obtiene lo siguiente:

Ajustamos estos valores con una regresión de mínimos cuadrados:

Figura n° 45: Modelo de Campo Lejano ajustada a una ecuación línea en archivo Excel,



*Fuente propia.*

Ajustando por Mínimos Cuadrados se logra lo siguiente:

$$\text{Log (PPV)} = 2.87 - 1.76 \text{ Log (De)}$$

Por lo tanto:

$$\text{Log } K = 2.87$$

$$K = \text{Antilog} (2.866) = 743.56$$

$$\alpha = -1.76$$

$$PPV = 743.56 * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^{-1.76}$$

Estos valores encontrados son un promedio, debido a que el 50% de las mediciones realizadas se encuentran debajo de dicha recta.

Ajustando el valor de K al 90 % de confiabilidad, mediante la siguiente ecuación:

$$K_a = \text{Antilog} (\text{Log } K + \text{Inv. Distr. Norm. Stand}(X\%) * E(t))$$

$$K_a = \text{Antilog} (2.87 + (90\%) * 0.0866)$$

$$K_a = 960.16$$

Por lo tanto, manteniéndose el valor de  $\alpha$ , el Modelo de Vibraciones a un 90% de confiabilidad de los datos, estará dado por la siguiente ecuación:

$$PPV = 960.16 * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^{-1.76}$$

Aplicando el Modelo de Vibraciones para 50% y 90% de confiabilidad de los datos se obtiene.

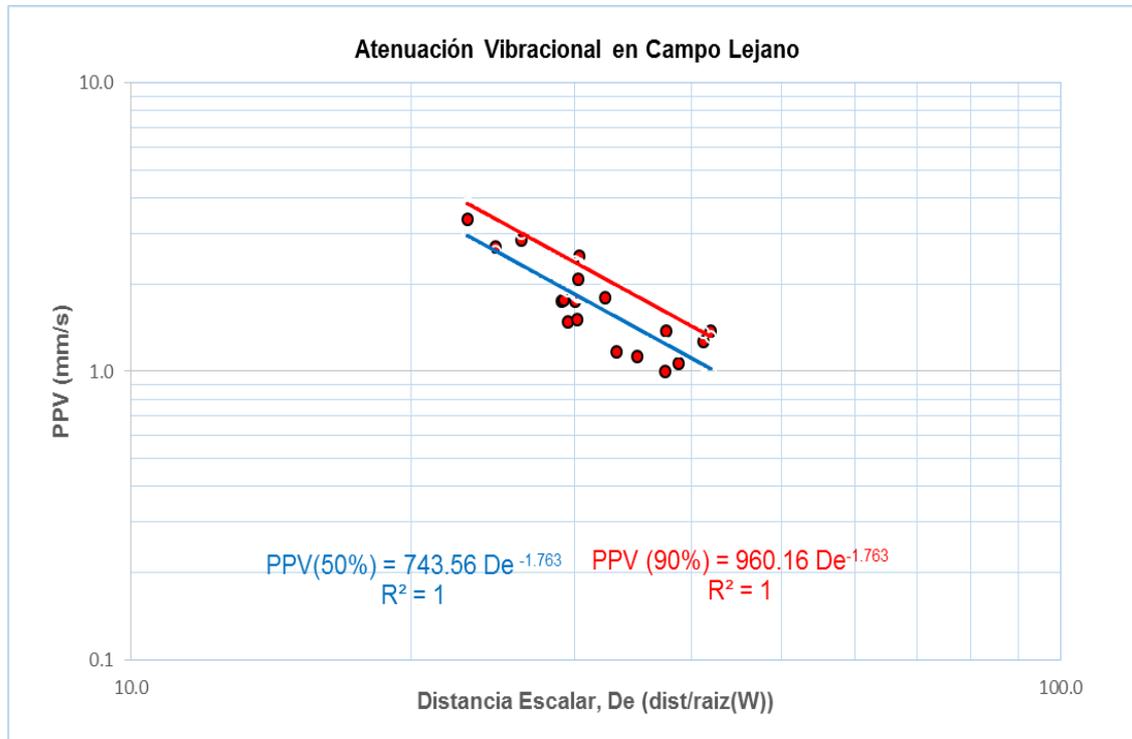
Tabla n° 15: Estimación del PPV, aplicando los modelos de Campo Lejano al 50% y 90% de confiabilidad.

De	Vector suma PPV	K	50%	90%
			Alfa	
			743.56	960.16
			-1.76	-1.76
38.8	1.1		1.17	1.52
37.5	1.0		1.25	1.61
30.3	2.5		1.82	2.35
29.5	1.5		1.90	2.46
32.4	1.8		1.62	2.09
24.7	2.7		2.61	3.37
41.3	1.3		1.06	1.36
35.0	1.1		1.41	1.82
33.2	1.2		1.55	2.00
30.0	1.8		1.85	2.39
29.1	1.8		1.96	2.53
42.0	1.4		1.02	1.32
37.6	1.4		1.24	1.60
23.0	3.4		2.96	3.82
30.2	1.5		1.83	2.36
30.3	2.1		1.82	2.35
29.2	1.8		1.94	2.51
26.3	2.8		2.34	3.02

*Fuente Propia.*

Utilizando los datos anteriormente, y ajustando a una ecuación Potencial, se obtiene lo siguiente:

Figura n° 46: Estimación del PPV, aplicando los modelos de Campo Lejano al 50% y 90% de confiabilidad en archivo Excel.



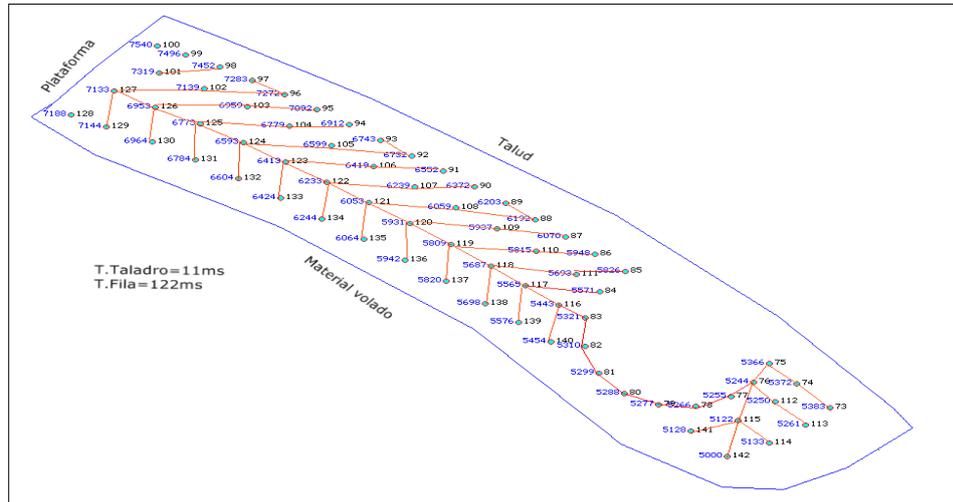
*Fuente Propia.*

La línea en azul es el modelo promedio, describe la condición media de la población de datos, es decir, el 50 % de los datos se ubicarán por debajo de la curva que representa el modelo y los 50% restantes se encontrarán sobre la curva. Matemáticamente esto es correcto, sin embargo, significa que existe una probabilidad de 50% que una carga explosiva producirá un nivel de vibración que supera a lo predicho por el modelo, situación que deja inútil el modelo. La solución se encuentra en desplazar el modelo (línea roja) hasta que sus predicciones cubran una mayor cantidad de datos tomados en campo, considerando un 90%, haciendo del modelo más confiable y segura la estimación de vibraciones.

**4.6.2. Estimación de Vibraciones según JKBENCH**

**4.6.2.1. Diseño de Secuencia**

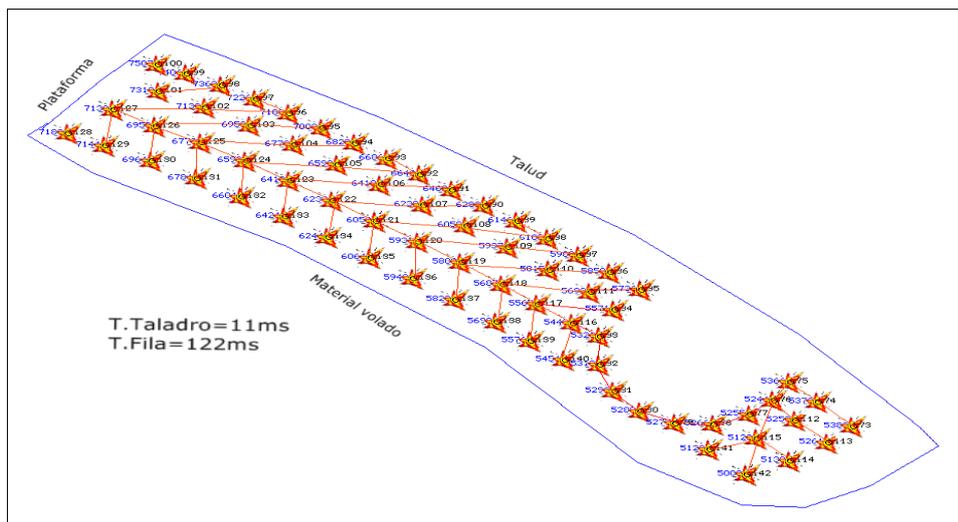
Figura n° 47: Diseño de Secuencia.



Fuente, Área de Asistencia Técnica Orca Mining Services.

**4.6.2.2. Diseño de Detonación**

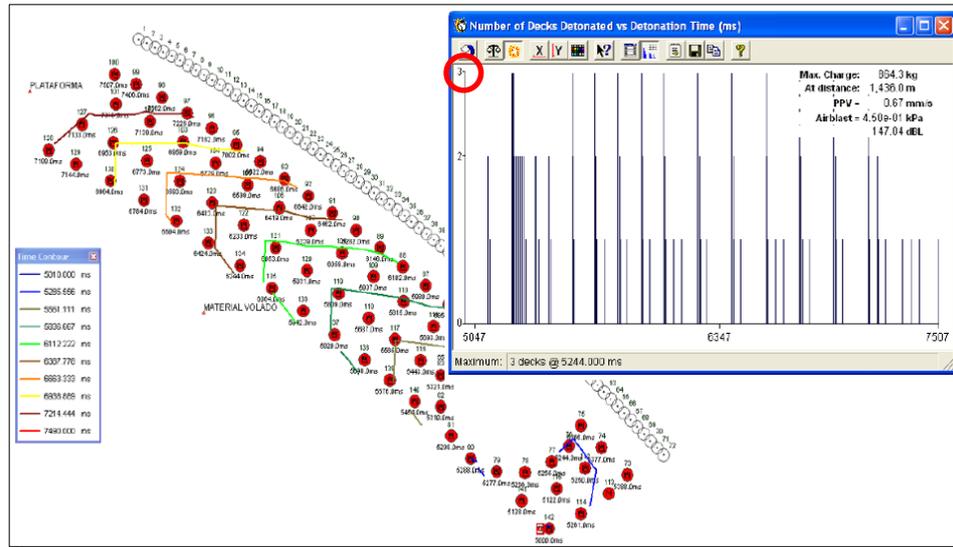
Figura n° 48: Diseño de Detonación.



Fuente, Área de Asistencia Técnica Orca Mining Services.

**4.6.2.3. Estimación del número de talados acoplados y del PPV (mm/s)**

Figura n° 49: Estimación del número de talados acoplados y el nivel de PPV.

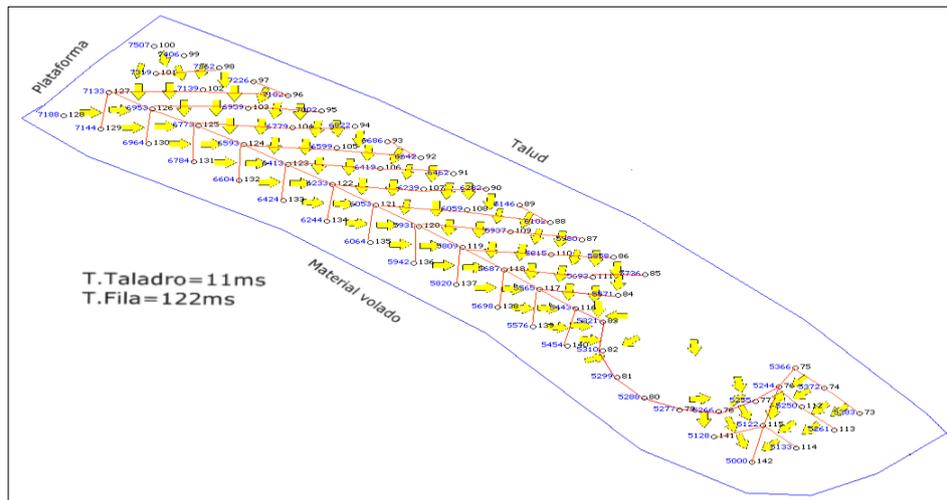


a

de Asistencia Técnica Orca Mining Services.

**4.6.2.4. Movimiento del Material**

Figura n° 50: Movimiento del Material. Fuente.



Área de Asistencia Técnica Orca Mining Services.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Modelo predictivo de Vibraciones a Campo Lejano a 90% de confiabilidad.

$$PPV = 960.16 * \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right)^{-1.76}$$

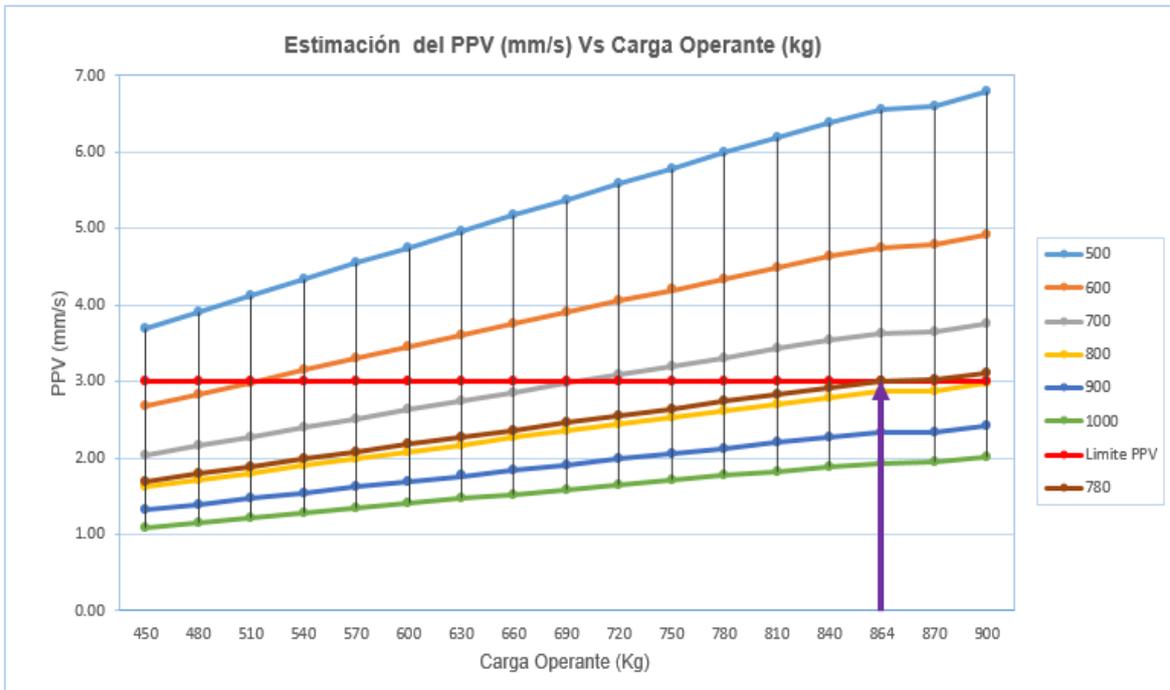
Tabla n° 16: Estimación del PPV, aplicando el modelo de Campo Lejano al 90% de confiabilidad.

		K	960.16	Estimación del PPV, respecto a la Carga Operante (kg) Vs Distancia (m)						
		Alfa	-1.76							
Limite PPV	Carga por Taladro (kg)	Carga Operante (kg)	Distancia (m)							
			500	600	700	780	800	900	1000	
3	150	450	3.69	2.68	2.04	1.69	1.61	1.31	1.09	
3	160	480	3.91	2.83	2.16	1.79	1.71	1.39	1.15	
3	170	510	4.12	2.99	2.28	1.88	1.80	1.46	1.22	
3	180	540	4.33	3.14	2.40	1.98	1.89	1.54	1.28	
3	190	570	4.54	3.30	2.51	2.08	1.99	1.61	1.34	
3	200	600	4.75	3.45	2.63	2.17	2.08	1.69	1.40	
3	210	630	4.96	3.60	2.74	2.27	2.17	1.76	1.46	
3	220	660	5.17	3.75	2.86	2.36	2.26	1.84	1.53	
3	230	690	5.37	3.90	2.97	2.46	2.35	1.91	1.59	
3	240	720	5.58	4.05	3.09	2.55	2.44	1.98	1.65	
3	250	750	5.78	4.20	3.20	2.64	2.53	2.06	1.71	
3	260	780	5.99	4.34	3.31	2.74	2.62	2.13	1.77	
3	270	810	6.19	4.49	3.42	2.83	2.71	2.20	1.83	
3	280	840	6.39	4.64	3.53	2.92	2.79	2.27	1.89	
3	288	864	6.55	4.75	3.62	2.99	2.86	2.33	1.93	
3	290	870	6.59	4.78	3.65	3.01	2.88	2.34	1.95	
3	300	900	6.79	4.93	3.76	3.10	2.97	2.41	2.00	

Fuente Propia.

En la tabla anterior encontramos diferentes valores de PPV para cada Carga Operante, de acuerdo al modelo de Campo Lejano con una confiabilidad al 90%, variando la distancia del punto de voladura al punto de monitoreo. En la fila resaltada se obtiene la máxima carga operante, con un nivel de vibraciones dentro de los parámetros establecidos, así como la distancia crítica en el cual un proyecto puede detonar, sin generar molestias en la población y daños en sus estructuras.

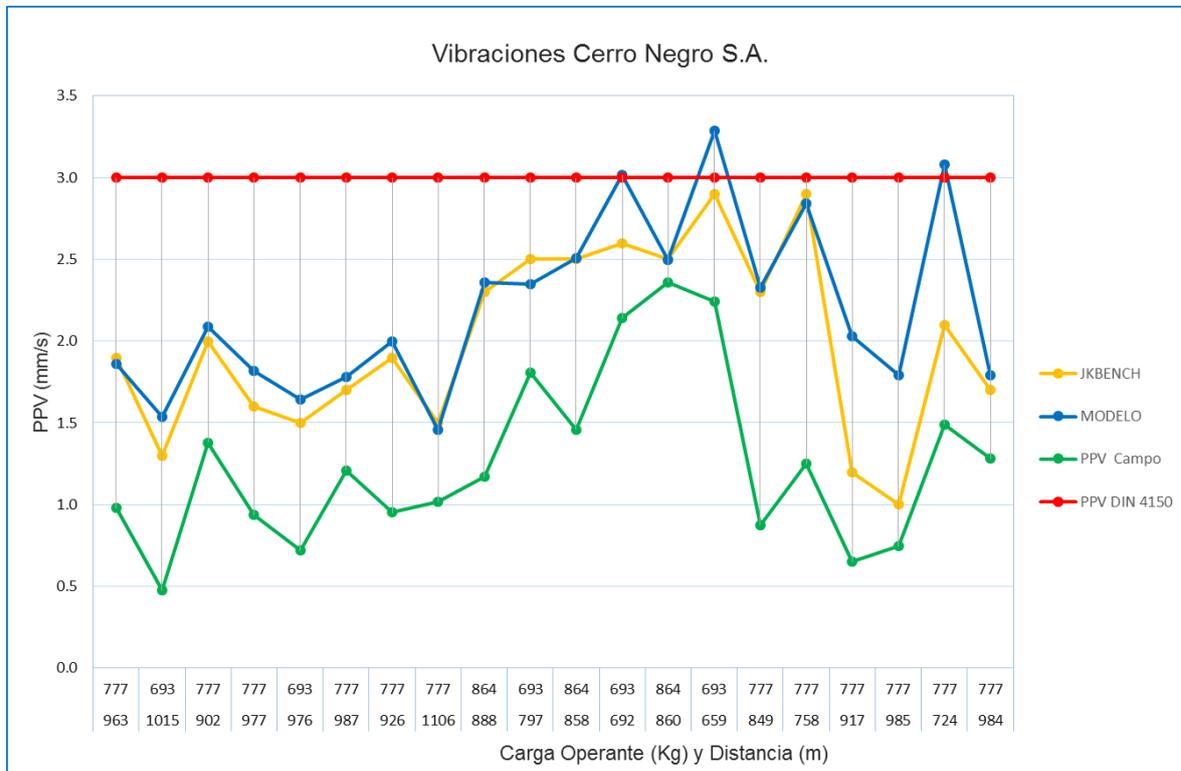
Figura n° 51: Estimación del PPV, aplicando el modelo de Campo Lejano al 90% de confiabilidad.



*Fuente Propia.*

De la figura, la flecha de color morado indica que, para mantener el nivel de vibraciones establecido por la normal DIN4150 dentro de los parámetros establecidos, la máxima Carga Operante encontrada es igual a 864 kg de explosivo HA 64 equivalente a tres taladros acoplados, esta establece un valor de PPV igual a 2.99 mm/s a una distancia de 780 m como límite para ser detonada.

Figura n° 52: Estimación y Medición de Vibraciones a campo lejano según:  
 Modelamiento, JKBENCH y Mediciones en Campo.



*Fuente Propia*

De la figura, se confirma que las estimaciones de vibraciones en un evento según el modelo predictivo de campo lejano a un 90% de confiabilidad y el software JKBENCH, se encuentran por encima de los valores de PPV encontrados en el monitoreo de vibraciones en campo, y por debajo del nivel de PPV establecida por la normativa.

## CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

En minera Cerro Negro S.A. el convivir con las comunidades cercanas al proyecto, es uno de los principales ejes para que las operaciones sean éxitos día a día. Dentro de las operaciones unitarias la voladura es una actividad fundamental en la que actúan variables controlables y no controlables.

El diseño de carga es una variable importante que determina la cantidad de explosivo por taladro, esta influye directamente en las vibraciones.

En Minera Cerro Negro se determinó la máxima carga operante, equivalente a 864 kg, esta determina el nivel máximo de la velocidad pico de partícula equivalente a 2.99 mm/s a una distancia de 780 m como crítica para estar dentro de los parámetros establecidos. La norma que establece la empresa como límites permisibles es la DIN 4150, esta normativa tiene como objetivo marcar los límites en las vibraciones para que las estructuras no pierdan su uso habitual. En la zona de influencia se encuentran edificaciones construidas de suelo apisonado o Tapial dentro de los 1000 m, según la norma lo podemos clasificar como edificación tipo III, estas son sensibles a las vibraciones con un valor máximo de PPV igual a 3 mm/s.

Así mismo el modelo de predicción no aplica, cuando se detonan mallas con sistema de iniciación convencional y/o sistema no eléctrico (no silencioso), debido a que se utiliza cordón detonante, estos no cuentan con tiempos de retardo o variación de tiempos como el sistema electrónico, la cual puede generar el aumento de la carga operante.

La cantidad de explosivo influye en el modelo predictivo desarrollada, así mismo cuando se determine trabajar con otro tipo de explosivo o diferente diámetro de taladro, el modelo predictivo necesitaría un nuevo análisis.

## CONCLUSIONES

Se logró encontrar la máxima Carga Operante para 864 kg de explosivo, obteniendo un nivel de PPV igual a 2.99 mm/s a una distancia de 780m. Este análisis establece una distancia mínima para encontrarnos dentro de los límites que establece un valor 3 mm/s como máximo para la norma DIN 4150 a campo lejano generadas por Voladura, en Unidad Minera Cerro Negro S.A..

Se realizó el monitoreo de vibraciones en voladuras de producción para determinar el modelo predictivo vibracional, en Minera Cerro Negro S.A.

Se analizó las posibles secuencias de detonación, que nos permitieron predecir el número de taladros acoplados y encontrar el nivel de vibraciones a campo lejano en Minera Cerro Negro.

Se analizó la relación PPV vs Cantidad de Explosivo o Carga Operante, para determinar los límites en las condiciones más Críticas.

Se logró comparar los nivel de vibraciones obtenidos en el modelo predictivo según la normativa establecida y los valores obtenidos en el monitoreo en campo.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda establecer una distancia mayor a 800 m, cuando se planifique detonar con la máxima carga operante según nuestro modelo predictivo de vibraciones, para no generar daños en las estructuras aledañas a la operación. La carga operante máxima a detonarse, no debe exceder a los 3 taladros acoplados.

Se deberán continuar monitoreando las voladuras durante la operación de la mina con el propósito de ampliar la base de datos, afinar las leyes de atenuación y controlar que los criterios al encontrar la máxima carga operante no sean excedidos.

El modelo predictivo se desarrolló en base a un tipo de explosivo (Heavy Anfo), y un tamaño de diámetro de taladro (7 7/8), en lo cual al cambiar estos parámetros, el modelo de predicción debería ser analizado para una mayor confiabilidad en sus resultados.

Para determinar el nivel límite de sensibilidad a las vibraciones en las estructuras construidas de tapial, se deberán de realizar un análisis de diseño sismo resistente para saber la frecuencia que admitirán dichas edificaciones sin sufrir daños, de esta forma el modelo predictivo calculado se debería ajustar según posibles escenarios.

## REFERENCIAS

- Chiappetta, F. (2014). New Innovation Blasting Techniques to Improve Fragmentation, Fing Highwalls and Plant Throughput. New Innovation Blasting Techniques to Improve Fragmentation, Fing Highwalls and Plant Throughput (págs. 60-92). U.S.A: Blasting Analysis International, Inc.
- CINTEX, C. d. (2006). Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento. Chile : Blasttechnology A.B.N.
- Contreras, W. J. (2009). Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones. Lima: San Marcos.
- Departamento Técnico Exsa S.A. (8 de Agosto de 2014). Seguridad Minera. Obtenido de Seguridad Minera: <http://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/parametros-en-la-voladura-de-rocas/>
- ENAEX. (2014). Manual de Tronadura Enaex. CHILE: Gerencia Técnica ENAEX S.A.
- EXSA SOLUCIONES S.A. (2013). Manual Práctico de Voladura EXSA. PERU: CTVE, Centro Tecnológico de Voladura EXSA.
- GeoBlast. (31 de Diciembre de 2014). Mina Cerro Corona. Obtenido de <http://geoblast.cl/sitio/portfolio/mina-cerro-corona-2/>
- GeoBlast. (2015). Uso Sismógrafo Instantel. Conferencia de GeoBlast. Cajamarca - Perú: Publicaciones GeoBlas.
- GIRALDO, F. (2010). Control de Vibraciones para casas de tierra en Perú. Lima, Perú: (Tesis de Título Profesional), Universidad Nacional de Ingeniería.
- Konya, C. J. (1998). Diseño de Voladura (6 ed.). España: Cuicatl.
- MineMate Plus. (2011). Manual del operador Minemate Plus (Vol. 4). (C. G. A, Trad.) Chile: Instantel World Leader.
- Minera Chinalco Perú. (2013). Estudio de Vibraciones por Efecto de Voladura en el Proyecto Toromocho y su influencia en la carretera, Central tramo Morococho, y Viviendas Aledañas. PERU: SVS INGENIEROS S.A.

## ANEXO

ANEXO N.º 1. Determinación de la Ley de Atenuación de las mediciones de vibración por medio de regresión lineal múltiple.

Tabla n° 17: Modelo Predictivo de vibraciones a Campo lejano por medio de regresión Lineal.

MODELO PREDICTIVO DE VIBRACIONES CAMPO LEJANO																			
r <sup>2</sup> =		0.7		Log (De)		Log (PPV)		Pendiente		-1.76		50%		K - 50%		743.56			
Alpha=		-1.76						90%		K - 90%		960.16							
Log(K)=		2.87						Correlación (R <sup>2</sup> )		1									
K=		743.56																	
DATA							Promedio (x)		Promedio (y)		Alpha					50%		90%	
Blast #	Carga Taladro kg	Distance m	Carga Operante kg	PPV mm/s	PPV mm/s	PPV mm/s	Σx	Σy	SSxy	SSxx	Σxy	Σx <sup>2</sup>	Σy <sup>2</sup>	K	743.6	960.2			
	Q	D	Q	L	T	V	27.04	4.00	-0.16	0.09	5.85	40.73	1.30	Alfa	-1.763	-1.763			
							De	Vector suma PPV	Log[De] (x)	Log[PPV] (y)	xy	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>						
1	228	1015.0	684.0	0.7	0.7	0.4	38.8	1.1	1.6	0.0	-0.02	0.01	0.04	2.5	0.0	1.17	1.52		
2	228	980.0	684.0	0.7	0.6	0.4	37.5	1.0	1.6	0.0	-0.02	0.01	0.00	2.5	0.0	1.25	1.61		
3	259	845.0	777.0	1.5	1.8	1.0	30.3	2.5	1.5	0.4	0.00	0.00	0.59	2.2	0.2	1.82	2.35		
4	259	823.0	777.0	0.8	1.1	0.7	29.5	1.5	1.5	0.2	0.00	0.00	0.25	2.2	0.0	1.90	2.46		
5	259	902.0	777.0	0.9	1.2	1.0	32.4	1.8	1.5	0.3	0.00	0.00	0.39	2.3	0.1	1.62	2.09		
6	288	725.0	864.0	1.1	2.3	1.0	24.7	2.7	1.4	0.4	-0.02	0.01	0.60	1.9	0.2	2.61	3.37		
7	231	1086.0	693.0	0.8	0.8	0.6	41.3	1.3	1.6	0.1	-0.01	0.01	0.17	2.6	0.0	1.06	1.36		
8	259	977.0	777.0	0.7	0.7	0.6	35.0	1.1	1.5	0.0	-0.01	0.00	0.08	2.4	0.0	1.41	1.82		
9	259	926	777.0	0.9	0.6	0.4	33.2	1.2	1.5	0.1	0.00	0.00	0.10	2.3	0.0	1.55	2.00		
10	259	836	777.0	1.4	0.9	0.6	30.0	1.8	1.5	0.2	0.00	0.00	0.36	2.2	0.1	1.85	2.39		
11	231	765	693.0	1.4	0.9	0.6	29.1	1.8	1.5	0.2	0.00	0.00	0.36	2.1	0.1	1.96	2.53		
12	231	1106	693.0	0.8	1.0	0.5	42.0	1.4	1.6	0.1	-0.01	0.01	0.23	2.6	0.0	1.02	1.32		
13	259	1048	777.0	0.8	1.0	0.5	37.6	1.4	1.6	0.1	-0.01	0.01	0.22	2.5	0.0	1.24	1.60		
14	231	605	693.0	1.8	2.5	1.4	23.0	3.4	1.4	0.5	-0.04	0.02	0.72	1.9	0.3	2.96	3.82		
15	288	888	864.0	0.6	1.0	0.9	30.2	1.5	1.5	0.2	0.00	0.00	0.27	2.2	0.0	1.83	2.36		
16	231	797	693.0	1.8	0.8	0.7	30.3	2.1	1.5	0.3	0.00	0.00	0.48	2.2	0.1	1.82	2.35		
17	288	858	864.0	0.6	1.4	0.8	29.2	1.8	1.5	0.2	0.00	0.00	0.36	2.1	0.1	1.94	2.51		
18	231	692	693.0	1.5	2.1	1.2	26.3	2.8	1.4	0.5	-0.02	0.01	0.64	2.0	0.2	2.34	3.02		

Fuente Propia.

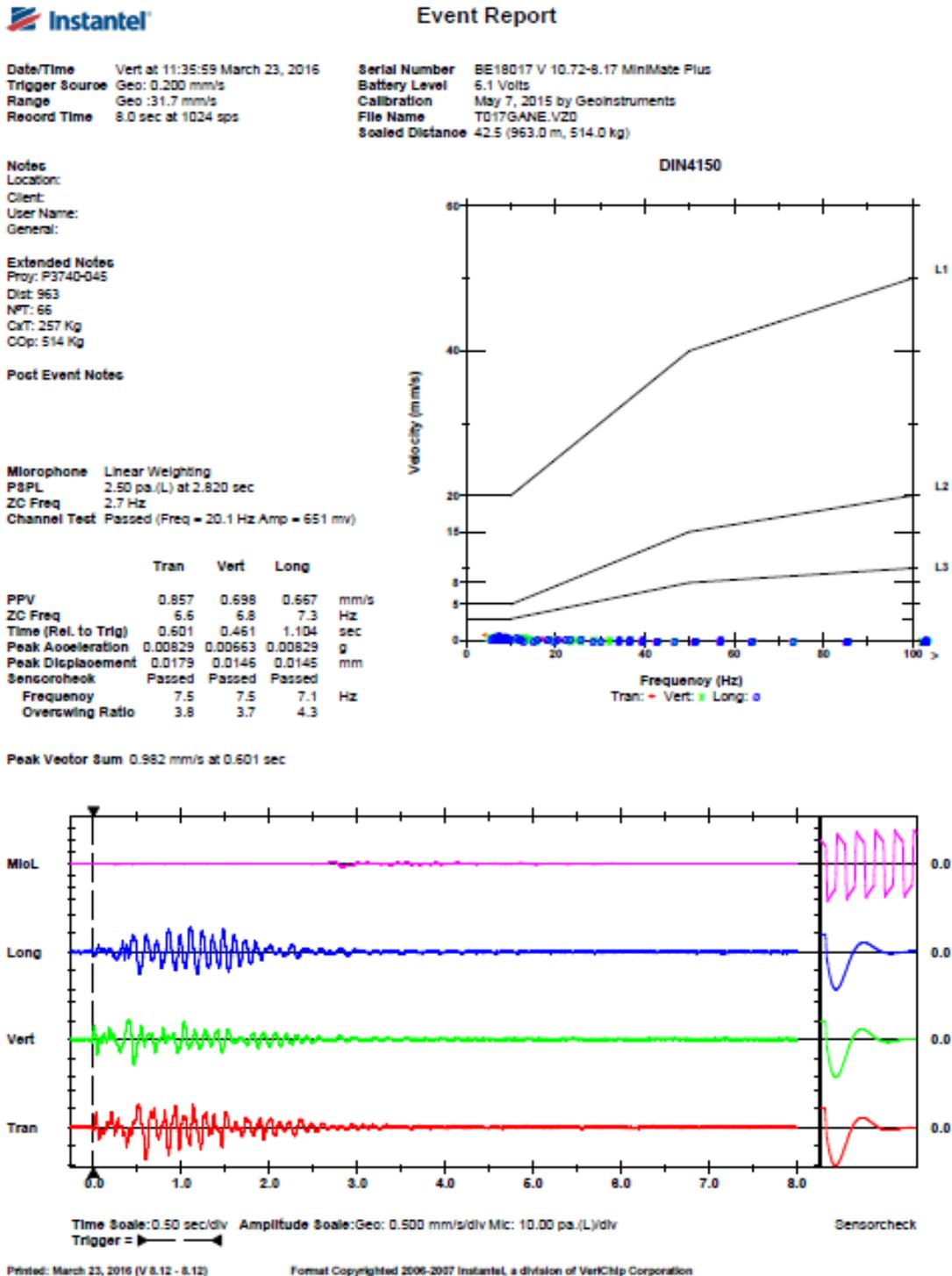
ANEXO N.º 2. Medición de vibraciones a Campo Lejano

Tabla n° 18: Medición de Vibraciones a Campo Lejano.

Fecha	Proyecto	Número Taladros	Carga por Taladro (Kg)	Distancia (m)	Carga Operante	PPV DIN 4150	EST. PPV			Registro Vibraciones							Nivel Presión Sonora	
							JKBENCH	K	Alfa	Long		Transv.		Vertical		PPV Campo	Pa	dB(L)
								960.16	-1.76	PPV	Frec.	PPV	Frec.	PPV	Frec.			
								MODELO										
23.03.16	P3740-045	66	259	963	777	3.0	1.9	1.86	0.7	7.3	0.9	6.6	0.7	6.8	0.98	2.5	101.9	
01.04.16	P3770-130	62	231	1015	693	3.0	1.3	1.53	0.4	5.7	0.4	12.0	0.3	7.8	0.48	2.3	101.0	
02.04.16	P3750-087	65	259	902	777	3.0	2.0	2.09	0.9	7.3	1.2	7.1	1.0	7.5	1.38	3.8	105.5	
06.04.16	P3750-088	78	259	977	777	3.0	1.6	1.82	0.7	7.8	0.7	8.5	0.7	6.2	0.94	7.3	111.2	
07.04.16	P3770-133	45	231	976	693	3.0	1.5	1.64	0.6	7.1	0.7	8.1	0.4	6.1	0.72	1.3	95.9	
08.04.16	P3740-048	83	259	987	777	3.0	1.7	1.78	0.6	7.0	1.2	7.5	0.7	6.0	1.21	1.8	98.8	
09.04.16	P3770-134	66	259	926	777	3.0	1.9	2.00	0.9	6.2	0.6	9.4	0.4	8.5	0.95	4.0	106.0	
15.04.16	P3740-050	70	259	1106	777	3.0	1.5	1.46	0.8	9.4	1.0	10.0	0.5	8.4	1.02	3.3	104.2	
17.04.16	P3740-051	106	288	888	864	3.0	2.3	2.36	0.6	7.9	1.0	7.6	0.9	7.6	1.17	2.8	102.8	
18.04.16	P3800-162	62	231	797	693	3.0	2.5	2.35	1.8	6.7	0.8	7.6	0.7	5.9	1.81	9.5	113.5	
19.04.16	P3740-052	60	288	858	864	3.0	2.5	2.51	0.6	10.8	1.4	12.8	0.8	12.2	1.46	2.3	101.0	
22.04.16	P3770-140	65	231	692	693	3.0	2.6	3.02	1.5	7.6	2.1	8.3	1.2	10.9	2.14	4.8	107.5	
23.04.16	P3740-053	148	288	860	864	3.0	2.5	2.50	1.7	6.8	1.8	9.4	1.4	6.0	2.36	9.3	113.3	
24.04.16	P3770-139	70	231	659	693	3.0	2.9	3.29	1.5	5.7	1.6	7.8	1.4	10.4	2.24	13.0	116.3	
27.04.16	P3770-135	72	259	849	777	3.0	2.3	2.33	0.7	7.0	0.9	6.7	0.7	7.5	0.88	6.8	110.6	
30.04.16	P3770-132	87	259	758	777	3.0	2.9	2.84	1.0	7.0	1.1	7.4	0.8	7.8	1.25	3.8	105.5	
06.05.16	P3740-056	81	259	917	777	3.0	1.2	2.03	0.5	5.8	0.5	11.0	0.5	11.0	0.65	1.8	98.8	
07.05.16	P3740-057	78	259	985	777	3.0	1.0	1.79	0.6	8.3	0.7	5.8	0.5	9.8	0.75	2.0	100.0	
11.05.16	P3770-147	106	259	724	777	3.0	2.1	3.08	1.2	6.3	1.4	6.7	0.6	7.9	1.49	4.8	107.5	
18.05.16	P3740-158	179	259	984	777	3.0	1.7	1.79	0.9	7.1	0.8	8.8	1.0	7.4	1.28	6.0	109.5	

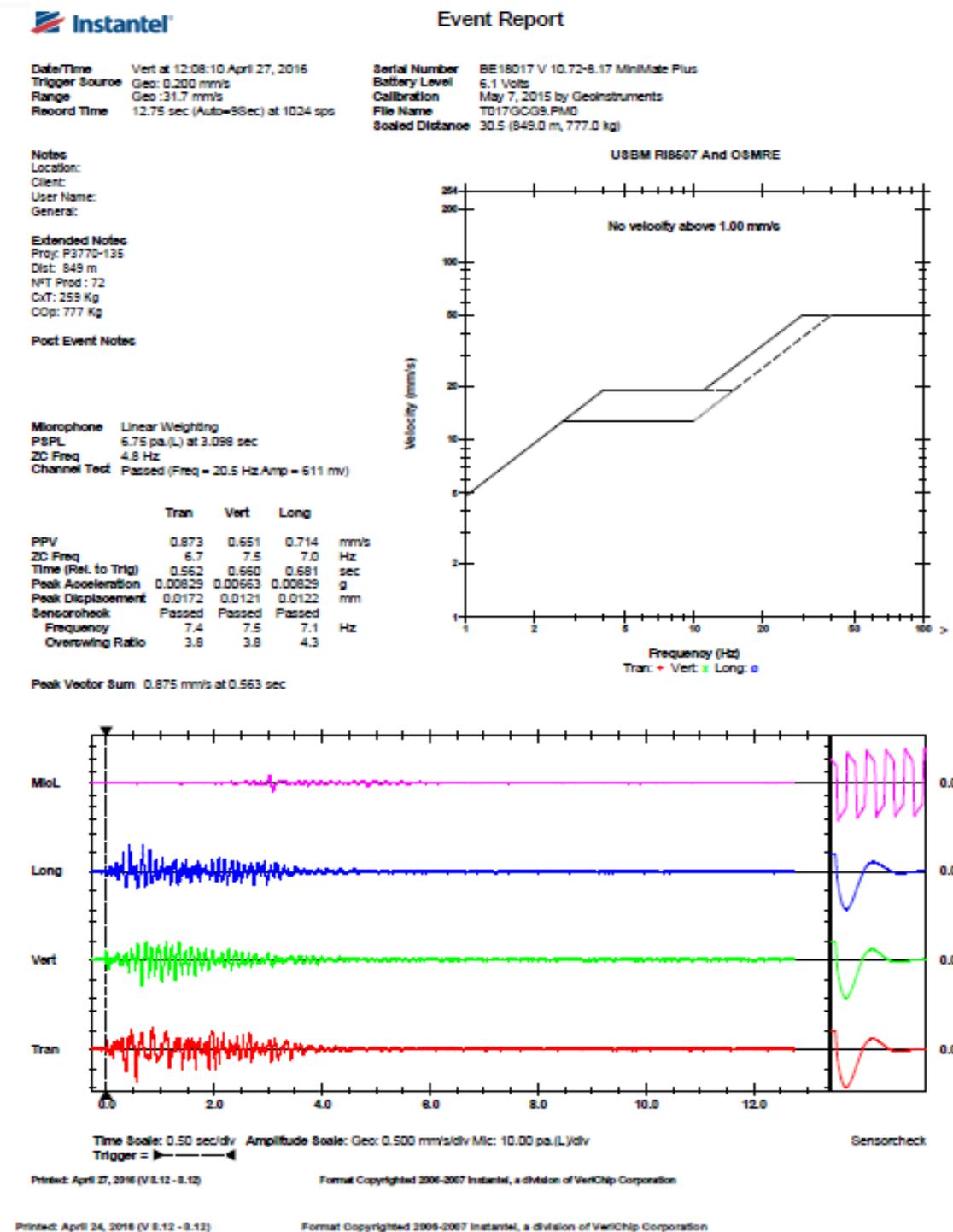
Fuente, Área de Asistencia Técnica Minera Cerro Negro S.A.

Figura n° 53: Primer Reporte de Evento.



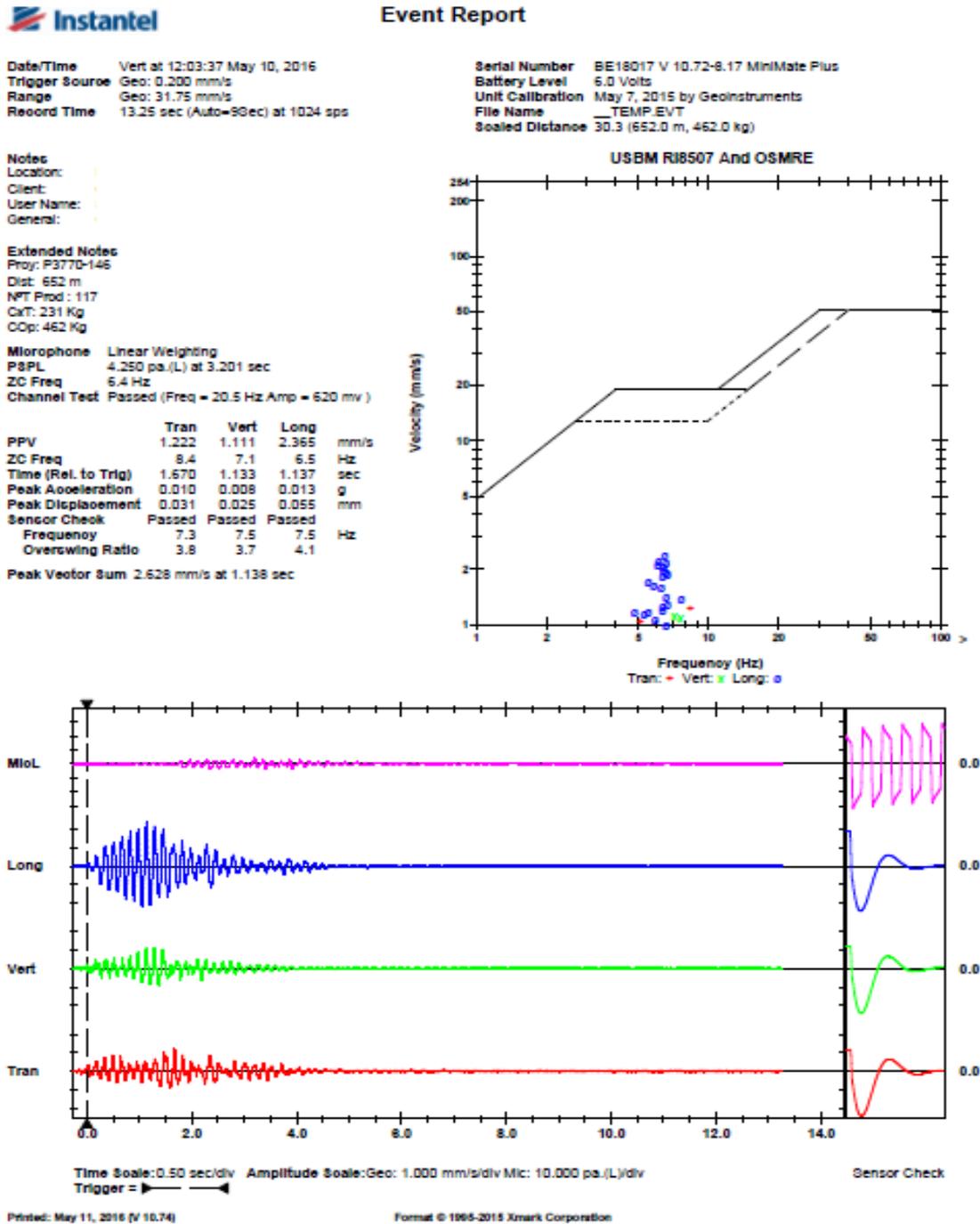
Fuente, Área de Asistencia Técnica Orica Mining Services.

Figura n° 54: Segundo Reporte de Evento.



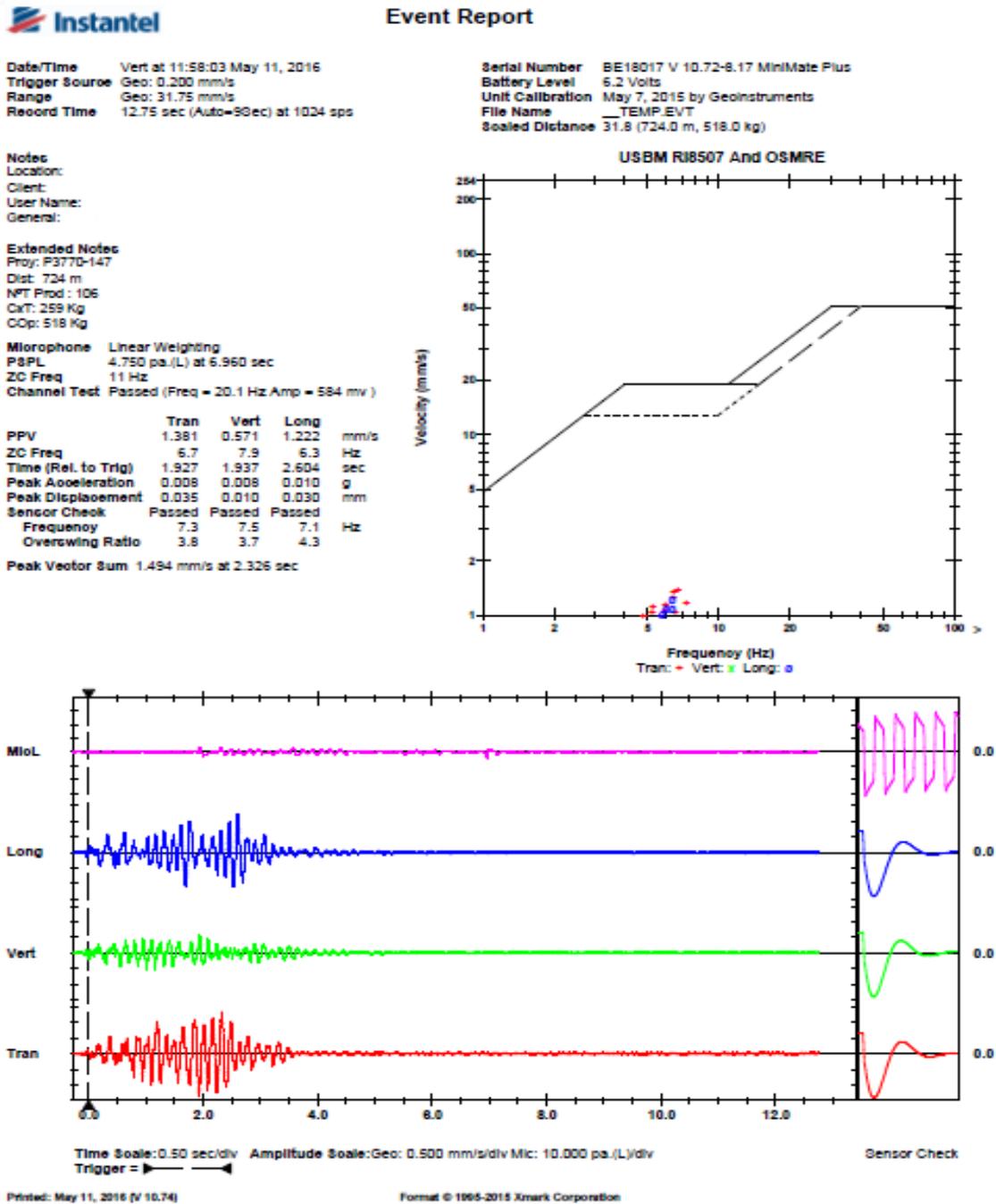
Fuente, Área de Asistencia Técnica Orica Mining Services.

Figura n° 55: Tercer Reporte de Evento.



Fuente, Área de Asistencia Técnica Orica Mining Services.

Figura n° 56: Cuarto Reporte de Evento.



Fuente, Área de Asistencia Técnica Orica Mining Services.

NEXO N.º 4. Predicción del PPV en talados secos y con agua, según el modelo de Campo lejano.

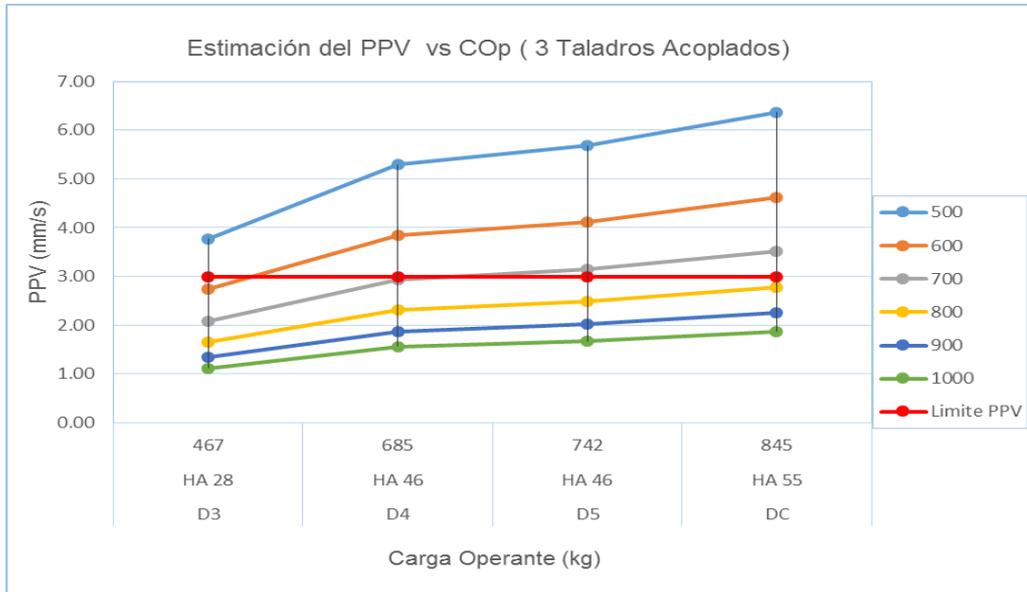
Tabla n° 19: Estimación del PPV en talados secos y talados con agua.

Limite PPV	Carga por Taladro (kg)	# Taladros Acoplados	Dureza (Mpa)	Explosivo	Carga Operante (kg)	Estimación del PPV Vs Carga Operante (kg)							
						K		Distancia (m)					
						960.2	Alfa -1.763	500	600	700	800	900	1000
TALADROS MINERAL - SECOS													
3	156	3	D3	HA 28	467	3.78	2.74	2.09	1.65	1.34	1.11		
3	228	3	D4	HA 46	685	5.29	3.84	2.92	2.31	1.88	1.56		
3	247	3	D5	HA 46	742	5.68	4.12	3.14	2.48	2.01	1.67		
3	282	3	DC	HA 55	845	6.37	4.62	3.52	2.78	2.26	1.88		
3	156	2	D3	HA 28	311	2.64	1.92	1.46	1.15	0.94	0.78		
3	228	2	D4	HA 46	457	3.70	2.68	2.05	1.62	1.31	1.09		
3	247	2	D5	HA 46	495	3.97	2.88	2.19	1.73	1.41	1.17		
3	282	2	DC	HA 55	563	4.46	3.23	2.46	1.95	1.58	1.31		
TALADROS MINERAL - CON AGUA													
3	206	3	D3	HA 64	617	4.83	3.50	2.67	2.11	1.71	1.42		
3	231	3	D4	HA 64	692	5.34	3.87	2.95	2.33	1.89	1.57		
3	259	3	D5	HA 64	778	5.92	4.29	3.27	2.59	2.10	1.74		
3	288	3	DC	HA 64	865	6.50	4.71	3.59	2.84	2.31	1.92		
3	206	2	D3	HA 64	412	3.38	2.45	1.87	1.48	1.20	1.00		
3	231	2	D4	HA 64	461	3.73	2.71	2.06	1.63	1.32	1.10		
3	259	2	D5	HA 64	519	4.14	3.00	2.29	1.81	1.47	1.22		
3	288	2	DC	HA 64	577	4.55	3.30	2.51	1.99	1.61	1.34		

*Fuente Propia.*

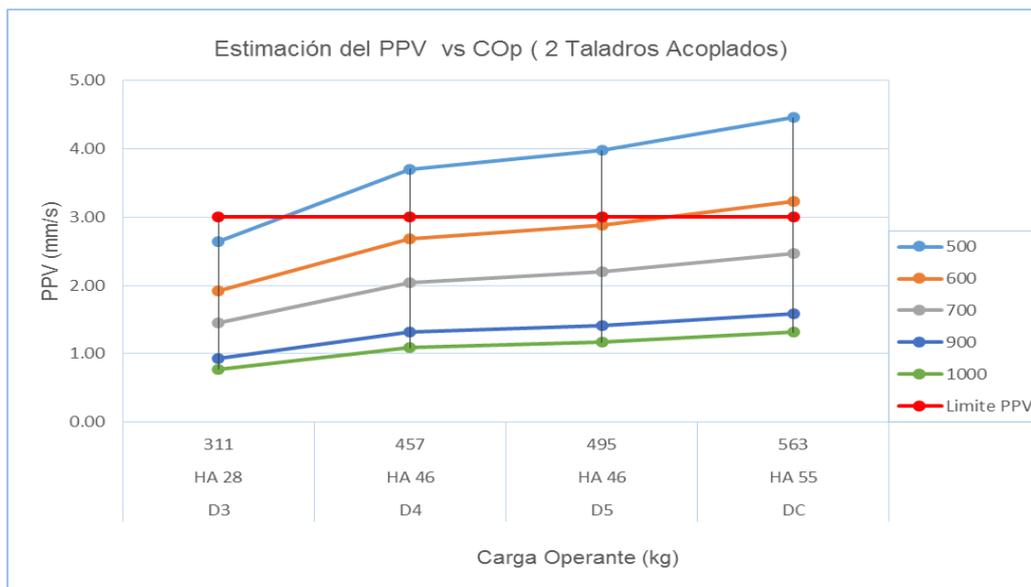
ANEXO N.º 5. Grafica de la Estimación del PPV en Taladros Secos

Figura n° 57: Estimación del PPV en Taladros Secos, con tres talados acoplados.



Fuente, Propia.

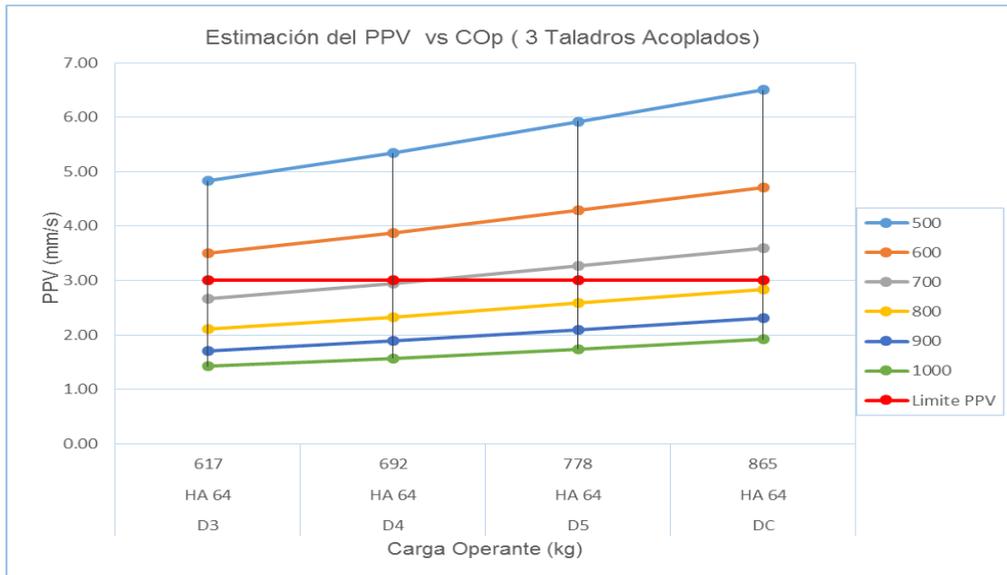
Figura n° 58: Estimación del PPV en Taladros Secos, con dos talados acoplados.



Fuente, Propia.

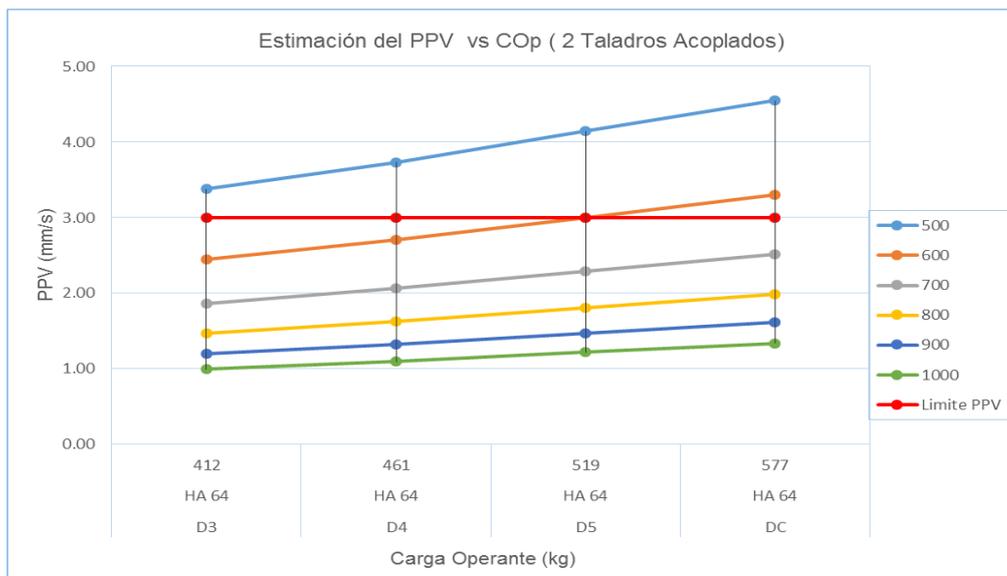
ANEXO N.º 6. Grafica de la Estimación del PPV en Taladros Con Agua

Figura n° 59: Estimación del PPV en Taladros Con Agua, con tres talados acoplados.



Fuente, Propia.

Figura n° 60: Estimación del PPV en Taladros Con Agua, con dos talados acoplados.



Fuente, Propia.