

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



**“REDUCCIÓN DEL DAÑO INDUCIDO AL MACIZO ROCOSO MEDIANTE  
MONITOREO, MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES POR  
VOLADURAS EN EL BYPASS 179. COMPAÑÍA MINERA KOLPA S.A.”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. JHOL WILFREDO DUEÑAS GUTIERREZ**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO – PERÚ**

**2018**



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

**TESIS**

"REDUCCIÓN DEL DAÑO INDUCIDO AL MACIZO ROCOSO MEDIANTE MONITOREO, MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES POR VOLADURAS EN EL BYPASS 179. COMPAÑÍA MINERA KOLPA S.A."

**PRESENTADO POR:**

Bach. JHOL WILFREDO DUEÑAS GUTIERREZ

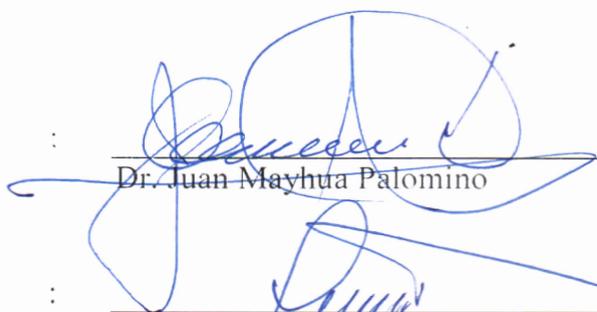
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

INGENIERO DE MINAS

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 03-10-2018

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**

**PRESIDENTE** :

  
\_\_\_\_\_

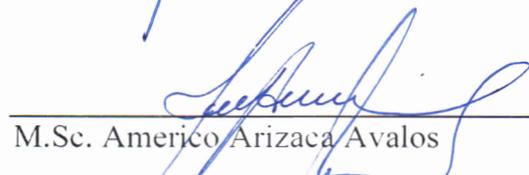
Dr. Juan Mayhua Palomino

**PRIMER MIEMBRO** :

  
\_\_\_\_\_

D.Sc. Jorge Gabriel Durant Broden

**SEGUNDO MIEMBRO** :

  
\_\_\_\_\_

M.Sc. Americo Arizaca Avalos

**DIRECTOR / ASESOR** :

  
\_\_\_\_\_

Ing. Arturo Rafael Chayña Rodriguez

**Área** : Ingeniería de Minas.

**Tema** : Monitoreo, Modelamiento y Análisis de vibraciones para reducir el daño inducido en el macizo rocoso.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan gratificante en mi vida, por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A mis queridos padres Melquiades Dueñas y Agustina Gutierrez por ser las persona que me han acompañado y apoyado durante mi formación profesional y personal.

A mis hermanas y hermanos quienes con su apoyo y consejos han sabido guiarme para culminar mi carrera profesional y emprender nuevos proyectos de vida.

A mi amada novia Sheyla Pérez por su amor incondicional, dedicación y motivación que me brinda cada día para lograr todo mis objetivos.

## AGRADECIMIENTO

En este espacio, mi agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano y a toda su plana docente quienes aportaron en mi formación profesional con sus conocimientos brindados.

Mi agradecimiento a mi director de tesis Ing. Arturo Chayña y miembros del jurado: Dr. Juan Mayhua, D.Sc. Jorge Durant y M.Sc. Americo Arizaca, por sus aportes y orientaciones durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En especial quiero extender mi agradecimiento al Ing. Rene Ojeda Mestas, principal colaborador, por su disponibilidad y generosidad en compartir su experiencia y amplio conocimiento en el material de estudio en esta tesis. Le agradezco también por sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante el desarrollo de este trabajo.

Para aquellos amigos que han compartido conmigo los “ires y venires” en el plano personal con los que compartí muchas actividades extras y en lo principal que es el desarrollo de la presente tesis que demandaron horas de trabajo.

Y, por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido va para mi familia. Sin su apoyo, colaboración e inspiración habría sido complicado lograrlo. A mis padres, Melquiades Dueñas y Agustina Gutierrez, por su ejemplo de lucha y honestidad; a mis hermanas y hermanos ejemplos de generosidad, superación, valentía y capacidad, por ellos y para ellos.

Finalmente a la compañía minera Kolpa S.A. por permitirme formar parte de su equipo humano durante los años 2015 y 2016 como Ingeniero de Voladura, dicha experiencia me permitió desarrollar el presente trabajo de investigación.

**ÍNDICE GENERAL**

ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS: .....	xiv
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	xv
RESUMEN .....	16
ABSTRACT.....	17

**CAPÍTULO I****INTRODUCCIÓN**

1.1 Descripción de la realidad del problema.....	20
1.2 Antecedentes de la investigación .....	22
1.2.1 Antecedentes internacionales:.....	22
1.2.2 Antecedentes nacionales: .....	22
1.3 Formulación del problema .....	25
1.3.1 Problema general .....	25
1.3.2 Problemas específicos.....	25
1.4 Justificación de la investigación .....	25
1.4.1 Justificación teórica .....	25
1.4.2 Justificación práctica.....	25
1.4.3 Justificación metodológica .....	26
1.5 Objetivos de la investigación .....	26
1.5.1 Objetivo general.....	26
1.5.2 Objetivos específicos: .....	26
1.6 Información general .....	27
1.6.1 Ubicación- compañía minera kolpa s.a.....	27

1.6.2	Vías de acceso .....	28
1.6.3	Geología del yacimiento .....	29
1.6.4	Geología económica.....	32
1.6.5	Hidrogeología.....	32
1.6.6	Método de explotación.....	34
1.6.6.1	Descripción del método .....	34
1.6.6.2	Diseño de mina.....	35
1.6.6.3	Labores de preparación y desarrollo .....	36

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1	Marco teórico .....	38
2.1.1	Fundamentos de vibración por voladura.....	38
2.1.2	Propiedades de las ondas de vibración.....	41
2.1.3	Clases de ondas en vibraciones .....	47
2.1.4	Tipos de ondas en vibraciones .....	47
2.1.5	Primer arribo de ondas.....	51
2.1.6	Características del movimiento ondulatorio .....	53
2.1.7	Características de las vibraciones por voladura .....	54
2.1.7.1	Vibración de un taladro único .....	55
2.1.7.2	Vibración de una voladura completa .....	60
2.1.8	Variables que afectan a las vibraciones .....	62
2.1.8.1	Peso de carga.....	62
2.1.8.2	Tipo de carga.....	63
2.1.8.3	Confinamiento de la carga .....	66
2.1.8.4	Acoplamiento de la carga.....	66
2.1.9	Predicción del nivel de vibraciones en el terreno .....	67
2.1.9.1	Modelo general o campo lejano .....	69

2.1.9.2	Modelo Holmberg & Persson o Campo cercano .....	73
2.1.10	Daño al macizo rocoso por voladura.....	76
2.1.10.1	Vibración y esfuerzo .....	76
2.1.10.2	Velocidad pico partícula crítica .....	76
2.1.10.3	Criterio de daño. ....	78
2.1.10.4	Contornos de daño en túnel .....	79
2.1.11	Parámetros del macizo rocoso.....	80
2.1.11.1	Sistema RMR.....	80
2.1.11.2	GSI.....	83
2.1.11.3	Módulo de deformación del macizo rocoso.....	84
2.1.11.4	Módulo de deformación de la roca intacta.....	85
2.1.11.5	Factor de disturbancia.....	87
2.1.12	Instrumentación para monitoreo de vibraciones .....	88
2.1.12.1	Equipos de monitoreo .....	99
2.1.12.2	Software de análisis de registros de vibración.....	104
2.1.13	Análisis de registros de vibraciones.....	108
2.1.13.1	Secuencia de detonación de los taladros.....	109
2.1.13.2	Velocidad Pico Partícula de cada carga en la voladura .....	111
2.1.13.3	Diferencia entre cargas explosiva de producción y contorno .....	111
2.1.13.4	Eficiencia relativa en la detonación de cargas similares.....	112
2.2	Marco conceptual.....	113
2.3	Hipótesis.....	115
2.3.1	Hipótesis general.....	115
2.3.2	Hipótesis específicas .....	115

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Tipo y diseño de investigación.....	116
-----	-------------------------------------	-----

3.1.1	Tipo de investigación .....	116
3.1.2	Diseño de la investigación .....	117
3.2	Nivel de investigación.....	119
3.3	Población y muestra .....	119
3.3.1	Población.....	119
3.3.2	Muestra.....	119
3.4	Técnicas de recolección de datos .....	119
3.5	Operacionalización de variables .....	120
3.5.1	Variables .....	120
3.5.2	Operacionalización de variables .....	120

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción de las voladuras monitoreadas.....	122
4.1.1	Voladura de contorno.....	123
4.1.2	La voladura de producción.....	124
4.2	Descripción de los explosivos utilizados .....	125
4.2.1	Superfam Dos.....	125
4.2.2	Emulnor 1000.....	126
4.2.3	Famecorte E-20 .....	126
4.2.4	Especificaciones técnicas de los explosivos .....	126
4.3	Monitoreo de vibraciones en campo lejano .....	127
4.4	Modelamiento de vibraciones .....	129
4.5	Modelamiento de vibraciones del anfo .....	129
4.5.1	Análisis estadístico de regresión no lineal ajustado a una ecuación .....	129
4.5.2	Análisis estadístico aplicando en Excel .....	131
4.6	Calculo de los parámetros del macizo rocoso .....	134
4.6.1	Clasificación geomecánica RMR 1989.....	134

4.6.2	Índice de resistencia geológica (GSI) .....	136
4.6.3	Deformabilidad del macizo rocoso .....	136
4.6.4	Modulo de deformación de la roca intacta.....	136
4.6.5	Velocidad de propagación de onda (Vp).....	137
4.7	Velocidad pico partícula critica .....	138
4.8	Análisis de daño al macizo rocoso.....	138
4.8.1	Análisis de daño por campo lejano .....	138
4.8.2	Análisis de daño por campo cercano.....	143
4.8.2.1	Daño generado por el Anfo con carga continua y acoplado .....	145
4.8.2.2	Daño generado por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga continua .....	147
4.8.2.3	Daño generado por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada .....	149
4.9	Contrastación de la hipótesis.....	151
4.9.1	Contrastación de la hipótesis general.....	151
4.9.2	Contrastación de la hipótesis específica 1.....	151
4.9.3	Contrastación de la hipótesis específica 2.....	152
4.9.4	Contrastación de la hipótesis específica 3.....	153
4.10	Discusión.....	153
	CONCLUSIONES .....	156
	RECOMENDACIONES.....	158
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	159
	ANEXOS .....	161

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Plano de ubicación Cía. Minera Kolpa S.A. ....	28
Figura N° 2: Modelo hidrogeológico conceptual interior mina.....	34
Figura N° 3: Modelo hidrogeológico conceptual interior mina.....	36
Figura N° 4: Zonas de acción de una onda explosiva.....	39
Figura N° 5: Ciclo de esfuerzo de compresión, seguido de tensión sobre la roca.....	40
Figura N° 6: Presión y relajación no simétrica a un elemento de roca. ....	41
Figura N° 7: Comportamiento de la frecuencia y desplazamiento de las vibraciones. ..	42
Figura N° 8: Amplitudes de Onda, A1 y A2.....	43
Figura N° 9: Onda completa de Vibración .....	44
Figura N° 10: Estimación de la velocidad de propagación usando dos geófonos .....	46
Figura N° 11: Comportamiento de los tipos de onda en función a la distancia.....	47
Figura N° 12: Movimiento de las partículas dentro de la onda P.....	48
Figura N° 13: Movimiento de las partículas dentro de la onda S .....	49
Figura N° 14: Movimiento de las partículas dentro de diferentes tipos de onda.....	50
Figura N° 15: Registro de llegada de las ondas P, S y R.....	51
Figura N° 16: El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar .....	52
Figura N° 17: Momento de arribo de la Onda .....	53
Figura N° 18: Registro de onda de la velocidad de vibración .....	54
Figura N° 19: Onda de un taladro medido a 20 metros .....	55
Figura N° 20: Espectro de Fourier de energía y amplitud para la onda .....	57
Figura N° 21: Espectro de energía (solido) y esfuerzo acumulativo .....	58
Figura N° 22: Desplazamiento del terreno, medido entre 15 a 20 metros del taladro....	59
Figura N° 23: Onda de vibración en campo lejano y espectro de energía.....	61
Figura N° 24: Espectros de velocidades de partículas por vibraciones de voladuras ....	63
Figura N° 25: Típica dispersión de datos, velocidad Pico-partícula vs distancia escalada cuadrada.....	69
Figura N° 26: Modelamiento de vibraciones en campo cercano .....	74
Figura N° 27: Criterio de daño .....	79
Figura N° 28: Zonas de daño en el túnel por altos niveles de vibración .....	80
Figura N° 29: Diagrama de datos del módulo de deformación de masa de roca.....	85
Figura N° 30: Módulo de deformación de masa de roca .....	86
Figura N° 31: Composición de un acelerómetro .....	90

Figura N° 32: Composición de un geófono .....	91
Figura N° 33: Nivel de confiabilidad de la medición de los geófonos. ....	92
Figura N° 34: Representación esquemática de la sensibilidad de un Geófono. ....	93
Figura N° 35: Representación esquemática del cambio de la sensibilidad Geófono.....	94
Figura N° 36: Arreglo triaxiales de geófonos para monitoreo en campo cercano.....	95
Figura N° 37: Arreglo triaxiales de geófonos para monitoreo en campo lejano .....	95
Figura N° 38: Orientación de voladura de sensores longitudinal, vertical y transversal	96
Figura N° 39: Orientación del geófono de sensor longitudinal hacia la voladura.....	96
Figura N° 40: Posible errores en la señal resultante por mal acople del geófono .....	97
Figura N° 41: Acoplamiento del geófono dentro del macizo .....	98
Figura N° 42: Acoplamiento del geófono dentro del macizo rocoso. ....	98
Figura N° 43: Modelos de sismógrafos Minimate Plus y accesorios .....	100
Figura N° 44: Sismógrafos Mini –Seis digital.....	102
Figura N° 45: Reporte de registros de vibración con Blastware con llave .....	105
Figura N° 46: Análisis de registros de vibración con Blastware con llave.....	106
Figura N° 47: Análisis de eventos con Seismograph Data Analysis .....	107
Figura N° 48: Reporte de vibraciones con Seismograph Data Analysis .....	108
Figura N° 49: Secuencia de detonación de los taladros por taladros.....	110
Figura N° 50: Tiempos de detonación de los taladros por taladros .....	110
Figura N° 51: Vibración presente en cada taladro cargado .....	111
Figura N° 52: Variación en los niveles de vibración .....	112
Figura N° 53: Vibraciones del sector de la ranura.....	112
Figura N° 54: Análisis eficiencia de la detonación de taladros del arranque y ayudas	113
Figura N° 55: Diagrama de la determinación del modelo predictivo .....	118
Figura N° 56: Diseño de la malla By Pass 179.....	122
Figura N° 57: Replanteo de los taladros de Contorno en el Bypass 179 .....	123
Figura N° 58: Taladro de corona y hastiales.....	124
Figura N° 59: Replanteo de los taladros de Producción en el Bypass 179 .....	124
Figura N° 60: Cebo - Emulnor 5000 y columna- Anfo con carga corrida y acoplado .	125
Figura N° 61: Ley de Atenuación usando Superfam Dos (Anfo) con excel.....	131
Figura N° 62: Ley de Atenuación usando Emulnor 1000 1 ¼ “x12” carga espaciada	132
Figura N° 63: Ley de Atenuación usando Emulnor 1000 1 ¼ “x12” carga continua...	133
Figura N° 64: Ley de Atenuación -Famecorte E-20 11/16“x20” carga continua. ....	133

Figura N° 65: Velocidad de onda P .....	137
Figura N° 66: Comparación de distancia de daño .....	141
Figura N° 67: Daño por el explosivo Anfo en vista en perfil .....	145
Figura N° 68: Daño por el explosivo Anfo en vista en planta .....	146
Figura N° 69: Daño por explosivo Emulnor 1000 carga corrida, vista perfil.....	147
Figura N° 70: Daño por explosivo Emulnor 1000 carga corrida, vista planta.....	148
Figura N° 71: Daño por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada vista perfil .....	149
Figura N° 72: Daño por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada vista en planta....	149
Figura N° 73: Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplado vista en perfil ...	150
Figura N° 74: Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplado vista en planta..	150
Figura N° 75: Intensidad de las vibraciones producidas por el Famecorte E-20.....	155

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Rutas de acceso a UM Huachocolpa Uno, Cía. Minera Kolpa S.A. ....	29
Tabla N° 2: Distribución de energía del explosivo en diferentes eventos .....	39
Tabla N° 3: Criterios de modelos de vibraciones en campo lejano .....	69
Tabla N° 4: Variabilidad en los parámetros del modelo de vibración Devine. ....	71
Tabla N° 5: Estimación de velocidad de partícula crítica teórica en distintos tipos de roca.....	77
Tabla N° 6: Valoración del sistema RMR de Bienaiwsky, 1989 .....	81
Tabla N° 7: Factores de ajuste (Bienaiwsky, 1989) .....	82
Tabla N° 8: Factores de ajuste para el caso de tunelería .....	82
Tabla N° 9: Factores de ajuste (Bienaiwsky, 1989) .....	83
Tabla N° 10: Clases de macizo rocoso según el valor del RMR ajustado.....	83
Tabla N° 11: Clasificación del macizo rocoso según GSI.....	84
Tabla N° 12: Guías para estimar el factor D.....	87
Tabla N° 13: Especificaciones técnicas Sismógrafos Minimate Plus.....	100
Tabla N° 14: Modelos de Sismógrafos Mini –Seis Digital por capacidad de memoria	102
Tabla N° 15: Especificaciones técnicas sismógrafo Mini – Seis digital.....	103
Tabla N° 16: Operacionalización de variables .....	120
Tabla N° 17: Especificaciones técnicas de explosivos .....	127
Tabla N° 18: Datos obtenidos usando Anfo .....	127
Tabla N° 19: Datos obtenidos usando Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada.....	128
Tabla N° 20: Datos obtenidos usando Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga continua.....	128
Tabla N° 21: Datos obtenidos usando Famecorte E-20 11/16” x 20” carga continua desacoplado.....	128
Tabla N° 22: Cálculos para modelo predictivo de vibraciones para explosivo Anfo ..	130
Tabla N° 23: Condiciones de discontinuidades .....	135
Tabla N° 24: Resumen de la valoración de RMR.....	135
Tabla N° 25: Criterio de daño según Cameron Mckenzie .....	138
Tabla N° 26: Análisis de regresión del daño inducido por lo explosivos en estudio ...	139
Tabla N° 27: Datos para determinar el daño inducido por explosivo.....	141
Tabla N° 28: Resultado daño inducido por explosivo .....	142
Tabla N° 29: Datos para determinar el daño inducido por explosivo.....	143

**ÍNDICE DE ANEXOS:**

Anexo A: Reportes de vibración bp 179.....	161
Anexo B: Datos geomecánicos .....	171
Anexo C: Evidencias fotográficas de voladuras de prueba .....	172
Anexo D: Matriz de consistencia.....	175
Anexo E: Plano geomecánico bp 179 .....	176
AnexoF:Vistas fotográficas de la instalación de sismógrafo para monitoreo de vibraciones .....	177

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

$V_p$	: Velocidad de Propagación de la Onda compresional P
$V_s$	: Velocidad de Propagación de la Onda transversal S
VR	: Velocidad de Propagación de la Onda Rayleigh R
VL	: de Propagación de la Onda Love L
f	: Frecuencia, cuantos ciclos de compresión y tensión por segundo, Hertzios.
A	: Amplitud, máximo valor o esfuerzo a la cual el medio es expuesto
t	: Tiempo, duración total que el medio está expuesto a la vibración.
$\lambda$	: Longitud de onda, distancia que viaja en un ciclo completo de compresión y tensión.
VPP	: Velocidad Pico Partícula.
SD	: Distancia Escalada
d	: Distancia de monitoreo
W	: Carga operante
K	: Factor de Amplitud.
$\alpha$	: Factor de Atenuación.
L	: Densidad de carga lineal
Ro	: Distancia cercana a la detonación del taladro.
VPPc	: Velocidad Pico Partícula crítica.
$\sigma_c$	: Resistencia a la compresión.
$\sigma_t$	: Resistencia a la tracción
$E_{rm}$	: Modulo de deformación del Macizo Rocoso.
$E_i$	: Modulo de deformación de la Roca Intacta.
D	: Factor de Disturbancia.
RMR	: Rock Mass Rating
GSI	: Geological Strength Index
ISEE	: Sociedad Internacional de Ingenieros Explosivistas.
CINTEX	: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos, Enaex.

## RESUMEN

El estudio de investigación denominado: “Reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179 Compañía Minera Kolpa S.A.”, el cual se realizó para reducir la sobre rotura que se genera en 0.25 m alrededor del perímetro de diseño de la labor y controlar el daño de creación de nuevas fracturas al cual es sometido el macizo rocoso por la voladura de rocas generando labores inestables para el trabajo diario, mayores costos de sostenimiento, acarreo y transporte, asimismo el objetivo general es experimentar el proceso de reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras; objetivos específicos: Construir los modelos predictivos de vibraciones para reducir el daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones; verificar el nivel de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión; reducir el daño en el macizo rocoso aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados. El tipo de investigación es tecnológica ya que se relaciona con el nivel experimental, ya que en ambos casos se busca producir cambios cualitativos, nuevos modelos, es de **diseño** experimental puro y **nivel** de la investigación es experimental. El instrumento utilizado fue el reporte de vibraciones. Los datos obtenidos de mina se procesaron para realizar un análisis estadístico de regresión múltiple adecuados al modelo de Devine y Duvall para determinar la ley de atenuación o modelo predictivo de los explosivos usados con sus respectivas constantes de velocidad y atenuación. En los resultados el nivel de daño de creación de nuevas fracturas (VPPc) con el explosivo de voladura de Emulnor 1000 con carga corrida genera un daño de 1.13 m, el explosivo Anfo se genera un daño de 1.0 m, el explosivo Emulnor 1000 de carga espaciada genera un daño de 0.46 m y el explosivo Famecorte E-20 genera un daño de 0.19 m, se concluye que este último modelo reduce el daño en el macizo rocoso, porque genera menor daño.

**PALABRAS CLAVE:** Vibraciones, Velocidad Pico Partícula, Modelo de Atenuación, Criterio de daño, By Pass, Macizo rocoso, Voladura, Explosivos

## ABSTRACT

This research study is called: "Reduction of the damage induced to the rock mass by monitoring, modeling and analysis of vibrations by blasting in the Bypass Company Minera Kolpa SA", which was made to reduce the overbreak that is generated in 0.25 m around the design perimeter of the work and control the damage of creating new fractures to which the rock mass is subjected to by the blasting of rocks generating unstable work for daily work, higher costs of support, hauling and transportations, also the general objective is to experience the process of reduction of the damage induced to the rock mass by means of monitoring, modeling and analysis of vibrations by blasting; Specific objectives: Building predictive models of vibrations to reduce damage in the rock mass by monitoring and analyzing vibrations; to verify the damage level of the blast designs with the predictive models by means of the law of attenuation and the function of regression; reducing the damage in the rock mass by applying the predictive vibration model and its interpretation of results. The type of research is technological since it is related to the experimental level, since in both cases it is sought to produce qualitative changes, new models, it is of pure experimental design and the level of research is experimental. The instrument used was the report of vibrations. The data obtained from the mine were processed to perform a multiple regression statistical analysis suitable for the Devine and Duvall model to determine the attenuation law or predictive model of the explosives used with their respective speed and attenuation constants. In the results the level of damage of creation of new fractures (VPPc) with the blasting explosive of Emulnor 1000 with running charge generates a damage of 1.13 m, the explosive Anfo generates a damage of 1.0 m, the explosive Emulnor 1000 of loading spaced generates a damage of 0.46 m and the explosive Famecorte E-20 generates a damage of 0.19 m, it is concluded that this last model reduces the damage in the rock mass, because it generates less damage.

**KEY WORDS:** Vibrations, Peak Speed Particle, Attenuation Model, Damage Criterion, By Pass, Rocky Massif, Blasting, Explosives.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

En las operaciones mineras para explotar los yacimientos se emplea la perforación y voladura, en ese sentido la compañía minera Kolpa S.A. realizó diferentes labores de desarrollo como rampas, cruceros, By Pass, etc., para el cumplimiento de las metas físicas programadas emplea las voladuras de rocas haciendo uso de diferentes tipos de explosivos que varían en densidad, velocidad de detonación y nivel de energía tales como: Anfo, Emulnor 3000, Emulnor 1000 y el Famecorte E-20 aplicados en el tipo de roca Andesita Porfírica es la roca volcánica más común después del basalto. Es porfírica, es decir, consiste en cristales gruesos incrustados en una matriz granular o vítrea con una densidad de  $2.7 \text{ ton/m}^3$  que es la roca predominante en la zona de desmonte del By Pass 179.

Es así que al realizar la voladura genera una intensidad de la vibración para ello se realizará una serie de monitoreo de vibraciones en campo lejano con diferentes explosivos bajo las mismas condiciones de caracterización geomecánica y diseño de perforación para generar una base de datos inicial de cada explosivo a través de Velocidad Pico Partícula (VPP), Carga Operante (W) y la distancia de la voladura al punto de monitoreo (D) con la información recopilada se realizará un análisis de regresión múltiple adecuados al modelo de Devine (1962) para determinar la ley de atenuación o modelo predictivo de los explosivos usados con la finalidad de reducir el daño causado en el macizo rocoso en el By Pass 179 de la compañía minera Kolpa S.A.

Entonces como se logra reducir y controlar el nivel de daño en el macizo rocoso mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones, se logra reducir de la siguiente forma: Para el monitoreo se realiza ubicando sismógrafos a determinadas

distancias de la voladura, en cuanto al modelamiento se determina el comportamiento de las vibraciones para cada tipo de explosivo y finalmente en el análisis de vibraciones se determina el explosivo adecuado que genera menor daño en las voladuras de contorno; con todo ello el objeto es controlar al máximo el nivel del daño inducido por la voladura de rocas que nos permitirá tener labores más estables y seguras para el desarrollo de las operaciones en interior mina.

La hipótesis general propuesta en el presente trabajo de investigación es que el nivel de daño inducido al macizo rocoso se reduce mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en el ByPass 179 en la Compañía Minera Kolpa S.A. Asimismo las hipótesis específicas son: La construcción de los modelos predictivos para la reducción del daño en el macizo rocoso se realiza con el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras aplicando el modelo de Divine; la determinación de los niveles de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión se realiza en función a los siguientes criterios de daño: Intenso fracturamiento, creación de nuevas fracturas y la extensión de fracturas preexistentes y la reducción del daño en el macizo rocoso se produce aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados.

La tesis está estructurada en cuatro capítulos:

El capítulo I, precisamente desarrolla la introducción que describe la realidad del problema, los antecedentes, formulación del problema, justificación de la investigación, objetivos de la investigación e información general.

El capítulo II desarrolla la revisión de la literatura. Primero se ha realizado el marco teórico de cada variable, dimensiones e indicadores sustentados con las citas directas y paráfrasis que sirven de base en la investigación. Segundo el marco conceptual que contiene los términos más utilizados en la investigación.

El capítulo III comprende los materiales y métodos, donde se desarrolla la metodología de investigación. El diseño es tecnológico, el tipo de investigación es experimental. Igualmente, el capítulo contiene la población, la unidad de análisis que está conformado Bypass 179 Compañía Minera Kolpa S.A. del mismo, las técnicas e instrumentos validados y confiables para la recolección de datos.

El capítulo IV presenta los resultados de la investigación y la discusión. Los resultados se presentan en tablas de frecuencia y gráficos, así como el análisis e interpretación de los resultados por cada variable. Por último, está la prueba de hipótesis.

### **1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD DEL PROBLEMA**

En la actualidad en toda operación minera para explotar los yacimientos se emplea la perforación y voladura, es así que en la compañía minera Kolpa S.A., se desarrollaron diferentes labores de desarrollo como son rampas, cruceros, By Pass, etc., para el cumplimiento de las metas físicas programadas se emplea la voladuras de rocas haciendo uso de una variedad de explosivos que van del más denso al menos denso con mayor a menor velocidad de detonación y diferentes niveles de energía diseñados para diferentes tipos de rocas.

El problema surgió en la zona de la Rampa N° 02, específicamente en el ByPass 179 en donde se tuvo sobre excavación de 0.25 m alrededor del perímetro de diseño de la labor, creado de nuevas fracturas en el macizo rocoso, producto de las voladuras que se ejecutó; de acuerdo a la evaluación realizadas por el área de planeamiento se genera de 2.0 m<sup>3</sup> de roca fragmentada por metro lineal de avance, haciendo un total por mes de 1000.0 m<sup>3</sup> de roca excavada que se tiene que extraer de interior mina incrementando el costo de acarreo y transporte, por la creación de nuevas fracturas, el daño inducido requiere cambiar el elemento y diseño de sostenimiento incrementado las horas hombre de trabajo, el costo de sostenimiento y más allá de incrementar los costos operativos es exponer a los colaboradores a trabajar en labores inseguras propenso a tener accidentes por caída de roca.

La causa del problema surge por la intensidad de la vibración generada por la voladura el cual obedece a diversas variables o factores que influyen, como son: tipo de explosivo empleado de acuerdo al tipo de voladura y la calidad de roca, la carga operante, el confinamiento y acoplamiento del explosivo en el taladro, la distribución espacial de la carga explosiva, el tiempo de retardo a ser empleado, etc.

Para reducir la intensidad de la vibración se realizará una serie de monitoreo de vibraciones en campo lejano (distancias mayores a 5 veces la longitud de carga dentro del taladros) con diferentes explosivos bajo las mismas condiciones de caracterización

geomecánica y diseño de perforación para generar una base de datos inicial de cada explosivo usado de los siguientes datos: Velocidad Pico Partícula (VPP), Carga Operante (W) y la Distancia de la voladura al punto de monitoreo (D) con la información recopilada se realizará un análisis de regresión múltiple adecuados al modelo de Devine (1962) para determinar la ley de atenuación o modelo predictivo de los explosivos usados

Con la ley de atenuación se determinará la carga máxima por retardo (carga operante) a una determinada distancia teniendo en considerando el diseño de la malla de sostenimiento de los pernos helicoidales para obtener vibraciones por debajo de la velocidad pico partícula crítica de la roca intacta, la caracterización y clasificación del macizo rocoso es la clave para determinar propiedades sísmicas como: La velocidad pico partícula crítica, la velocidad de propagación de la onda, resistencia a la tracción y módulo de deformación dinámico de la roca intacta, que nos permita establecer límites tolerables de diseño para el tipo de roca optando el tipo de explosivo y los retardos a emplear para reducir y controlar el daño inducido en el macizo rocoso y tener labores más estables.

El modelo de atenuación de la vibración de partícula varía según la calidad del macizo rocoso y la potencia del explosivo empleado, el cual nos permite realizar un análisis de regresión para predecir los niveles de vibración a distancias cercanas a la voladura. Así mismo el modelamiento y análisis de vibraciones permite establecer un comportamiento de la velocidad de vibración de las partículas en el macizo rocoso a medida que no alejamos de la voladura (a este fenómeno se le conoce como atenuación).

Mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones se tiene proyectado eliminar la sobre excavación y controlar al máximo el nivel del daño inducido por la voladura de rocas que nos permitirá tener labores más estables y seguras para el desarrollo de las operaciones en interior mina.

## 1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.2.1 Antecedentes internacionales:

Nathan (2015). *The relative effect of charge dimensions on elastic vibration attenuation and blast-induced seismic energy concepts* (tesis doctoral). Universidad de Ciencia y Tecnología, Missouri, Estados Unidos. En una de sus conclusiones refiere, que:

La distancia desde la explosión, el peso de la carga, el confinamiento y la geología son las variables estadísticamente significativas que afectan las vibraciones de las explosiones. Sin embargo, las vibraciones producidas por explosiones de varias cargas de producción probablemente no serán tan afectadas por estas variables como una sola carga estudiada en esta investigación. Estos resultados son más importantes cuando se estudian las vibraciones a pequeñas distancias de la carga.

Vasquez (2013). *Predicción de la ley de atenuación, frecuencia dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladuras a cielo abierto.*(tesis pre pragado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, España.

Indica que a partir de análisis de las leyes de atenuación obtenidas para las dos agrupaciones de voladuras, se establece que la detonación de barrenos semilla genera un mayor nivel de vibraciones en contraste con las voladuras sin la presencia de estos ( con barrenos con cara libre) ello se refleja en el desplazamiento superior de la ley estimada ( $K_{N^{\circ}1-N^{\circ}4} > K_{N^{\circ}5-N^{\circ}10}$ )

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

### 1.2.2 Antecedentes nacionales:

Scherpenisse, Adamson y Díaz (2000). *Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras en desarrollo horizontal* (4° Seminario Internacional de Seguridad Minera). Perú. En una de sus conclusiones menciona, que:

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

Contreras (2009). *Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. En una de sus conclusiones más importantes refiere, que:

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

Sandoval, Espinoza y Peralta (2009). *Modelamiento de vibraciones para el control de daño en el macizo rocoso Unidad Minera Parcoy* (trabajo técnico). 29 Convención Minera PERUMIN, Arequipa, Perú. Entre sus resultados menciona, que:

- El modelamiento de vibraciones en campo lejano nos da una herramienta básica para aproximar y exige una correlación mayor de datos (monitoreo) para acercarse más a las condiciones reales de terreno que nos permitan ajustar los modelos matemáticos iniciales y establecer parámetros de diseño como cargas operantes e intensidades de daño acorde a la realidad.

- El empleo de dinamitas de baja VOD y poder rompedor como el exsablock permite alargar la columna de carga sin tener que incrementar la carga operante empleado como carga continua, generando un corte suave en los contornos de las labores que nos eviten problemas de sostenimiento, considerando que el mayor problema que tenemos en mina no es la fragmentación si no al estabilidad de las cajas por la mala calidad de roca encajonante del yacimiento que va de muy fracturada a intensamente fracturada dificultando el minado.

Rivera, Jiménez, y De La Vega (2012). *Diseño de malla basado en la respuesta sísmica de la roca y reducción del daño inducido al macizo rocoso* (trabajo técnico). Dentro de sus conclusiones menciona, que:

Permitió observar el comportamiento de cada columna de taladro disparado con un determinado retardo, y traducido en VPP (Velocidad pico partícula) desde los más dañinos. Así como muchos taladros que no desarrollan un trabajo efectivo por su mala configuración geométrica o burden muy cercano o alejado, encontrando un él un pico más alto en el diseño usual que fue de 19.79 mm/s y en el diseño replanteado alcanzamos un promedio de 11.84 mm/s. mediante el modelo predictivo y ley de atenuación se logró reducir en 50% el daño severo ocasionado con la voladura al macizo.

Quiroz (2014). *Monitoreo de vibraciones causadas por voladuras en taludes* (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Lima, Perú. En una de sus conclusiones menciona, que:

El monitoreo de vibraciones producto de las voladuras es una técnica que permite evaluar el rendimiento general del diseño de la voladura. Los valores absolutos obtenidos de los niveles de velocidad de partícula hacen posible la obtención de modelos predictivos confiables, con los cuales se pueden evaluar los diversos parámetros de la voladura.

Peña (2014). *Modelamiento, monitoreo y control de vibraciones para evitar daños inducidos por la voladura de rocas de una operación minera superficial* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. En una de sus conclusiones menciona que:

Se debe usar el método de la velocidad pico partícula (PPV), para evaluar y cuantificar las vibraciones inducidas por la voladura de rocas, porque este método ha demostrado dar resultados confiables, para evaluar los diferentes criterios de daños postulados por varios investigadores.

### **1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1 Problema general**

¿Cómo se realiza la reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179 en la Compañía Minera Kolpa S.A.?

#### **1.3.2 Problemas específicos**

- A. ¿Cómo se realiza la construcción del modelo predictivo de vibraciones para reducir el daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones?
- B. ¿Cómo se determina el nivel de daño de los diseños de voladura con el modelo predictivo mediante la ley de atenuación y la función de regresión?
- C. ¿Cómo se reduce el daño en el macizo rocoso aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados?

### **1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1 Justificación teórica**

Desde el punto de vista teórico, la investigación contribuirá al enriquecimiento del conocimiento sobre el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en la reducción del daño en el macizo rocoso; ya que se tiene que en los trabajos actuales de voladura en diferentes compañías mineras no se realiza voladura controlada, el explosivo empleado no es el adecuado en los taladros de contorno para el tipo de roca y la secuencia de salida inadecuada que genera mayor carga operante. Todos los factores antes mencionados conllevan a generar altos niveles de vibración

#### **1.4.2 Justificación práctica**

Desde el punto de vista práctico, la investigación científica es una propuesta de reducción del daño inducido en el macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y

análisis de vibraciones de las voladuras, que al determinar la “Ley de atenuación de vibración de partícula” se podrá dimensionar la carga máxima por retardo explosivo, adicionalmente con una selección adecuada del explosivo a emplearse en los taladros de contorno, modificar el diseño de carga, reducir la carga operante de acuerdo a la secuencia de salida de voladura, todas las variables antes mencionadas permitirán reducir las demoras operativas en sostenimiento, acarreo y transporte.

En la compañía minera Kolpa S.A., es importante reducir la sobrerotura y controlar el daño de creación de nuevas facturas, para tener labores más estables, reducir los accidentes por desprendimiento de rocas, asimismo reducir los costos de sostenimiento, acarreo y transporte de material producto de la sobre excavación y el daño inducido.

### **1.4.3 Justificación metodológica**

Metodológicamente, la presente investigación se justifica en el sentido que se emplean el instrumento reporte de vibración que permitieron comprender cual es el modelo adecuado para reducir el daño en el macizo rocoso determinando que es el modelo Famecorte E-20, el cual genera menor daño en la voladura.

## **1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1 Objetivo general**

Experimentar el proceso de reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179. Compañía Minera Kolpa S.A.

### **1.5.2 Objetivos específicos:**

- A. Construir los modelos predictivos de vibraciones para reducir el daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones.
- B. Verificar el nivel de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión.
- C. Reducir el daño en el macizo rocoso aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados.

## 1.6 INFORMACIÓN GENERAL

### 1.6.1 UBICACIÓN- COMPAÑÍA MINERA KOLPA S.A.

La Unidad Huachocolpa Uno de la Compañía Minera Kolpa S.A (2015), según su estudio geomecánico señala que, geográficamente se ubica en el flanco este de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, en el distrito de Huachocolpa, provincia y región de Huancavelica, a una altitud promedio de 4480 msnm.

Sus coordenadas geográficas son:

Longitud Oeste : 74° 53' 43"

Latitud Sur : 13° 03' 52"

Sus coordenadas U.T.M. son:

Este : 0502,230.55

Norte : 8,555,752.86

Las cotas donde opera la mina están entre 4,230 a 4,650 m.s.n.m.

Geológicamente esta Unidad se encuentra emplazada en volcánicos terciarios constituidos por lavas, aglomerados y Brechas Volcánicas Andesíticas pertenecientes a la formación Caudalosa, abarcando parte de los Cuadrángulos de Huancavelica, Huachocolpa, Conayca y Castrovirreyna.

Figura N° 1: Plano de ubicación Cía. Minera Kolpa S.A.



Fuente: Estudio geomecánico UM Huachocolpa Uno, Cía. Minera Kolpa S.A

### 1.6.2 VÍAS DE ACCESO

El acceso a la unidad minera desde Lima se da por las siguientes rutas que se detalla en la tabla N° 1.

**Tabla N° 1: Rutas de acceso a la UM Huachocolpa Uno, Cía. Minera Kolpa S.A.**

<b>RUTA</b>	<b>DISTANCIA</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>TIPO DE VÍA</b>
1. Lima - Pisco - Huaytará - Rumichaca - Paso de Chonta - Mina	445 km	± 9 horas	Asfaltada y afirmada
2. Lima- Pisco - Castrovirreyna - Paso de Chonta – Mina	462 km	± 10 horas	Asfaltada y afirmada
3. Lima - Huancayo- Huancavelica - Paso de Chonta - Mina	565 km	± 12 horas	Asfaltada y afirmada

**Fuente:** Estudio Geomecánico UM Huachocolpa Uno, Cía. Minera Kolpa S.A

### 1.6.3 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO

#### 1.6.3.1 Geología regional

La zona de estudio se ubica en el cuadrángulo de Huachocolpa, que abarca parte de los departamentos de Huancavelica y Ayacucho, se emplaza en la parte oriental de la Cordillera Occidental, en altitudes que varían de los 4000 a los 5200 msnm.

En los alrededores del proyecto se constituye una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas que abarcan edades desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

El área de estudio se emplaza en rocas volcánicas del Neógeno, correspondientes a la “Formación domos de lava” (Noble, 1973), son primordialmente andesitas de color gris-marrón-amarillento, debido principalmente a la débil alteración argilítica supérgena, su rumbo promedio es N 52° - 65° E y buzamiento 55°. 75° SE su potencia de esta veta es variable: 1 - 4 m.

El relleno mineral es de origen hidrotermal epitermal, emplazado por procesos de relleno de fisura con brecha.

Como principales minerales constituyentes se tienen: esfalerita, galena, cuarzo y pirita; en menor proporción tetraedrita, calcopirita, estibina, baritina, yeso y rejalgar. Estos minerales se presentan con una textura brechoide a orbicular, siendo el cuarzo el

relleno principal a manera de matriz, englobando fragmentos de galena-esfalerita (Valdivia, 1994).

### **1.6.3.2 Geología local**

Soto (2014) señala que en el sector de Bienaventurada son predominantes las andesitas de color gris-marrón amarillentas con alteración argílica supérgena débil a moderada.

Además indica se puede distinguir dos posibles unidades litológicas, una al noroeste de la veta Bienaventurada, donde los volcánicos andesíticos se presentan con bandeamientos de flujo, de rumbo promedio N 65° W y buzamiento 66°- 70° NE y hacia el área de la Veta Sur con rumbo N 50°-60° E y 50°NW de buzamiento.

Asimismo las andesitas presentan alteración supérgena con una coloración pardo-amarillenta.

En interior mina las andesitas son porfiríticas de color gris y gris blanquecinas cuando están fuertemente alteradas. Una segunda unidad litológica corresponde a derrames sub - horizontales de andesitas marrón amarillentas, las mismas que se emplazan al este y noreste de la veta Bienaventurada; al este, las lavas andesíticas están argilizadas supergénicamente y tienen 1.00 m. a 15.00 m. de potencia, con rumbos de N 60° E y buzamientos 15° - 25° SE.

Las andesitas en algunos casos son porfiríticos con horizontes de aglomerados volcánicos de la misma composición, también hay horizontes de derrames lávicos intercalados con aglomerados en las partes altas.

Algunas capas presentan débil disseminación de pirita fina y otras en su matriz tienen fenos de cuarzo. Hacia el NE en la posible continuidad de la veta Bienaventurada, existen intercalaciones de bancos potentes de lavas andesíticas con aglomerados volcánicos grises y en las partes altas al NE, derrames lávicos andesíticos grises de rumbo N 70° E y 10° SE de buzamiento.

### **1.6.3.3 Geología estructural**

León (2016) indica que las secuencias volcánicas que se emplazan en la Unidad de Producción Huachocolpa-Uno, corresponden a una parte de una estructura dómica dentro de la formación “Domos de lava”.

Estas capas en el área de la mina se encuentran suavemente plegadas con rumbo N 30° - 40° W y 10° SW - 15° NE de buzamiento, cortadas por fallas transversales en su mayoría mineralizados.

Como consecuencia de los esfuerzos de comprensión a nivel regional se han originado una serie de fracturas de cizalla y tensión de rumbo N 60° E a N 60° W que es característica tectónica general del distrito y sirvieron para el emplazamiento de los fluidos mineralizantes.

Las estructuras principales de la Unidad de Producción Huachocolpa Uno están formadas por dos sistemas principales.

a. **Fracturas de tensión y cizalla de rumbo N 45° - 85° E.-** Que son los que tienen mayor longitud, con buzamientos entre 42°-85° SE, con inflexiones, cimoides, ramales en diferentes tramos en toda su extensión.

A este sistema pertenece las vetas Caudalosa1, Caudalosa2, Viviana, Silvia Ramal 1, Lucia, Gladis, Bienaventurada, Bienaventurada Sur-1, Bienaventurada Sur 2, Jessica, Elizabeth, Rublo, Peseta, Galena, Katherine, Fortuna.

Es de resaltar que las vetas Caudalosa 2, Rublo, Bienaventurada, Jessica, Elizabeth a diferencia de las demás vetas están asociadas a fallas y presenta clastos subredondeados de volcánicos, lo que nos indica que se produjo fallas de reactivación de movimientos dextrales, con numerosas vetas de cizalla.

b. **Fracturas del sistema este-oeste.-** algunas de gran longitud interceptada en muchos casos por fracturamiento del sistema anterior, el mayor ejemplo de este sistema lo constituye la veta falla Silvia con rumbo E- W y buzamiento promedio 75° S.

Estructuras secundarias de poca longitud de rumbo N 20° a 30° E, posiblemente correspondan a una última etapa de fracturamiento pre-mineral.

El área comprendida entre la falla Silvia y la falla Caudalosa parece corresponder a un graben de poca profundidad

#### 1.6.4 GEOLOGÍA ECONÓMICA

León (2016) nos señala que la Unidad de Producción Huachocolpa Uno; son depósitos de tipo filón, rellenos de fracturas por soluciones hidrotermales; las fracturas han servido de canal y receptáculo para el emplazamiento de menas y gangas.

Las vetas sub paralelas se presentan en forma casi continua por longitudes mayores a 1,000 m. La mineralización económica en la mayoría de las vetas está en clavos irregulares en longitud, profundidad y potencia, separados entre sí por zonas de adelgazamiento y/o empobrecimiento.

Es excepcional la veta Bienaventurada que al lado Este en profundidad la longitud del clavo mineralizado pasa los 1,500 metros, con tendencia de ampliarse en los niveles inferiores, con pequeños anticlavos en la parte central y sur oeste; este mismo comportamiento no ocurre con la Veta Jessica y Elizabeth que son estructuras más falladas, irregulares e inestables que en la actualidad se explora, desarrolla y explota en forma muy limitada.

La mayoría de las vetas se presentan en forma de típico “Yacimiento en Rosario” que es característico de la mayoría de los depósitos filonianos en volcánicos Terciarios del Perú. Por su temperatura de formación, el yacimiento es clasificado como mesotermal a epitermal de plomo-zinc con contenido de plata y cobre.

#### 1.6.5 HIDROGEOLOGÍA

Las precipitaciones son de carácter convectivo, con una media anual de 1,013.6 mm/año, las que se producen en los meses de diciembre a marzo, y los de menor intensidad se presentan entre mayo a Setiembre. La temperatura media es 4.5°C, con máximas que sobrepasan los 7.2°C sobre todo en verano, y la mínima por debajo de 0°C, durante el invierno.

El mapeo hidrogeológico indica escasa descarga de agua subterránea a superficie; manantiales de bajo caudal en su gran mayoría diseminados y esporádicos bofedales localizados a media ladera en ambas márgenes del río Escalera.

Se identificaron cinco unidades hidrogeológicas, entre ellas; un depósito aluvial aguas abajo de la zona Industrial, dos acuitardos en depósitos morrénicos y fluvio-glaciares del piso de valle, las andesitas fracturadas del volcánico Manchaylla (0.1

a 0.5 m/d) calificado como acuitardo, y se considera acuífugo a las andesitas y brechas del volcánico Tinquí ( $1.0E-3$  a  $1.0E-2$  m/d).

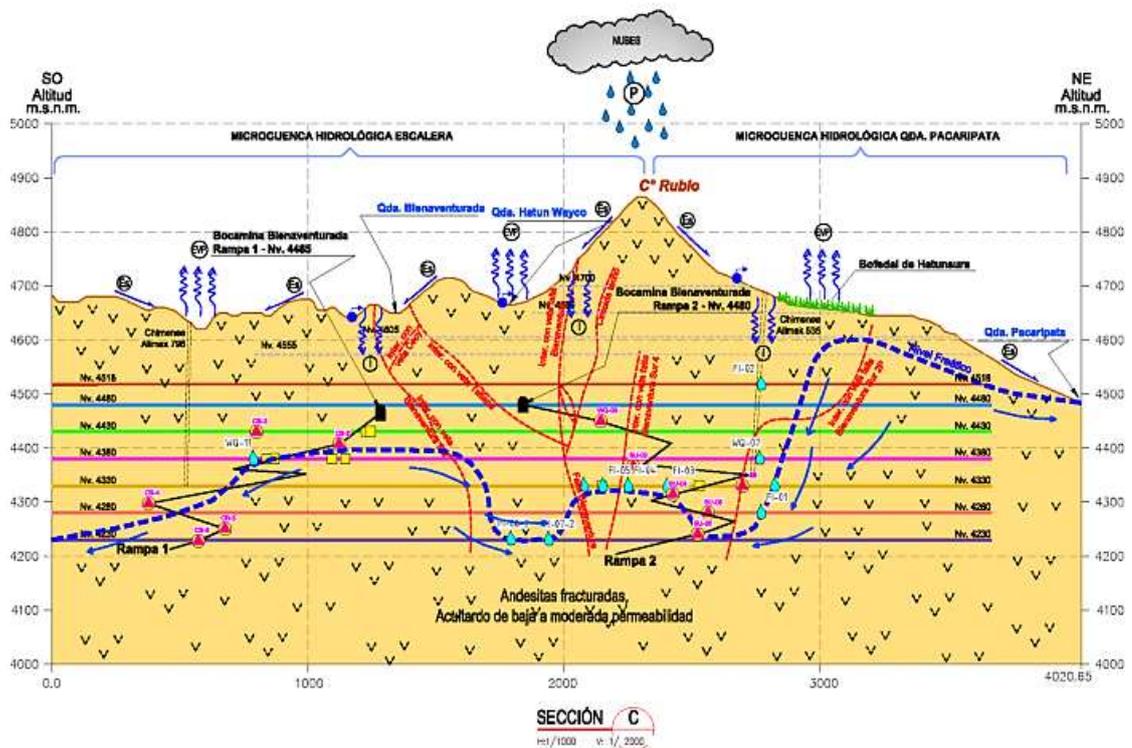
La recarga y flujo de aguas subterráneas se produce dentro de un “medio hidrogeológico fracturado”, la que se produce recarga directa en chimeneas y estructuras tectónicas interconectadas a fallas y vetas. Las fracturas del volcánico Manchaylla constituyen el medio de circulación principal para la descarga de manantiales diseminados y de bajo caudal.

En la mina subterránea Bienaventurada sus aguas provienen principalmente de los niveles, Nv 4330 con 15.1 l/s, el Nv 4380 con 14.4 l/s, seguido por el Nv 4430 con 0.6 l/s, además del Nv 4230 con 12.7 l/s, y el resto proceden de otros niveles.

Se estima que la recarga promedio del área tributaria es equivalente al caudal base del río Escalera, lo cual varía aproximadamente entre 90 - 120 l/s, y representa a una tasa de recarga promedio de 3.7 l/s/km<sup>2</sup> o 130 mm/año, indicando que la microcuenca tiene poca retención, la mayor parte se escurre en la época húmedas.

El impacto a los caudales en manantiales durante la etapa de explotación será negativo y de baja magnitud, por ser fuentes estacionales, sin embargo, el impacto ocasionado al deprimir el nivel de agua subterránea para la extracción de mineral, será “moderado” y “local”, por estar emplazado en una unidad de baja conductividad hidráulica.

Figura N° 2: Modelo hidrogeológico conceptual interior mina



Fuente: Estudio Geomecánico UM Huachocolpa Uno, Cía. Minera Kolpa S.A

## 1.6.6 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

### 1.6.6.1 Descripción del método

Vargas (2017) indica que el método de minado por Corte y Relleno Ascendente Mecanizado (C&RA), se caracteriza en hacer rebanadas horizontales de variada longitud con alturas de corte de acuerdo a la longitud de perforación. Lo relevante de la aplicación de éste método en la Mina Bienaventurada está en la perforación vertical (realce) con maquina Jackleg y barrenos de 8 pies, el cual requiere de una altura de perforación de 2.40 m y 3.40 m con Mini Jumbo, luego se realiza el carguío del explosivo y disparo obteniendo altura de corte de 2.0 m, en seguía se procede con el desatado y sostenimiento del tajo, para luego posteriormente se realiza la limpieza del material volado, finalizado la limpieza se rellena el tajo con desmorte una altura de 2.0 m .

Para ganar productividad se tienen dos frentes de producción que son ciclados constantemente, los cuales son accedidos por medio de una rampa operativa que conecta en la parte central de la veta obteniendo frentes en el ala Este y Oeste.

### 1.6.6.2 Diseño de mina

La mina cuenta con una estructura principal llamada Veta Bienaventurada, con presencia de splits al Este, separándose hasta en 3 vetas como ocurre en el Nivel 4518.

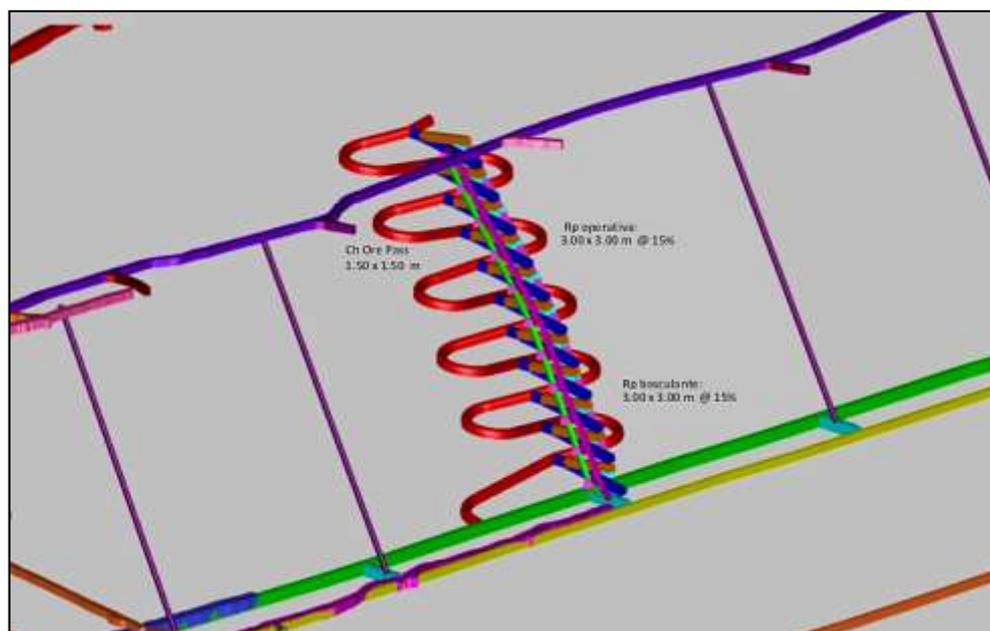
De acuerdo al diseño geomecánico, el By Pass debe estar a una distancia no menor de 20 m de la veta. A partir de este By Pass y en la zona central del tajeo se diseña una rampa operativa positiva que servirá como preparación y acceso al tajeo, a partir de esta rampa operativa se diseñan las rampas basculantes dirigidas a la veta y que serán rebatidas en cada corte o voladura del tajeo, cada rampa basculante sirve para explotar 12 metros de altura en el tajeo (6 cortes).

La longitud de cada tajeo es de 400 m, altura de 100 m. La pendiente de la rampa operativa y las rampas basculantes es de 15%. A cada lado de la rampa basculante se tiene la chimenea de Ore Pass y al otro lado la chimenea de Fill Pass, las cuales estarán conectadas desde la rampa basculante mediante ventanas.

Las dimensiones de la rampa operativa, rampa basculante son de 3.0 m × 3.0 m, las ventanas base de las chimeneas Ore Pass y Fill Pass son de 3.0 m × 3.0 m × 6.0 m. La chimenea Ore Pass son de 1.50 m × 1.50 m, el Fill Pass son de 2.4 m × 1.20 m y será levantada conforme avanza el minado.

Las chimeneas de servicio, de ventilación y acceso se encuentran espaciadas cada 100 m y comunicadas al tajeo mediante ventanas de 2.40 m × 2.40 m × 6.0 m, estas chimeneas tendrán la siguiente sección 2.40 m × 1.20 m × 100 m

La distribución de los servicios de aire y agua tendrán líneas troncales por chimeneas. El relleno para los tajeos provendrá de labores de avance y preparación en desmonte, así como el relleno mecánico (relave clasificado) proveniente de la Planta Concentradora. (León, 2016)

**Figura N° 3: Modelo hidrogeológico conceptual interior mina**

**Fuente:** Plan de Minado UM Huachocolpa Uno, Cía. Minera Kolpa S.A., 2016

### 1.6.6.3 Labores de preparación y desarrollo

León (2016) nos señala lo siguiente:

- **Labores de desarrollo:** Esta operación se realizará para hacer factible la explotación de mineral contenido en el yacimiento, que consiste en los trabajos previos para establecer los accesos desde la superficie hasta a las reservas económicas.

Al confirmar los recursos minerales por tamaño de la mineralización y sus respectivas leyes, se desarrolla la mina mediante una rampa negativa (-12%) de 4.00 m x 4.00 m de sección. A partir de la rampa se interceptar la veta según se acuerdo a diseño de los niveles principales, se realiza una labor tipo crucero de 4.0 m x 4.0 m con una gradiente de (+) 1% y una longitud promedio de 40 m, del cual se diseñan el By pass de 4.0 m x 4.0 m de sección y con una gradiente favorable hacia la Poza de Bombeo principal y paralelos al rumbo de la veta.

Todas las labores verticales de Ventilación son ejecutadas en desmote y con Equipo Alimak de longitudes cortas (100 m).

- **Labores de preparación:** Los trabajos de preparación consisten en diseñar en el terreno la forma de cómo extraer el mineral mediante un método de minado (Corte y Relleno Ascendente Mecanizado), para esto se preparan rampas operativas positivas de acceso de 15% de gradiente desde el By Pass respectivo.

En la cota de diseño se ingresan con rampas basculantes que serán rebatidas máximo en 12 m, equivalentes a 6 cortes con maquina Jack Leg (2.0 m/corte). La Rampa operativa continúa su preparación hasta la siguiente cota de diseño para iniciar la siguiente Rampa basculante que entrara en negativo 15% para comunicar al último corte dado con la rampa basculante anterior ya rebatida, secuencialmente se ejecuta las labores de preparación hasta comunicar con el nivel superior.

Las ventanas base del Fill Pass y Ore Pass serán rebatidas también, y la chimenea de Ore Pass levantadas a medida que avanza el minado.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### 2.1 MARCO TEÓRICO

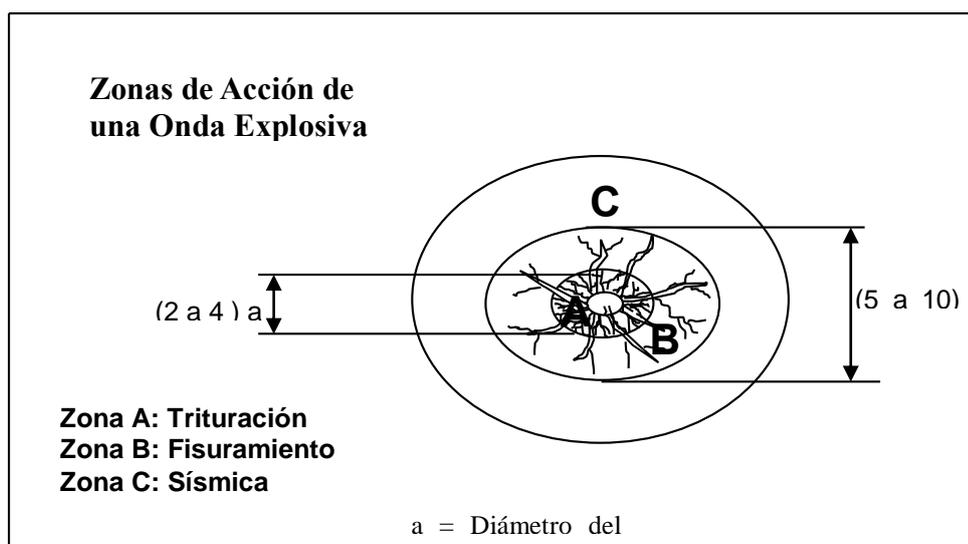
##### 2.1.1 FUNDAMENTOS DE VIBRACIÓN POR VOLADURA

International Society of Explosives Engineers (ISEE, 2008) nos señala que cuando se detona una carga explosiva en la roca, instantáneamente la carga se convierte en un gas de presión intensa. La onda explosiva se desplaza a través de la roca, triturándola en un radio aproximado de dos veces el radio de la perforación original, dependiendo de la resistencia de la roca. En varios tipos de roca, la cavidad que se forma tiene alrededor de cuatro veces el volumen del taladro original alrededor de la roca. A medida que la cavidad se expande, empiezan a formarse una serie de grietas radiales; algunas de estas prevalecen mientras que las demás dejan de expandirse. Los gases en expansión continúan trabajando en la roca, propagando las grietas y moviendo la roca hacia afuera y hacia arriba.

Esta actividad se realiza en la zona de trabajo planeado en la roca (llamada a veces la zona no elástica, o la zona de cráter), rompiéndola y moviéndola para la excavación. Dicha actividad consume la mayor parte de la energía explosiva, pero una pequeña porción sobrante, se extiende pasando la zona de trabajo planeada en forma de vibraciones elásticas del suelo y ondas de aire.

Cuando los pulsos pasan el perímetro de la zona de la roca dañada, toman en nombre de ondas elásticas, lo cual significa que no producirán más daño en la roca y no habrá ningún desplazamiento permanente de partículas de la misma.

**Figura N° 4: Zonas de acción de una onda explosiva**



Fuente: ISEE, 2008.

Hagan (1977) estima que el 15% de la energía total generada en la voladura es aprovechada en los mecanismos de fracturamiento y desplazamiento de la roca. Según Rascheff y Goemans (1977) han establecido que la energía aprovechada varía entre el 5% y 50% de la energía total dependiendo del tipo y la clase de explosivo utilizado.

**Tabla N° 2: Distribución de energía del explosivo en diferentes eventos**

EVENTO	%
Desmenuzamiento de la pared del taladro	5
Formación de fractura (radial y de tensión)	10
Corte	5
Calor y luz	20
Movimiento de la masa rocosa	15
Vibración del terreno	30
Presión de aire	15
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Fuente: Ames, L.V.A., 2008.

### 2.1.1.1 La naturaleza cíclica de las vibraciones

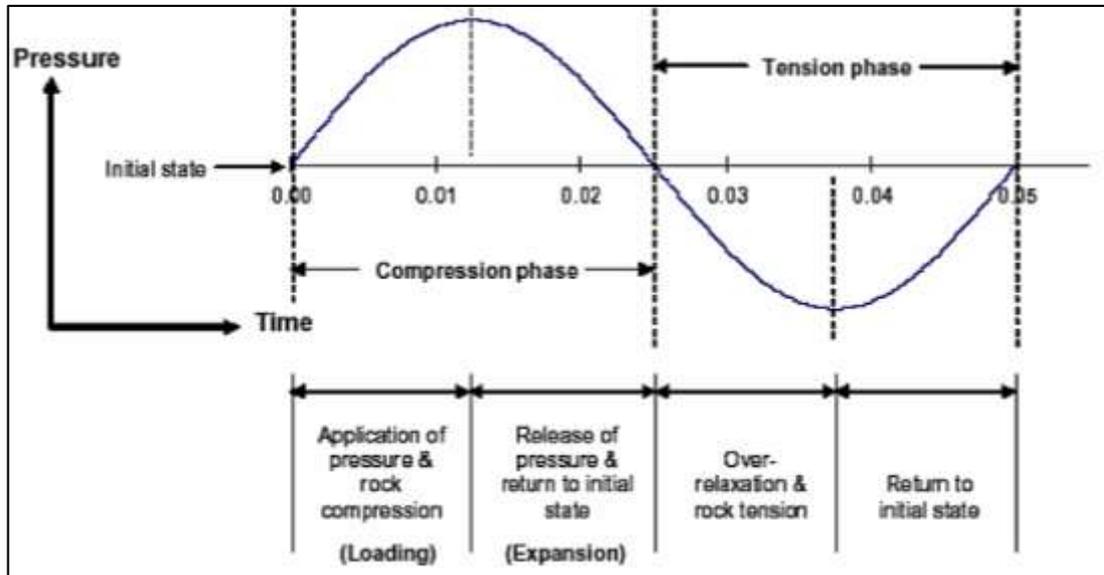
Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex (CINTEX, 2005) indica las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso

de fases alternativas de compresión y tensión. Con respecto a las vibraciones por voladuras inducidas en la roca, generalmente se considera que las vibraciones son producidas por la detonación del explosivo.

Consideremos un caso simple, de un solo taladro de voladura con una pequeña carga de explosivo (Largo = 6 \* diámetro, aproximando a una carga esférica). Cuando la carga es detonada, la masa rocosa alrededor de la carga es inmediatamente sometida a compresión. Esto produce la componente de compresión del ciclo de vibraciones.

Después de la fase de compresión, la roca sufre una fase de expansión en un intento a volver a su estado original. Ya que todos los materiales se comportan, en mayor o menor medida, como un resorte, una vez que la fuerza de compresión es removida, la roca se relaja y vuelve a su estado original pasando más allá de ésta. Como la roca se mueve más allá de su posición original, esto crea una fase de tensión del ciclo de vibraciones.

**Figura N° 5:** *Ciclo de esfuerzo de compresión, seguido de tensión sobre la roca*

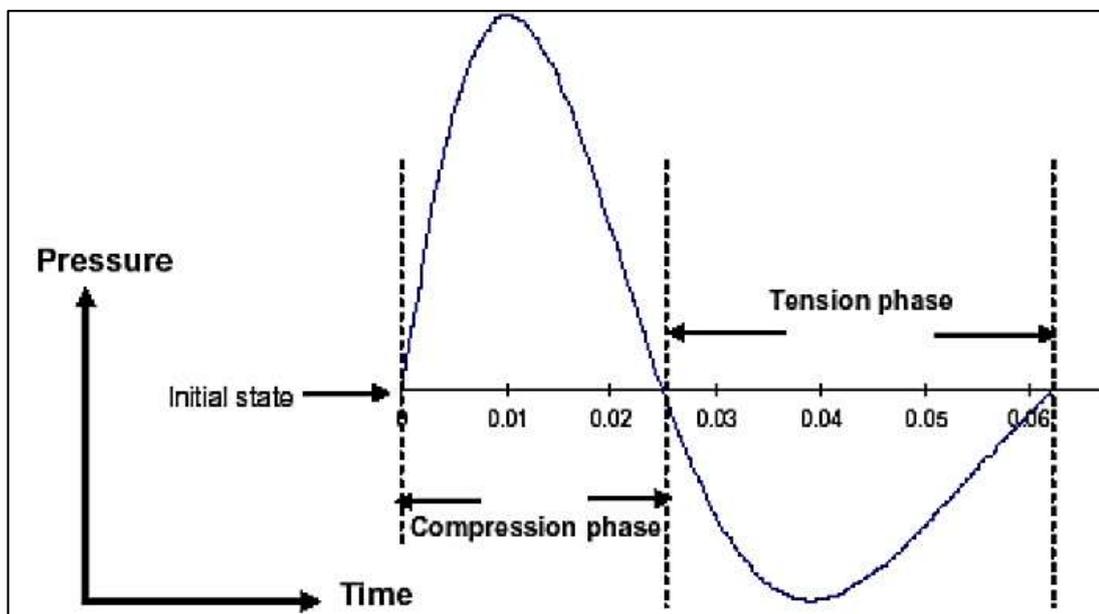


**Fuente:** Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex – CINTEX, 2005

CINTEX (2005) asimismo indica ya que la roca responde como un resorte al paso de las ondas de vibraciones, (el módulo de Young representa la rigidez del resorte), el ritmo al cual la roca se relaja puede ser diferente al ritmo a la cual es sometida la roca por un pulso de corta duración, que genera la detonación de una carga explosiva. En

este caso, no es inusual ver, en rocas débiles con módulo de Young relativamente bajos, que las fases de compresión y tensión tienen diferentes amplitudes y diferentes duraciones.

**Figura N° 6:** *Presión y relajación no simétrica a un elemento de roca.*



**Fuente:** Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex – CINTEX, 2005

## 2.1.2 PROPIEDADES DE LAS ONDAS DE VIBRACIÓN

CINTEX (2005) señala las siguientes propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones:

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

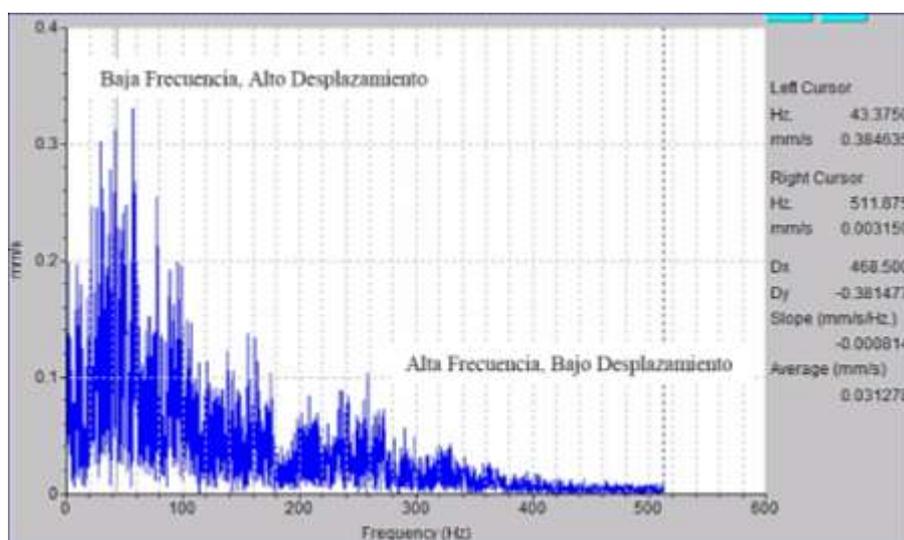
### 2.1.2.1 Frecuencia de las vibraciones

La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión. El factor que tiene

una gran influencia en esto son las dimensiones de las cargas, columnas grandes de carga tienden a producir bajas frecuencias. Sin embargo, otros importantes factores incluyen los módulos de la roca y la razón de carga producida por la detonación (es decir la velocidad de detonación). La frecuencia dominante es considerada generalmente como el inverso del tiempo del ciclo completo.

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

**Figura N° 7: Comportamiento de la frecuencia y desplazamiento de las vibraciones.**

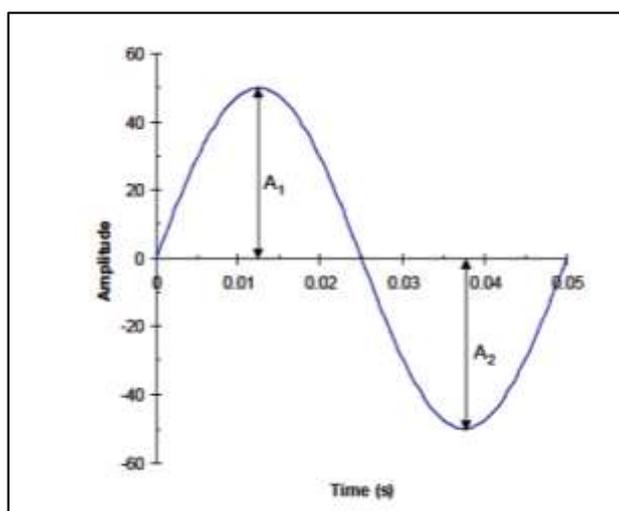


Fuente: Contreras, P.W.J, 2009

### 2.1.2.2 Amplitud de las vibraciones

La amplitud de las vibraciones es una medida de su “Fuerza” y la energía de una onda de vibraciones es proporcional al cuadrado de su amplitud. En el caso de una vibración continua, en la cual cada ciclo de propagación tiene la misma forma, un valor único es suficiente para describir la “fuerza” de la vibración o la amplitud, es decir  $A_1$  o  $A_2$ , en la figura N° 8. El signo de las amplitudes indica la dirección del movimiento.

**Figura N° 8: Amplitudes de Onda,  $A_1$  y  $A_2$**



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex – CINTEX, 2005

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

Las unidades de amplitud dependen del tipo de sensor utilizado para detectar el paso de la onda cíclica de esfuerzo. El paso de las ondas de vibraciones resulta en un desplazamiento real de la partícula, y es posible medir ese desplazamiento real, la velocidad de la partícula en movimiento, o su aceleración. Ya que la frecuencia del movimiento de la partícula puede ser alta (cientos de Hertz), en la práctica es fácil encontrar y usar dispositivos que tengan una adecuada respuesta a la frecuencia y sensibilidad para medir velocidad (geófonos) o aceleración (acelerómetros). Debido a que el desplazamiento, velocidad y aceleración están relacionados, la medida de cualquiera de éstas, teóricamente podría permitir el cálculo de las otras dos. Los

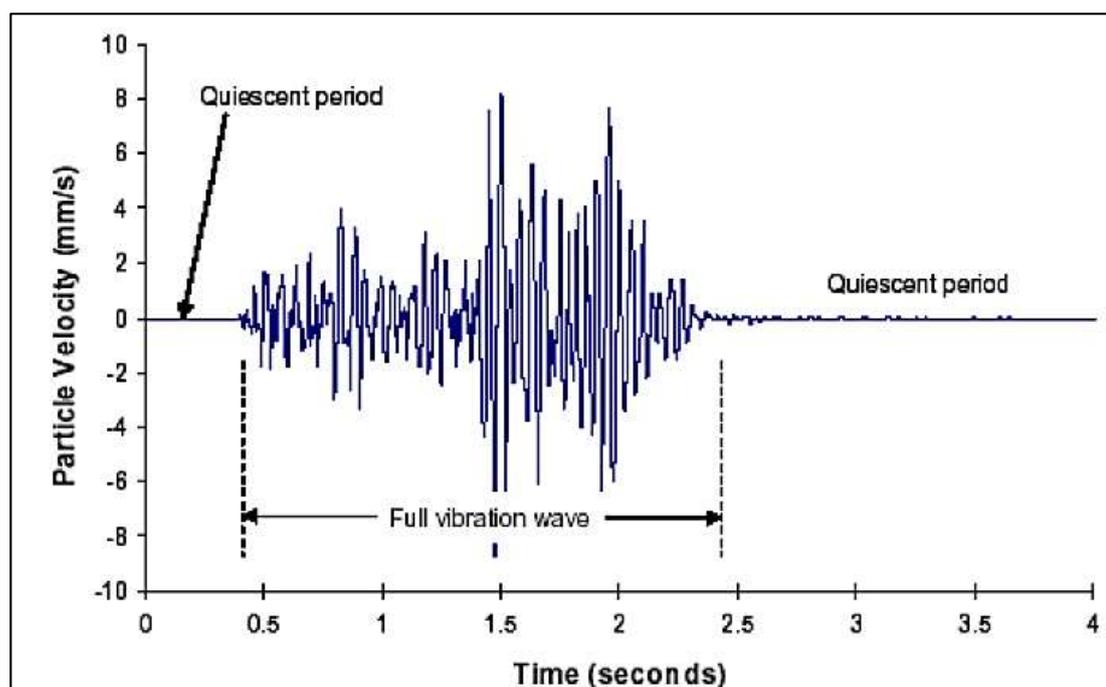
dispositivos más baratos y fáciles de usar para medir las vibraciones son los geófonos, y con estos dispositivos las vibraciones son medidas en términos de velocidad de partículas y tiene la unidad de mm/s (pulgadas/s en USA).

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

### 2.1.2.3 Duración de las vibraciones

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

**Figura N° 9: Onda completa de vibración**



**Fuente:** Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex – CINTEX, 2005

La onda total de vibración, que es medida a partir de una voladura de producción, es el resultado de pulsos individuales producidos por cada taladro de voladura combinados todos en el punto de medición. El modelo en el cual ellas se combinan para formar la onda resultante variará de acuerdo a la dirección y distancia de la voladura, por lo tanto, dos registros de la misma voladura no producirán la misma onda de 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 taladro). 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 taladro detonado al punto de medición. La duración de la vibración se incrementa con el aumento de la distancia de propagación, ya que, en grandes distancias, la refracción y reflexión de la onda se combinan con la onda directa, y un lento movimiento de ondas de superficie y ondas de corte comienzan a aumentar, separadas del rápido movimiento de las ondas de cuerpo. A 500 metros la onda de vibración puede ser de 500 a 1000 ms más larga que la duración de la voladura.

#### **2.1.2.4 Longitud de onda de las vibraciones**

La longitud de onda de una vibración es la distancia recorrida por la onda de vibración durante un ciclo completo de compresión y tensión, es decir un Periodo de la Onda.

La longitud de onda es un factor importante a considerar durante el modelamiento, y durante discusiones del potencial daño que pueden causar las ondas de vibraciones sobre las estructuras de la roca. La longitud de onda,  $\lambda$ , se puede calcular a partir de una onda de vibración con una frecuencia única,  $f$ , (es decir una onda armónica simple) por la fórmula  $\lambda = V_p / f$ , donde  $V_p$  es la velocidad de propagación de la onda P.

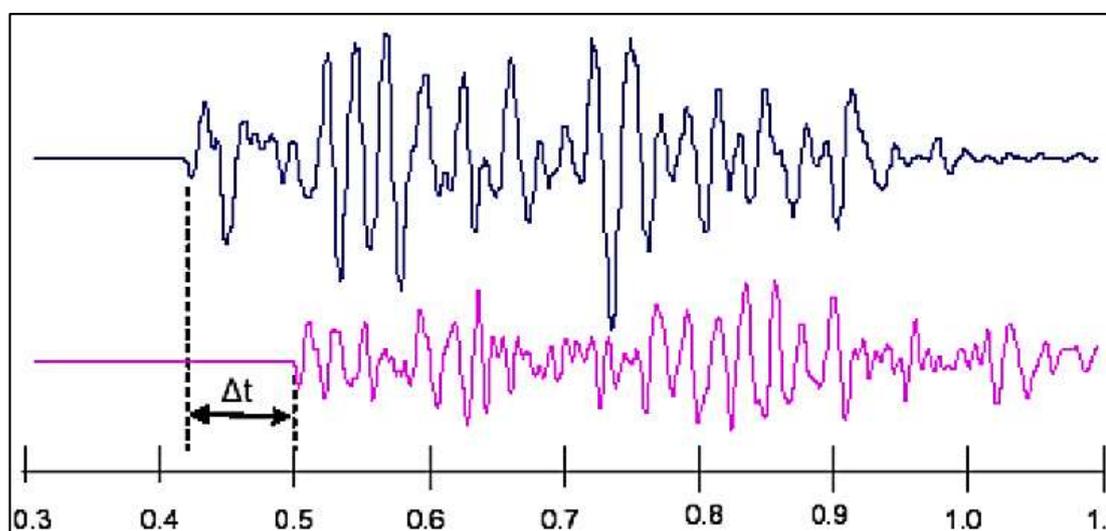
#### **2.1.2.5 Velocidad de propagación de la onda**

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.

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

En la figura N°10 se muestra, los geófonos están separados 300 metros, y la diferencia de tiempo de arribo,  $t$ , es de 80 ms, correspondiendo a una velocidad de propagación de 3.750 m/s. La velocidad de propagación de onda P,  $V_p$ , se calcula usando la ecuación simple  $V_p = s/t$ , donde  $s$  es la distancia de propagación y  $t$  es el tiempo de propagación.

**Figura N° 10: Estimación de la velocidad de propagación usando dos geófonos separados a 300 m.**



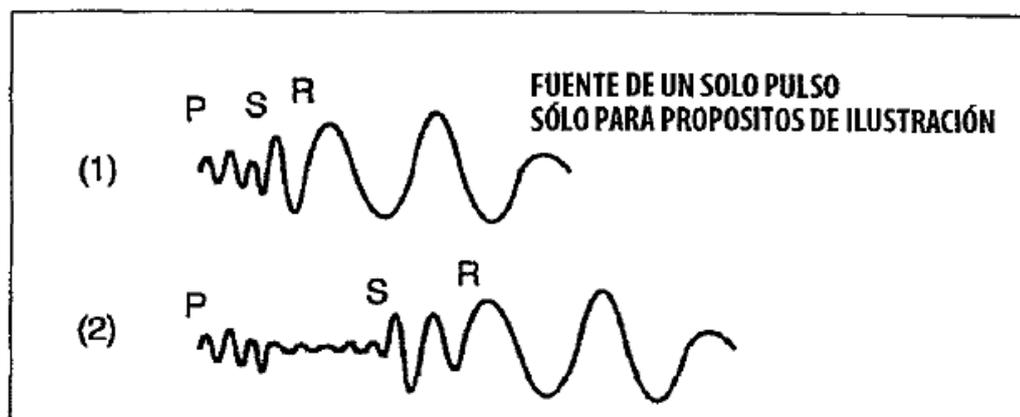
Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex – CINTEX, 2005

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

### 2.1.3 CLASES DE ONDAS EN VIBRACIONES

ISEE (2008) precisa que cuando se detona una carga explosiva en un medio sólido como la roca, se genera un grupo de ondas. Estas ondas tienen diferentes movimientos de partícula y se desplazan por el material a diferentes velocidades de onda, además de tener características diferentes que afectan la forma en las estructuras y personas responden a ellas. Las ondas de un grupo se conocen como “Ondas de Cuerpo” y están compuestas de ondas compresionales y ondas transversales, las cuales se desplazan a través del cuerpo del material, como también por la superficie. Las ondas de otro grupo se conocen como “Ondas Superficiales”, las cuales también pueden tomar diferentes formas, pero solo se pueden desplazar por la superficie. Los distintos tipos de onda viajan a velocidades diferentes, de manera que se dispersan a medida que se van alejando del punto de origen. A grandes distancias, las diferencias en los tiempos de llegada pueden hacer una diferencia notable en la duración de la vibración percibida. El gráfico tal como muestra ilustra sismogramas hipotéticos que ilustran la propagación de las ondas a medida que estas se desplazan lejos del origen.

**Figura N° 11: Comportamiento de los tipos de onda en función a la distancia.**



Fuente: Sismógrafo hipotético que ilustran las formas de la onda P, la onda S y la onda R, A; donde 1) es la distancia intermedia y 2) gran distancias. Adaptado del Manual del Especialista en Voladura 17ª Edición, ISEE, 2008.

### 2.1.4 TIPOS DE ONDAS EN VIBRACIONES

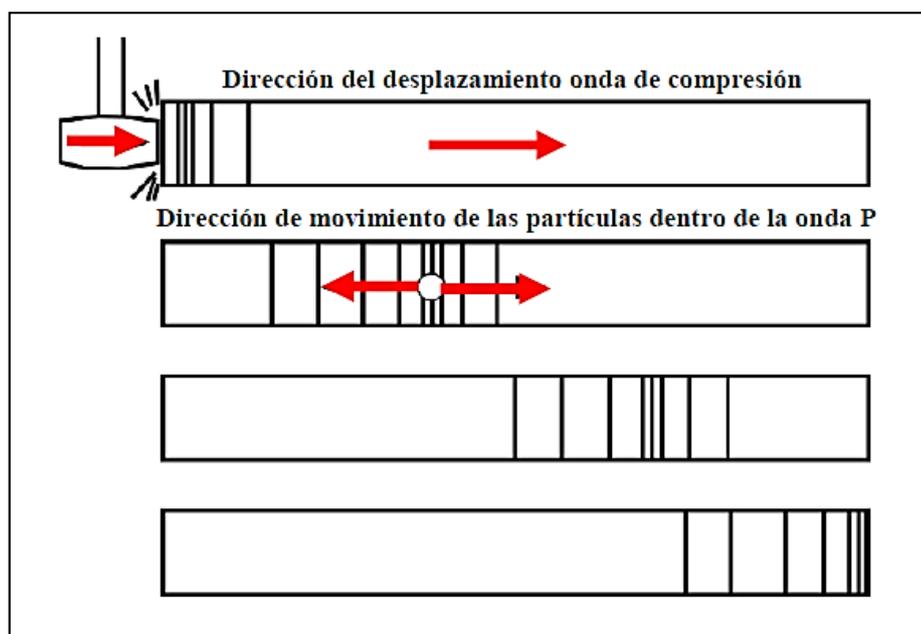
#### 2.1.4.1 Ondas compresionales u ondas P

ISEE (2008) indica es la más rápida de estas y la primera en llegar es una onda compresional u onda P (en los inicios de la sismología, se llamaba “Primare” en latín, es decir, onda primaria). Se trata del mismo tipo de onda que transmite el sonido a través

del aire o del agua. En diferentes tipos de rocas viajan alrededor desde aproximadamente 1830m/s hasta alrededor 6100m/s. A menudo las ondas P tendrán la frecuencia más alta y el desplazamiento más corto.

Vásquez (2013) señala que la onda que viaja a mayor velocidad, deformando volumétricamente la roca en la dirección de su propagación. A manera de ilustrar el movimiento que experimenta las partículas dentro de la onda P, consideramos una varilla de acero la cual es golpeada en un extremo, dando lugar al movimiento de las partículas de la barra hacia adelante y atrás mientras que el pulso de compresión viaja a lo largo de la barra; es decir, las partículas de la onda se mueven en la misma dirección de la onda. El movimiento de la onda P se ilustra en la figura N° 12.

**Figura N° 12: Movimiento de las partículas dentro de la onda P**



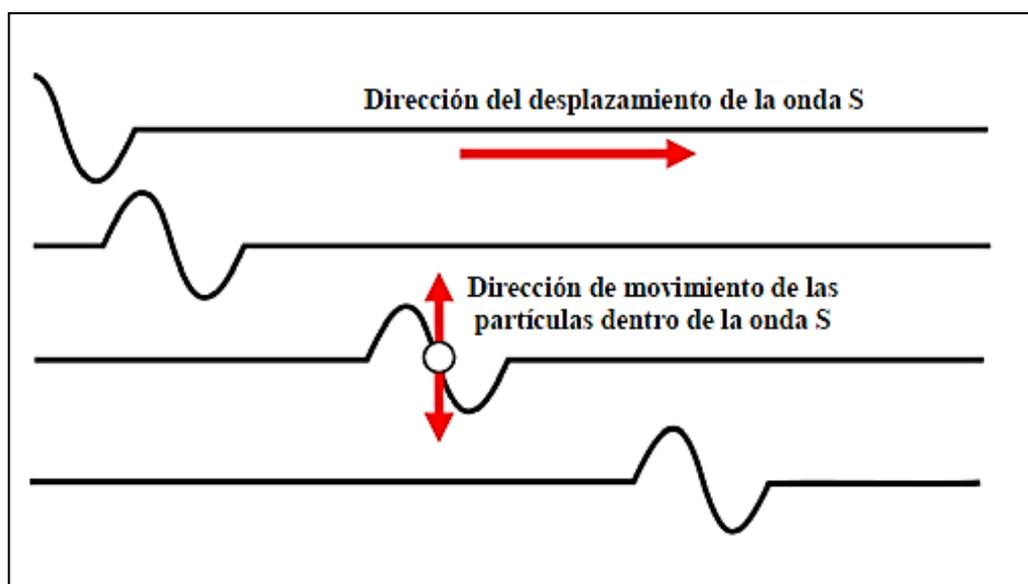
Fuente: Vásquez, S.N.Y. – 2013

#### 2.1.4.2 Ondas transversales u ondas S

ISEE (2008) asimismo indica que luego de las ondas P viene las ondas Transversales, u ondas S (en los inicios de la sismología, la S iba por “second” en latín, es decir, por llegadas secundarias) estas ondas se desplazan a aproximadamente  $\frac{3}{5}$  de la velocidad de las ondas P. Además de las ondas S generalmente tendrán frecuencias más bajas y desplazamientos más largos que las ondas P.

Vásquez (2013) precisa que tras la onda P, se propaga la onda S. Esta onda provoca una deformación de la masa rocosa perpendicular (transversal) a la dirección de su propagación, sin modificar el volumen de los materiales a su paso. El movimiento de las partículas dentro de la onda S puede ser ilustrado mediante la agitación de una cuerda por un extremo, dando lugar al desplazamiento de la onda a lo largo de la cuerda, sin embargo, las partículas dentro de la onda se mueven perpendicularmente a la dirección de movimiento de la onda. El movimiento de la onda S se ilustra en la figura N° 13 y 14.

**Figura N° 13: Movimiento de las partículas dentro de la onda S**



Fuente: Vásquez, S.N.Y. – 2013

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

### **2.1.4.3 Ondas rayleigh u ondas R**

Vásquez (2013) nos indica que es la más importante y la más común de las ondas superficiales (llamada así en honor a Lord Rayleigh quien fue primero en describirla

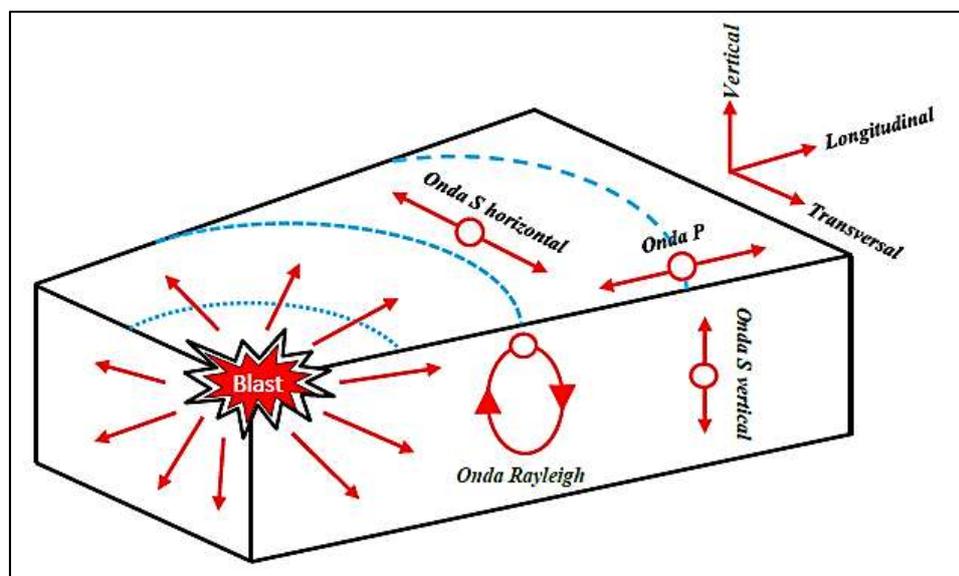
matemáticamente). Normalmente, las ondas Rayleigh se desplazan alrededor de 0.9 veces de la velocidad de las ondas S.

El movimiento de las partículas dentro de la onda es del tipo elíptico retrógrado en un plano vertical en el mismo sentido que la dirección de propagación. El movimiento de la onda S se ilustra en la figura 13.

#### 2.1.4.4 Ondas love u ondas L

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

**Figura N° 14: Movimiento de las partículas dentro de diferentes tipos de onda**



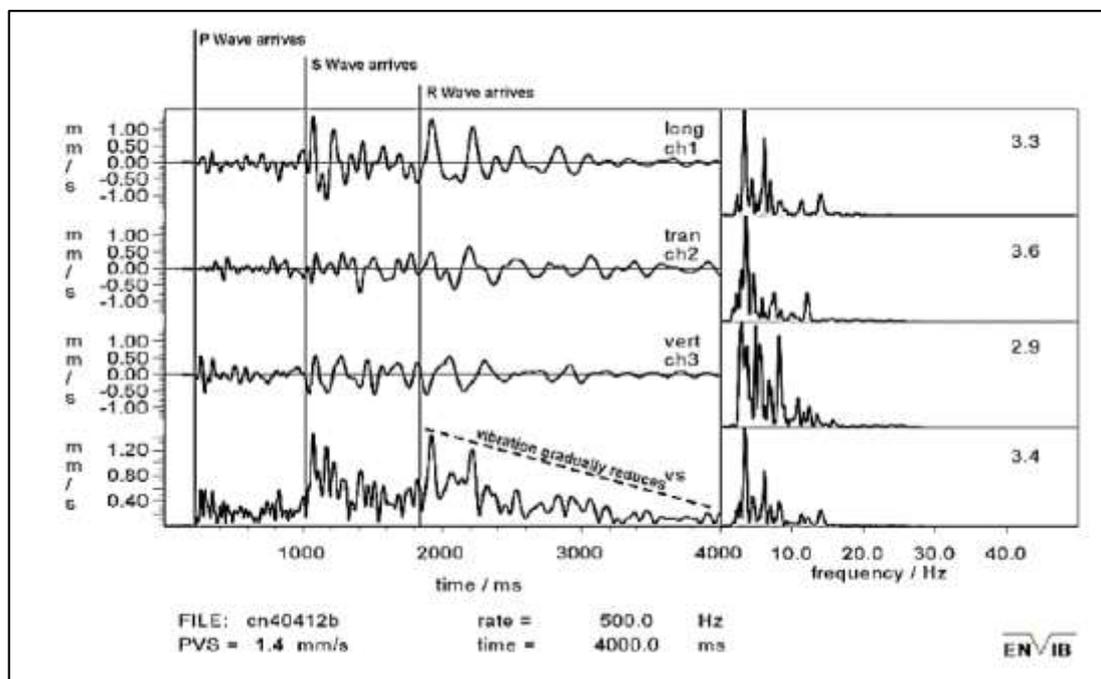
Fuente: Vásquez, S.N.Y. – 2013

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

Vásquez (2013), diversos estudios realizados han demostrado que la energía sísmica de alta frecuencia es absorbida más rápidamente que la de baja frecuencia, de modo que la energía contenida en las ondas sísmicas estará más concentrada en intervalos correspondientes a bajas frecuencias a medida que nos alejemos del foco generador. A pesar de todo lo dicho, hay que tener presente que en los análisis de

vibraciones no suele llegarse a distinguir entre si los diferentes tipos de ondas que llegan al geófono (Pascual de Blas, 2000).

**Figura N° 15: Registro de llegada de las ondas P, S y R para la detonación de un único barreno (Richard & Moore)**

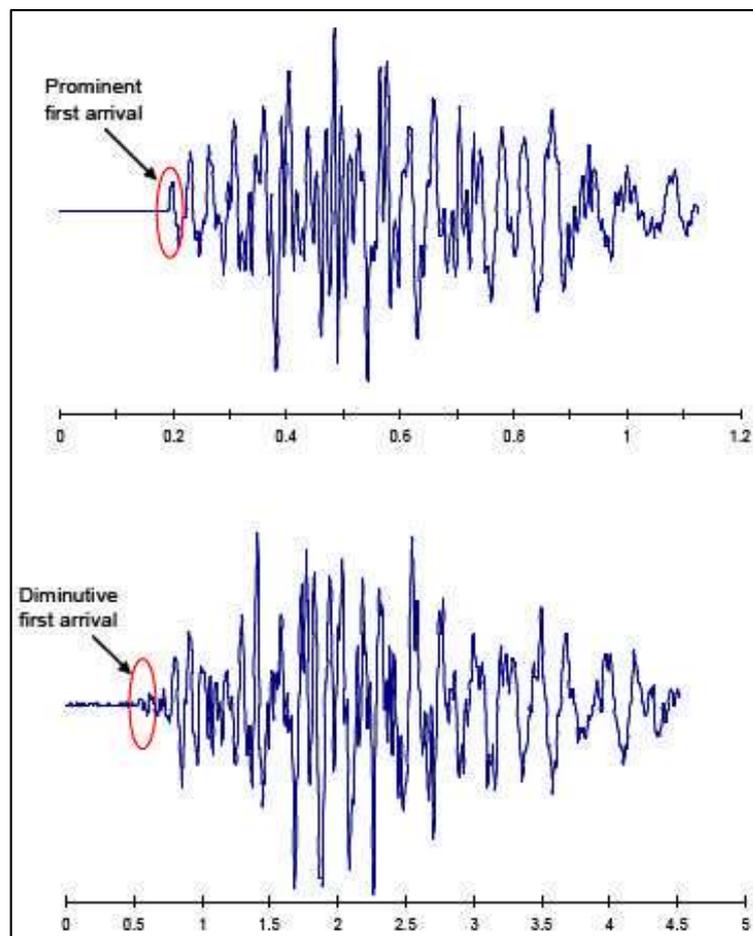


Fuente: Vásquez, S.N.Y. – 2013

### 2.1.5 PRIMER ARRIBO DE ONDAS

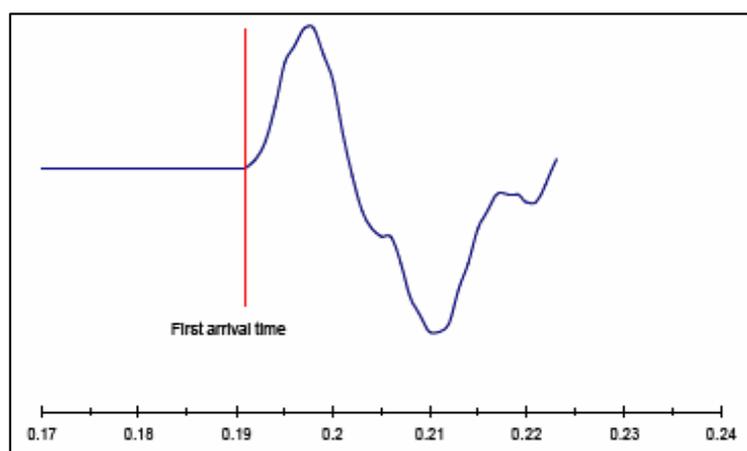
CINTEX (2005) indica que la primera onda que llega al monitor será siempre la onda P, ya que ésta, de todos los tipos de onda, es la que viaja más rápido (entre 30 y 50% más rápido que la onda S). Sin embargo, ésta puede no ser la onda con la mayor amplitud, de tal manera que no siempre es fácil de identificar. La siguiente figura presenta dos ondas de vibraciones, donde la primera indica un arribo destacado de la onda siendo su tiempo de llegada y amplitud fácil de determinar. El segundo diagrama muestra una diminuta llegada de la primera onda, donde se dificulta determinar el tiempo de arribo y su amplitud.

**Figura N° 16:** *El primer arribo de la onda P puede ser difícil de identificar*



Fuente: Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por voladuras, Análisis y Modelamiento, CINTEX, 2005

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

Figura N° 17: *Momento de arribo de la onda*

Fuente: Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por voladuras, Análisis y Modelamiento, CINTEX, 2005

### 2.1.6 CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO

Vásquez (2013), este se caracteriza por la propagación de vibraciones, no existe movimiento efectivo de masas ni de volúmenes, tampoco se realiza transporte de materia, si no tan solo consta de transferencia de energía des un punto a otro.

El movimiento vibratorio se asemeja a un movimiento sinusoidal armónico, definido por la siguiente ecuación:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) = A \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1)$$

Donde:

- x : es el desplazamiento en unidades de longitud.
- t : es el tiempo en segundos
- A : es la amplitud, máximo valor que alcanza la oscilación.
- f : es la frecuencia natural del movimiento, en hertzios
- $\omega$  : es la frecuencia angular del movimiento ( $\omega = 2 \pi f$ ), en radianes/s
- $\varphi$  : es la fase inicial e indica el estado de oscilación o vibración (o fase) en el instante  $t=0$  de la partícula que oscila.

La velocidad (v) y la aceleración (a) son respectivamente la primera y segunda derivada de la ecuación anterior

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f \cdot A \cos \omega t = \omega \cdot A \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

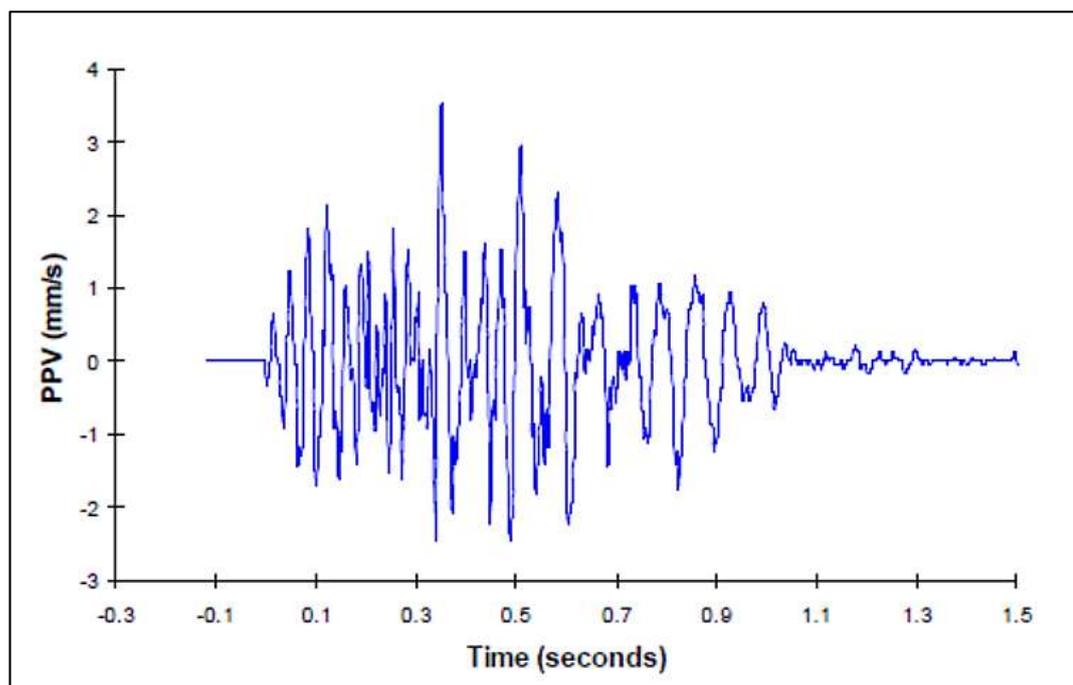
$$a = \frac{dv}{dt} = -(2\pi f)^2 \cdot A \sin(\omega t) = \omega^2 \cdot A \sin(\omega t + \pi) \quad (3)$$

Se puede apreciar que el desplazamiento, la velocidad y la aceleración están desfasados en  $\pi/2$  sucesivamente.

### 2.1.7 CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES POR VOLADURA

CINTEX (2005) señala que en la práctica las vibraciones por voladura se presentan como sinusoidales, pero no pueden ser bien descritas por una ecuación armónica única que involucre una frecuencia única, como se ilustra en la figura siguiente, obtenida a partir de un registro de voladura de 120 taladros.

**Figura N° 18:** *Registro de onda de la velocidad de vibración de una voladura de producción, mostrando variación de amplitud y frecuencia respecto al tiempo.*



**Fuente:** Manual de monitoreo de vibraciones generadas por voladuras, análisis y modelamiento, CINTEX, 2005

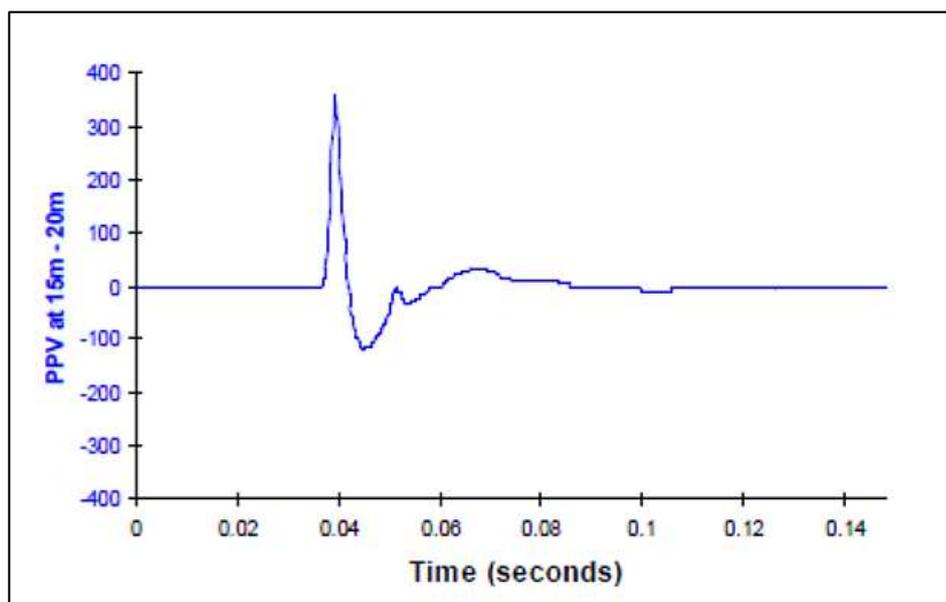
Para lograr un razonable entendimiento de las ondas de vibraciones, es más fácil y mejor empezar con la onda producida por un solo taladro, y proceder a partir de ese punto a un análisis de la onda de vibración de una voladura que contiene varios taladros separados por elementos de retardo.

### 2.1.7.1 Vibración de un taladro único

CINTEX (2005) indica que la respuesta de vibración de un único taladro de voladura representa la forma de onda más simple que puede ser analizada en una operación normal de voladura; sin embargo, puede ser interesante comparar la onda de un único taladro de voladura con la onda generada por una carga esférica (una carga de longitud igual al diámetro). En voladuras que tienen muchos taladros, se considera generalmente que cada taladro genera una onda “elemental” igual, separadas en el tiempo por los retardos y en el espacio por las dimensiones del burden y espaciamiento.

La figura presenta la onda generada por la detonación de un taladro de aproximadamente 15 metros de Anfo (4” de diámetro) medida a una distancia aproximada de 15 a 20 metros, en roca dura.

**Figura N° 19: Onda de un taladro medido a 20 metros**



Fuente: Manual de monitoreo de vibraciones generadas por voladuras, análisis y modelamiento, CINTEX, 2005

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

confinamiento de los gases) de la roca después que la presión de detonación se haya disipado. Características importantes de la forma de onda se pueden resumir en:

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

#### **a) Frecuencia de las vibraciones:**

Es claro que el pulso de vibración de un único taladro no puede ser descrito usando una simple analogía sinusoidal.

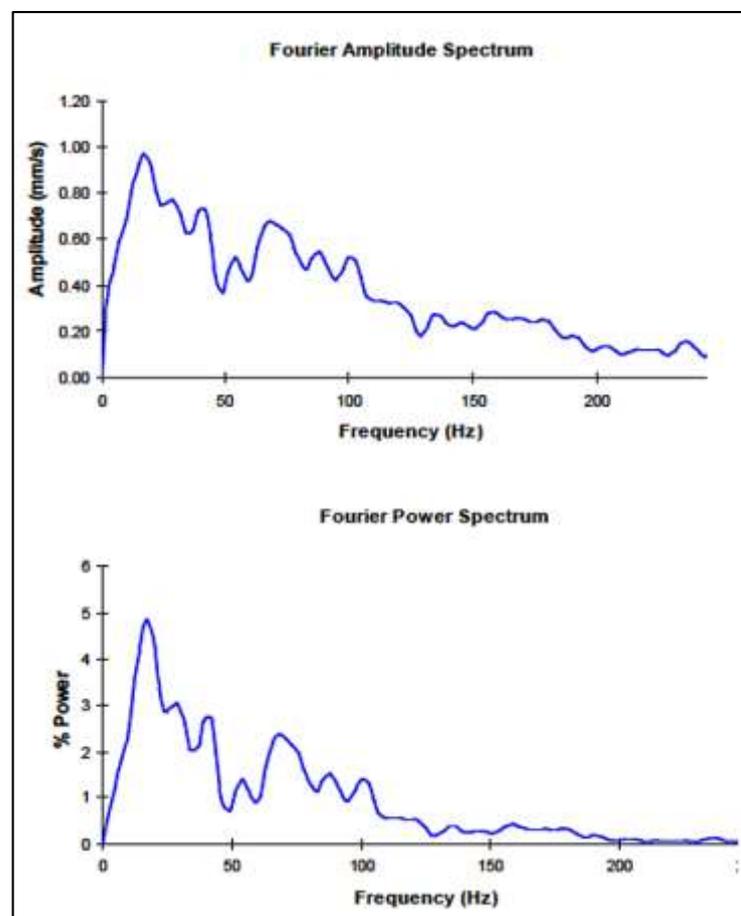
La Transformada de Fast Fourier (FFT) se puede usar para producir el Espectro de Amplitud (EA), mostrando las amplitudes de las velocidades (en mm/s) asociadas con cada componente individual de frecuencia, o el Espectro de Energía (EP), que muestra la energía relativa asociada con cada componente de frecuencia. La figura N° 20, indica un Espectro de Amplitud (arriba) y Energía (abajo) para una onda de un único taladro de voladura.

El método de Fourier es el único método confiable y efectivo para análisis de frecuencia, aunque cuando se utiliza este método, se transforma muy difícil describir la frecuencia por un único valor, tal como la frecuencia dominante, puesto que se observa muy a menudo que muchas frecuencias están asociadas a valores similares de amplitud ya sea en el espectro de amplitud o energía.

Si se requiere un valor único de frecuencia para describir un espectro complejo, se considera que el número debiera ser derivado a partir de la distribución completa de frecuencia, usando un método estadístico estándar. Uno de estos métodos es considerar el espectro acumulativo de Energía, mediante la suma de todas las componentes de energía del espectro, ya que esta distribución, como la Distribución Normal y de Rosin Rammler, deben sumar en total hasta un valor de 100%. La curva siempre parte de cero, y alcanza el máximo valor de 1 (o 100%), y se parece a una curva de distribución de tamaño de Rosin Rammler.

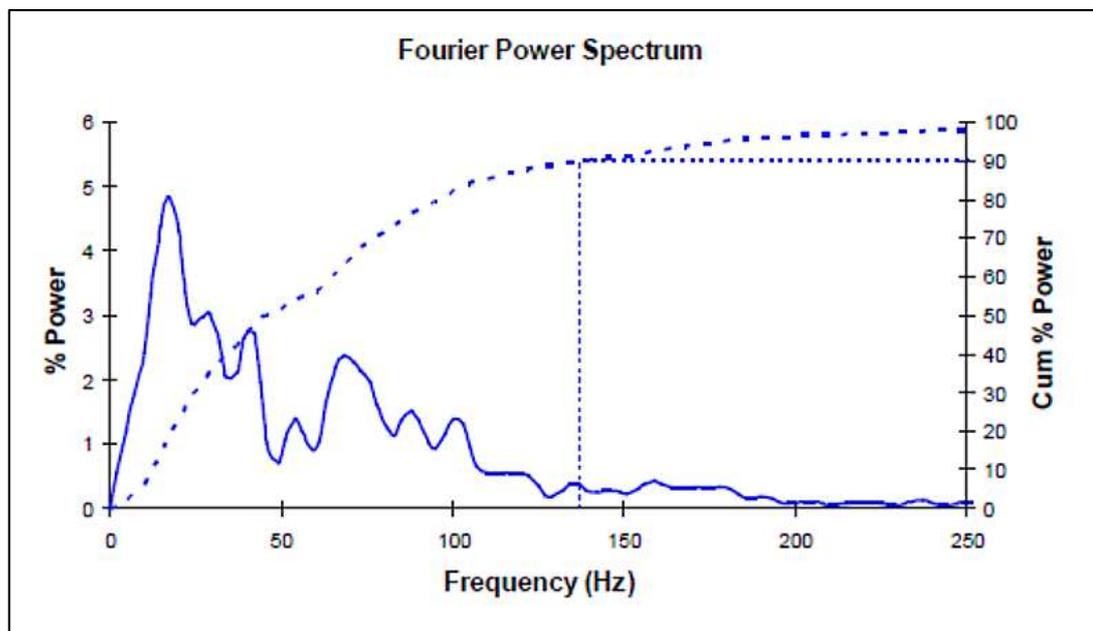
Si asumimos que el espectro comienza en 0 Hz o muy próximo a este valor, el parámetro más simple para describir la distribución es alguna medida de su ancho. Debido a que la curva se aproxima al 100% muy suavemente (como la distribución acumulativa Normal o la distribución de Rosín Rammler), es más fácil para identificar el percentil sobre un valor, tal como la frecuencia bajo la cual está contenida el 90% de la energía de la onda. Usando esta definición la onda de un taladro único tiene el 90% de su energía bajo 137 Hz.

**Figura N° 20:** *Espectro de Fourier de energía y amplitud para la onda de un solo taladro*



**Fuente:** Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por voladuras, Análisis y Modelamiento, CINTEX, 2005

**Figura N° 21:** *Espectro de energía (sólido) y esfuerzo acumulativo de energía (segmentada) para la vibración de un solo taladro*



Fuente: Manual de Monitoreo de vibraciones generadas por voladuras, análisis y modelamiento, CINTEX, 2005

Se considera que la frecuencia bajo un percentil de 90% usado en el Espectro de energía es la mejor manera de caracterizar la frecuencia de una onda de vibración, respecto a la frecuencia de la componente que tiene la amplitud mayor, especialmente cuando la onda de vibración tiene muchos pulsos de similar amplitud, pero de diferentes anchos, y donde hay más de una componente de frecuencia de igual o similar amplitud. Es difícil encontrar una buena analogía para describir la frecuencia usando el Espectro de Amplitud, y por esta razón se prefiere el Espectro de Energía para definir la frecuencia de la señal.

#### **b) Amplitud de las vibraciones:**

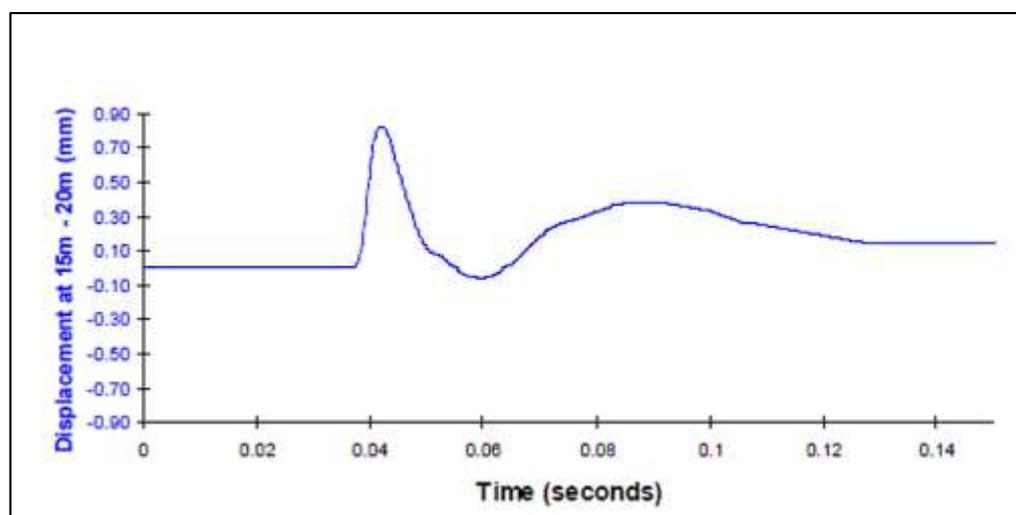
La amplitud de la onda de vibración usualmente se toma como el peak positivo o negativo de la amplitud de la velocidad, dondequiera que tenga el valor absoluto más alto. Usualmente el signo del peak de velocidad no se considera.

Es interesante notar la asimetría en la onda de vibración, lo que sugiere que el esfuerzo de compresión (360 mm/s) es mucho más alto que el esfuerzo de tensión (114 mm/s). Comúnmente esta asimetría se observa cerca de las cargas grandes y desaparece

después de unos 100 metros de propagación, donde la componente de tensión tiene esencialmente la misma amplitud que la componente de compresión. A menudo se considera que el gran esfuerzo de compresión cercano a los taladros es el causante de intenso quebrantamiento alrededor del taladro, mientras que en zonas más alejadas del taladro ocurren fallas por tensión.

Es importante indicar que el área bajo la fase de compresión debe ser igual al área bajo la fase de tensión, ya que estas áreas representan el desplazamiento en las direcciones positivas y negativas. Si las áreas no fueran iguales entonces la suposición de un comportamiento elástico es incorrecto, y ocurre un desplazamiento mayor en una dirección más que en otra. Para revisar si las áreas son iguales, se debe integrar la señal (primero debe removerse cualquier offset en la señal). El máximo desplazamiento también se puede comparar con las limitaciones de máximo movimiento del geófono (usualmente 2 mm).

**Figura N° 22:** *Desplazamiento del terreno, medido entre 15 a 20 metros del taladro*



Fuente: Manual de monitoreo de vibraciones generadas por voladuras, análisis y modelamiento, CINTEX, 2005

### c) Duración de las vibraciones:

La duración del pulso de la detonación de un único taladro no es fácil de medir, ya que no es claro determinar cuando la vibración desaparece. La duración de la primera fase de compresión y tensión es de aproximadamente 23 milisegundos, la cual debiera ser comparada con el tiempo de detonación de la columna de explosivo. Asumiendo una

VOD de aproximadamente 4000 m/s en un taladro de 4" de diámetro y cuya longitud de carga sea aproximadamente de 15 metros, la columna debiera detonar completamente en aproximadamente 4 milisegundos. El tiempo adicional es aquel para que el macizo rocoso vuelva a su estado original, y este tiempo es controlado principalmente por el módulo de la roca, pero también por el tiempo de retención de los gases de detonación en el taladro.

Se puede ver que las duraciones de los pulsos de vibración serán más y más largos a mayores distancias de propagación, principalmente a través de un alargamiento de la onda después de la primera fase de compresión y tensión. Los alargamientos ocurren como resultado de reflexiones, refracción y separación de las ondas P y S y de las ondas de superficie.

### **2.1.7.2 Vibración de una voladura completa**

CINTEX (2005), la medición completa de una voladura, en cualquier ubicación, contiene una respuesta en el terreno combinada por la detonación de cada uno de los taladros. Es común asumir que cada taladro de la voladura producirá el mismo pulso de vibración.

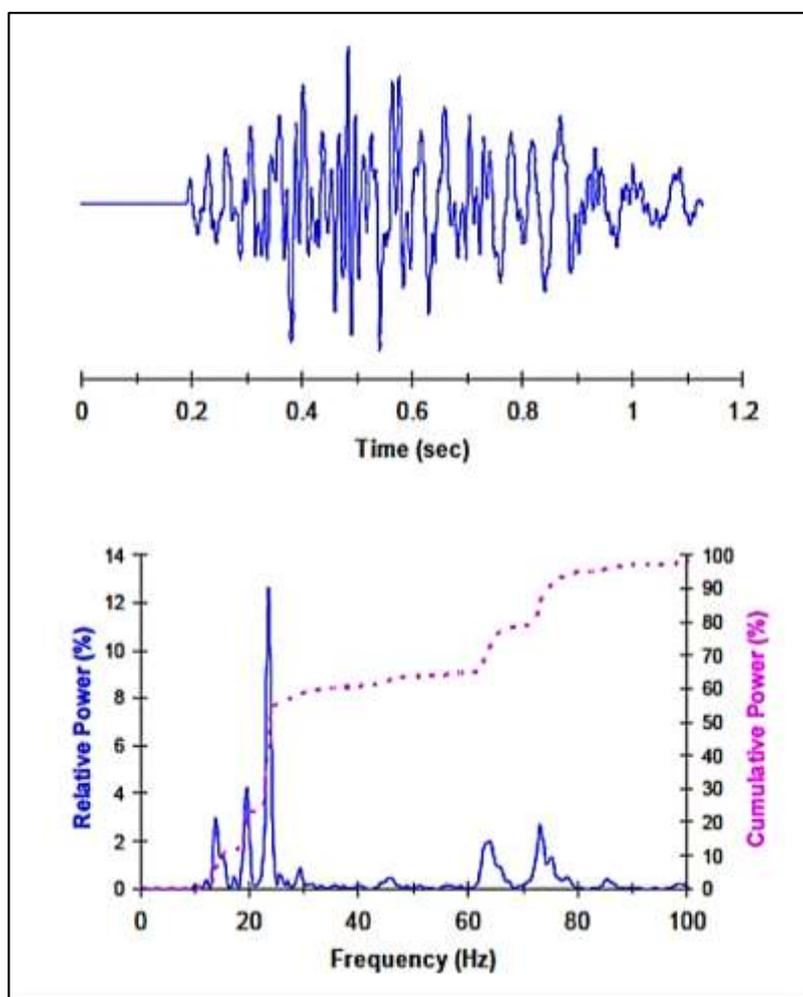
Fundamentalmente se asume que la roca es homogénea, que cada taladro contiene la misma carga, y que las características de detonación se mantienen constantes. El Principio de Superposición se utiliza para procesar la respuesta combinada mediante la suma algebraica de las respuestas individuales. Fundamentalmente se asume que la roca presenta un comportamiento elástico en el punto de interés, es decir, no hay cambios permanentes tales como agrietamientos o deformaciones plásticas. Los retardos son usados en las voladuras de manera de asegurar que las vibraciones provenientes de diferentes taladros no produzcan una interferencia constructiva (no es el único objetivo), generando niveles de vibraciones mucho mayores que los de un solo taladro. A pesar de los retardos usados, es inevitable algún grado de interferencia constructiva en voladuras normales de producción, donde los tiempos de detonación están cada 10 ms.

#### **a) Frecuencia de las vibraciones:**

La onda completa de la vibración de la figura N° 23 es reproducida nuevamente como un ejemplo de registro de vibración de una voladura de aproximadamente 120 taladros. Esta voladura fue medida a una distancia de aproximadamente 600 metros, y

una observación visual rápida sugiere un amplio rango en las frecuencias, confirmado en la figura N° 23 que muestra la onda de velocidad y el espectro de energía de Fourier.

**Figura N° 23: Onda de vibración en campo lejano y espectro de energía**



Fuente: Manual de monitoreo de vibraciones generadas por voladuras, análisis y modelamiento, CINTEX, 2005

Para el espectro de energía, la frecuencia bajo un percentil de 90 es de 75Hz y es claro que no han sido registradas frecuencias bajo los 10 Hz. Es decir, el 90% de la energía de esta onda está en un rango de 10 a 75Hz.

Es complicado asignarle a una onda compleja un simple valor de frecuencia. El único y mejor número descriptor se considera que es el ancho de banda del espectro más que un promedio o la frecuencia característica.

### b) **Amplitud y duración de las vibraciones:**

De la misma manera de lo difícil que es describir el espectro de la frecuencia de una onda usando el promedio o el valor dominante, es igualmente difícil describir la amplitud de una onda de vibración compleja indicando un valor único de amplitud. En términos de utilización de datos para determinar los parámetros de atenuación de vibración de un sitio específico, normalmente el valor del peak es el único dato requerido. Sin embargo, en términos del daño potencial que la onda de vibración pueda causar a las estructuras en la roca o a construcciones, se debe esperar que el promedio de la vibración debiera ser un valor importante, como por ejemplo una onda con una amplitud constante de 100 mm/s de 2 segundos de duración, se esperaría que tenga un daño mayor que una onda con un peak único de 100 mm/s y con un nivel promedio de 30 mm/s.

## **2.1.8 VARIABLES QUE AFECTAN A LAS VIBRACIONES**

### **2.1.8.1 Peso de carga**

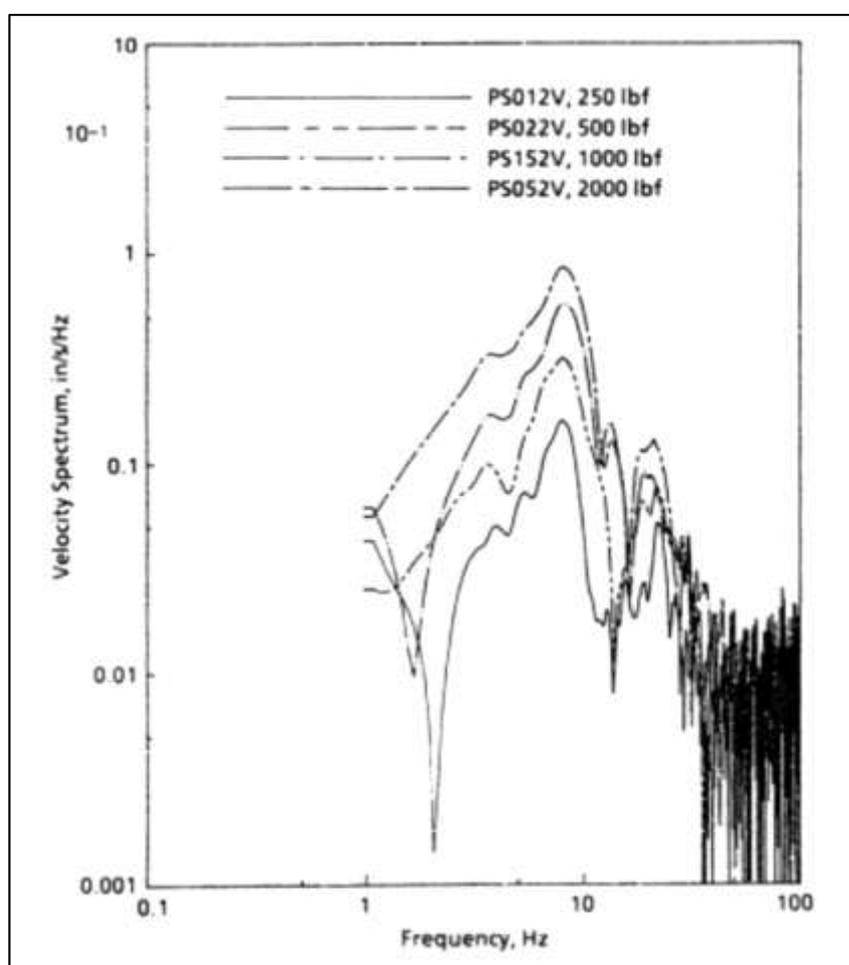
Thomas (2015) indica que el peso de carga es uno de las variables más utilizados en cálculos de vibración por voladura. Es un factor de la geometría de carga, características explosivas, condiciones de carga y prácticas de carga.

La máxima amplitud de una vibración producida por la detonación de un típico taladro de voladura cilíndrico aumenta linealmente con el peso de carga (Crenwelge, 1988). Esta relación cambia a medida que la carga se hace más grande y / o relativamente menos confinada, donde la amplitud es proporcional al peso de la carga a la mitad de la potencia. La relación del peso de carga - amplitud de velocidad de la partícula también cambia a medida que la geometría de carga se vuelve esférica (o se puede considerar que es esférico) donde la amplitud se amplía como la raíz cúbica del peso de carga. Además, para pesos de carga más grandes, el pulso de choque es más grueso (Yang et al., 2009).

Los choques más gruesos requieren una mayor distancia para atenuarse en ondas elásticas porque los mayores pesos de carga también producen una mayor cantidad de energía durante el proceso de detonación completo.

El espectro de velocidad de la partícula producido por cargas con un diámetro constante muestra que hay poco cambio de frecuencia ya que el peso de carga varía de 113 kg a 907 kg (250 lbs a 2000 lbs) (ver figura N°24). Esta figura muestra los datos producidos por cuatro cargas de 270 mm (10-5 / 8 pulgadas) de diámetro, con longitudes de 2.3 m, 4.7 m, 9.3 m y 18.6 m (7.5, 15.3, 30.5 y 61 pies). Los espectros apilados muestran que el mayor peso de carga produce mayores velocidades de partículas a lo largo del espectro a pesar de que las frecuencias dominantes son constantes.

**Figura N° 24:** *Espectros de velocidades de partículas por vibraciones de voladuras registradas a partir de cargas de diferente peso y diámetro constante.*



Fuente: Crenwelge, 1988 como se citó en Thomas, R. N., 2015. .

### 2.1.8.2 Tipo de carga

Thomas (2015), la composición química de la carga explosiva afecta la energía, presión, velocidad de detonación y gases creados durante la detonación proceso (Cooper, 1996).

Estas propiedades de detonación también se ven afectadas por otras variaciones en el entorno de voladura. Debido a todos estos efectos, el proceso de detonación nunca es ideal y las propiedades de detonación pueden variar mucho (Chiappetta, 1994; Mulla, McGinley y Stancavage, 1995).

El proceso de detonación generalmente se evalúa usando la velocidad de detonación (VOD) del explosivo (Chiappetta, 1994; Mohanty y Yang, 1997). Para la mayoría de explosivos, el VOD aumenta asintóticamente a un valor máximo con carga aumentada diámetro para explosivos comerciales a granel (Fleetwood et al., 2012; Kirby et al., 2014), aunque esto no siempre es cierto (Torrance, 2013). La densidad es un ejemplo de una característica explosiva que se puede usar para estimar rendimiento desde la velocidad de detonación y la presión que se desarrollan durante el proceso de detonación se ve afectado por la densidad (Cooper, 1996). Se observa que, en la práctica, densidad de copa, el método de campo para medir la densidad explosiva y la densidad enumerada en la hoja de datos técnicos de un explosivo es significativamente más baja que el promedio en el agujero densidad en un factor de 7% a 13% (Torrance, 2013).

CINTEX (2005), claramente el parámetro  $n$  en la ecuación de Devine está controlado por la geometría del frente de onda en expansión, y el coeficiente de atenuación de la roca. Sin embargo, el valor de  $K$  está controlado principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca como un esfuerzo. Los factores que controlan la transferencia de la energía del explosivo desde el pozo a la roca son la densidad y la VOD del explosivo, producto que representa la Característica de Impedancia,  $Z$ . Para el macizo rocoso,  $Z_{rock} = \rho_{rock} * V_p$  y para el explosivo,  $Z_{exp} = \rho_{exp} * VOD$ .

Si la Razón de Impedancia se considera como  $n$  (es decir  $n = Z_{exp}/Z_{rock}$ ), entonces la razón entre el esfuerzo transmitido al macizo rocoso,  $\sigma_{rock}$ , y la presión en el pozo debido a la detonación del explosivo,  $\sigma_{exp}$ , puede ser calculada a partir de:

$$\frac{\sigma_{rock}}{\sigma_{exp}} = \frac{2}{1+n} \quad (4)$$

La razón entre el esfuerzo reflejado y la presión de detonación puede ser calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma_{reflected}}{\sigma_{exp}} = \frac{1-n}{1+n} \quad (5)$$

La presión de detonación,  $P_d$ , se estima generalmente usando la siguiente relación:

$$P_d = 0.25 \rho_{exp} VOD^2 \quad (6)$$

- Cuando la característica de Impedancia de la roca es igual a la característica de impedancia del explosivo, el 100% de la energía de choque en el taladro se transmite a la roca, (es decir no hay energía reflejada devuelta al taladro).
- Cuando la característica de Impedancia de la roca es mayor que la del explosivo ( $z < 1$ ) el esfuerzo reflejado a las paredes del taladro es compresivo, y el esfuerzo inducido en la masa rocosa es mayor que la presión en el taladro, con un máximo esfuerzo del doble de la presión de taladro cuando  $z = 0$ .
- Cuando la característica de Impedancia de la roca es menor que la del explosivo ( $z > 1$ ), el esfuerzo reflejado a las paredes del taladro es de tensión ( $\sigma_{reflected}$  es negativo), y el esfuerzo inducido en la masa rocosa es menor que la presión en el taladro.
- La onda transmitida es siempre compresiva (el termino  $\sigma_{rock}$  es siempre positivo).

Las implicaciones prácticas de estas relaciones, con respecto a las vibraciones son:

- El aumento de la densidad del explosivo y/o VOD incrementará el esfuerzo inducido en la roca.
- El aumento del esfuerzo inducido en la roca incrementará el valor de  $K$  usado en la ecuación de Devine.
- Si una voladura contiene diferentes cargas y diferentes taladros, entonces se deberían usar valores diferentes de  $K$  para estimar los niveles de vibración producidos por taladros individuales

Es importante tener en cuenta que, si la onda de vibración pasa a través de diferentes tipos de roca con diferentes características de Impedancia, sus frecuencias no cambian, pero sí su longitud de onda. Por lo tanto, cambios en el tipo de roca, no causarán cambios en la frecuencia de la vibración.

### 2.1.8.3 Confinamiento de la carga

ISEE (2008). El confinamiento de las cargas afecta la intensidad de la vibración. Si una carga se encuentra profundamente sin una superficie libre cercana, la roca no se desplazará (aunque se dañara alrededor del explosivo) y la mayor parte de la energía se irá en las ondas sísmicas. A veces, el pre corte genera niveles de vibración más altos por esta razón, aunque algunas veces el desacoplamiento de las cargas contrarresta este efecto (el desacoplamiento se da cuando se colocan cargas de diámetro pequeño dentro de un taladro más grande, de manera que éstas no están en contacto con las paredes de dicho taladro, es decir, están desacopladas). La falta de confinamiento tiene el efecto contrario. Si sobre la carga o frente a ella existe solo un recubrimiento superficial, esta tendrá menos trabajo que realizar, se ventilará con mayor facilidad, y parte de su energía se perderá en la atmosfera; además, se gastará menos energía en la generación de ondas sísmicas.

Algunas veces, en un intento por disminuir las vibraciones, el usuario de explosivos no consigue ninguna ventaja al reducir el factor de carga, si al hacerlo, el burden y el confinamiento aumentan en relación a la cantidad de explosivos. De esta manera, puede obtener tanta vibración como antes, además de lograr poca fragmentación en la roca, a lo cual le seguirán trabajos de corrección y voladuras adicionales. Generalmente, es mejor emplear un factor de carga adecuado para lograr la fragmentación necesaria en un diseño de voladura bien equilibrado y controlar la vibración mediante el peso de carga por retardo.

### 2.1.8.4 Acoplamiento de la carga

ISEE (2008). El acoplamiento de carga de explosivos a la roca afecta la cantidad de energía que se transmitirá a ésta; de ahí la intensidad de las vibraciones, así como como la efectividad de la voladura para fracturar la roca. Tal como se mencionó anteriormente, si se colocan cargas de diámetro pequeño dentro de los taladros de diámetro grande, las cargas se desacoplan y se transmitirán menos energía. Los productos a granel resultan ser más eficientes al transmitir su energía a la roca, debido a que llenan toda la sección transversal del taladro y, por lo tanto, se encuentra en contacto con (acopladas a) las paredes del mismo.

Un tipo diferente de acoplamiento se puede prever en el suelo en sí. En los cascajos ligeramente cimentados, porosos y abiertos, hay poco acoplamiento o contacto entre partículas del cascajo; por esta razón, la energía sísmica no se transmite adecuadamente.

Entonces si un taladro se perfora más allá de un nivel friático, los vacíos en el cascajo se llenarán con agua, y así se logrará una gran mejora en el acoplamiento entre las partículas lo cual resultará en una transmisión más eficiente de las ondas sísmicas. es común observar un incremento en la intensidad de la vibración, cuando se realiza una voladura debajo del nivel friático si el material esta suelto. Sin embargo, en roca firme, la presencia de un nivel friático no cambia la roca de manera considerable, de ahí que las características de vibración de la roca no varían de manera apreciable.

Una variación de dicha condición se puede encontrar en la roca muy expuesta o en la roca con muchas juntas o fracturas. La roca seca de esta clase es menos eficiente al transmitir las ondas sísmicas.

### 2.1.9 PREDICCIÓN DEL NIVEL DE VIBRACIONES EN EL TERRENO

Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000) indican que varios son los modelos experimentales que representan la velocidad de partícula en función del explosivo detonado y la distancia a la que se registra dicha detonación, entre los más conocidos se encuentran el modelo general y el de regresión múltiple.

#### - Modelo general

$$VPP = K \cdot SD^\alpha \quad (7)$$

Donde:

- VPP : Velocidad Pico de Partícula (mm/s)
- SD : Distancia Escalar
- K : Factor de Amplitud
- $\alpha$  : Factor de Atenuación

El término "SD" o distancia escalar, da cuenta de la influencia de la distancia de la voladura al punto de monitoreo [m], y la carga operante en [Kg].

Vásquez (2013). Se sabe que la magnitud de la vibración generada está relacionada de manera proporcional con la cantidad máxima de explosivo que detona al mismo

tiempo (carga operante), por ello a manera de explicación se plantean los siguientes casos:

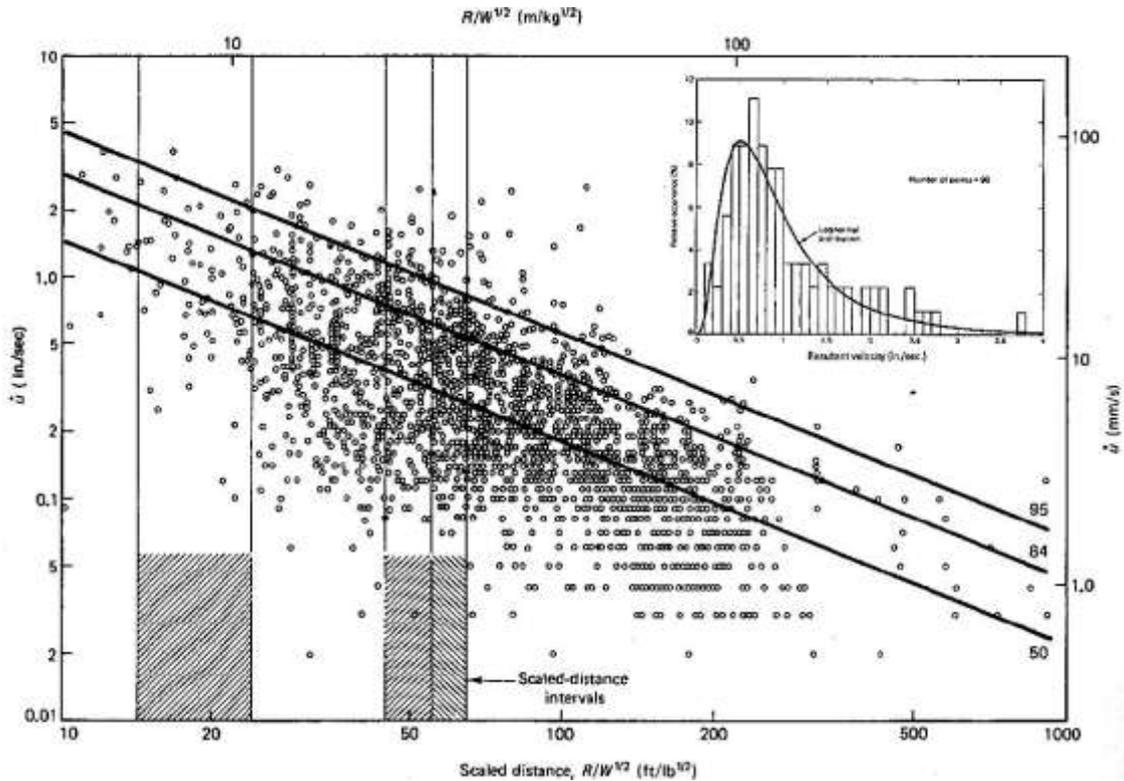
Caso 1, se utilizan detonadores con micro-retardos y además cada barreno está conectado a un número distinto de detonador (es decir con diferente tiempo), entonces se puede afirmar que la carga máxima que detona en un mismo tiempo coincidirá con la del taladro más cargado.

Caso 2, se tiene varios taladros conectados a detonadores con un mismo número, por consiguiente, la carga máxima que detona al mismo tiempo viene dada por la máxima suma de los pesos de explosivo/barreno iniciados por detonadores con un mismo número de retardo, a este peso se le denomina carga cooperante o máxima carga instantánea (MIC).

Vásquez (2013). La formulación clásica de la distancia escalada (raíz cuadrada) está basada en el análisis estadístico de un gran número de datos, tal como se muestra en la figura N° 25.

En relación a ésta formulación matemática existen varios criterios derivados de los cuales se emplea comúnmente el Regresión Múltiple.

Figura N° 25: Típica dispersión de datos, velocidad Pico-partícula vs distancia escalada cuadrada (Dowding C H, 2000)



Fuente: Vásquez, S.N.Y., 2013.

### 2.1.9.1 Modelo general o campo lejano

Vásquez (2013) indica que un número de investigadores han estudiado el problema de la predicción de vibraciones en el terreno y han propuesto diversas fórmulas, pero todos coinciden que la velocidad máxima de vibración en el terreno (VPP) es proporcional a la masa de explosivo, Q, e inversamente proporcional a la distancia, D.

Con relación a esta formulación matemática existen varios criterios de los cuales se pueden señalar los siguientes:

Tabla N° 3: Criterios de modelos de vibraciones en campo lejano

CRITERIO	COEFICIENTE ESCALAR
Criterio general exponencial	$SD = \left( \frac{d}{W^{1/2}} \right) * e^{\left( \frac{d*\beta}{\alpha} \right)}$
Criterio general	$SD = \left( \frac{d}{W^{\beta/\alpha}} \right)$

Langerfors 1963

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

Hendron (Bulletin 656)

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

Devine (1962)

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

**Fuente:** Elaborado en base a la aplicación del Modelamiento de Vibraciones – ASIEX 2008.

Contreras (2009), señala que el modelo más utilizado en minería superficial y subterráneo es el de Devine y Duvall, donde la distancia escalada es la relación de la distancia de voladura al punto de monitoreo (D) entre la raíz cuadrada de la carga operante (W). Se aplica raíz cuadrada porque este criterio es el que mejor representa la vibración en campo lejano (aproximadamente  $d > 5$  largo de la carga) para las cargas cilíndricas y raíz cubica para las cargas esféricas.

#### - Regresión múltiple del Modelo de Devine

$$PVV = K * \left[ \frac{d}{W^{1/2}} \right]^{-\alpha} \quad (8)$$

Donde:

PPV : Velocidad de Partícula (mm/s)

d : Distancia de monito

W : Carga operante

K : Factor de Amplitud

$\alpha$  : Factor de Atenuación

Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000), señala que en la tabla N° 14, se presentan diferentes valores para los parámetros del modelo Devine (K y Alfa), obtenidos en diferentes tipos de roca y distintas faenas mineras del país. Esta gran variabilidad para el factor K desde un mínimo de 99 hasta un máximo de 703 (7 veces mayor) y para el Factor de Atenuación Alfa desde -1.54 hasta -2.49, determinan que el uso indiscriminado de estos modelos y la transferencia de estos desde una mina a otra o desde un sector a otro en la misma mina puede significar estimar un gran margen de error las vibraciones y como consecuencia de ello las restricciones a las voladuras y los criterios de daño.

**Tabla N° 4: Variabilidad en los parámetros del modelo de vibración Devine, para diferentes minas y macizos rocosos.**

Factor de amplitud <b>K</b>	Factor de atenuación <b>Alfa</b>	Factor de amplitud <b>K</b>	Factor de atenuación <b>Alfa</b>
597	-2.34	99	-2.33
500	-2.11	227	-1.60
321	-2.39	499	-2.01
495	-2.12	175	-1.63
262	-2.28	112	-1.94
284	-1.72	428	-2.49
481	-1.74	168	-1.54
299	-2.48	703	-2.21
597	-2.32	177	-2.04
<b>K máximo =</b>	<b>703</b>	<b>Alfa máximo =</b>	<b>-2.49</b>
<b>K mínimo =</b>	<b>99</b>	<b>Alfa mínimo =</b>	<b>-1.54</b>
<b>K promedio =</b>	<b>357</b>	<b>Alfa promedio =</b>	<b>-2.07</b>

Fuente: Elaborado por Scherpenisse, Adamson y Díaz (2000).

Esta variabilidad en los parámetros del modelo Devine, da cuenta de la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular, la ecuación de comportamiento de las vibraciones, la que está directamente relacionada con las propiedades geomecánicas, tipos de explosivos, aspectos geométricos, etc., y por tanto, deben ser estimados como consecuencia de una campaña de monitoreo y modelamiento, en forma independiente no sólo en cada mina si no en cada dominio geomecánico de la misma.

Contreras (2009) precisa claramente el parámetro  $\alpha$  en la ecuación de Devine está controlado por la geometría del frente de onda en expansión, y el coeficiente de atenuación de la roca. Sin embargo, el valor de K está controlado principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca como un esfuerzo. Los factores que controlan la transferencia de la energía del

explosivo desde el taladro a la roca son la densidad y la VOD del explosivo, producto que representa la característica de Impedancia, Z.

**- Modelamiento de vibraciones en campo lejano**

Los estudios realizados por la mayoría de investigadores determinaron que el comportamiento de las vibraciones es el de una ecuación potencial, la ecuación de Devine es de la forma:

$$Y = aX^b \quad (9)$$

Donde:

- Y : Es la VPP, variable dependiente.
- X : Es la  $(\frac{D}{\sqrt{W}})$ , variable independiente.
- a : Es la constante K, a determinar.
- b : Es la constante  $\alpha$ , a determinar.

Para modelar las vibraciones monitoreados en campo realizaremos un análisis de regresión y correlación mediante un ajuste potencial, para convertirla en una ecuación lineal se aplica logaritmos a la ecuación.

$$\text{Log}Y = \log(aX^b) \quad (10)$$

$$\text{Log}Y = \text{Log} a + b \log X$$

Su sistema de ecuaciones para determinar las constantes a y b está definido de la siguiente manera:

$$b = \frac{n\sum(\log X) \cdot (\log Y) - (\sum \log X)(\sum \log Y)}{n\sum(\log X)^2 - (\sum \log X)^2} \quad (11)$$

$$a = 10^{\left(\frac{\sum \log Y}{n} + \frac{b\sum \log X}{n}\right)}$$

$$r^2 = \frac{(\sum(\log X)(\log Y) - \frac{(\sum \log X)(\sum \log Y)}{n})^2}{(\sum(\log X)^2 - \frac{(\sum \log X)^2}{n})(\sum(\log Y)^2 - \frac{(\sum \log Y)^2}{n})}$$

Donde:

$n$  : Es el número de datos a realizar el análisis de regresión.

$r^2$  : Es el grado de correlación de las constantes de regresión

El coeficiente de determinación toma valores entre 0 y 1;  $0 \leq R^2 \leq 1$

- Toma el valor “0” cuando la regresión no explica nada de la variabilidad de los valores observados y por tanto el ajuste obtenido no modeliza adecuadamente (ni siquiera mínimamente) la relación entre variables.
- Toma el valor “1” cuando el ajuste efectuado recoge toda la variabilidad de la variable original, y por tanto el ajuste es perfecto.
- Para valores entre “0” y “1”, el ajuste es tanto mejor cuanto más se aproxima a 1 el coeficiente de determinación. Los ajustes se consideran razonables cuando  $R^2 \geq 0.75$ .

### 2.1.9.2 Modelo Holmberg & Persson o Campo cercano

Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000) señalan que otros autores en la ecuación de campo lejano, no consideran una simetría de carga particular y utilizan la siguiente expresión.

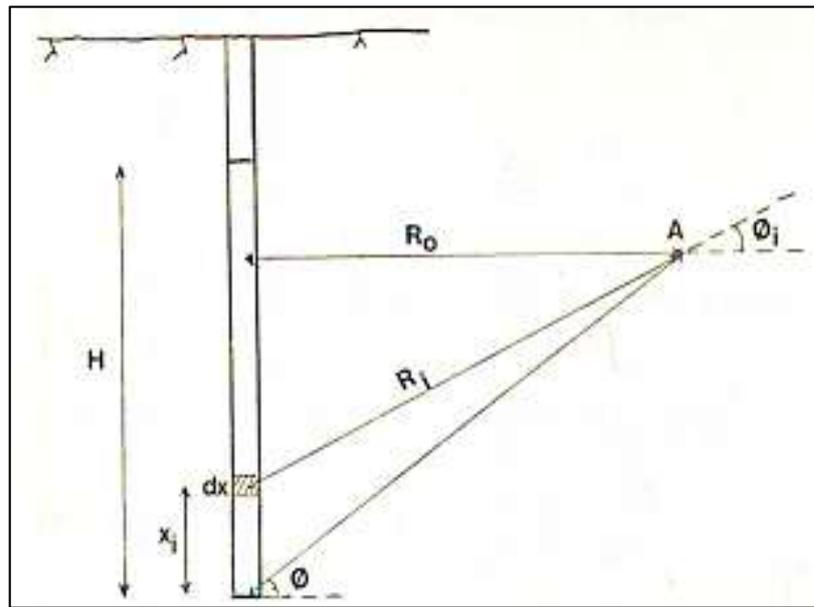
$$PPV = K * d^{-\beta} * W^{\alpha} \quad (12)$$

$$V = K (W^{\alpha} / R^{\beta}) \quad (13)$$

En el área más cercana a las cargas explosivas (donde se produce la mayor fractura miento), esta ecuación puede ser modificada para tomar en cuenta la longitud de una carga de forma cilíndrica.

La forma matemática del modelo de vibración en el campo cercano propuesto por Holmberg & Persson (1979), es la representación gráfica a continuación, según los términos detallados en la Figura N° 26.

**Figura N° 26: Modelamiento de vibraciones en campo cercano**



Fuente: Holmberg, R., 2011

Holmberg (2011) precisa que de la imagen se determina lo siguiente:

$$R_i^2 = R_0^2 + (R_0 \tan \Phi)^2 \quad (14)$$

En este caso la columna de explosivo es dividida en una serie de cargas Infinitesimales, cada una de una longitud (dx), siendo (L) el peso por unidad de longitud de cada una de ellas. Entonces, el peso total de cada porción de explosivo, estará representado como:

$$Q_i = dx L \quad (15)$$

Donde:

L : Densidad de carga Lineal, kg/m

$$q = (v/k)^{1/\alpha} = Q/R^{\beta/\alpha} \quad (16)$$

Cada parte Qi de la carga Q contribuye a la intensidad de vibración definida como

$W = V^{1/\alpha}$ , con  $W_i = (kQ_i^\alpha/R_i^\beta)^{1/\alpha}$ , la integración a lo largo de la altura de carga H da:

$$PPV = K \gamma^\alpha \left[ \int_0^H \frac{dh}{|R_o^2 + (R_i \tan \phi - h)^2|^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha \quad (17)$$

Como interesa saber el efecto global de la columna explosiva sobre el punto P, se desestima la diferencia de tiempo en el arribo de las vibraciones generadas por las distintas porciones de explosivo. Además, se utiliza la amplitud peak de las vibraciones sin considerar la dirección de llegada al punto.

De este modo, la velocidad se puede calcular a través de la integración de la fórmula anterior, tomando como límites de integración: 0 (fondo del taco) y H (fondo de la columna explosiva).

Ojeda (2015), explica lo siguiente:

Vista en perfil: ( $R_o$  = longitud variable en eje Z)

$$V_{pp} = K \left( \frac{L}{R_o} \right)^\alpha \left[ \arctan \left( \frac{H+x_s-X_o}{R_o} \right) + \arctan \left( \frac{X_o-x_s}{R_o} \right) \right]^\alpha \quad (18)$$

Vista en Planta: ( $R_o$  = Longitud del taladro constante y  $X_o$  = Vector resultante en Plano X, Y)

$$V_{pp} = K \left( \frac{L}{R_o} \right)^\alpha \left[ \arctan \left( \frac{H+x_s-\sqrt{x^2+y^2}}{R_o} \right) + \arctan \left( \frac{\sqrt{x^2+y^2}-x_s}{R_o} \right) \right]^\alpha \quad (19)$$

Contreras (2009) señala que donde K,  $\alpha$  y  $\beta$  son las mismas constantes que se muestran en la ecuación de Devine y  $\gamma$  es la carga lineal cargada en el taladro (kg/m). Holmberg & Persson (1979) dieron valores de K,  $\beta$  y  $\alpha$  de 700, 1.5 y 0.7 respectivamente para las condiciones de roca dura en Suecia.

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

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

## 2.1.10 DAÑO AL MACIZO ROCOSO POR VOLADURA

### 2.1.10.1 Vibración y esfuerzo

CINTEX (2005) precisa que el fundamento para usar el peak de velocidad de partículas, PPV, es debido a que la mayoría de los análisis consideran que el daño, o potencial daño, está relacionado con la velocidad de la onda  $P$ ,  $V_p$ , y la deformación inducida,  $\varepsilon$ , es decir, la velocidad de vibración tiene una correlación directa con el esfuerzo cuando la onda está viajando como una onda plana y la deformación es elástica.

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma}{E} \quad (20)$$

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

$$PPV_{max} = \varepsilon_{max} V_p = \frac{\sigma_{max} V_p}{E} \quad (21)$$

Puesto que las vibraciones viajan con una componente sinusoidal de compresión y tensión aproximadamente iguales y la resistencia a la tensión es siempre mucho menor que la resistencia a la compresión, el máximo esfuerzo que la roca puede resistir es el esfuerzo a la tensión.

### 2.1.10.2 Velocidad pico partícula crítica

Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000) nos indican que de la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico de la roca, la Velocidad de Partícula Máxima (Crítica), PPV<sub>c</sub>, que puede ser soportada por la roca antes de que ocurra el fallamiento por tensión, es estimada conociendo la Resistencia a la Tracción ( $\sigma_t$ ), el Modulo de Young,  $E$ , y la velocidad de propagación de la Onda  $P$ ,  $V_p$ , usando la ecuación:

$$PPV_c = \frac{\sigma_t V_p}{E} \quad (22)$$

En la tabla 5, se resumen los datos y el valor calculado para los tipos de roca analizados. En la última columna, se muestra el cálculo del PPV<sub>c</sub>, definido como el nivel sobre el cual se generará un daño produciendo nuevas fracturas a la roca.

**Tabla N° 5: Estimación de velocidad de partícula crítica teórica en distintos tipos de roca**

Tipo de roca	Resistencia a la tracción (MPa)	Velocidad de onda P (m/s)	Modulo Young (GPa)	Velocidad de Partícula Crítica (mm/s)
Cuarzo-1	14	5 102	55.5	1 286
Brecha-1	7.3	4 298	30.2	1 037
Milonita	1.9	2 940	14.6	380
Ox-1	6.7	4 373	35.2	836
Ox-2	7.2	4 804	44.4	774
Cuarzo-2	8.4	4 207	42.7	823
Brecha -2	3.9	4 041	39.3	401
Andesita - 1	14.9	4 975	67.3	1 100
Diorita	13.2	4 650	48.6	1 260
Brecha-3	11.3	4 650	58.3	900
Pórfido-1	6.7	3829	31.2	823
Pórfido-2	5.1	3 661	46.6	401

Fuente: Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000)

Los valores de Velocidad de Partícula Crítica calculados en la Tabla 5, son producto de las características físicas de la roca, y la precisión en su estimación depende de la calidad y cantidad de los datos de ensayos ocupados en su cálculo, recordándose que sigue siendo una estimación y deben constantemente ajustarse con mediciones en terreno, que den cuenta cuantitativamente del daño y que permitan establecer con mayor precisión e in-situ, la capacidad de macizo rocoso para soportar niveles de vibración en el rango estimado.

Los niveles de Velocidad Partícula Crítica entregados en la tabla 5, pueden diferir de los mencionados habitualmente en la literatura técnica al respecto.

Estas diferencias reflejan la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular los límites de daño, los que están directamente relacionados con sus propiedades geomecánicas y por tanto deben ser estimados en forma independiente no sólo en cada mina si no en cada dominio geomecánico de la misma.

El daño es causado principalmente por 3 mecanismos que son; La generación de nuevas grietas en la roca al superar un nivel crítico de velocidad partícula, extensión y apertura de fracturas existentes por la acción de una excesiva presión de gases, y finalmente, la desestabilización de bloques, cuñas, etc. debido a la alteración de las propiedades de las estructuras geológicas. De estos mecanismos, es importante reconocer que los dos primeros afectan al campo cercano (<50 metros del límite de la voladura), mientras que el último mecanismo puede ocurrir en el campo lejano (> 50 metros).

La gran cantidad de variables que interactúan en una voladura, hace necesario el adaptar y desarrollar técnicas que permitan una óptima evaluación de este proceso, antes, durante y después de su ocurrencia, así como de una adecuada cuantificación y control del daño que ella puede producir.

### **2.1.10.3 Criterio de daño.**

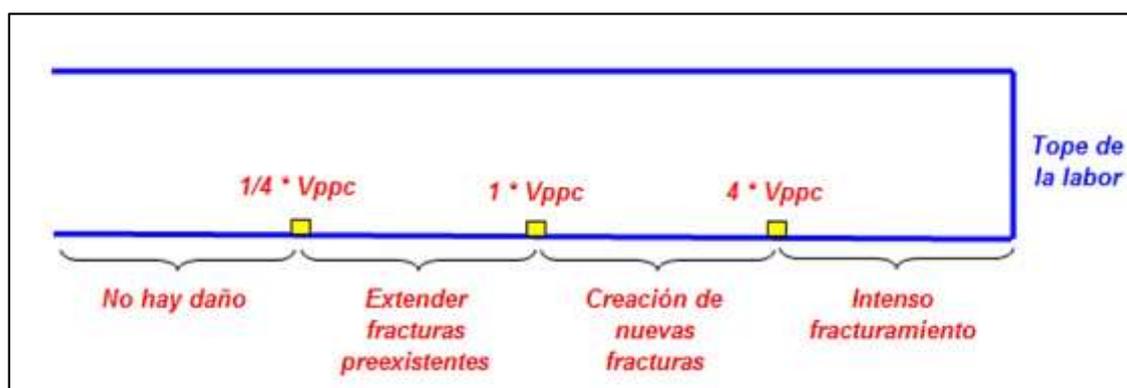
Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000) señalan que los altos niveles de vibración pueden dañar al macizo rocoso, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto, puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.

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

Ojeda (2015). El umbral del valor máximo de la velocidad de partícula para los distintos niveles de daño según Cameron Mckenzie.

4VPPcrítica	: Fracturamiento intenso
1VPPcrítica	: Creación de nuevas fracturas
1/4VPPcrítica	: Extensión de fracturas pre existentes

Figura N° 27: Criterio de daño

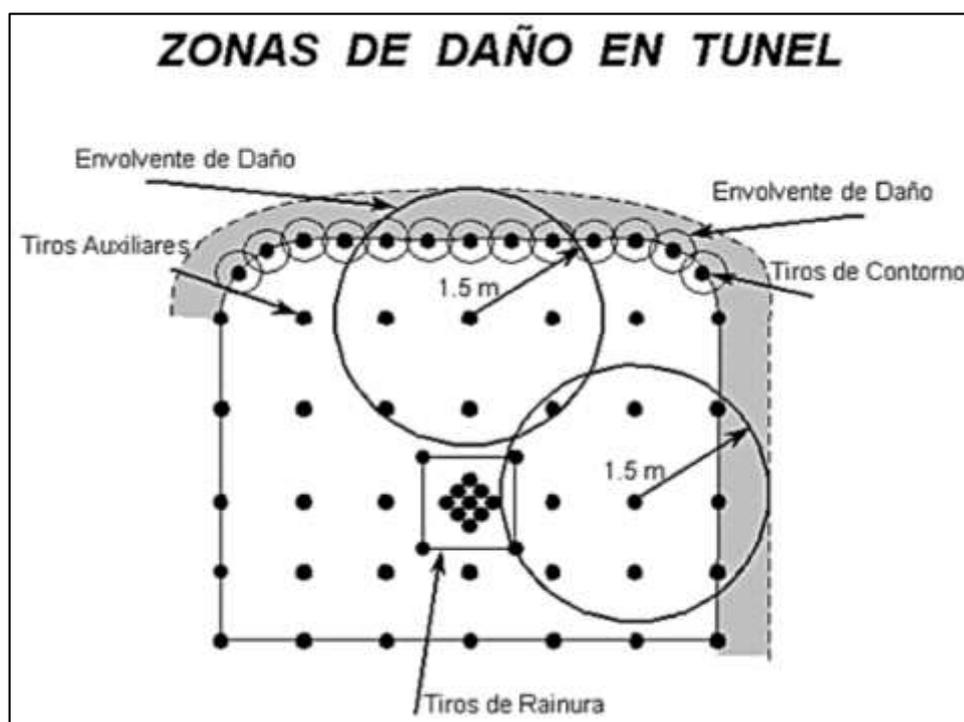


Fuente: Ojeda (2015).

#### 2.1.10.4 Contornos de daño en túnel

Scherpenisse, Adamson y Diaz (2000) nos indican que utilizando el modelo de Holmberg & Persson es posible estimar con bastante confianza las vibraciones que se generarán en los alrededores de una carga explosiva típica en desarrollo horizontal, el que determina que a distancias menores a 1.5 m se sobrepasen rápidamente los niveles para daño intenso.

Esta situación podría significar, como lo muestra la figura 6, que los tiros auxiliares generen previamente niveles de vibración suficientemente altos a una distancia que supera el contorno de la labor aumentando la probabilidad de daño en el techo y pilares, negando en consecuencia los beneficios y efectividad de los tiros de contorno con cargas desacopladas.

**Figura N° 28: Zonas de daño en el túnel por altos niveles de vibración**

Fuente: Scherpenisse, C.R., Adamson, W.R, Díaz, J.C., 2000.

## 2.1.11 PARÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO

### 2.1.11.1 Sistema RMR

Este índice, diseñado por Bienawski en 1989 combina 5 factores, a cada uno de los cuales se le asigna un puntaje. El RMR corresponde a la suma de los respectivos puntajes ya que compañía minera Kolpa S.A lo usa

Los factores son los siguientes:

1. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS1) : (0-15 puntos)
2. RQD : (3-20 puntos)
3. Espaciamiento de discontinuidades : (5-20 puntos)
4. Condición de discontinuidades : (0-30 puntos)
5. Condición de Aguas Subterráneas : (0-15 puntos)

**Tabla N° 6: Valoración del sistema RMR de Bieniowski, 1989**

Parámetros	Intervalo de valores						
Resistencia a la compresión simple de la roca	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 -100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 Mpa	1 - 5 MPa	< 1 Mpa
Valoración	15	12	7	4	2	1	0
RQD	90- 100 %	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	25%		
Valoración	20	17	13	8	3		
Separación entre las juntas	>2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	<60 mm		
Valoración	20	15	10	8	5		
Condición de las juntas	Muy rugosas, no continuas, cerradas, bordes sanos y duros.	Algo rugosas, separación < 1 mm bordes algo meteorizados (duros)	Algo rugosas, separación < 1 mm bordes muy meteorizados (blandos)	Espejos de falla o relleno < 5 mm o separación 1-5 mm. Continuas.	Relleno blando > 5 mm o separación > 5 mm. Continuas.		
Valoración	30	25	20	10	0		
Flujo de agua en las juntas	Secas	Ligeramente Húmedas	Húmedas	Goteando	Fluyendo		
Filtración en 10 m de túnel	0	< 10	10 - 25	25 -125	> 125		
Razón de presiones intersticiales	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	0.5		
Valoración	15	10	7	4	0		

Fuente: Quispe, A.Y.I, 2012

Para la valoración de la condición de las juntas o discontinuidades el sistema RMR toma en consideración los siguientes aspectos:

- 4.1. Persistencia : (0-6 puntos)
- 4.2. Abertura : (0-6 puntos)
- 4.3. Rugosidad de la superficie : (0-6 puntos)
- 4.4. Relleno de discontinuidades : (0-6 puntos)
- 4.5. Alteración de las paredes : (0-6 puntos)



**Tabla N° 9: Factores de ajuste (Bienaiwski, 1989)**

Dirección perpendicular al eje de túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento de 0° a 20° en cualquier dirección
Avance con buzamiento		Avance contra buzamiento				
Buzamiento de 45° a 90°	Buzamiento de 20° a 45°	Buzamiento de 45° a 90°	Buzamiento de 20° a 45°	Buzamiento de 45° a 90°	Buzamiento de 20° a 45°	
Muy favorable	Favorable	Aceptable	Desfavorable	Muy desfavorable	Aceptable	Desfavorable
0	-2	-5	-10	-12	-5	-10

Fuente: Quispe, 2012

El resultado final de la resta es el índice final RMR, que puede variar entre 0 y 100. Los macizos rocosos se clasifican según el valor del índice en cinco clases.

**Tabla N° 10: Clases de macizo rocoso según el valor del RMR ajustado**

RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0
Clase	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala

Fuente: Quispe, 2012

### 2.1.11.2 GSI

Egaña (2008) señala que la resistencia de un macizo rocoso fracturado dependerá de las propiedades de la roca intacta, y de la capacidad de deslizar y rotar de los diferentes trozos de roca intacta dentro del macizo. Esto es controlado por la forma de los trozos y la condición de las superficies de las discontinuidades, entre otros factores. GSI es un sistema que permite estimar la reducción de la resistencia del macizo bajo distintas condiciones geológicas. Para determinar el GSI es necesario realizar observaciones de campo que permiten describir las condiciones in situ

En la práctica, es usual definir el GSI en rangos de  $\pm 15$  puntos. La clasificación se hace según el siguiente criterio:

**Tabla N° 11: Clasificación del macizo rocoso según GSI**

Calidad del macizo	Clase	Intervalo GSI
Muy mala	V	0-20
Mala	IV	20-40
Regular	III	40-60
Buena	II	60-80
Muy buena	1	80-100

Fuente: Egaña, 2008.

Para el caso del RMR de 1989, si el rating de la condición de aguas es de 15 y el de la orientación de discontinuidades es de 0, la relación es la siguiente:

$$GSI = RMR89 - 5$$

### 2.1.11.3 Módulo de deformación del macizo rocoso

Hoek y Diederichs (2005); Hoek (2006) reexaminaron los métodos empíricos existentes para estimar el módulo de deformación de la masa rocosa y concluyeron que ninguno de estos métodos proporcionó información confiable. Estimaciones sobre todo el rango de condiciones de masas rocosas encontradas. En particular, se encontraron grandes errores para masas rocosas muy pobres y, en el otro extremo del espectro, para masas rocosas fuertes y masivas.

Afortunadamente, un nuevo conjunto de datos medidos confiables de China y Taiwán estaba disponible para análisis y se encontró que la ecuación que mejor se ajustaba a estos datos es una función sigmoidea que tiene la forma:

$$y = c + \frac{a}{1 + e^{-((x-x_0)/b)}} \quad (23)$$

Usando el software de ajuste de curva comercial, se ajustó la ecuación y a los datos chinos y taiwanés, las constantes a y b en la ecuación ajustada se reemplazaron por expresiones que incorporaban GSI y el factor de perturbación D.

Estos fueron ajustados para dar la curva promedio equivalente y los límites superior e inferior, en los cuales > 90% de los puntos de datos se ajustaron. Tenga en cuenta que la constante a = 100 000 en la ecuación x es un factor de escala y no está directamente

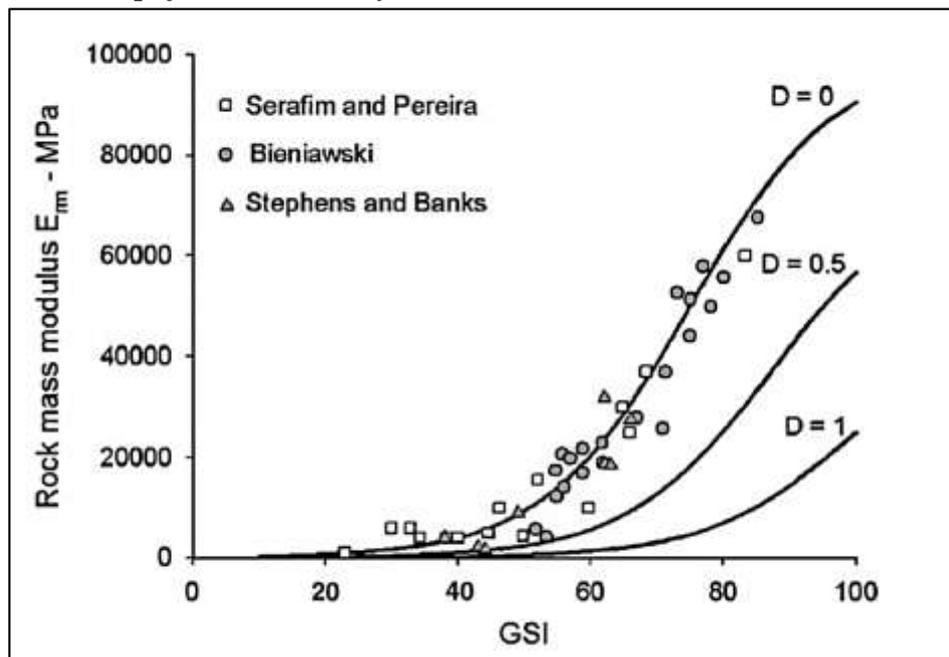
relacionado con las propiedades físicas de la masa rocosa. Se derivó la siguiente ecuación de mejor ajuste:

$$E_{rm}(MPa) = 100,000 \left( \frac{1-D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right) \quad (24)$$

Para probar independientemente la adecuación de la ecuación antes descrita, se ha comparado con los datos de campo medidos informados por Serafim y Pereira, Bieniawski y Stephens and Banks. Estos datos provienen de pruebas de alta calidad y se consideran confiables. Todos estos datos se recopilaron antes de 1989 y luego se ha supuesto que GSI = RMR76.

De la figura N° 29 se puede ver que el simplificado Hoek y Diederichs da un buen ajuste a este campo de datos para D = 0 (límite superior, condiciones no alteradas).

**Figura N° 29:** Diagrama de datos del módulo de deformación de masa de roca in situ de Serafim y Pereira, Bieniawski y Stephens y Banks, contra la ecuación simplificada de Hoek y Diederichs



Fuente: Hoek, Diederichs ( 2005)

#### 2.1.11.4 Módulo de deformación de la roca intacta

Hoek (2006) indican que los datos del módulo de deformación en masa rocosa de China y Taiwán incluyen información sobre la geología y la resistencia a la compresión uniaxial ( $\sigma_{ci}$ ) de la roca intacta. Esta información permite un análisis más detallado en el que se puede incluir la relación entre el módulo de masa y el módulo intacto (

$E_{rm}/E_I$ ). Utilizando la relación de módulo MR propuesta por Deere (1968) (modificada por los autores basada en parte en este conjunto de datos y también en correlaciones adicionales de Palmstrom y Singh (2001)) es posible estimar el módulo intacto de:

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci} \quad (25)$$

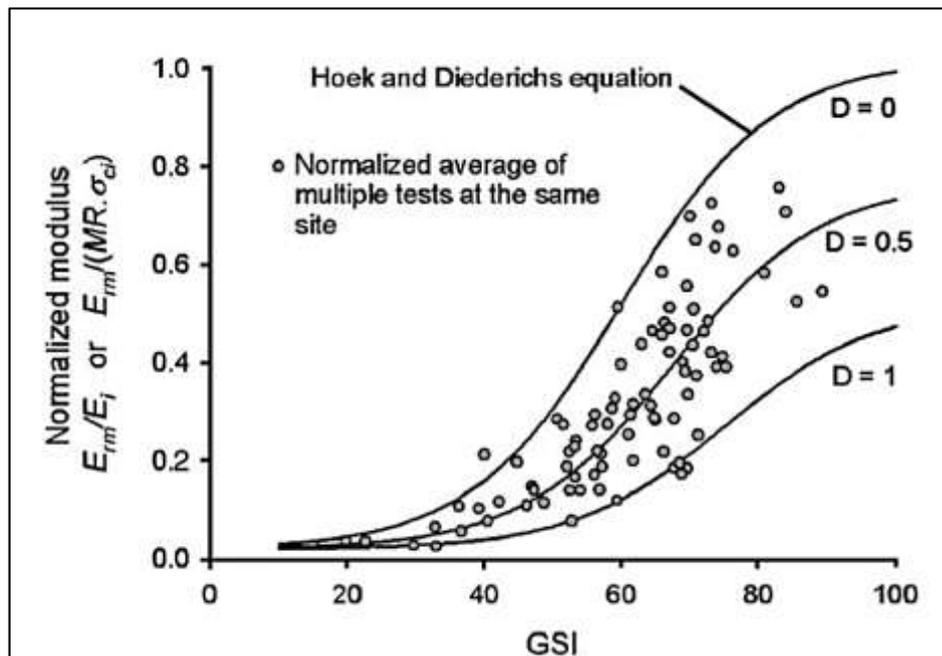
Esta relación es útil cuando no se dispone de valores directos del módulo intacto ( $E_I$ ) cuando el muestreo completamente inalterado para la estimación de E es difícil. Un análisis detallado de los datos chinos y taiwaneses, usando la ecuación antes descrita para estimar resultó en la siguiente ecuación:

$$E_{rm} = E_i \left( 0.02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right) \quad (26)$$

Ecuación de Hoek y Diederichs

Esta ecuación incorpora un valor finito para el parámetro c para tener en cuenta el módulo de roca quebrada o fracturada (roca transportada, agregado o suelo) descrito por  $GSI = 0$ . Esta ecuación se representa frente a los datos de campo normalizados promedio de China y Taiwán en la figura 30.

**Figura N° 30: Módulo de deformación de masa de roca in situ normalizado de China y Taiwán frente a la ecuación de Hoek y Diederich.**



Fuente: Hoek, Diederichs (2005)

**2.1.11.5 Factor de disturbancia**

Hoek, Carranza y Corkum (2002) señalan que la experiencia en el diseño de taludes en grandes tajos a cielo abierto ha mostrado que el criterio de Hoek-Brown para macizos rocosos *in situ* no alterados ( $D = 0$ ) da lugar a parámetros de resistencia del macizo rocoso consideradas optimistas. Los efectos de los intensos daños de las voladuras, así como de la elación de esfuerzos debido a la retirada del estéril de recubrimiento, provocan una alteración del macizo rocoso. Para estos macizos rocosos es más apropiado considerar propiedades “alteradas” el macizo, es decir  $D = 1$  en las ecuaciones.

Cheng y Liu recopilaron los resultados de análisis retrospectivos de medidas de deformación, a partir de extensómetros colocados antes del comienzo de la excavación, en la caverna de la central hidroeléctrica de Mingtan en Taiwan. Ellos encontraron que la zona dañada por las voladuras se extendía a una distancia de unos 2 m alrededor de toda la excavación.

La resistencia y propiedades de deformación del macizo rocoso dañado calculadas de manera retrospectiva dan un factor de alteración equivalente  $D = 0,7$ .

A partir de esta referencia, está claro que sobre el grado de alteración en el macizo rocoso a una excavación pueden influir un gran número de factores y que nunca es posible cuantificar estos factores de manera precisa. Sin embargo, a partir de la experiencia y del análisis de todos los detalles recogidos en estos artículos, los autores han intentado establecer unas guías para estimar el factor  $D$ , que son resumidas en la tabla 12.

**Tabla N° 12: Guías para estimar el factor  $D$**

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor $D$ sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado al túnel	$D = 0$



Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso.

D = 0

Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.

D = 0.5



Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso.

D = 0.8



Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo, la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.

D = 0.7

Buena voladura

D = 1.0

Mala voladura



Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento.

D = 1.0

Voladura de producción

D = 1.0

Voladura mecánica

En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.12 INSTRUMENTACIÓN PARA MONITOREO DE VIBRACIONES

ASP BLASTRONICS (2006) indican que la instrumentación que se utiliza para medir las vibraciones de la roca inducidas por voladura, consta de los siguientes componentes:

- ✓ Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalan en forma solidaria a la roca

- ✓ Un sistema de cables que llevan la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo
- ✓ Un equipo de adquisición, el cual recibe la señal y la guarda en memoria
- ✓ Un computador, el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.

- **Número de sensores:**

CINTEX (2005) señalan que el número de transductores usados depende de la cantidad de información requerida. por lo tanto, existen arreglos de geófonos uniaxiales, los cuales miden la velocidad de partículas en un solo eje, arreglos biaxiales que consisten en dos geófonos orientados en dos ejes y arreglos triaxiales los que permiten registrar la velocidad de partículas en los tres ejes (x, y, z), lo que permite obtener el modulo del vector de velocidad de partículas.

Si el interés principal es confirmar la detonación de cada carga (o grupo de cargas en cada retardo), o la medición de la dispersión de los retardos, entonces se requerirá solo un transductor y su localización no será muy crítica.

Si se desea examinar la contribución de cada carga de la voladura, o si el interés es conocer la forma de la onda por cada componente, la fuente generadora de cada vibración debe ser conocida. Se requiere para esto una cuidadosa ubicación y selección del número de transductores a utilizar.

El uso de arreglos triaxiales a diferentes profundidades inmediatamente atrás de las voladuras, se utiliza particularmente en voladuras de minas subterráneas. La dirección de movimiento de la bobina móvil al paso de cada vibración determina si el primer arribo de la señal es positivo o negativo, de acuerdo a esto, la dirección de viaje de las ondas y puede ser determinada la localización relativa de la fuente emisora.

- **Tipos de sensores:**

CINTEX (2005) precisa que 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.

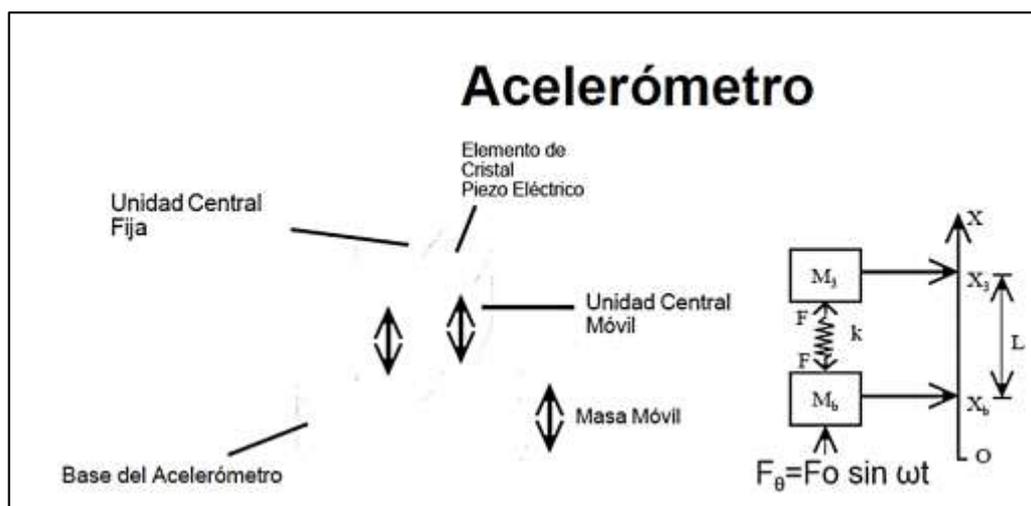
Los dos tipos básicos de transductores usados para medir las vibraciones del terreno son el acelerómetro y el geófono. En la práctica, la selección de los transductores es un compromiso entre la precisión, el costo y la relación señal ruido. En el presente trabajo de investigación se utilizó geófonos.

#### a. Acelerómetros

Los acelerómetros del tipo piezo - eléctrico tienen una alta frecuencia natural y una respuesta lineal bajo su frecuencia resonante. La señal de salida es proporcional a la aceleración, la cual debe por lo general ser amplificada previamente a su grabación.

Los acelerómetros fácilmente reúnen los datos especificados, por lo general son livianos, robustos, pero caros. Son más complejos de usar ya que requieren equipamiento auxiliar tal como fuente de poder y pre amplificadores, los que además pueden inducir problemas de ruidos eléctricos significativos.

**Figura N° 31: Composición de un acelerómetro**



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

Características generales:

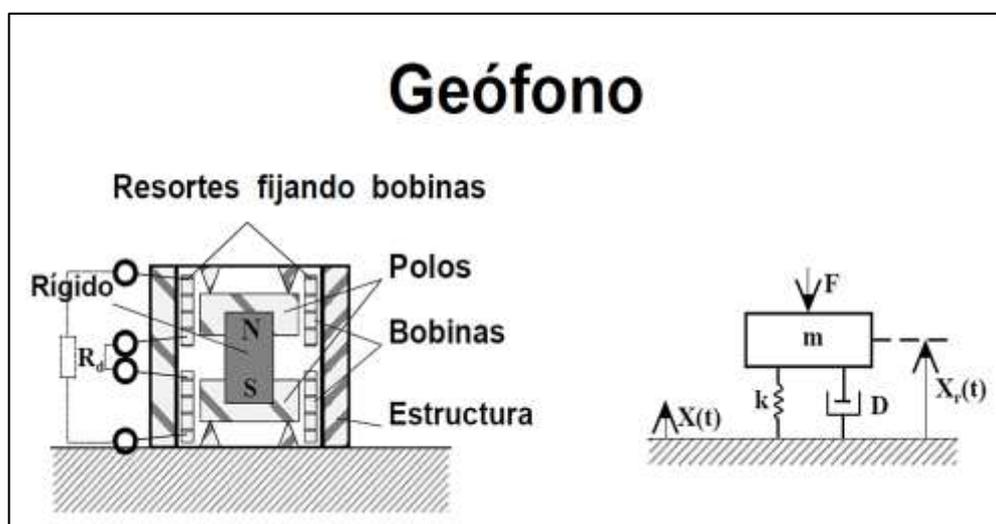
- ✓ Mejor respuesta en un amplio rango de frecuencias (1Hz a 20.000Hz)
- ✓ Su unidad de medida es el g ( $1g=9.8 \text{ m/s}^2$ ), con rangos de 0-250g.
- ✓ No poseen partes móviles, lo que resulta en una mayor fiabilidad.
- ✓ La deformación del cristal piezoeléctrico genera voltajes muy pequeños que deben amplificarse con elementos externos.

- ✓ Son de pequeño tamaño.
- ✓ Alto costo (aprox. US\$ 1.000)

### b. Geófonos

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

Figura N° 32: Composición de un geófono



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

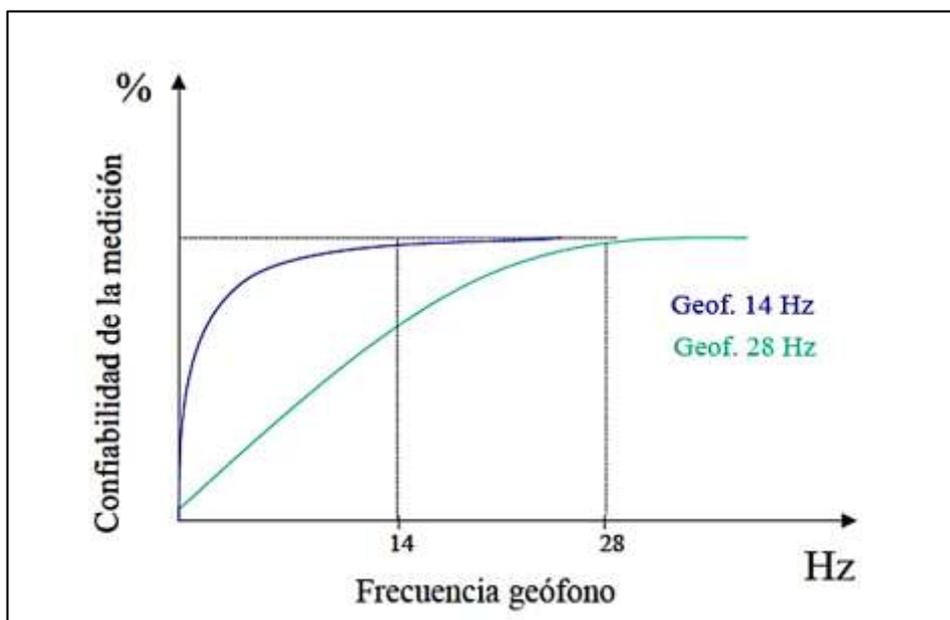
Características generales de los geófonos:

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

### - Frecuencia de registro de los geófonos

CINTEX (2005) señala que se distinguen dos tipos de geófonos, los de campo cercano y los de campo lejano, los cuales poseen un rango de aceptabilidad en la medición que depende de frecuencia que es capaz de registrar, diferenciando los geófonos de 14 Hz y 28 Hz. Los geófonos de 14 Hz son capaces de medir vibraciones a partir de esa frecuencia con perfecta precisión, mientras que los geófonos de 28 Hz son capaces de medir vibraciones a partir de frecuencias sobre los 28 HZ. La Figura 33 da cuenta de la precisión de la medición respecto al nivel de frecuencia esperado en el registro.

**Figura N° 33: Nivel de confiabilidad de la medición de los geófonos en función de la frecuencia.**



Fuente: Elaborado por CINTEX, 2005.

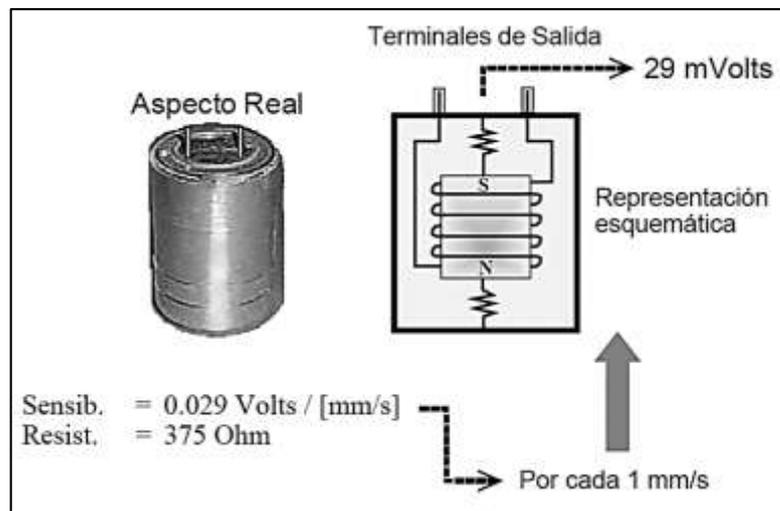
### - Sensibilidad de un geófono

CINTEX (2005) afirman que por otra parte, existe la sensibilidad del geófono, la cual indica la magnitud máxima de vibraciones que puede recibir un geófono, y ésta se indica en unidades de volt/(mm/s). Para obtener el rango máximo de vibración que permitiría registrar un geófono es necesario ingresar el valor de sensibilidad de éste y el equipo de medición entregará el valor máximo de velocidad en forma automática. Sin embargo, para el cálculo de la velocidad máxima, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$V_{\max} = \frac{V(\text{volt})}{S(\text{volt}/(\text{mm}/s))} \quad (27)$$

Donde V corresponde al voltaje máximo que es capaz de recibir el equipo de medición y S a la sensibilidad del geófono. Para el caso de los equipos Blastronics, el valor de V es de 24 volt, mientras que para los equipos Minimate Plus este valor es de 1,6113 volt.

**Figura N° 34: Representación esquemática de la sensibilidad de un Geófono.**



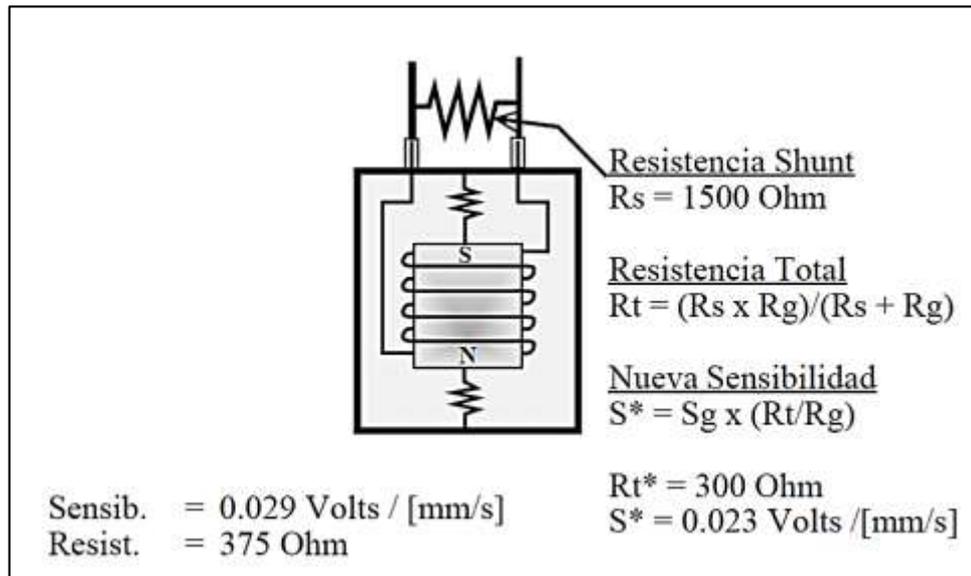
Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

Si por alguna razón se desea aumentar o disminuir el valor de S, se puede realizar mediante la incorporación de nuevas resistencias al geófono, ya sea en serie o en paralelo. La nueva sensibilidad de un geófono se determina de la siguiente relación

$$S_N = S * \frac{R_T}{R_G} (\text{volt}/(\text{mm}/s)), \quad (28)$$

Siendo SN la nueva sensibilidad del geófono, RT la resistencia total del geófono y RG la resistencia inicial del geófono. Por lo general cuando se envían los geófonos, éstos traen su información de sensibilidad y resistencia. El motivo de modificar la sensibilidad de un geófono es para modificar el nivel máximo de vibraciones que permita registrar el geófono.

**Figura N° 35: Representación esquemática del cambio de la sensibilidad de un geófono.**



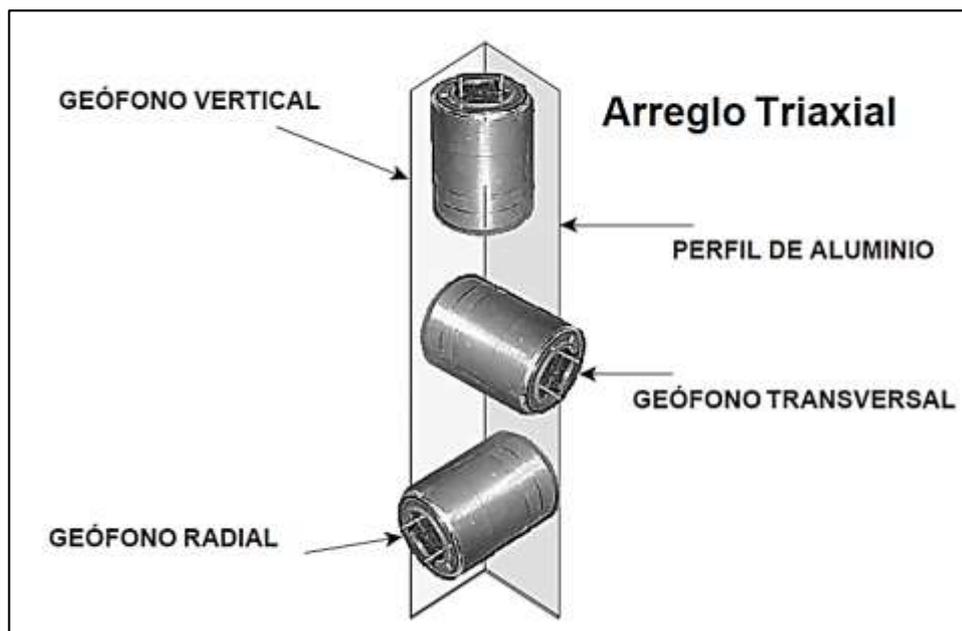
Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

**- Instalación de sensores**

CINTEX (2005) señala que 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 la técnica empleada para instalar y orientar los transductores.

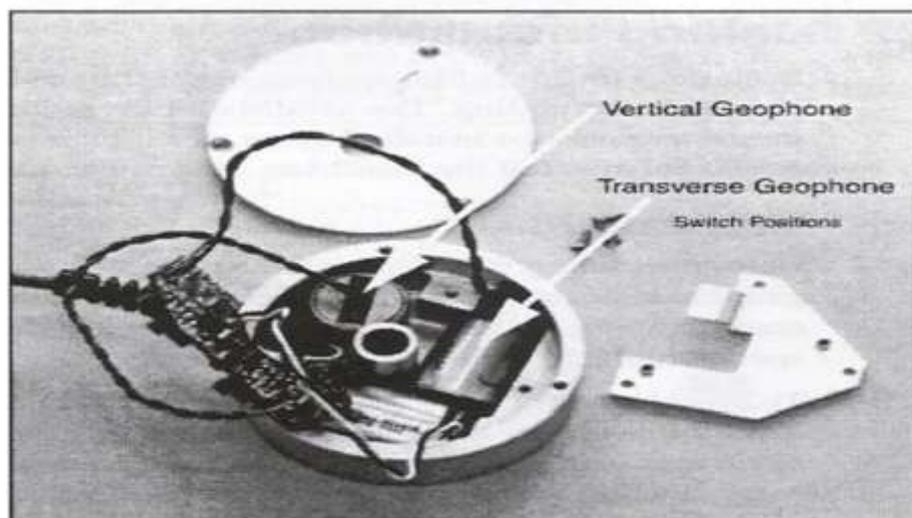
La relación ortogonal entre las 3 componentes de un arreglo triaxiales, se logra ubicando cada una de las tres componentes sobre las caras opuestas de un pequeño trozo de barra en ángulo rígido no conductor. Es necesario mantener una disposición coherente de las tres componentes que asegure, al momento de la instalación, que los primeros arribos de las señales sean de signo positivo o negativo, y esto se mantenga constante.

**Figura N° 36:** *Arreglo triaxiales de geófonos para monitoreo en campo cercano*



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

**Figura N° 37:** *Arreglo triaxiales de geófonos para monitoreo en campo lejano*



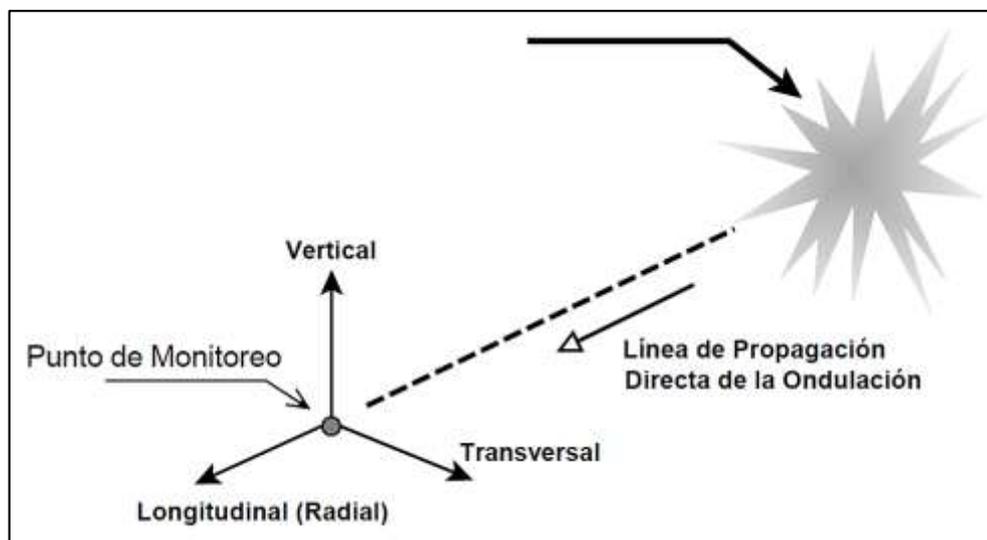
Fuente: Pampacata, H.L.R. – 2015.

#### - **Orientación**

ASP BLASTRONICS (2006) precisa que para realizar una adecuada interpretación de los datos de vibración, que permitan analizar la secuencia real de iniciación de un

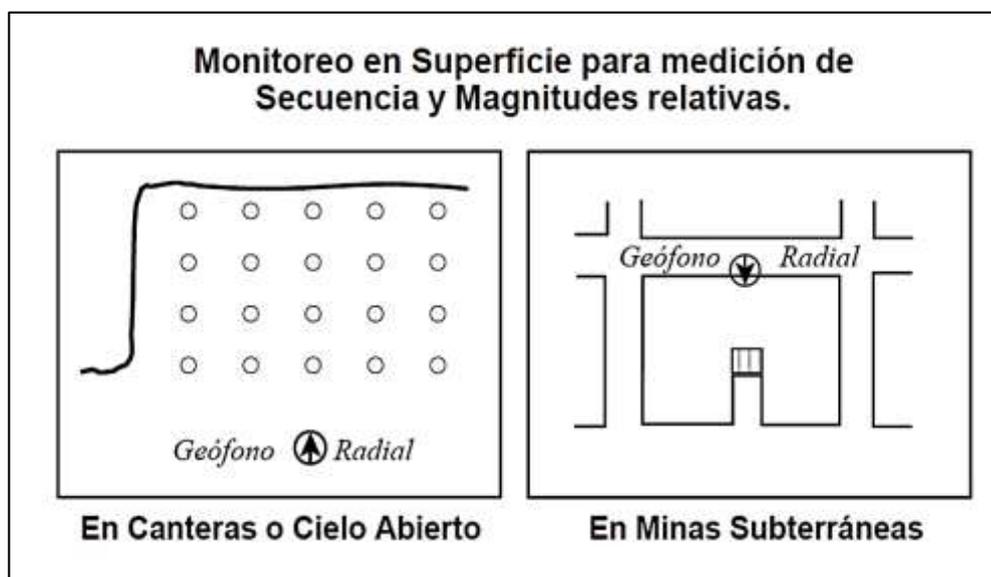
determinado número de cargas, en asociación con la posición relativa entre ésta y el transductor, es necesario tener absoluta certeza de la orientación real del transductor.

**Figura N° 38:** *Orientación hacia la voladura de los sensores longitudinal, vertical y transversal*



Fuente: Elaborado por BLASTRONICS, 2006.

**Figura N° 39:** *Orientación del geófono con el sensor longitudinal hacia la voladura en mina a tajo abierto y subterráneo en la superficie de la roca.*



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

### - Acoplamiento de geófono en superficie del macizo rocoso

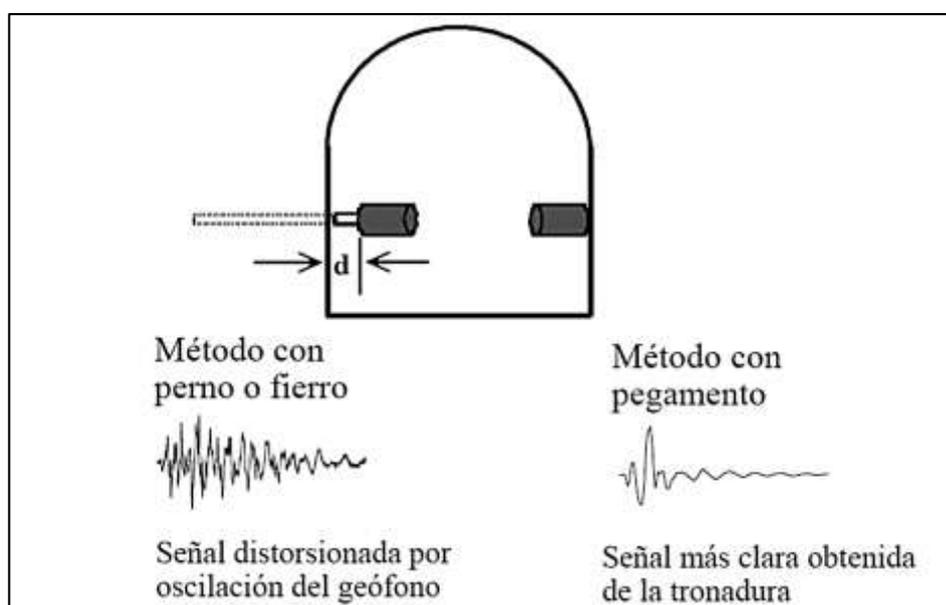
Útil para medición relativa en el campo cercano (tiempos y secuencia de detonación), y de uso frecuente para medición en el campo lejano.

Pampacata (2015) indica que el método de enterrado es preferible excavar un hoyo no menor de tres veces la altura del sensor de acuerdo a la norma ANSI S2.47 – 1990, R1997, colocar el sensor en el fondo del hoyo y compactar firmemente el suelo alrededor y sobre el geófono.

La fijación del geófono sobre superficie rocosa se realiza por medio de pernos, grampas o adhesivos.

El sensor puede fijarse a la base de la estructura si está a +/- 1 pie (0.30 m) del nivel del suelo de acuerdo a la norma USBM RI8969. Este método se usará si el enterrado, el clavado o el refuerzo con bolsas de arena no fuera práctico

**Figura N° 40: Posible errores en la señal resultante por mal acople del geófono**



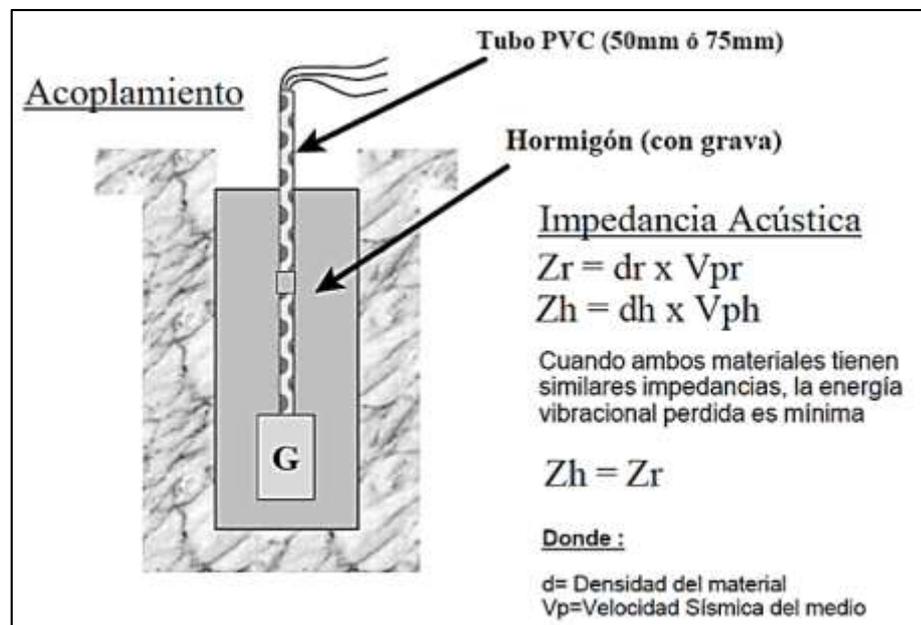
Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

### - Acoplamiento de geófono dentro del macizo rocoso

Útil para medición de valores absolutos en el Campo Cercano y es de un solo uso por estar acoplado mediante el uso de cemento.

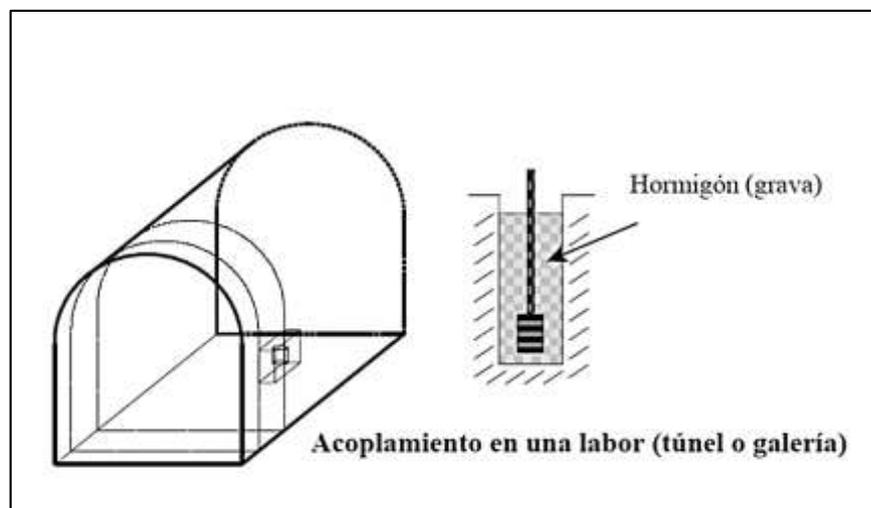
CINTEX (2005) indica que una vez que el transductor está ubicado en la perforación de monitoreo y correctamente orientado, su posición debe ser asegurada por medio de cemento con características de hormigón, el cual proporciona mejor acoplamiento. Se debe en lo posible realizar esta operación dentro de una perforación que tenga la mínima diferencia entre los diámetros, pero que facilite la operación. La idea en definitiva es disminuir la zona de interface entre los dos medios esto es, la roca y el instrumento detector.

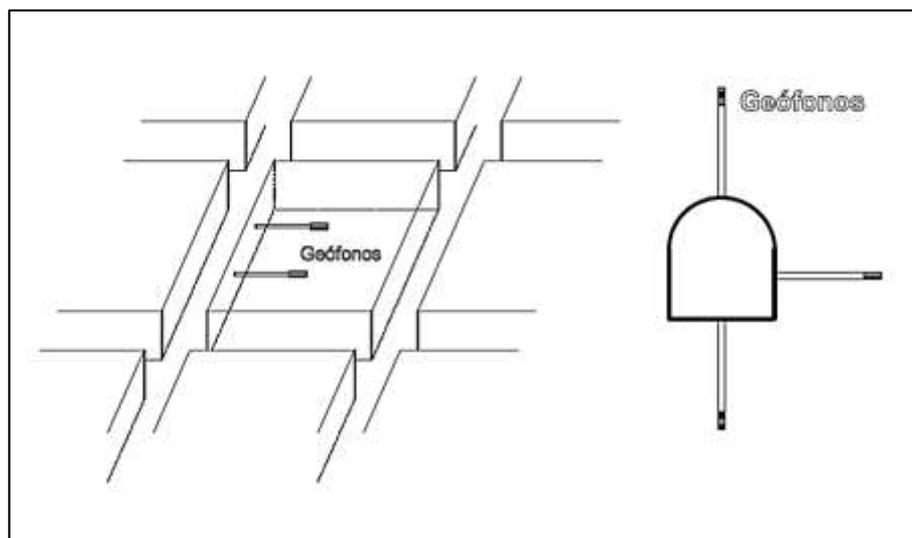
**Figura N° 41: Acoplamiento del geófono dentro del macizo rocoso con hormigón de similar impedancia con la roca.**



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

**Figura N° 42: Acoplamiento del geófono dentro del macizo rocoso en labores subterráneas.**





Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006.

### 2.1.12.1 EQUIPOS DE MONITOREO

CINTEX (2005) señalan que 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.

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

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

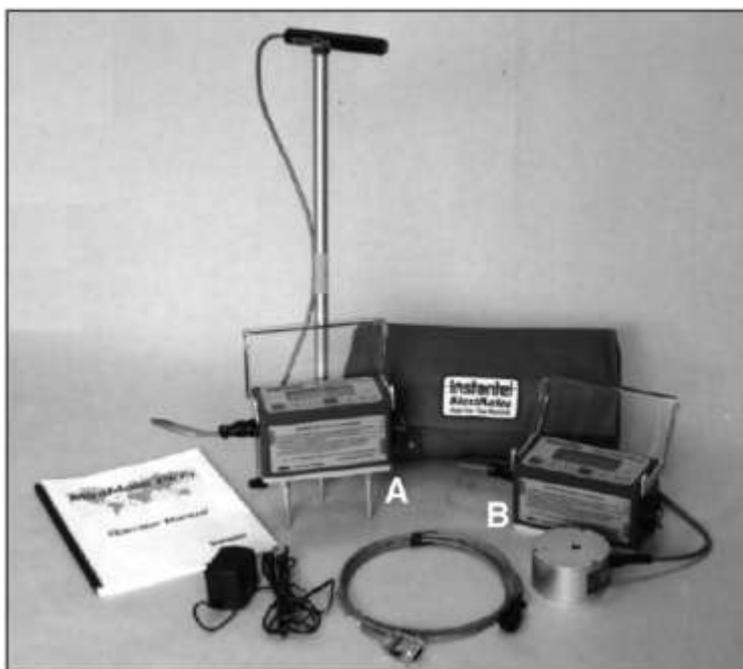
#### a) Sismógrafo Instantel Minimate Plus

El Minimate Plus funciona como un monitor de cumplimiento básico con funciones intuitivas y facilidad de uso para ayudar a la primera vez que el operador configura y graba un evento rápidamente. El Minimate Plus también ofrece funciones avanzadas

para aplicaciones específicas que requieren más información para ser recopilada y analizada.

La serie de monitores Minimate Plus incluye dos modelos basados en la cantidad de canales de grabación, como se muestra en la Figura 43. El modelo estándar ofrece cuatro canales de grabación y un transductor estándar integrado (A). El segundo modelo ofrece ocho canales de grabación con su elección de transductores y micrófonos externos (B). Todos los modelos ofrecen el nivel de rendimiento y la facilidad de uso que espera de los monitores InstanTel.

**Figura N° 43: Modelos de sismógrafos Minimate Plus y accesorios**



Fuente: Manual de operador Minimate Plus, elaborado por InstanTel

**b) Especificaciones técnicas Sismógrafo Minimate Plus**

**Tabla N° 13: Especificaciones técnicas sismógrafos Minimate Plus**

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	
Canales	01 Micrófono y 01 geófono triaxiales o 4 canales independientes
	02 Micrófonos y 02 geófonos triaxiales u 8 canales independientes

## Monitoreo de vibración con geófono triaxiales estándar

Rango	Hasta 254 mm/s
Rango de frecuencia	2 a 250 Hz dentro de acero
Monitoreo se sobrepresión del aire	
Rango lineal	88 a 148 dB
Respuesta a Frecuencia Lineal	2 a 250 Hz
Rango peso A	50 a 110 dBA
Registro de datos	
Modalidad de registro	Manual, un solo disparo , continua
Activación sísmica	0.125 a 254 mm/s
Activación acústica	
Lineal	100 A 148 dB
Peso A	55 a 110 dBA
Velocidad de muestreo	
Por canal	1024 a 16384 ciclos/seg por canal (independiente del tiempo de registro)
Un solo canal	Hasta 65536 ciclos /seg en un solo canal
8 canales	Con software avanzado máxima 8192 ciclos/seg por canal
Tiempo de ciclo	El registro no se interrumpe mientras se procesa los eventos
	Capacidad de almacenamiento
Eventos completos	300 eventos de un segundo a 1024 ciclos/seg

Fuente: Elaboración propia en base al manual de operador Minimate Plus de Instantel

### c) Sismógrafo White Miniseis

El Mini-Seis está diseñado para vibraciones de explosión de bajo costo y monitoreo de vibración industrial. Se ofrece en un paquete pequeño que pesa aproximadamente 3.5 libras. Hay una pantalla de dos líneas, 40 caracteres y seis teclas para la programación en el sitio. Incluye un micrófono externo y un paquete de detección triaxial de movimiento en el suelo.

El Mini-Seis se puede pedir con niveles variables de memoria para la grabación de eventos. Los modelos de memoria estándar y los parámetros de almacenamiento de eventos aproximados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 14: Modelos de Sismógrafos Mini –Seis digital por capacidad de memoria**

Modelo de instrumento	Memoria	Capacidad aproximada de eventos almacenados
Mini-Seis 1/4M	1/4M (256K)	50 - 100 eventos tipo explosión
Mini-Seis 1/2M	1/2M (256K)	150 - 250 eventos tipo explosión
Mini-Seis 1.0M	1.0M (256K)	Hasta 340 eventos tipo explosión

Fuente: Manual de operador Mini – Seis Digital, elaborado por White Industrial Seismology.

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó el moldeo Mini – Seis 1.0M, para registros hasta 340 eventos del tipo explosión.

**Figura N° 44: Sismógrafos Mini –Seis digital**



Fuente: Manual de operador Mini – Seis digital, White Industrial Seismology.

**Tabla N° 15: Especificaciones técnicas sismógrafo Mini – Seis digital**

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	
Canales	Tres canales sísmicos y un canal acústico
<b>Monitoreo de vibración con geófono triaxiales estándar</b>	
Rango	0.125 a 64 mm/s
	0.25 a 127 mm/s
	0.5 a 254 mm/s
Rango de frecuencia	2 a 500 Hz a 2048 ciclos por segundo
<b>Monitoreo se sobrepresión del aire</b>	
Rango lineal	100 a 142 dB
	106 a 148 dB
<b>Registro de datos</b>	
Modo temporizador	Esta activo solo durante las horas seleccionadas.
Velocidad de muestreo	De 32 hasta 2048 ciclos por segundo por canal
Activación sísmica	0.25 a 14.5 mm/s
	0.5 a 29 mm/s
	1.0 a 58 mm/s, modificado de acuerdo al rango del geófono
Activación acústica	106 a 142 dB
	112 a 148 dB
Duración del registro	De 1 a 6 segundo a una velocidad de muestreo de 2048 ciclos/seg a menor velocidad de muestreo, la duración automáticamente incrementa
Tiempo de ciclo	Con 1024 muestras por segundo, se pueden tomar hasta 12 segundos de datos con solo 50 milisegundos entre eventos. Después de almacenar 12 segundos de datos, no se puede realizar otro evento hasta que se hayan procesado los datos anteriores.
Capacidad de almacenamiento	Hasta 341 eventos típicos de mina de carbón o cantera

Fuente: elaboración propia en base al manual de operador Mini – Seis digital, White Industrial Seismology.

### 2.1.12.2 SOFTWARE DE ANÁLISIS DE REGISTROS DE VIBRACIÓN

ASP BLASTRONICS (2006) indican que el análisis de los datos requiere de un conjunto computador y software con capacidades para un manejo integral de la forma de onda, y donde las principales tareas que deben realizar, son las siguientes:

- Desplegar múltiples señales
- Amplificación de partes de la señal total (efecto zoom)
- Cursor móvil sobre la señal para un análisis acucioso de los tiempos y amplitudes
- Derivación e integración de las ondas
- Generar el vector suma de tres componentes ortogonales
- Despliegue de las señales en el dominio de la frecuencia
- Filtro de frecuencia

Para el análisis de los registros de vibración en el presente estudio se utilizó el software de Blastware para los sismógrafos Instantel y el Seismograph Data Analysis para los sismógrafos White Seismology.

#### a) SOFTWARE BLASTWARE

Instantel (2015) señala que el programa de software Blastware tiene dos módulos. El primero es el Módulo de Cumplimiento y viene de serie con cada Blastmate III, Minimate Plus, o Minimate Blaster, o un monitor Serie IV. Este módulo incluye todos los comandos para controlar las funciones básicas de cumplimiento de tu monitor. También puede usarlo para transferir sus Eventos grabados a una computadora personal donde puede verlos, formatear Informes de Evento y FFT que su impresora puede producir, o producir un formato de archivo PDF que puede enviarse por correo electrónico.

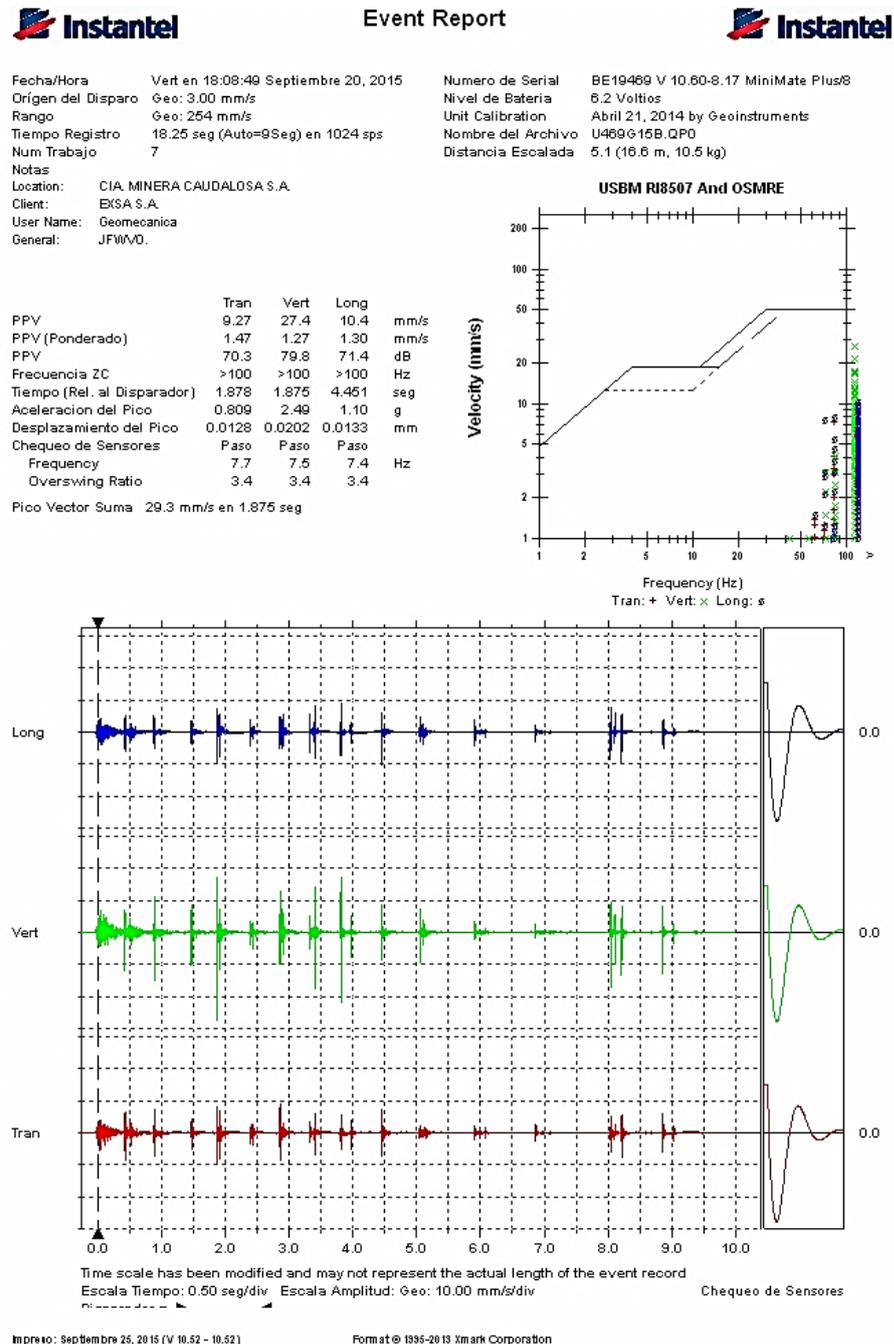
El segundo módulo, el Módulo avanzado, proporciona funciones avanzadas para analizar los eventos grabados. Puede editar estándares nacionales de frecuencia, realizar FFT y análisis de línea de tiempo. También puede integrar, diferenciar, invertir, agregar, superposición lineal, filtrar y truncar formas de onda.

#### - Reporte y análisis de eventos:

Para un mejor análisis se usan las funciones avanzadas del Blastware III, las cuales se pueden usar con la llave de seguridad del software. Esta llave nos permite tener el

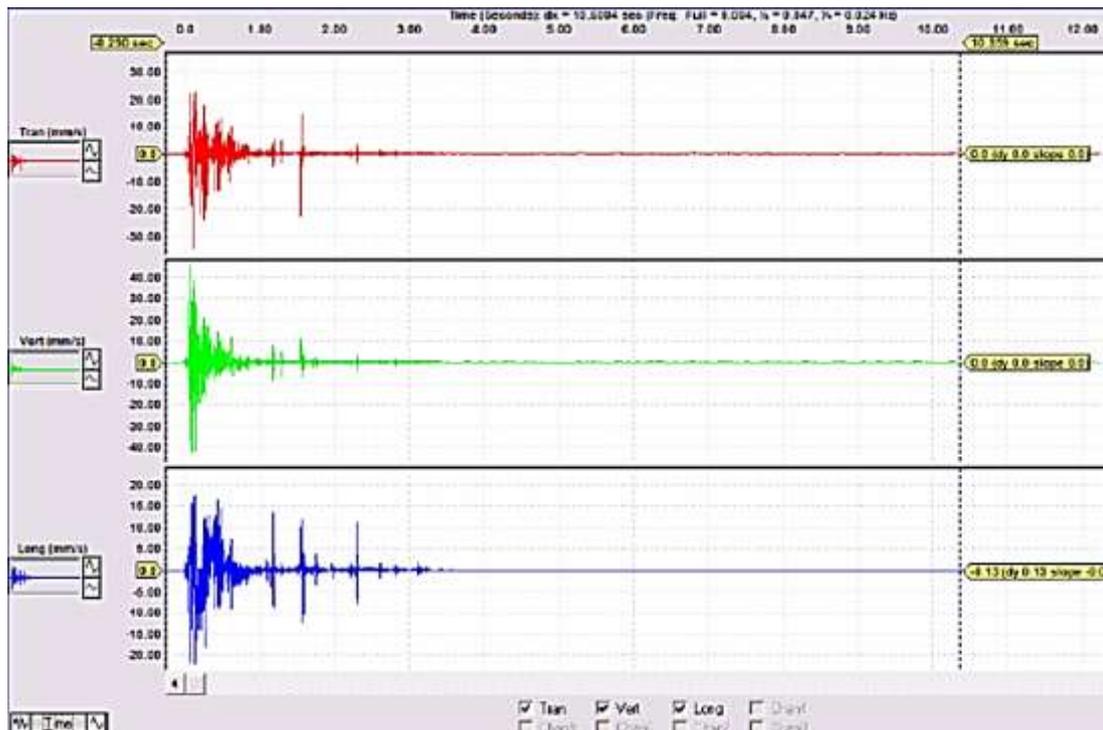
botón Analysis en la ventana Event Manager (sin la llave este botón no aparece y el software solo puede emitir el reporte general). Al hacer Click en Analysis se tiene una vista de la pantalla con el juego de ondas en sus tres direcciones y que pueden ser vistas una separada de la otra seleccionando cual o cuales se desean visualizar como se ve en los gráficos siguientes:

**Figura N° 45: Reporte de registros de vibración con Blastware con llave**



Fuente: Software Blastware, 2015

**Figura N° 46: Análisis de registros de vibración con Blastware con llave**



Fuente: Manual de operador Blastware, 2015

## b) SOFTWARE SEISMOGRAPH DATA ANALYSIS

White Industrial Seismology (2008) indica que el software Seismograph Data Analysis es común que los siguientes dos procesos sean los más utilizados:

- **Descarga de registros:** Es lo más simple posible. Sin embargo, hay algunas decisiones que los usuarios debemos tomar. Ejemplo, ¿en qué carpeta (s) en el medio de almacenamiento (difícil unidad, disquete, etc.) se almacenarán los registros? ¿Cómo se nombrarán las carpetas para que los registros se puedan ubicar fácilmente (consulte Sugerencias para crear nuevas carpetas para almacenar registros)?
- **Imprimir registros:** Esto es muy fácil de hacer. Simplemente vamos a la carpeta donde están los registros almacenado, indicamos qué registros queremos imprimir y hacemos clic en la opción de impresión. Podemos suministrar un conjunto personalizado de encabezados de informes y, si lo deseamos, elija una de las dos funciones de análisis más comunes.

**- Reporte y análisis de eventos:**

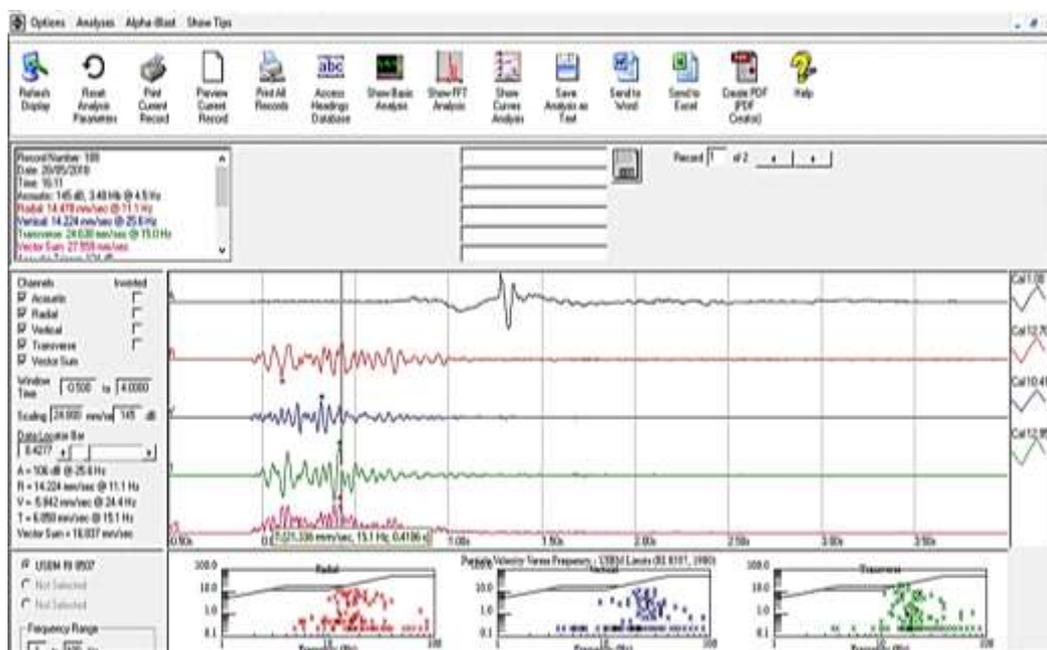
Las capacidades de análisis del software son extensas, casi cualquier análisis significativo que necesita está disponible.

Funciones básica de forma de onda y gráfico de barras

- Desplazarse fácilmente de un registro seleccionado al siguiente.
- Cambiar la ventana de tiempo
- Establecer las escalas de amplitud.
- Verifique qué canales mostrar.
- Muestre las amplitudes en cualquier punto de tiempo en la forma de onda usando la barra de localización.
- Especifique encabezados de informe

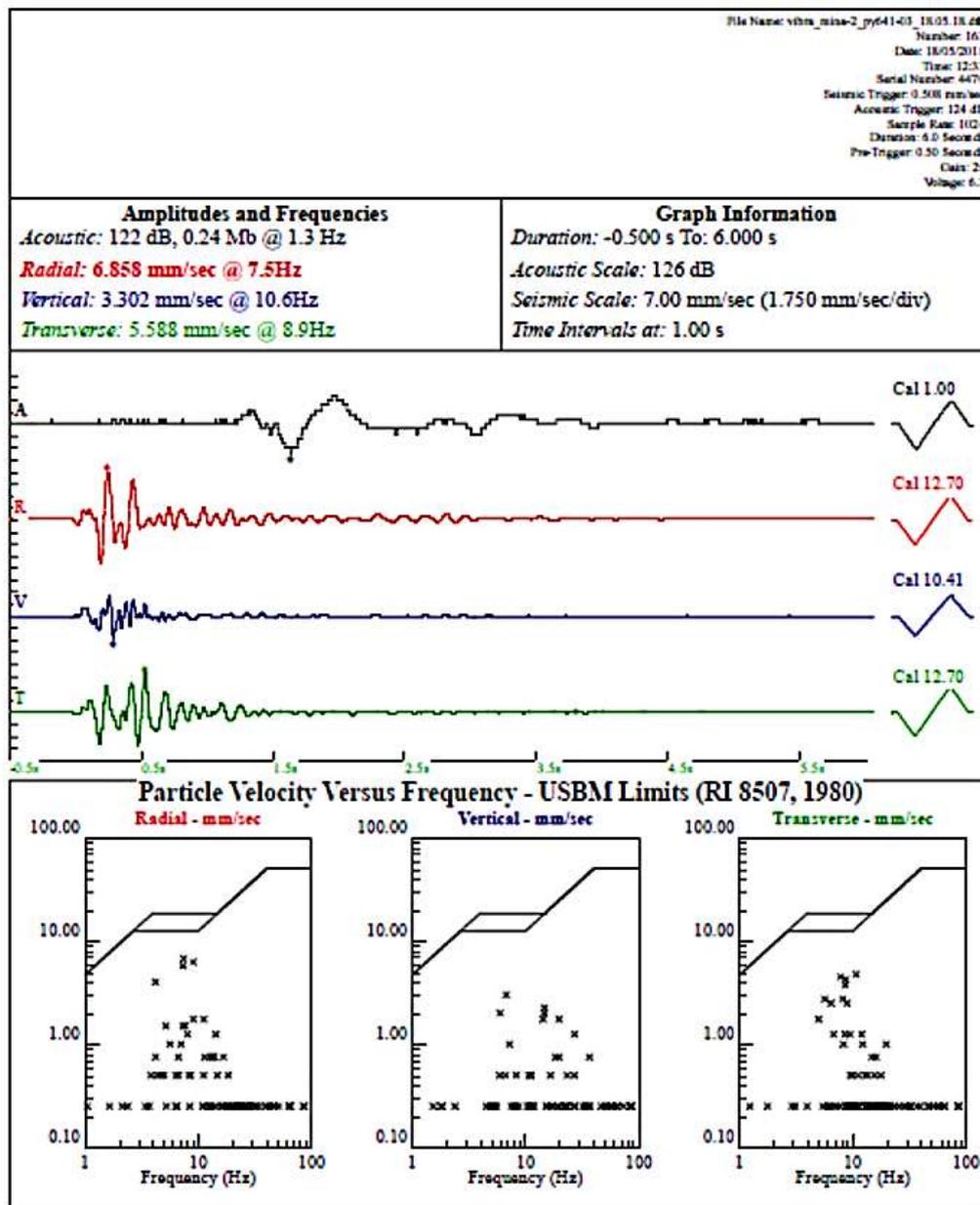
Así mismo cuenta con funciones de análisis de forma de onda tales como: frecuencia FFT, movimiento de partículas análisis de velocidad, desplazamiento y aceleración, etc.

**Figura N° 47: Análisis de eventos con Seismograph Data Analysis**



Fuente: Manual de Seismograph Data Analysis 9.X, 2008

Figura N° 48: Reporte de vibraciones con Seismograph Data Analysis



Fuente: Software Seismograph Data Analysis

### 2.1.13 ANÁLISIS DE REGISTROS DE VIBRACIONES

ASP BLASTRONICS (2006) indican que la señal de vibraciones producida por una voladura, consiste en un número discreto de paquetes de ondas, cada uno de estos corresponde a cargas o grupos de cargas detonando en un determinado tiempo. El primer paso en el análisis de la señal, es determinar que carga representa cada paquete de vibración. De la capacidad para realizar esto depende determinar la diferencia entre la detonación real y la secuencia diseñada.

La forma y amplitud de un paquete de vibración, da la efectividad relativa de la detonación de las cargas en una voladura. La amplitud de vibración es una medición de la energía transferida por el explosivo al macizo rocoso por lo que para un determinado tipo de carga y geometría de monitoreo, la amplitud relativa puede ser usada como una medición de la eficiencia de cada carga.

Con el monitoreo y análisis de las ondas de vibraciones es posible determinar y calcular lo siguiente:

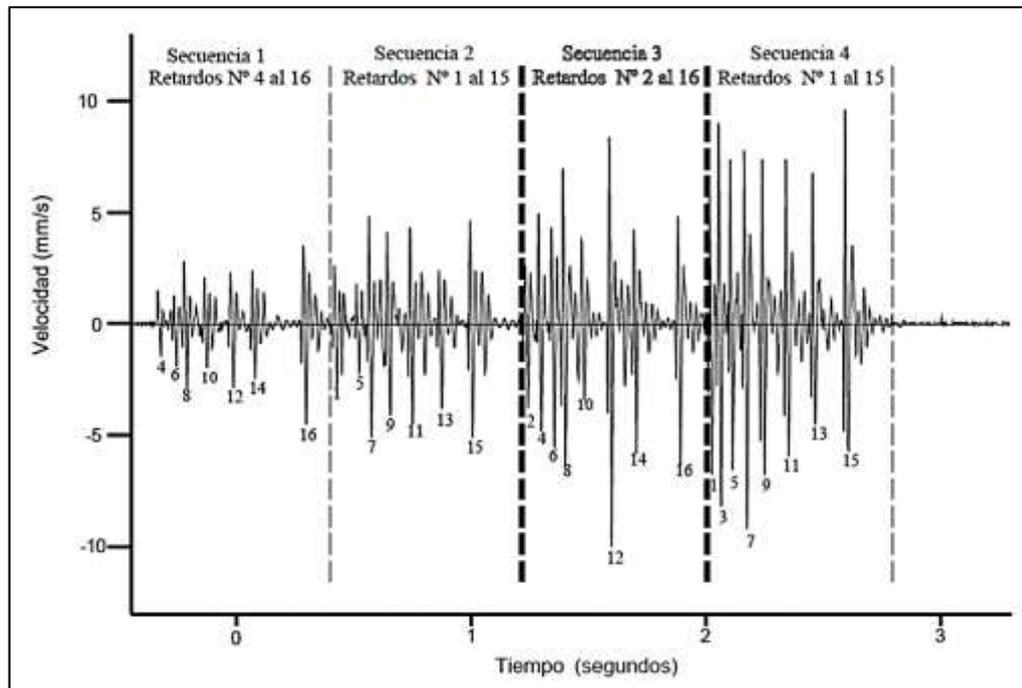
- Tiempo real de detonación de una carga o cargas (dispersión)
- Velocidad de partículas de cada carga en la voladura.
- Detonación de cargas con baja eficiencia o no detonadas.
- Detonación instantánea de cargas; detonación de cargas por simpatía, acoplamiento, por insuficiente tiempo entre retardo de los taladros.
- Eficiencia relativa en la detonación de cargas similares.
- Diferencia entre cargas explosiva de producción y contorno.
- Diferencia entre cargas detonadas con distinto confinamiento.
- Análisis de frecuencia, etc.

A continuación, se detalla los análisis de registros de vibraciones que se tuvo en cuenta para el desarrollo del presente estudio.

#### **2.1.13.1 Secuencia de detonación de los taladros**

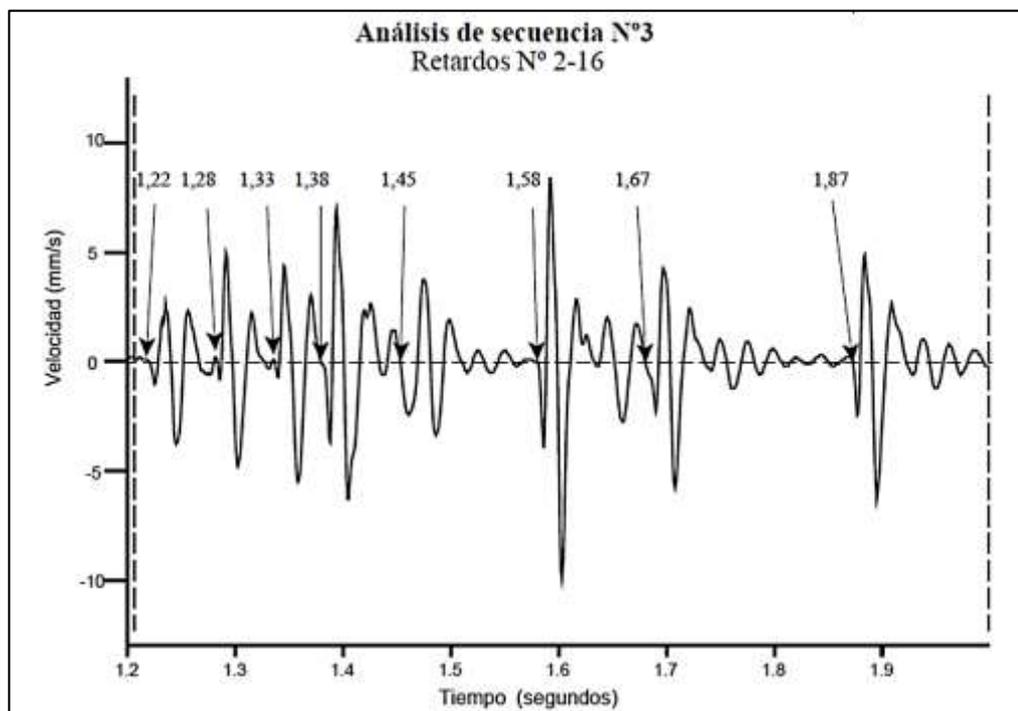
La base del análisis es el registro de vibración propiamente tal, de éste registro es posible obtener con exactitud los tiempos de detonación de cada carga y por lo tanto el rendimiento o precisión de los retardos.

**Figura N° 49: Secuencia de detonación de los taladros por taladros**



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006

**Figura N° 50: Tiempos de detonación de los taladros por taladros**

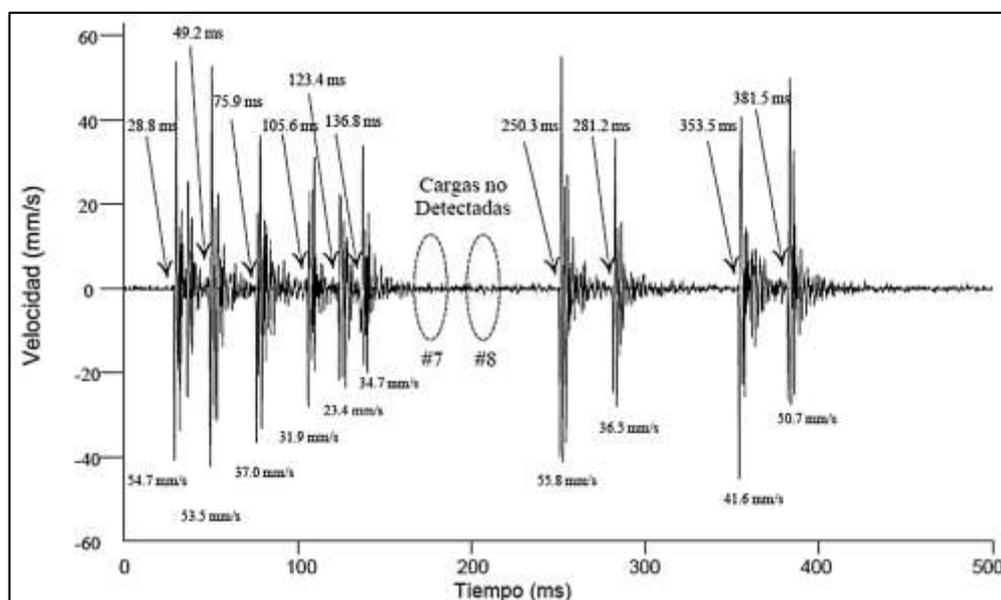


Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006

### 2.1.13.2 Velocidad Pico Partícula de cada carga en la voladura

Para realizar el análisis de la velocidad pico partícula que genera cada taladro o conjunto de taladros en un determinado tiempo de la voladura, es necesario conocer la secuencia y tiempo de detonación de la voladura con el objetivo de identificar zonas de daño por generar intensidades altas de vibración, por ejemplo, se detecta que los taladros auxiliares de contorno presentan los valores de velocidad de partícula más altos en todos los taladros monitoreados, extendiendo una distancia de daño fuera del perímetro de la labor y compromete el correcto funcionamiento o eficiencia de los taladros del perímetro.

**Figura N° 51: Vibración presente en cada taladro cargado**

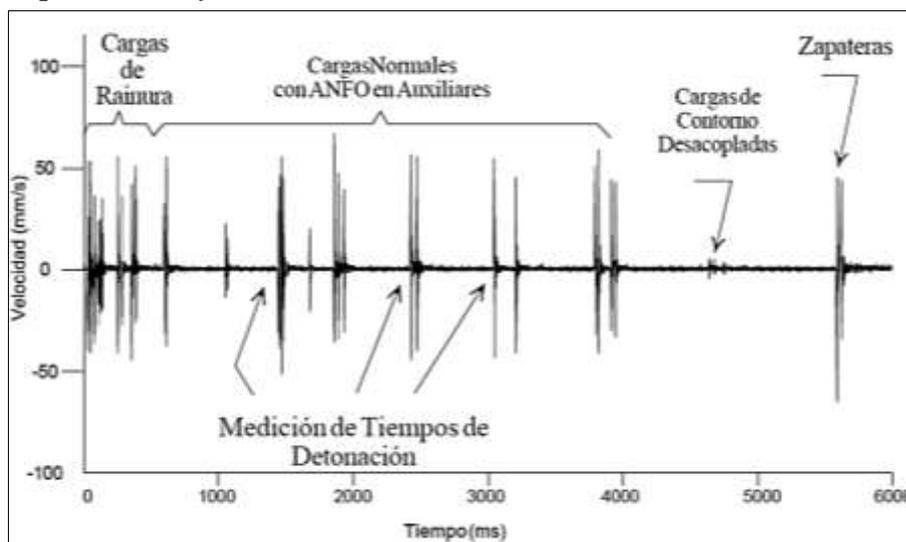


Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006

### 2.1.13.3 Diferencia entre cargas explosiva de producción y contorno

Las voladuras de contorno en túneles se caracterizan por controlar la sobre rotura al emplear explosivos desacoplados y espaciados de menor energía, menor densidad y menor velocidad de detonación reduciendo de esta manera la presión de detonación y presión de taladro de las voladuras de contorno, por lo tanto, el impacto de la vibración al momento de la detonación de estos taladros será mucho menor reduciendo el nivel de daño en el macizo rocoso.

**Figura N° 52: Variación en los niveles de vibración de los taladros de producción y contorno**

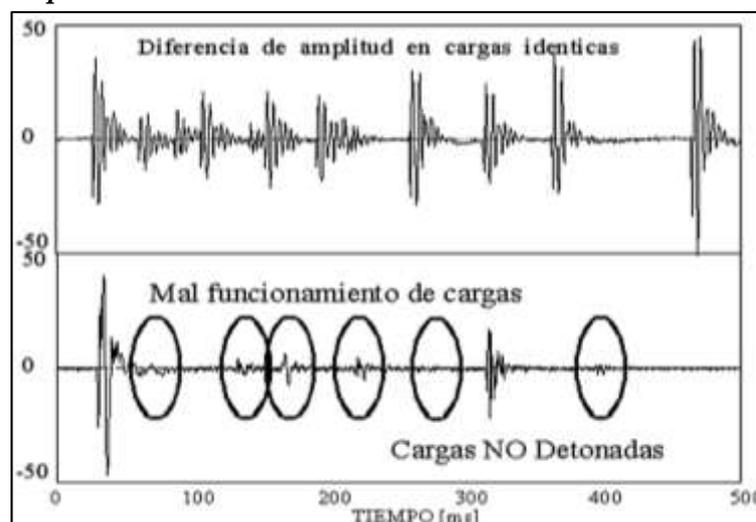


Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006

### 2.1.13.4 Eficiencia relativa en la detonación de cargas similares

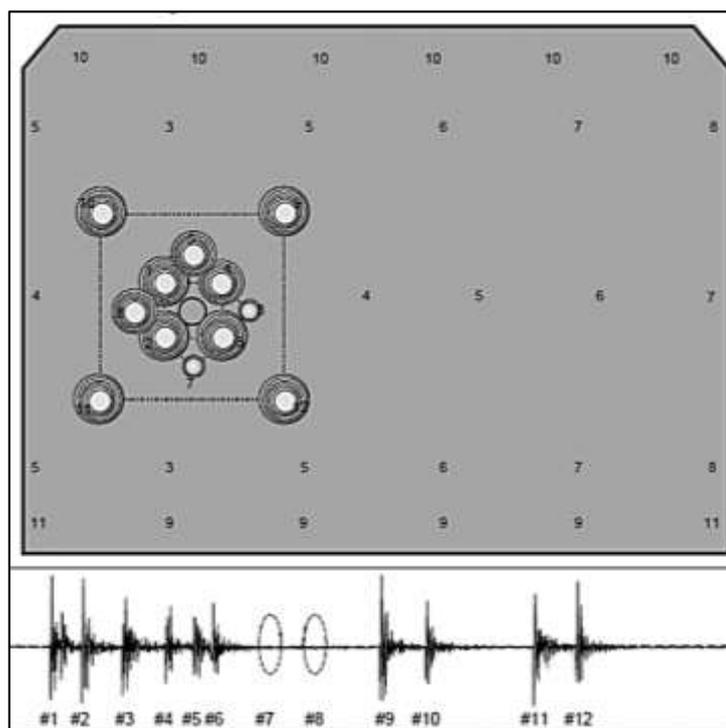
La eficiencia de la detonación de cada carga en base de su amplitud relativa, su vibración en valor absoluto y posteriormente analizar cada sección del diseño (por ejemplo, la ranura) por separado en más detalle, incluso haciendo comparaciones entre un resultado satisfactorio y uno que indica la existencia de varios problemas en el funcionamiento del diseño o su ejecución

**Figura N° 53: Vibraciones del sector de la ranura, para el caso de una voladura con buen y mal resultado respectivamente.**



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006

**Figura N° 54:** *Análisis de la eficiencia al momento de la detonación de los taladros del arranque y ayudas*



Fuente: Elaborado por ASP BLASTRONICS, 2006

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

Se tiene las siguientes definiciones, que fueron utilizados en el presente trabajo de investigación:

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

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

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

**2.2.4 Confinamiento del explosivo:** Es el grado de aislamiento del explosivo de una superficie, se aplica para retener más tiempo la energía del explosivo y evitar su

perdida, en un taladro el confinamiento se da mediante el uso de material inerte (detritus de perforación, stemming, arcilla) en la parte superior de la columna con una determinada altura al cual se conoce como Taco.

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

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

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

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

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

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

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

**2.2.12 Resistencia a la compresión:** Es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento, también se define como la resistencia de un

material a su deformación ante un esfuerzo de compresión, sus unidades de medida son (psi y MPa).

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

## 2.3 HIPÓTESIS

### 2.3.1 Hipótesis general

El nivel de daño inducido al macizo rocoso se reduce mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en el ByPass 179 en la Compañía Minera Kolpa S.A.

### 2.3.2 Hipótesis específicas

- A. La construcción de los modelos predictivos para la reducción del daño en el macizo rocoso se realiza con el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras aplicando el modelo de Divine.
- B. La determinación de los niveles de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión se realiza en función a los siguientes criterios de daño: Intenso fracturamiento, creación de nuevas fracturas y la extensión de fracturas preexistentes.
- C. La reducción del daño en el macizo rocoso se produce aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

##### 3.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación de la presente tesis es **investigación tecnológica**, según Carrasco (2007) señala que esta investigación está dirigida a descubrir y conocer que técnicas son más eficaces o apropiadas para operar, es decir, producir cambios o conservar los progresos alcanzados, así como perfeccionar las actividades productivas o manipular cualquier fragmento de la realidad.

En la realización de la investigación tecnológica es indispensable la concurrencia de la teoría científica, así como de las leyes y principios que definen y explican los hechos y fenómenos de la realidad, sin los cuales no es posible su ejecución.

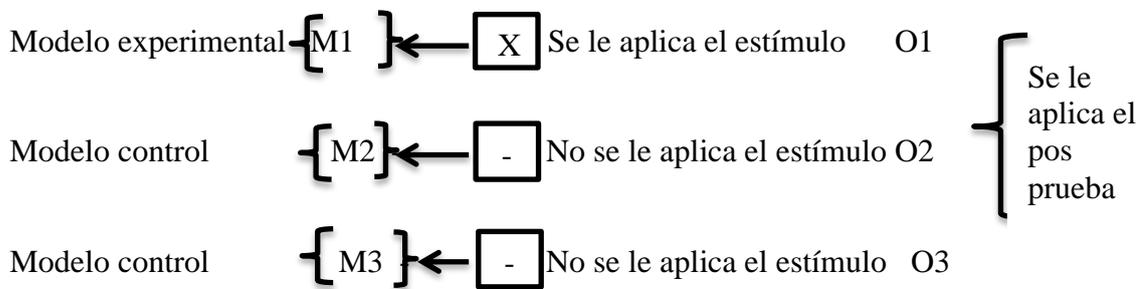
Este tipo de investigación se relaciona esencial, objetiva y metodológicamente con el nivel experimental de la misma, ya que en ambos casos se busca producir cambios cualitativos, mediante aplicación de nuevos sistemas, nuevos modelos o nuevas técnicas. (p.45)

Asimismo es investigación tecnológica puesto que se realizaron voladuras de pruebas con diferentes explosivos en el cual se monitoreó la intensidad de las vibraciones con sismógrafo, para luego predecir el modelo de atenuación de las vibraciones de cada explosivo mediante el análisis de regresión múltiple y determinar el daño inducido en el macizo rocoso.

### 3.1.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

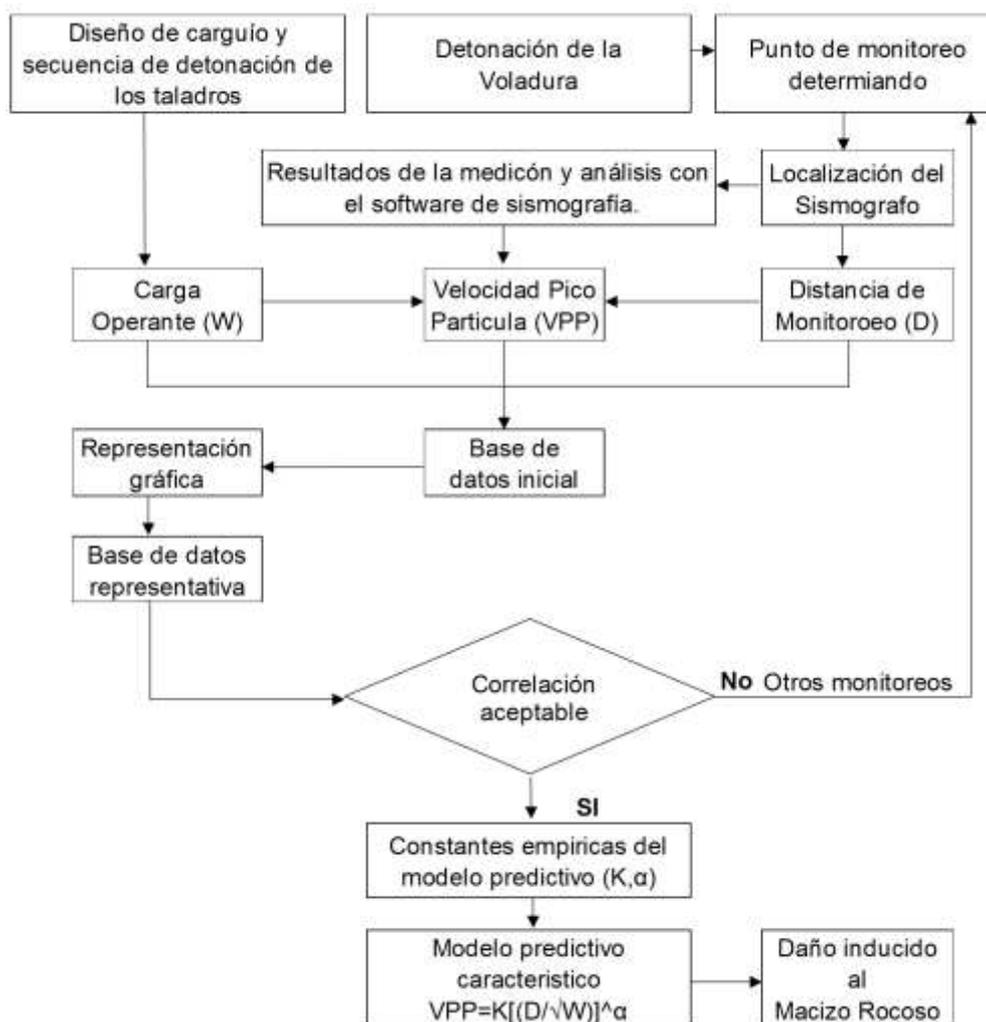
El diseño de la presente investigación es **experimental puro**, en opinión de Hernández y Fernández (1999) como se citó en Carrasco (2007) indica que son aquellos que reúnen los dos requisitos para lograr el control y la validez interna. (p.64)

El subtipo experimental es el **diseño con posprueba únicamente y grupo de control** es el que se aplica en esta investigación, el cual considera para la investigación dos grupos, a uno se le aplica el tratamiento experimental (grupo experimental) y al otro no (grupo de control). En esta investigación tendremos modelo experimental y modelos de control como los dos grupos. (p. 65,66), el mismo que se describe de la siguiente forma:



Asimismo los modelos experimental y los de control de la presente investigación y la aplicación de posprueba a estos se determinó el modelo predictivo (modelo experimental y control) se realizó el monitoreo de vibraciones de una serie de voladuras ejecutadas en la misma zonificación geomecánica utilizando diferentes explosivos, cuantificando las siguientes variables por cada voladura monitoreada: distancia de la voladura al geófono (D), carga operante (W) y el registro del monitoreo de vibraciones (velocidad pico partícula – VPP). Al obtener una base de datos inicial se realiza una representación gráfica de la distancia escalada (relación de distancia de monitoreo entre la raíz cuadra de la carga operante) y la velocidad pico partícula VPP, para luego realizar una regresión múltiple y obtener el modelo predictivo de vibraciones o la Ley de atenuación con sus constantes empíricas del modelo predictivo (K,α).

Figura N° 55: Diagrama de la determinación del modelo predictivo



Fuente: Elaboración propia

Para determinar el nivel del daño inducido en el macizo rocoso del By Pass 179 se realiza el análisis de regresión de la ley de atenuación o modelo predictivo con la finalidad de cuantificar la intensidad de la vibración en los alrededores del perímetro de la labor hasta llegar a los valores de la Velocidad Pico Partícula crítica VPPc, para cuantificar la distancia de daño.

Una vez determinado la distancia de daño, se procede a cuantificar la carga operante máxima por retardo con la finalidad de rediseñar el proceso de voladura y reducir la intensidad de la vibración a valores inferiores de la velocidad pico partícula crítica.

### 3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de la investigación es experimental, el cual responde a las preguntas: ¿qué cambios y modificaciones se han producido?, ¿qué mejoras se han logrado?, ¿cuál es la eficiencia del modelo?, etc.

Es la investigación que se realiza luego de conocer las características del fenómeno o hecho que se investiga y las causas que han determinado tales y cuales características, es decir, conociendo los factores que han dado origen al problema, entonces se le puede dar un tratamiento metodológico. En este nivel se aplica un nuevo sistema, modelo, tratamiento del programa, método o técnicas para mejorar o corregir la situación problemática, que ha dado origen al estudio de investigación. (Carrasco, 2007, p.42)

Por lo tanto en la presente investigación se analizó el nivel de daño inducido en el macizo rocoso por cada explosivo utilizado, aplicando el modelo predictivo de vibraciones de cada explosivo, en el cual se determinó el explosivo adecuado para reducir y controlar el daño inducido en el macizo rocoso.

### 3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.3.1 POBLACIÓN

La población del proyecto de investigación viene a ser la Compañía Minera Kolpa S.A. en su unidad de producción Huacocolpa – Uno, que representa el total de la población que tienen la sisma zonificación geomecánica del By Pass 179 de la rampa II.

#### 3.3.2 MUESTRA

La muestra será el By Pass 179 de la rampa II, que representa a la población que permitirá obtener conclusiones similares a la problemática del proyecto de investigación.

### 3.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica de recolección de datos será la *observación sistemática, estructurada, regulada o controlada y documental* en el cual se utilizará el siguiente instrumento: **Reporte de vibraciones** para medir la intensidad de la Velocidad Pico Partícula que

generan los diferentes explosivos en estudio a través de sismógrafo; asimismo se registra la distancia entre el punto de monitoreo y la voladura a través de un Distanciómetro o Wincha.

Respecto a la recolección de datos de la observación documental se cuenta con la información geomecánica del By Pass 179, los mismos que están detallados en el estudio Geomecánico de la unidad de producción Huacocolpa - Uno de Compañía Minera Kolpa S.A. para determinar la Velocidad Pico Partícula crítica (VPPc) del macizo rocoso.

### 3.4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS TÉCNICOS

En el procesamiento de datos de la **investigación** se realizó con el reporte de vibración, y la información geomecánica del macizo rocoso con los cuales se iniciaron los trabajos de gabinete para analizar los resultados obtenidos.

La información obtenida fue ordenado y procesado de acuerdo a los objetivos e hipótesis de la investigación.

## 3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

### 3.5.1 VARIABLES

Variable independiente

X= Monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras

Variable dependiente

Y= Reducción del daño inducido al macizo rocoso por voladura en el By Pass 179

### 3.5.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

**Tabla N° 16: Operacionalización de variables**

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALAS
<b>Variable X:</b>	1.1. Ubicación de geófonos.	1.1.1. Distancia en metros.	Escala ordinal

<p>Monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras</p>	<p>1.2.Registro de la VPP 1.3. Carga operante de la voladura 1.4 Factor de velocidad (K) 1.5 Factor de atenuación (<math>\alpha</math>)</p>	<p>1.2.1 Milímetros por segundo 1.3.1 Kilos de explosivo por retardo. 1.4.1 Tipo de explosivo 1.5.1 Tipo de explosivo</p>	<p>Criterio de daño:  - Intenso fracturamiento - Creación de nuevas fracturas - Extensión de fracturas preexistentes</p>
<p><b>Variable Y:</b>  Reducción del daño inducido al macizo rocoso por voladura en el By Pass 179</p>	<p>2.1. Modelo predictivo de vibraciones</p>	<p>2.1.1. Modelo predictivo para el explosivo Anfo. 2.1.2. Modelo predictivo para el explosivo Emulnor 1000 con carga corrida. 2.1.3. Modelo predictivo para el explosivo para el explosivo Emulnor 1000 con carga espaciada. 2.1.4. Modelo predictivo para el explosivo para el explosivo Famecorte E-20.</p>	
	<p>2.2. Velocidad Pico Partícula crítica</p>	<p>2.2.1 Resistencia a la atracción del macizo rocoso. 2.2.2 Velocidad de propagación de la onda P del macizo rocoso. 2.2.3 Modulo de formación del macizo rocoso.</p>	

Fuente: Elaboración propia.

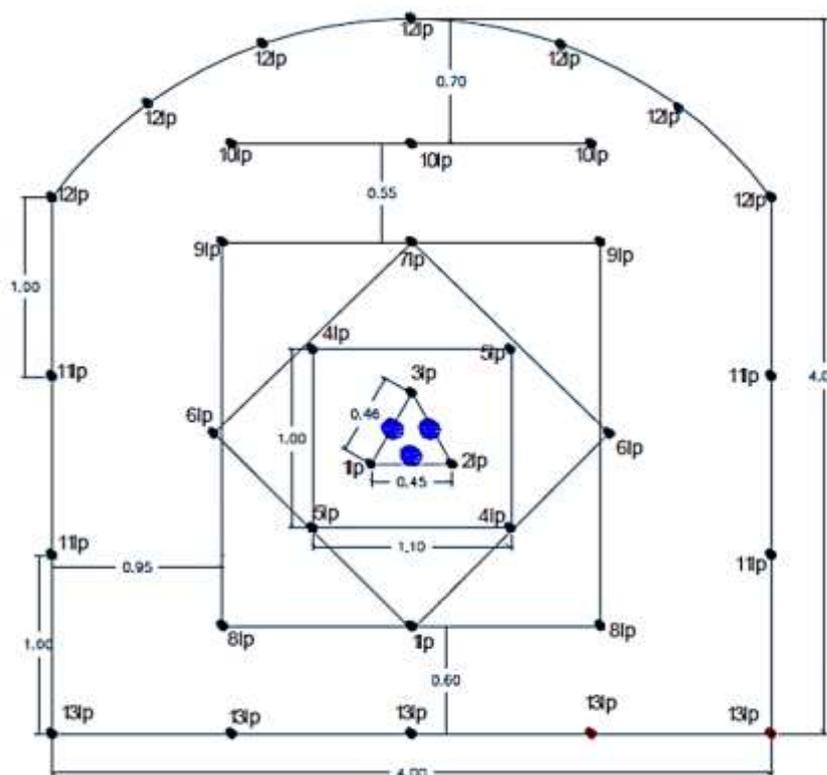
## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VOLADURAS MONITOREADAS

Durante el desarrollo del estudio se realizaron diversas voladuras de pruebas en el By Pass 179 de sección 4.0 m x 4.0 m, con diferentes explosivos y diseños de carga en un mismo predomino Geomecánico, a continuación de detalla el diseño de perforación.

**Figura N° 56: Diseño de la malla By Pass 179**

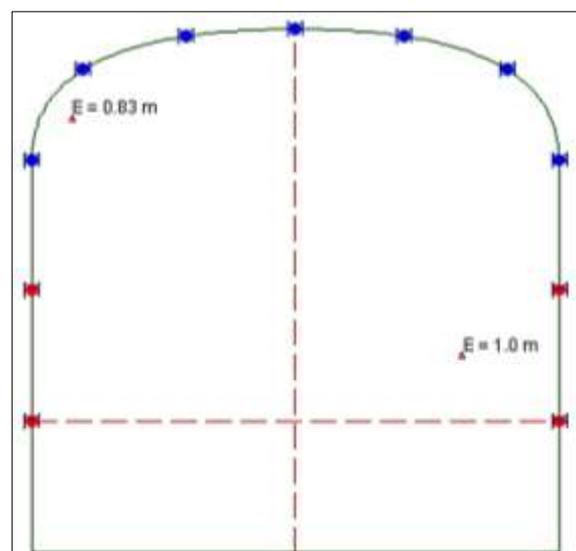


Fuente: Informe técnico FAMESA Explosivos S.A.C.

#### 4.1.1 VOLADURA DE CONTORNO

Las voladuras de contorno están compuestas por los taladros de la corona y hastiales, con un diámetro de perforación de 45 mm, replanteados en el frente de la labor a un espaciamiento de 75 cm y burden de 70 cm en la corona y 1.0 m de espaciamiento y 0.95 m de burden en los hastiales, el objetivo de estos taladros de cuidado es amortiguar el impacto de la voladura de producción y controlar el daño inducido en el macizo rocoso remanente.

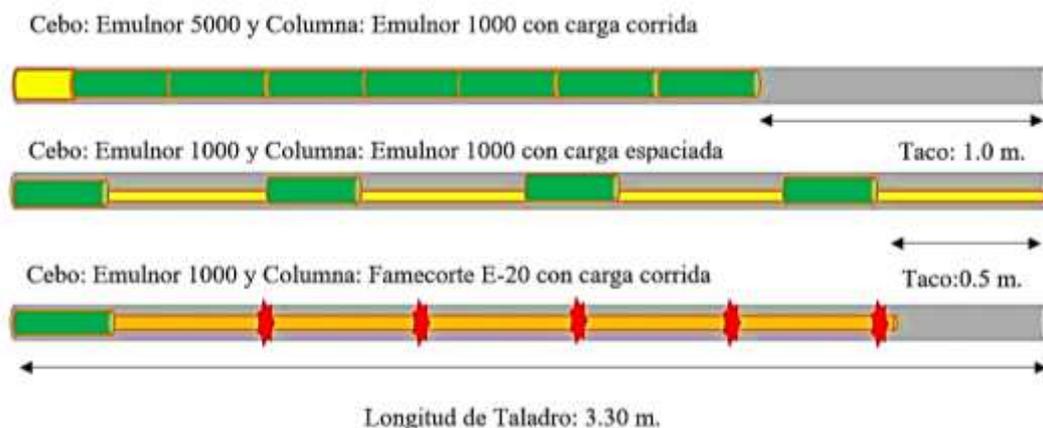
**Figura N° 57: Replanteo de los taladros de contorno en el Bypass 179 de una sección de 4.0 m x 4.0 m**



Fuente: Elaboración propia

Para el carguío de los taladros se utilizaron diferentes explosivos en diferentes voladuras para obtener registro de VPP de cada explosivo empleado; tales como: Emulnor 1000 de 1 ¼" x 12" con columna de carga espaciado en la corona y carga corrida en los hastiales y finalmente el Famecorte E-20 11/16" X 20" se usó en los hastiales y la corona, ver el esquema de la figura N° 58.

**Figura N° 58: Taladro de corona y hastiales**

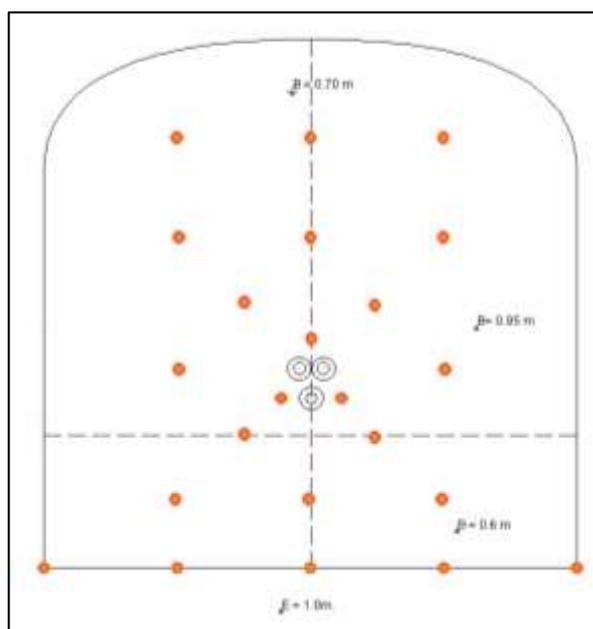


Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2 La voladura de producción

Las voladuras de producción están conformadas por taladros de alivio de un diámetro de (4 pulg), los taladros de arranque, 1ra, 2da y 3ra Ayuda, ayuda de corona y finalmente los taladros de arrastre todos de un diámetro de perforación de 45 mm, el objetivo de estos taladros es fragmentar la roca, los cuales son replanteados en el frente de la labor de la siguiente manera:

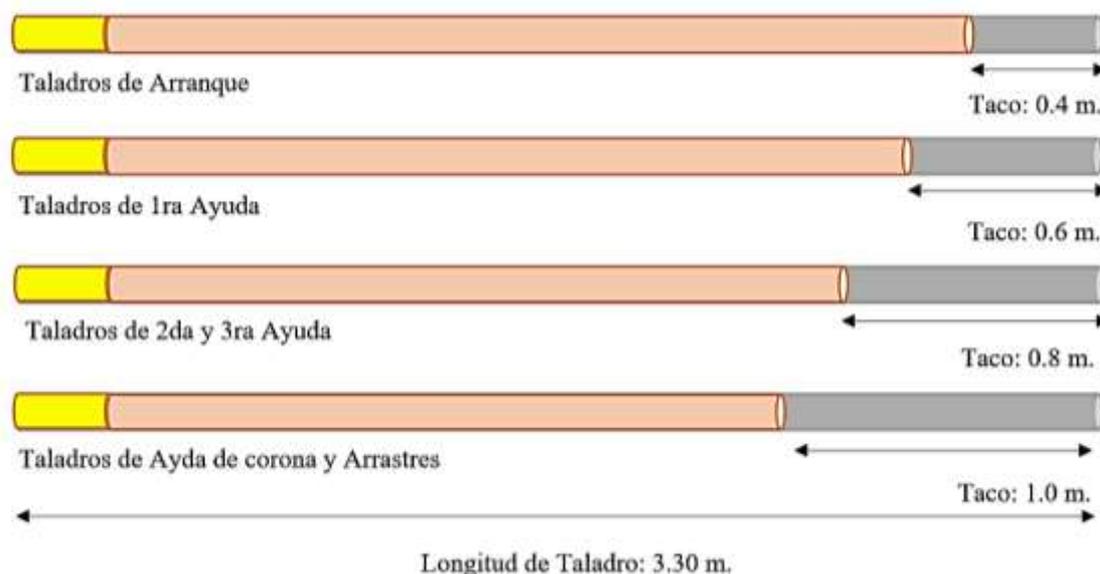
**Figura N° 59: Replanteo de los taladros de producción en el Bypass 179 de una sección de 4.0 m x 4.0 m**



Fuente: Elaboración propia

Para el carguío de los taladros de producción se utilizan el Anfo como columna de carga y como cebo el Emulnor 5000, en el caso de los taladros de arrastre se utilizan Emulnor 3000 como columna de carga e iniciador en el caso de presencia de agua. En la figura N° 60 se muestran los esquemas de carguío de los taladros.

**Figura N° 60: Cebo - Emulnor 5000 y columna- Anfo con carga corrida y acoplado**



Fuente: Elaboración propia

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EXPLOSIVOS UTILIZADOS

Durante el desarrollo del estudio se realizaron diferentes voladuras empleando diferentes explosivos, bajo las mismas condiciones con el objetivo de determinar el modelo predictivo de vibraciones para los siguientes explosivos comerciales o industriales:

- Superfam® Dos
- Emulnor® 1000
- Famecorte E-20

### 4.2.1 SUPERFAM DOS

El SUPERFAM DOS® es un agente explosivo granular compuesto con Nitrato de Amonio en prills grado ANFO, un combustible líquido y un colorante.

El SUPERFAM DOS® se utiliza principalmente en minería superficial como también en minería subterránea, obras civiles y donde el tipo de roca sea blanda o semidura, es recomendable utilizarlo en labores donde exista una buena ventilación y ausencia de afloramientos de agua.

#### **4.2.2 EMULNOR 1000**

El EMULNOR® es una emulsión explosiva encartuchada en una envoltura plástica que posee propiedades de seguridad, potencia, resistencia al agua y buena calidad de los gases de voladura.

Su uso está orientado a cualquier tipo de trabajo: En explotaciones y desarrollos mineros, en obras de ingeniería civil, en canteras, en taladros secos, húmedos e inundados, pudiendo trabajar como columna explosiva o como “cebos” de iniciación de columnas.

#### **4.2.3 FAMECORTE E-20**

EL FAMECORTE-E® 20 se presenta en tubos semirrígidos acoplables entre sí, para formar una columna explosiva continua de acuerdo a la longitud deseada.

Adicionalmente lleva un accesorio especial denominado “centrador”, que sirve para centrar la columna explosiva y crear un anillo de aire a lo largo del taladro, con la finalidad de amortiguar los efectos del explosivo sobre el terreno.

EL FAMECORTE-E® 20, es una emulsión explosiva de bajo poder rompedor, especialmente diseñado para trabajos de voladura controlada, contorno, túneles, talud de canteras, carreteras, etc. donde es necesario obtener perfiles de roca estables sin sobre excavación.

#### **4.2.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EXPLOSIVOS**

Cada explosivo tiene una determina liberación de energía al cual corresponde un nivel de vibración determinado tal es así que se levantó información en mina de cada tipo de explosivo para determinar su comportamiento en el macizo rocoso.

**Tabla N° 17: Especificaciones técnicas de explosivos**

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	UNIDAD	SUPERFAM DOS	EMULNOR 1000	FAMECORTE E-20
Densidad relativa	g/cm <sup>3</sup>	0.82	1.13	1.1
Velocidad de Detonación*	m/s	3300	5100	4200
Presión de detonación	kbar	51	95	48
Energía	kcal/kg	932	785	-
Volumen normal de gases	l/kg	-	920	909
Potencia relativa en peso	%	100	87	74
Potencia relativa en volumen	%	100	120	-
Resistencia al agua	-	Malo	Excelente	Excelente

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 MONITOREO DE VIBRACIONES EN CAMPO LEJANO

En esta sección se detalla los datos obtenidos en mina como son la Velocidad Pico Partícula (VPP) del monitoreo de vibraciones, distancia de la voladura al punto de monitoreo (D) y carga operante de voladura (W).

Estos datos son procesados en gabinete para determinar la distancia escalada o reducida (SD); que es la relación de la distancia de la voladura al punto de monitoreo (D) entre la raíz cuadrada de la carga operante (W), Basado en el modelo de Devine y Duvall de 1962.

$$VPP = K(SD)^{-\alpha} \quad (29)$$

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \quad (30)$$

A continuación, se muestra los datos obtenido en mina para los explosivos en estudio, los cuales son:

**Tabla N° 18: Datos obtenidos usando Anfo**

Explosivos: Emulnor 3000 1.1/4"x12" ANFO		Columna de carga		Eje (x)	Eje (y)
BP-179 ZONA RAMPA II	VPP (mm/s)	D (m)	W (Kg)	De = D/W <sup>(1/2)</sup>	VPP (mm/s)
Disparo (Fecha) Equipo	Vel. Pico Particula	Distancia Monitoreo	(Peso max/retardo)	Distancia escalar	Vel. Pico Particula
25-Ago-15 Instantel	17.50	25.00	7.80	8.95	17.50
26-Ago-15 Instantel	14.20	27.00	7.80	9.67	14.20
26-Ago-15 Instantel	11.70	30.00	7.80	10.74	11.70
26-Ago-15 Instantel	7.65	33.00	7.80	11.82	7.65

18-Set-15	Instantel	21.60	22.00	8.50	7.55	21.60
18-Set-15	Instantel	17.20	27.00	8.50	9.26	17.20
18-Set-15	Instantel	28.70	16.00	8.50	5.49	28.70
24-Set-15	Instantel	7.94	35.00	8.50	12.00	7.94
24-Set-15	Instantel	26.70	17.00	8.50	5.83	26.70

Fuente: Recopilado por el autor

**Tabla N° 19: Datos obtenidos usando Emulnor 1000 1 ¼" x 12" carga espaciada**

Datos de Monitoreo		Explosivos: Emulnor 1000 1 ¼ "x12" (04 cart/tal)			Eje (x)	Eje (y)
BP-179 ZONA RAMPA II	VPP (mm/s)	D (m)	W (Kg)	De = D/W <sup>^(1/2)</sup>	VPP (mm/s)	
Disparo (Fecha)	Equipo	Vel. Pico Partícula	Distancia Monitoreo	(Peso max/retardo)	Distancia escalar	Vel. Pico Partícula
29-Ago-15	White	1.24	67.00	1.28	59.27	1.24
30-Ago-15	White	2.83	39.00	1.27	34.60	2.83
31-Ago-15	White	2.59	44.12	1.27	39.14	2.59
7-Set-15	White	7.30	18.00	1.00	18.00	7.30
8-Set-15	White	7.39	21.20	1.25	18.96	7.39

Fuente: Recopilado por el autor

**Tabla N° 20: Datos obtenidos usando Emulnor 1000 1 ¼" x 12" carga continua**

Datos de monitoreo		Explosivos: E5000 1.1/4"x12"(1cart) y E1000 1.1/4"x12"( 8cart/tal)			Eje (x)	Eje (y)
BP-179 ZONA RAMPA II	V (mm/s)	D (m)	W (Kg)	De = D/W <sup>^(1/2)</sup>	VPP (mm/s)	
Disparo (Fecha)	Equipo	Vel. Pico Partícula	Distancia Monitoreo	(Peso max/retardo)	Distancia escalar	Vel. Pico Partícula
29-Ago-15	White	1.52	67.00	2.28	44.39	1.52
30-Ago-15	White	6.85	39.00	2.27	25.88	6.85
31-Ago-15	White	4.93	44.12	2.27	29.28	4.93
7-Set-15	White	14.02	18.00	2.28	11.93	14.02
8-Set-15	White	13.65	21.20	2.78	12.72	13.65

Fuente: Recopilado por el autor

**Tabla N° 21: Datos obtenidos usando Famecorte E-20 11/16" x 20" carga continua desacoplado**

Datos de monitoreo		Explosivos: Famecorte E-20 11/16" x 20" 5cat.tal			Eje (x)	Eje (y)
BP-179 ZONA RAMPA II	V (mm/s)	D (m)	W (Kg)	De = D/W <sup>^(1/2)</sup>	VPP (mm/s)	

Disparo (Fecha)	Equipo	Vel. Pico Partícula	Distancia Monitoreo	(Peso max/retardo)	Distancia escalar	Vel. Pico Partícula
21-Nov-15	Instantel	1.40	56.00	0.94	57.62	1.40
21-Nov-15	Instantel	0.86	58.00	0.94	59.68	0.86
21-Nov-15	Instantel	2.55	29.00	0.94	29.84	2.55
21-Nov-15	Instantel	2.06	31.00	0.94	31.90	2.06
22-Nov-15	Instantel	2.08	37.50	0.94	38.59	2.08
22-Nov-15	Instantel	1.98	39.00	0.94	40.13	1.98

Fuente: Recopilado por el autor

#### 4.4 MODELAMIENTO DE VIBRACIONES

Para realizar el modelamiento o ley de atenuación de vibraciones se empleará los datos registrados y procesados de mina como: La velocidad pico partícula (VPP) y la distancia escalada o reducida (SD) respectivamente, estos datos son analizados mediante una **regresión no lineal ajustado a una ecuación potencial** para calcular las constantes de regresión ( $K$ ,  $\alpha$ ) del modelo predictivo de vibraciones basado en el criterio de Devine 1962.

$$VPP = K \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-\alpha} \quad (31)$$

La ecuación basada en el criterio de Devine tiene un comportamiento potencial, para efectos de cálculo lo denominaremos de la siguiente manera:

$$Y = aX^b \quad (32)$$

Para modelar los datos de campo se convirtió en una ecuación lineal, aplicando logaritmos a la ecuación, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Log} Y = \text{Log} a + b \text{log} X \quad (33)$$

Este método se aplicó para determinar los modelos predictivos de los tres explosivos en estudio con sus respectivos diseños de carga, a continuación, se desarrollo

#### 4.5 MODELAMIENTO DE VIBRACIONES DEL ANFO

##### 4.5.1 Análisis estadístico de regresión no lineal ajustado a una ecuación

En la tabla N° 22 se muestra los cálculos previos aplicado logaritmos a los datos de campo para determinar las constantes de regresión y el grado de correlación.

**Tabla N° 22: Cálculos para modelo predictivo de vibraciones para explosivo Anfo**

INGRESO DE DATOS DE CAMPO					VALORES PARA CALCULAR LAS CONSTANTES DE REGRESIÓN (a y b) Y CORRELACIÓN (r <sup>2</sup> )				
N° DATOS	VPP (mm/s)	W (kg)	D (m)	DR (m/kg <sup>1/2</sup> )	logY	(logY) <sup>2</sup>	LogX	(logX) <sup>2</sup>	logX.logY
1	17.5	7.8	25.0	8.951	1.243	1.545	0.952	0.906	1.183
2	14.2	7.8	27.0	9.668	1.152	1.328	0.985	0.971	1.135
3	11.7	7.8	30.0	10.742	1.068	1.141	1.031	1.063	1.101
4	7.7	7.8	33.0	11.816	0.884	0.781	1.072	1.150	0.948
5	21.6	8.5	22.0	7.546	1.334	1.781	0.878	0.770	1.171
6	17.2	8.5	27.0	9.261	1.236	1.527	0.967	0.934	1.194
7	28.7	8.5	16.0	5.488	1.458	2.125	0.739	0.547	1.078
8	7.9	8.5	35.0	12.005	0.900	0.810	1.079	1.165	0.971
9	26.7	8.5	17.0	5.831	1.427	2.035	0.766	0.586	1.092
n					∑ logY	∑ (logY) <sup>2</sup>	∑ logX	∑ (logX) <sup>2</sup>	∑ logX.logY
9					10.701	13.072	8.470	8.093	9.875

Fuente: Recopilado por el autor

Con los datos obtenidos de la Tabla N°22 se determinó las constantes de regresión a y b que son la constante de velocidad K y la constante de atenuación α respectivamente, usando las siguientes formulas:

$$b = \frac{9 \times 9.875 - 8.470 \times 10.701}{9 \times 8.093 - 8.470^2} = -1.597 \tag{34}$$

$$a = 10^{\left(\frac{10.701}{9} - \frac{-1.597 \times 8.470}{9}\right)} = 492.46 \tag{35}$$

Finalmente se determinó la correlación de análisis de regresión de las constantes mediante la siguiente formula:

$$r^2 = \frac{\left(9.875 - \frac{8.470 \times 10.701}{9}\right)^2}{\left(8.093 - \frac{8.470^2}{9}\right)\left(13.072 - \frac{10.701^2}{9}\right)} = 0.90 \tag{36}$$

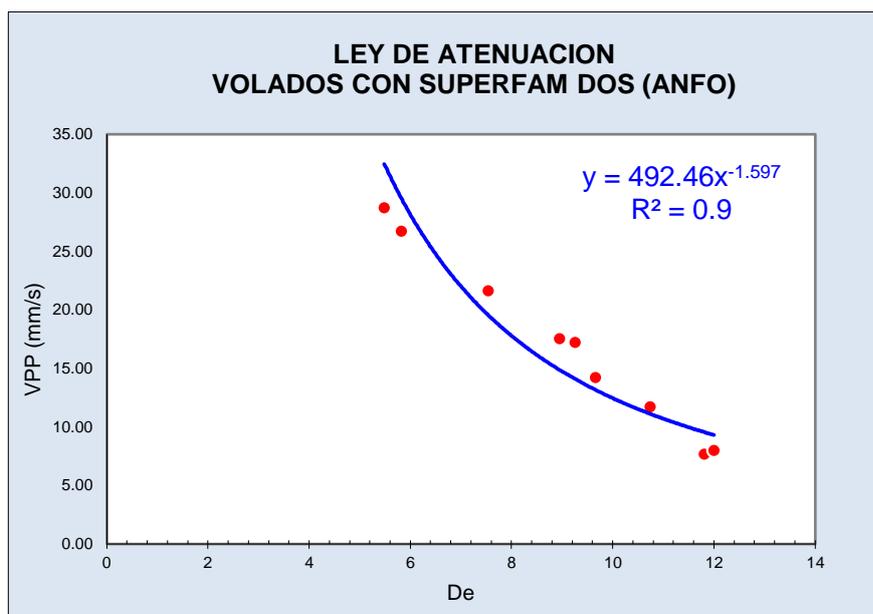
El grado de correlación es 0.90, este valor es más próximo a 1.0 por tanto el modelamiento o ley de atenuación de las vibraciones generados por el Anfo tiene una confiabilidad del 90%, por lo que no es necesario aplicar una corrección.

#### 4.5.2 Análisis estadístico aplicando en Excel

Otra forma más sencilla para realizar el análisis de regresión es aplicando el programa Excel mediante una representación gráfica por dispersión de la distancia escalada (De) en el eje X y los registro de VPP en el eje Y.

A estos datos de la figura se le agrega la línea de tendencia potencial y las opciones de representar la ecuación de ajuste y el grado de correlación R<sup>2</sup>, a continuación, se muestra la gráfica para los datos del Anfo.

**Figura N° 61: Ley de Atenuación usando Superfam Dos (Anfo) con excel**



Fuente: Recopilado por el autor

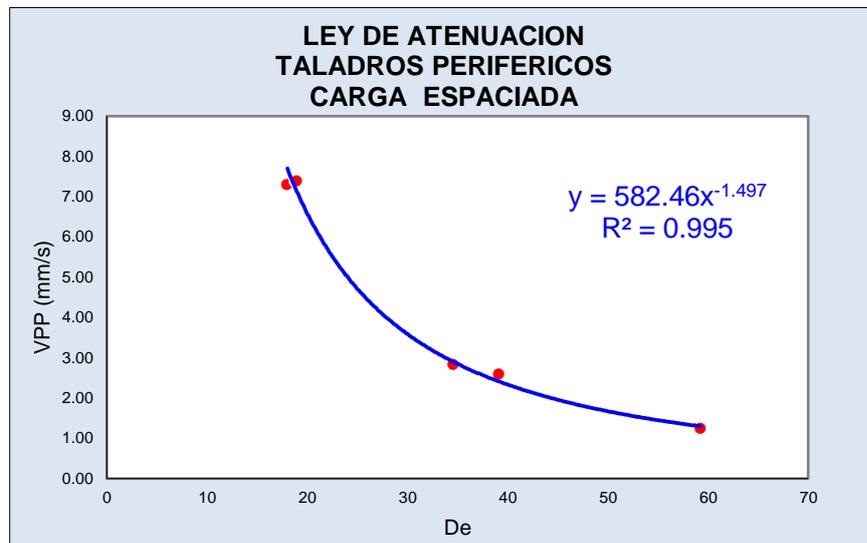
En la figura 61 y del análisis de regresión se determinó el siguiente modelo que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso en el By Pass 179 con el uso del Superfam Dos (Anfo) con una confiabilidad del 90 %:

$$y = 492.46x^{-1.597} \implies VPP = 492.46\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.597} \quad (37)$$

Para determinar las constantes de velocidad (K) y atenuación ( $\alpha$ ) se puede determinar manualmente aplicando el análisis de regresión no lineal ajustado a una ecuación potencial o haciendo uso del programa Excel que resultada más sencillo.

Para los demás explosivos se determinar el modelo de vibraciones haciendo uso del programa Excel.

**Figura N° 62: Ley de Atenuación usando Emulnor 1000 1 ¼ “x12” carga espaciada a 50 cm**

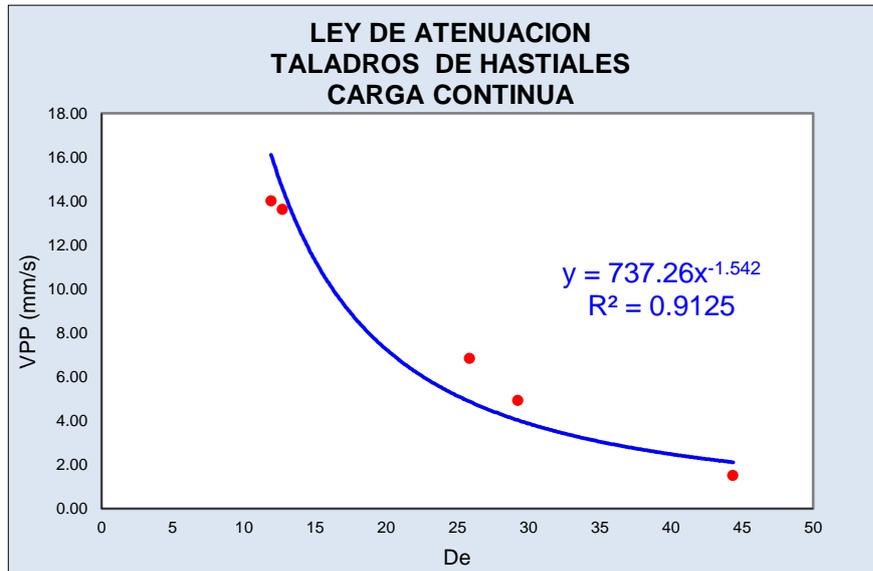


Fuente: Recopilado por el autor

En la figura N° 62, se obtiene la siguiente formula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso en el By Pass 179 con el uso del Emulnor 1000 1 ¼ “x12” espaciados a 50 cm con una confiabilidad del 99.5 %:

$$y = 582.46x^{-1.497} \quad \Longrightarrow \quad VPP = 582.46\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.497}$$

**Figura N° 63:** Ley de Atenuación usando Emulnor 1000 1 ¼ “x12” carga continua.

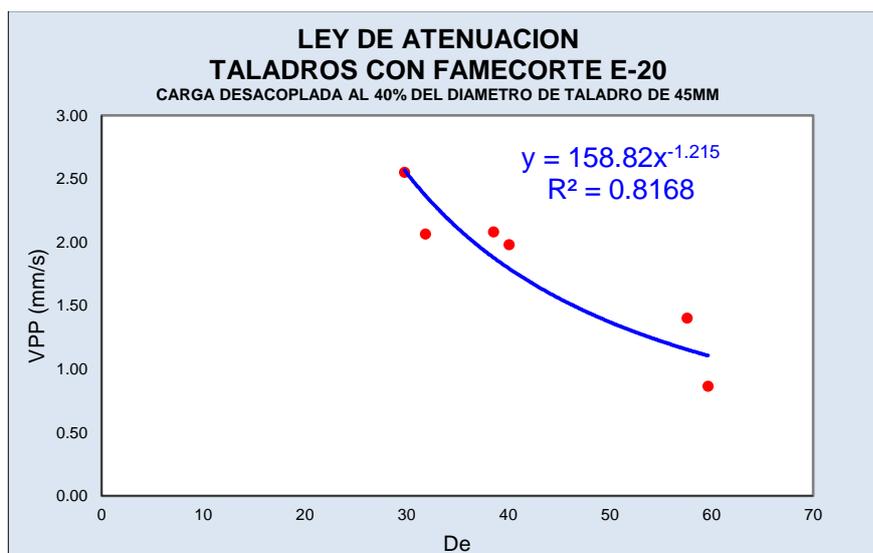


Fuente: Recopilado por el autor

En la figura N° 63, se obtiene la siguiente formula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso en el By Pass 179 con el uso del Emulnor 1000 1 ¼ “x12” de carga continua con una confiabilidad del 91.25 %:

$$y = 737.26x^{-1.542} \quad \implies \quad VPP = 737.26\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.542}$$

**Figura N° 64:** Ley de Atenuación usando Famecorte E-20 11/16 “x20” carga continua.



Fuente: Recopilado por el autor

En la figura N° 64, se obtiene la siguiente formula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso en el By Pass 179 con el uso del Famecorte 11/16" x 20" de carga continua con una confiabilidad del 81.68%:

$$y = 158.82x^{-1.215} \quad \Longrightarrow \quad VPP = 158.82\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.215}$$

#### 4.6 CALCULO DE LOS PARÁMETROS DEL MACIZO ROCOSO

##### 4.6.1 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR 1989

Los datos se obtuvieron del estudio geomecánico de la Unidad Minera Huachocolpa Uno realizado por el área de Geomecánica de compañía minera Kolpa S.A.

**4.6.1.1 Resistencia a compresión uniaxial ( $\sigma_c$ ):** se determinó mediante el índice de rebote del esclerómetro (martillo schmit)

$$\sigma_c = 10^{(0.00088xIRx\delta+1.01)} \quad (38)$$

Donde:

IR : Índice de rebote del matillo Schmidt, (IR = 42.5 promedio)

$\delta$  : Peso Específico de la roca, ( $\delta = 26.49 \text{ N/m}^3$ )

Entonces reemplazando los datos en la ecuación N°39, tenemos:

$$\sigma_c = 10^{(0.00088x42.5x26.49+1.01)} = 100.2 \text{ Mpa} \quad (39)$$

Valoración : 12

Por lo tanto la resistencia a la tracción será ( $\sigma_t$ ):

$\sigma_t = \frac{\sigma_c}{10}$ , entonces la  $\sigma_t = 10.02 \text{ Mpa}$

**4.6.1.2 Designación de la calidad de la roca (RQD):**

$$RQD = 100xe^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (40)$$

Donde:

$\lambda$  : N° de discontinuidades por metro lineal (59 promedio en 10 m)

$$\lambda = 59 / 10 = 5.9 \text{ disc. /m.}$$

Entonces reemplazando el dato en la ecuación N° tenemos:

$$RQD = 100xe^{-0.1x5.9}x (0.1x5.9 + 1) = 88.14\%$$

Valoración: **17**

#### 4.6.1.3 Espaciamiento entre discontinuidad:

De 200 – 600 mm

Valoración: **10**

#### 4.6.1.4 Condiciones de discontinuidades

**Tabla N° 23: Condiciones de discontinuidades**

CONDICIONES DE DISCONTINUIDADES	VALORACIÓN
Persistencia De 3 -10 m	2
Apertura Angosta: 0.1 - 1.0 mm	4
Rugosidad Rugoso	5
Relleno Relleno blando < 5.0 mm	1
Alteración No meteorizada	6
<b>Total Valoración</b>	<b>18</b>

Fuente: Elaboración propia en base al estudio geomecánico de UM Huachocolpa Uno de compañía minera Kolpa.

#### 4.6.1.5 Aguas subterráneas: Húmedo mayormente analizados.

Valoración: **10**

Entonces sumando los valores se tiene:

**Tabla N° 24: Resumen de la valoración de RMR**

RMR (Básico)	VALORACIÓN
Resistencia a la compresión uniaxial	<b>12</b>
Designación de calidad de la roca	<b>17</b>

Espaciamiento discontinuidades	entre	<b>10</b>
Condición de discontinuidades		<b>18</b>
Aguas subterráneas		<b>10</b>
<b>Total</b>		<b>67</b>

Fuente: Elaboración propia en base al estudio geomecánico de UM Huachocolpa Uno de compañía minera Kolpa.

La orientación de las discontinuidades es desfavorable, con una valoración de **10**, por lo tanto:

$$RMR_{89} = RMR (Básico) - 10$$

$$RMR_{89} = 67 - 10 = 57$$

#### 4.6.2 ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI)

El GSI se determinó con la siguiente ecuación N°

$$GSI = RMR_{14} - 5$$

$$GSI = 57 - 5 = 52$$

#### 4.6.3 DEFORMABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO

$$E_{rm} = 100000 \left[ \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{75 + 25 \times D - GSI}{11}\right)}} \right] \quad (41)$$

$$E_{rm} = 100000 \left[ \frac{1 - \frac{0}{2}}{1 + e^{\left(\frac{75 + 25 \times 0 - 52}{11}\right)}} \right] = 10,998.4 \text{ MPa}$$

#### 4.6.4 MODULO DE DEFORMACIÓN DE LA ROCA INTACTA

$$\frac{E_{rm}}{E_i} = \left[ 0.02 + \frac{1 - \frac{0}{2}}{1 + e^{\left(\frac{60 + 15 \times 0 - 52}{11}\right)}} \right] = 0.35$$

Entonces:

$$E_i = \frac{10,998.4 \text{ MPa}}{0.35} = 31,806.1 \text{ MPa} = 31.8 \text{ GPa}$$

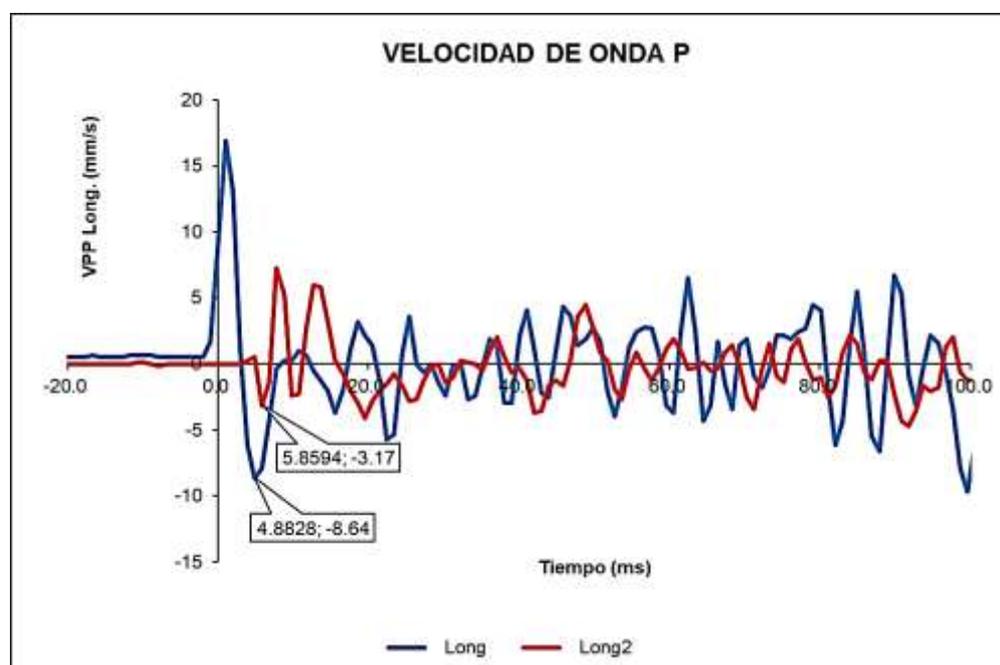
$$E_{i(dinamico)} = 1.13 \times 38.8 \text{ GPa} = 43.9 \text{ GPa}$$

#### 4.6.5 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDA ( $V_p$ )

La  $V_p$ , es la velocidad de la onda longitudinal; para determinar esta variable se hizo uso del sismógrafo Instantel de 8 canales ubicando los geófonos de la siguiente manera:

El primer geófono se ubicó a 17 metros del tope del By Pass 179 y el segundo geófono a 20.6 metros también del tope del frente, esta diferencia de los tiempos arribo de la VPP longitudinal entre ambos geófonos determino la onda P, que a continuación se muestra la siguiente figura:

**Figura N° 65: Velocidad de onda P**



Fuente: Elaboración propia en base a registro de vibraciones

De lo antes mencionado y de la figura N° 65 determinamos lo siguiente:

- Tiempo de arribo de la primera onda del geófono N°01 es : 4.8828 ms
- Tiempo de arribo de la primera onda del geófono N°02 es : 5.8594 ms
- La diferencia de los tiempos del geófono N°02 y 01es : 0.9766 ms
- La distancia entre los geófonos N°01 y 02 es : 3.6 m
- Para determinar la velocidad de propagación de la Onda P aplicaremos la siguiente formula:

$$Vp = \frac{d}{t} \quad (42)$$

$$Vp = \frac{3.6 \text{ m}}{0.9766 \text{ ms}} = 3.6863 \text{ m/ms}$$

$$Vp = 3.6863 \frac{\text{m}}{\text{ms}} \times 1000 \frac{\text{ms}}{\text{s}} = 3,686.3 \text{ m/s}$$

#### 4.7 VELOCIDAD PICO PARTÍCULA CRÍTICA

$$VPPc = \frac{\sigma t \times Vp}{E_i} \quad (43)$$

$$VPPc = \frac{10 \times 3,686.3}{31.806} = 1,159 \text{ mm/s}$$

**Tabla N° 25: Criterio de daño según Cameron Mckenzie**

CRITERIO DE DAÑO	TIPO DE DAÑO	VPPc
Mayor 4 * PPVc	Intenso fracturamiento	4636
Mayor 1 * PPVc	Creación de nuevas fracturas	<b>1159</b>
Mayor 1 / 4 * PPVc.	Leve propagación fracturas pre-existent	290

Fuente: Elaboración propia

#### 4.8 ANÁLISIS DE DAÑO AL MACIZO ROCOSO

Obtenida la información a través de los instrumentos aplicado a la muestra con la, se procedió con la tabulación de los resultados, es decir expresar valores, magnitudes, conceptos por medio de tablas y gráficos, a continuación se presenta el análisis e interpretación de los resultados.

##### 4.8.1 Análisis de daño por campo lejano

Una vez determinado los criterios de daños mediante la Velocidad Pico Partícula crítica (VPPc) y los modelos predictivos de vibración con las constantes de velocidad (K) y atenuación ( $\alpha$ ) determinados para una misma litología o predominio geomecánico se determinó que explosivo genera más daño aproximando la intensidad de VPP que genera un taladro a diferentes distancias o radio de influencia a los criterios de daños de

la VPPc. Para estos cálculos se aplicó el modelo de Devine ya determinado para los cuatro diseños de carga.

$$VPP = K\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-\alpha} \quad (44)$$

Es importante mencionar que los tres tipos de explosivos tiene diferentes diseños de carga el cual al momento de la detonación generan diferentes intensidades de vibración por la cantidad de explosivo por taladro y el grado de acoplamiento y confinamiento de los explosivos al taladro.

- Superfam Dos (Anfo) con carga continua y acoplado  $VPP = 737.26\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.542}$
- Emulnor 1000 1 ¼” x 12” con carga continua  $VPP = 492.46\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.597}$
- Emulnor 1000 1 ¼” x 12” con carga espaciada  $VPP = 582.46\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.497}$
- Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplada  $VPP = 158.82\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.215}$

Aplicando estos modelos predictivos construidos a partir de monitores de vibraciones de las voladuras en el By Pass 179 se determinó la intensidad de vibración alrededor del radio de acción de los taladros, a continuación, en la tabla N°26 se detalla los resultados obtenidos.

**Tabla N° 26: Análisis de regresión del daño inducido por lo explosivos en estudio**

EXPLOSIVO	Emulnor 1000	Anfo	Emulnor 1000	Famecorte E 20
COLUMNA DE CARGA	Continua	Acoplado continua	Espaciado	Desacoplada
<b>K</b>	737.26	492.46	582.46	158.82
<b>Alfa</b>	-1.542	-1.597	-1.497	-1.215
<b>Q (Kg)</b>	2.28	2.93	1.00	0.94
Radio de Influencia(m)		VPP (mm/s)		
<b>0.01</b>	1687570	1815397	574468	41288
<b>0.02</b>	579527	600104	203528	17786
<b>0.04</b>	199015	198373	72108	7662
<b>0.06</b>	106501	103816	39298	<b>4681</b>
<b>0.08</b>	68343	65575	25547	3300
<b>0.10</b>	48446	45917	18292	2517
<b>0.12</b>	36573	34318	13923	2017
<b>0.14</b>	28836	26829	11054	1672
<b>0.16</b>	23470	21677	9051	1422

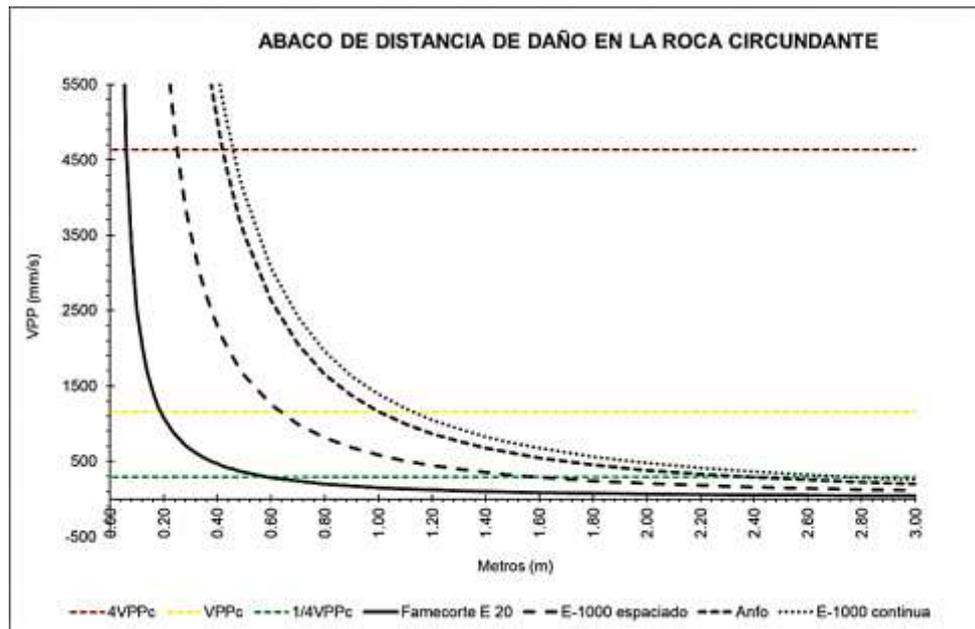
0.18	19572	17960	7588	1232
0.20	16637	15178	6481	<b>1084</b>
0.22	14363	13035	5619	966
0.24	12560	11344	4933	869
0.26	11101	9983	<b>4376</b>	788
0.28	9902	8869	3916	720
0.30	8903	7943	3532	662
0.32	8060	7166	3207	612
0.34	7340	6504	2928	569
0.36	6721	5937	2688	531
0.38	6184	5446	2479	497
0.40	5713	5017	2296	467
0.42	5299	4641	2134	440
0.44	4932	<b>4309</b>	1991	416
0.46	<b>4606</b>	4014	1863	394
0.48	4313	3750	1748	374
0.50	4050	3513	1644	356
0.60	3057	2626	1251	<b>285</b>
0.70	2411	2053	<b>993</b>	237
0.80	1962	1659	813	201
0.90	1636	1374	682	174
1.00	1391	<b>1161</b>	582	153
1.10	1201	997	505	137
1.20	<b>1050</b>	868	443	123
1.30	928	764	393	112
1.40	828	679	352	102
1.50	744	608	317	94
1.60	674	548	<b>288</b>	87
1.80	562	454	242	75
2.00	478	384	206	66
2.20	412	330	179	59
2.40	361	<b>287</b>	157	53
2.60	319	252	139	48
2.80	<b>284</b>	224	125	44
3.00	256	201	112	40

Fuente: Elaboración propia

Las intensidades de vibración determinados en la tabla N°26 son comparados a los criterios de daños postulados por Cameron McKenzie para determinar cualitativamente que explosivo genera menor daño.

- 4VPPc, Intenso fracturamiento : 4636 mm/s
- VPPc, Creación de nuevas fracturas : 1159 mm/s
- 1/4VPPc, Leve propagación de fracturas : 290 mm/s

Figura N° 66: Comparación de distancia de daño



Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 66 se concluye que el Emulnor 1000 1 ¼” x 12” con un diseño de carga continua genera mayor daño al macizo rocoso, seguido por el Anfo con un diseño de carga acoplado y continuo, asimismo el Emulnor 1000 1 ¼” x 12” espaciado genera menor daño que el Anfo y el explosivo que menor daño genera es el Famecorte E -20 1 1/16” x 20” con un diseño de carga desacoplado.

Para conocer las distancias de daño con precisión en macizo rocoso de cada explosivo y diseño de carga, se determinó despejando la distancia (D) de la ecuación de Devine, el cual la carga operante (W) es la cantidad de explosivo por taladro, la Velocidad Pico Partícula (VPP) toma los valores de los criterios de daño de la VPPc, a continuación, se detalla la ecuación.

$$D = \left(\frac{KxW}{VPPc}\right)^{\frac{1}{2\alpha}} \tag{45}$$

Tabla N° 27: Datos para determinar el daño inducido por explosivo

Descripción	Und	Emulnor 1000 continua	Anfo acoplado	Emulnor 1000 espaciado	Famecorte E 20 Desacoplado
Dimensión					
Cartucho	pulg	1 1/4" X 12"	Agranel	1 1/4" X 12"	1 1/16" X 20"
Constante k	-	737.26	492.46	582.46	158.82
Constante α	-	-1.542	-1.597	-1.497	-1.215

Peso explosivo / Tal.	kg	2.28	2.93	1.00	0.94
--------------------------	----	------	------	------	------

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 28: Resultado daño inducido por explosivo**

Explosivo	Emulnor 1000	Anfo	Emulnor 1000	Famecorte E 20	
Columna	Continua	Acoplado continuo	Espaciado	Desacoplada	
VPPc (mm/s)	Distancia (m)				
Intenso fracturamiento (4 x VPPc)	4636	0.46	0.42	0.25	0.06
Creación de nuevas fracturas (1 x VPPc)	1159	1.13	1.00	0.63	0.19
Extender fracturas preexistentes (1/4 x VPPc)	290	2.77	2.39	1.59	0.59

Fuente: Elaboración propia

En las voladuras de contorno el explosivo que genera mayor daño es el Emulnor 1000 1 ¼F” x 12” con un diseño de carga continua y el explosivo que menor daño genera es el Famecorte E -20 1 1/16” x 20” con un diseño de carga desacoplado, a continuación, se detalla las distancias de acuerdo al criterio de daño:

- **Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga continua:** La voladura no genera daño desde los 2.77 m del perímetro de la labor, entre 1.13m y 2.77m hay extensión de fracturas pre-existentes, entre 0.46m y 1.13m hay creación de nuevas fracturas y entre 0.46 m y el límite de la labor hay intenso fracturamiento.
- **Anfo con carga continua y acoplado:** La voladura no genera daño desde los 2.39 m del perímetro de la labor, entre 1.0 m y 2.39 m hay extensión de fracturas pre-existentes, entre 0.42m y 1.0 m hay creación de nuevas fracturas y entre 0.42 m y el límite de la labor hay intenso fracturamiento.
- **Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada:** La voladura no genera daño desde los 1.59 m del perímetro de la labor, entre 0.63 m y 1.59 m hay extensión de fracturas pre-existentes, entre 0.25 m y 0.63 m hay creación de nuevas fracturas y entre 0.25 m y el límite de la labor hay intenso fracturamiento.
- **Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplado:** La voladura no genera daño desde los 0.59 m del perímetro de la labor, entre 0.19 m y 0.59 m hay

extensión de fracturas pre-existentes, entre 0.19 m y 0.06 m hay creación de nuevas fracturas y entre 0.06 m y el límite de la labor hay intenso fracturamiento.

#### 4.8.2 Análisis de daño por campo cercano

Para el análisis de vibraciones en campo cercano usando el modelo de Holmberg y Persson considera otras variables como la densidad de explosivo, longitud de carga, longitud de taco y la densidad de carga lineal.

Es importante mencionar que para realizar un modelamiento de vibraciones en campo cercano se debe realizar a distancias menores a 5 veces la longitud de carga, perforando taladros para instalar los geófonos a una determinada distancia y profundidad de la columna de carga de los taladros, como los modelos predictivos en campo lejano tienen una confiabilidad alta mayor al 90% emplearemos los mismos factores de velocidad (K) y atenuación ( $\alpha$ ) con el objetivo de graficar en perfil y en planta los radios de acción de los tres explosivos con sus respectivos diseños de carga, a continuación se detallan los datos de entrada.

**Tabla N° 29: Datos para determinar el daño inducido por explosivo**

Descripción	Und.	Emulnor	Anfo	Emulnor	Famecorte E
		1000		1000	20
Dimensión cartucho	Pulg.	1 1/4" X 12"	Agranel	1 1/4" X 12"	1 1/16" X 20"
Columna de carga	-	Continua	Continua	Espaciado	Desacoplado
Constante velocidad, K	-	737.26	492.46	582.46	158.82
Constante atenuación, $\alpha$	-	-1.542	-1.597	-1.497	-1.215
Longitud de taco, $x_s$	m.	0.50	1.00	0.50	0.50
Longitud de carga, H	m.	2.80	2.30	2.80	2.80
Long. Taladro	m.	3.30	3.30	3.30	3.30
Densidad explosivo	g/cm <sup>3</sup>	1.13	0.85	1.13	1.15
Peso de explosivo	kg	2.28	2.93	1.00	0.94
Densidad carga	Kg/m	0.69	0.89	0.30	0.29

---

 lineal,  $\gamma$ 


---

Fuente: Elaboración propia

**Vista en perfil:** (Ro longitud del taladro variable en el eje Z)

$$V_{pp} = K \left( \frac{\gamma}{R_o} \right)^\alpha \left[ \arctan \left( \frac{H+x_s-X_o}{R_o} \right) + \arctan \left( \frac{X_o-x_s}{R_o} \right) \right]^\alpha \quad (46)$$

**Vista en Planta:** (Ro longitud del taladro constante y Xo es la resultante del plano X, Y)

$$V_{pp} = K \left( \frac{\gamma}{R_o} \right)^\alpha \left[ \arctan \left( \frac{H+x_s-\sqrt{x^2+y^2}}{R_o} \right) + \arctan \left( \frac{\sqrt{x^2+y^2}-x_s}{R_o} \right) \right]^\alpha \quad (47)$$

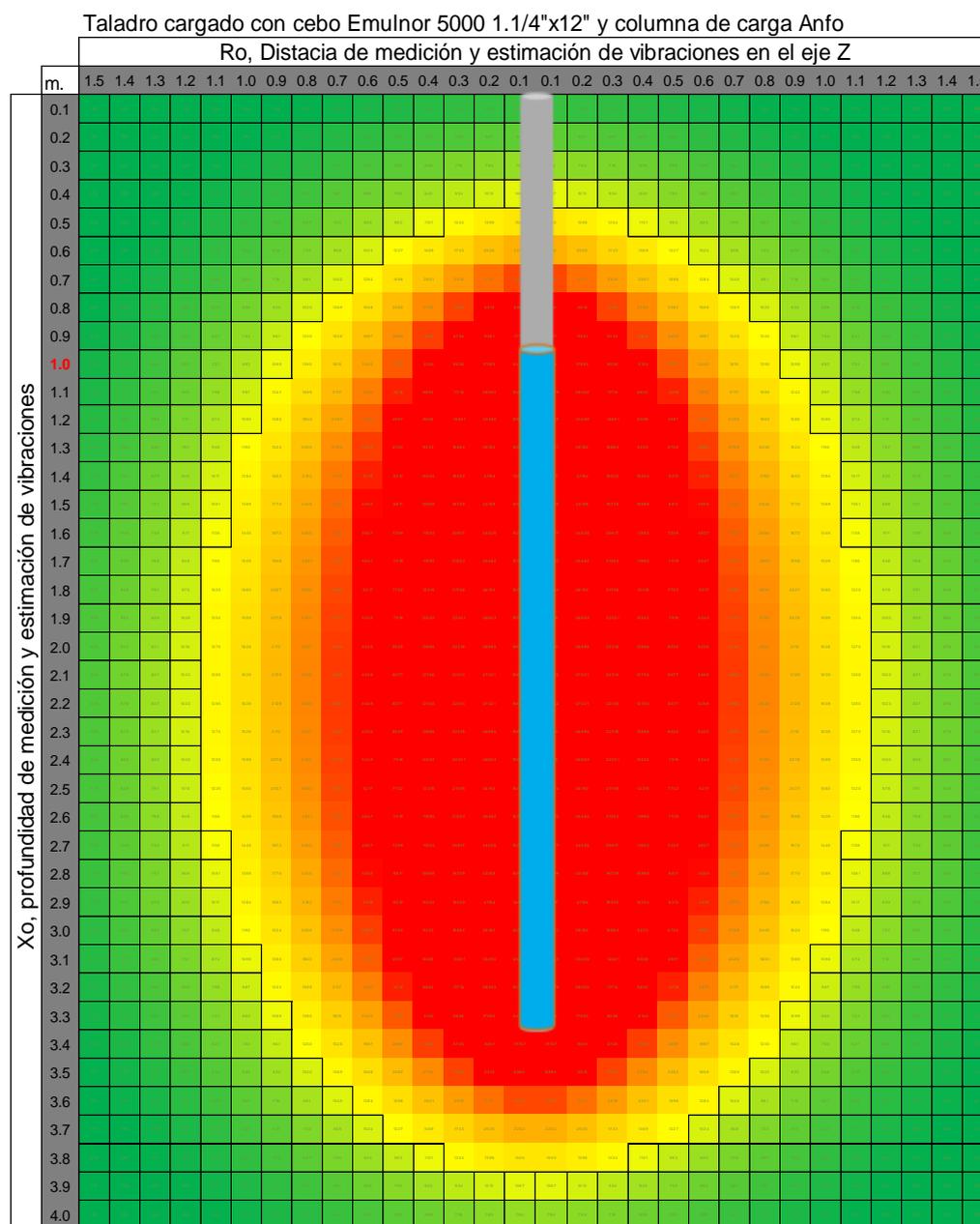
Donde:

- PPV : Velocidad Pico de Partícula (mm/s)  
 $\gamma$  : Densidad de Carga Lineal (kg/m)  
 Xo : Distancia de medición desde la Carga (m)  
 H : Longitud de Carga (m)  
 xs : Longitud de Taco (m)  
 Ro : Profundidad de medición (m)  
 K : Factor de velocidad  
 $\alpha$  : Factor de atenuación

Con los datos de la tabla N° 29 procedemos a modelar las intensidades de vibraciones en el radio de acción de los taladros tanto en vista en perfil y en planta de acuerdo al criterio de daño ya establecido.

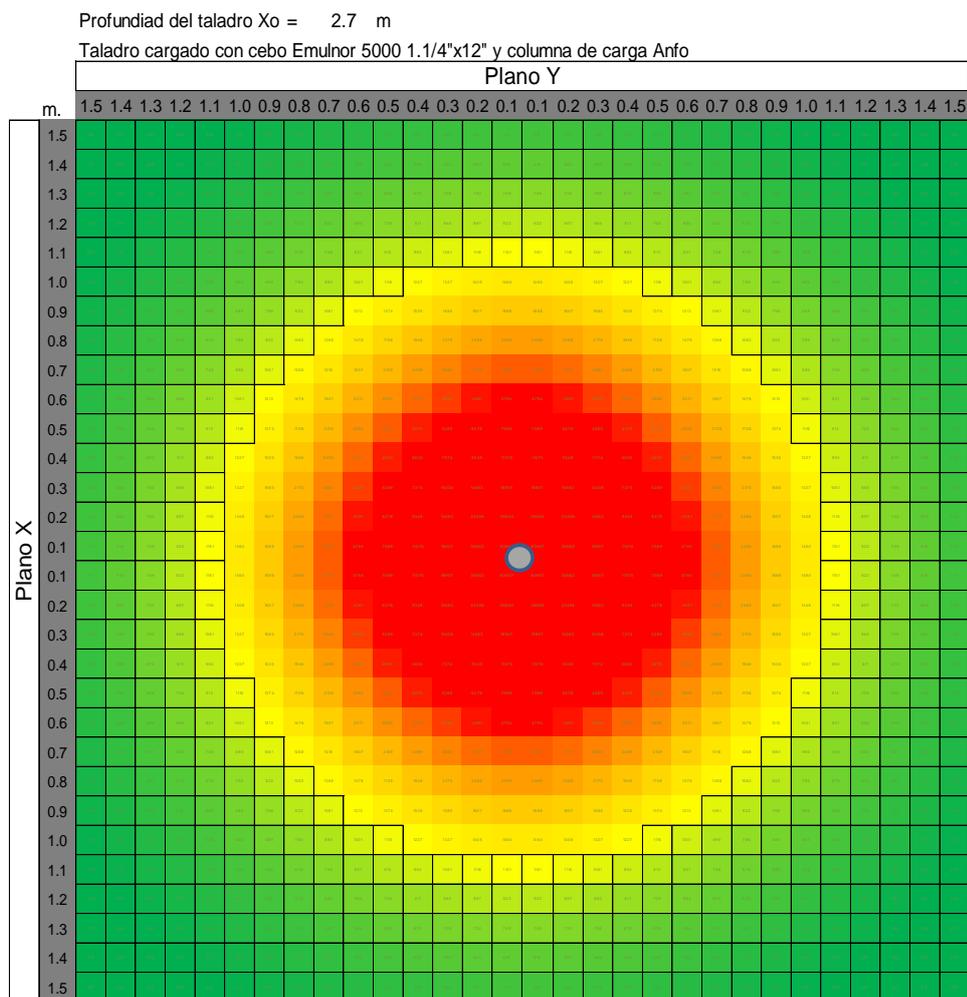
4.8.2.1 Daño generado por el Anfo con carga continua y acoplado

Figura N° 67: Daño generado por el explosivo Anfo en vista en perfil



Fuente: Elaboración propia

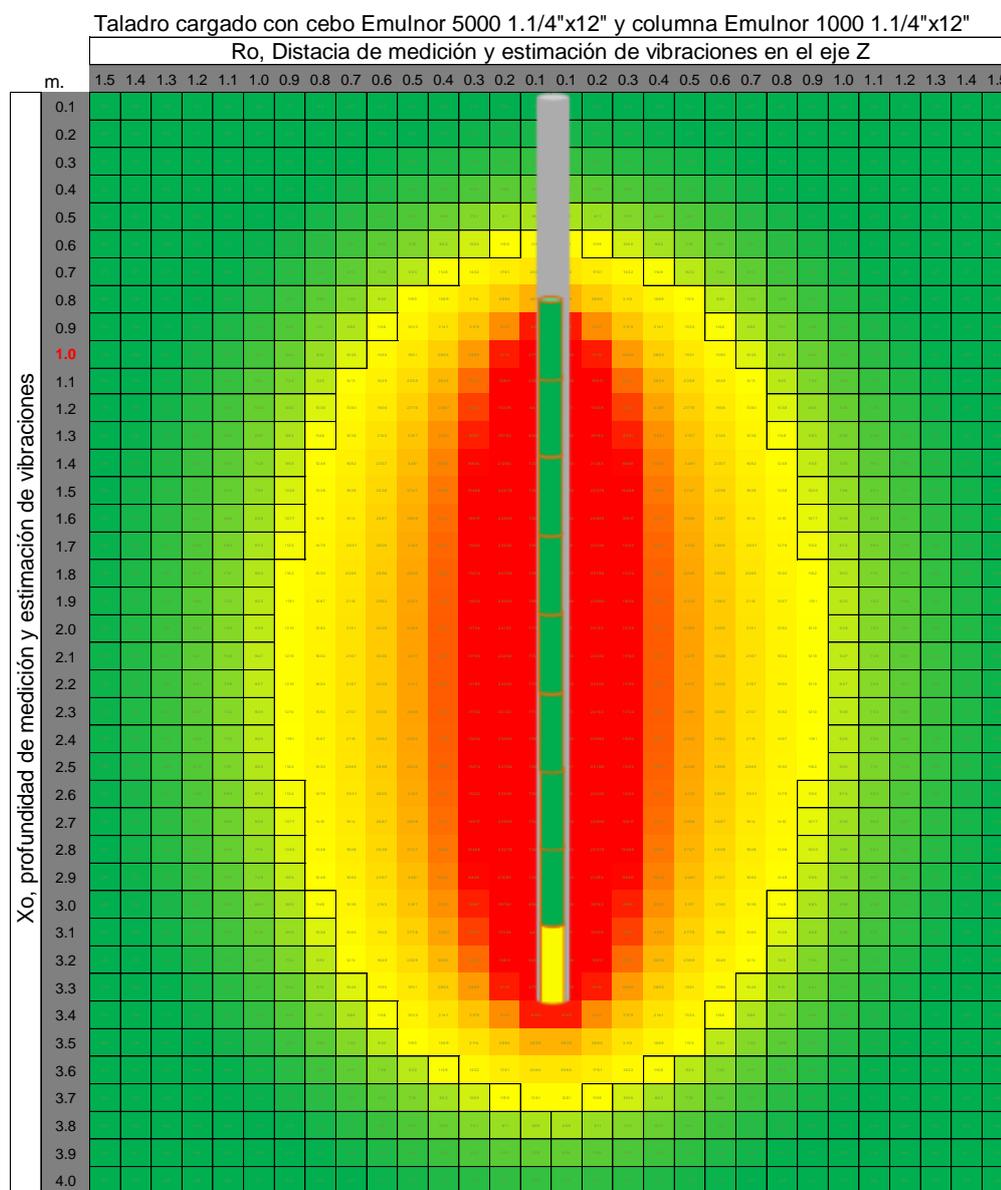
**Figura N° 68: Daño generado por el explosivo Anfo en vista en planta**



En la figura N° 67 y 68, el radio de daño al macizo rocoso es de 1.10 m cargado con Anfo (Superfam Dos) acoplado y carga continua, con una carga operante de **2.86 Kg/taladro**.

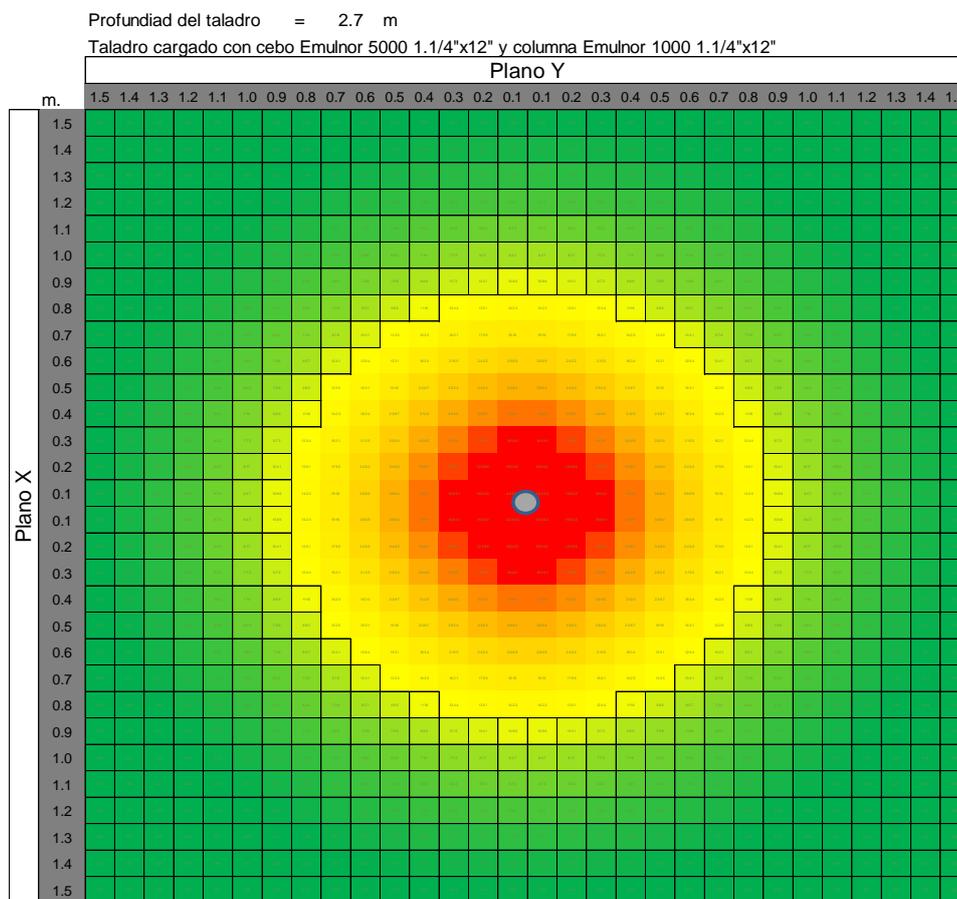
4.8.2.2 Daño generado por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga continua

**Figura N° 69:** *Daño generado por el explosivo Emulnor 1000 carga corrida, vista en perfil*



Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 70: Daño generado por el explosivo Emulnor 1000 carga corrida, vista en planta**

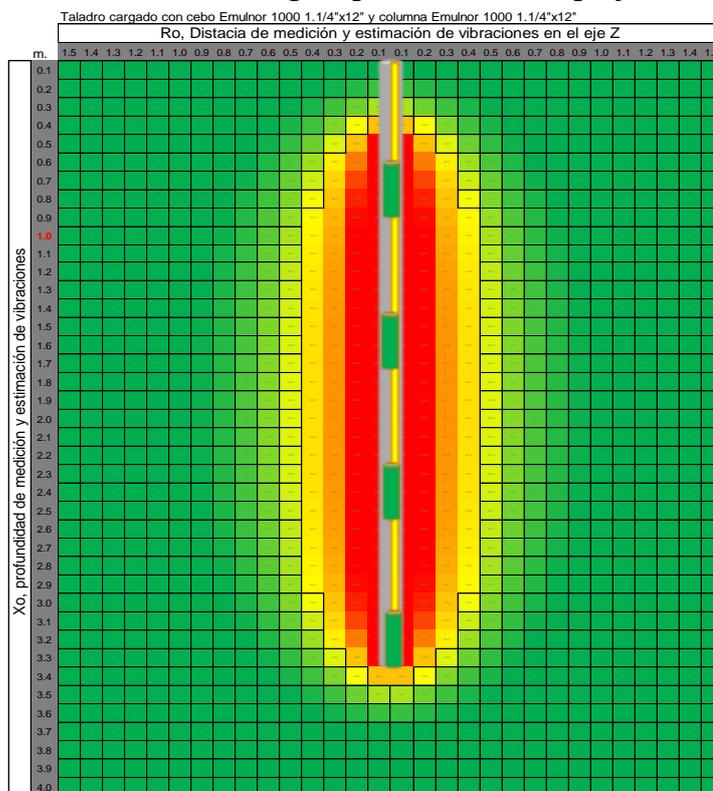


Fuente: Elaboración propia

Las figuras N° 69 y 70, el radio de daño al macizo rocoso es de 90 cm cargado con **EMULNOR 1000 de 1.1/4"x12"** de carga continua, con una carga operante de **2.28 Kg/taladro**.

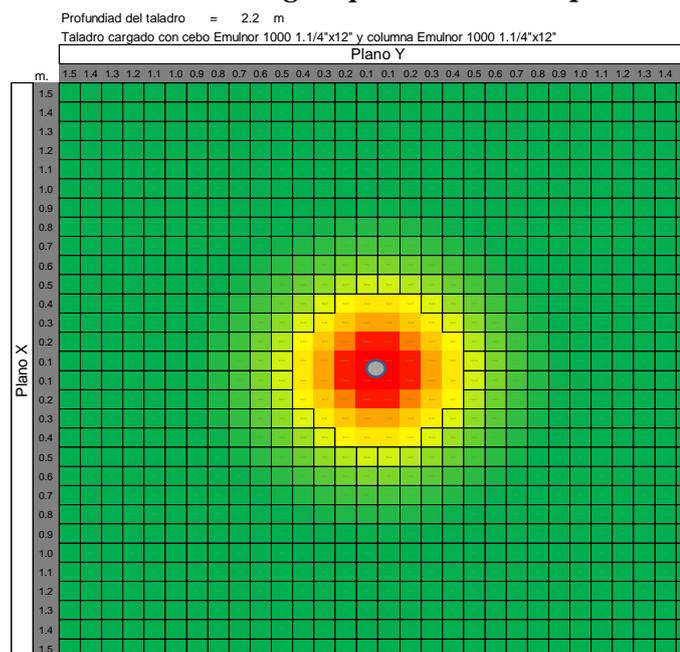
4.8.2.3 Daño generado por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada

**Figura N° 71: Daño generado por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada vista en perfil**



Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 72: Daño generado por Emulnor 1000 1 ¼” x 12” carga espaciada vista en planta**

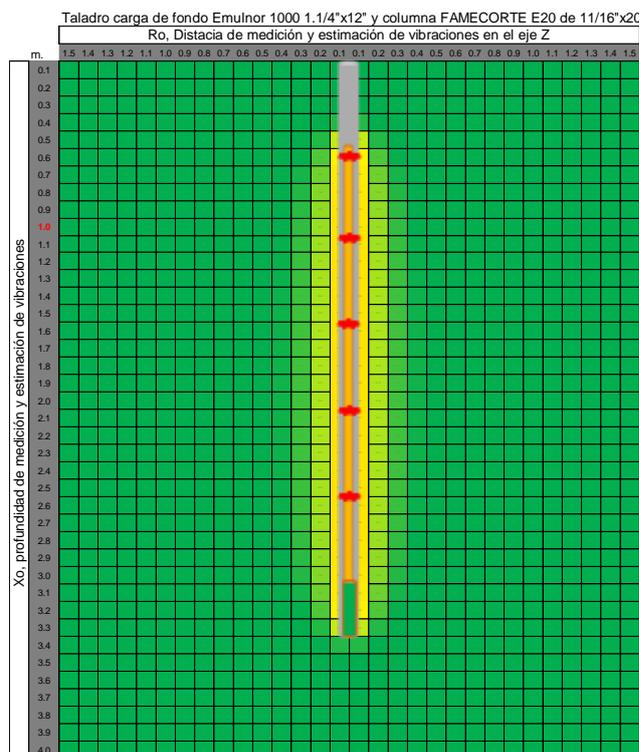


Fuente: Elaboración propia

En las figuras N° 68 y 69, el Radio de daño al macizo rocoso es de 40 cm cargado con **EMULNOR 1000 de 1.1/4”x12”** espaciado y usando cordón detonante 5P, con una carga operante de **1.0Kg/taladro**.

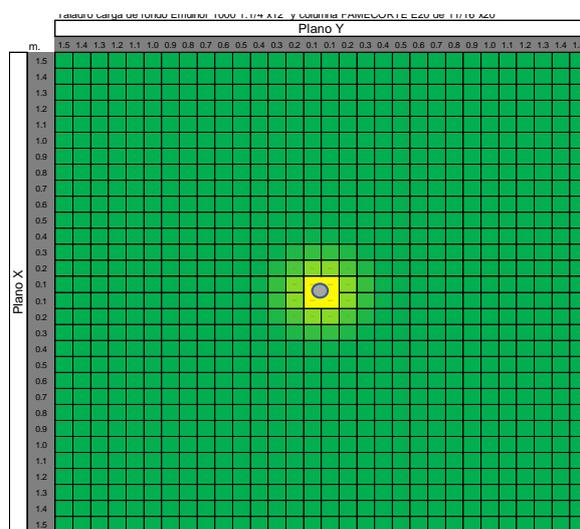
**4.8.2.4. Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplado**

**Figura N° 73: Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplado vista en perfil**



Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 74: Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplado vista en planta**



Fuente: Elaboración propia

En las figuras N° 73 y 74, el radio de daño al macizo rocoso es de 10 cm cargado con 05 cartuchos de **FAMECORTE E-20** de 1.1/4"x12" como carga de columna y carga de fondo 01 cartucho de **Emulnor 1000 de 1.1/4"x12"** con una carga operante de **0.94Kg/taladro**.

## 4.9 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

### 4.9.1 Contrastación de la hipótesis general

**H<sub>1</sub>**: El nivel de daño inducido al macizo rocoso se reduce mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en el ByPass 179 en la Compañía Minera Kolpa S.A.

**H<sub>0</sub>**: El nivel de daño inducido al macizo rocoso no se reduce mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en el ByPass 179 de la Compañía Minera Kolpa S.A.

Se confirma la hipótesis de investigación debido a que el nivel de daño en el macizo rocoso se logró reducir mediante el monitoreo modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en el ByPass 179 de la Compañía Minera Kolpa S.A; para el monitoreo se ubicó sismógrafos a determinadas distancias de la voladura, en cuando al modelamiento se logró determinar el comportamiento de las vibraciones para cada tipo de explosivo adecuado y finalmente en el análisis de vibraciones se determinó el explosivo adecuado que genera menor daño en las voladuras de contorno.

### 4.9.2 Contrastación de la hipótesis específica 1

**H<sub>1</sub>**: La construcción de los modelos predictivos para la reducción del daño en el macizo rocoso se realiza con el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras aplicando el modelo de Divine.

**H<sub>0</sub>**: La construcción de los modelos predictivos para la reducción del daño en el macizo rocoso no se realiza con el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras aplicando el modelo de Divine.

Se confirma la hipótesis específica 1, ya que se logró construir los modelos predictivos para el control de daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones, a continuación se detallan los modelos:

- Modelo predictivo del Anfo

$$VPP = 492.46 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.597}$$

Con un grado de confiabilidad del modelo al 90%

- Modelo predictivo del Emulnor 1000 carga corrida

$$VPP = 737.26 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.542}$$

Con un grado de confiabilidad del modelo al 91.25%

- Modelo predictivo del Emulnor 1000 carga espaciada

$$VPP = 582.46 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.497}$$

Con un grado de confiabilidad del modelo al 99.5%

- Modelo predictivo del Famecorte E-20

$$VPP = 158.82 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.215}$$

Con un grado de confiabilidad del modelo al 81.68%

Con el modelo predictivo del Famecorte E-20 se controla el daño en el macizo rocoso, ya que este genera menor daño.

#### 4.9.3 Contrastación de la hipótesis específica 2

**H<sub>1</sub>:** La determinación de los niveles de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión se realiza en función a los siguientes criterios de daño: Intenso fracturamiento, creación de nuevas fracturas y la extensión de fracturas preexistentes.

**H<sub>0</sub>:** La determinación de los niveles de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión no se realiza en

función a los siguientes criterios de daño: Intenso fracturamiento, creación de nuevas fracturas y la extensión de fracturas preexistentes.

Se confirma la hipótesis específica 2, debido a que aplicando los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión dio como resultado los niveles de daño de los explosivos, como se detalla a continuación:

<b>Explosivo</b>	Emulnor 1000	Anfo	Emulnor 1000	Famecorte E 20	
<b>Columna</b>	Continua	Acoplado continuo	Espaciado	Desacoplada	
	<b>VPPc (mm/s)</b>	<b>Distancia (m)</b>			
Intenso fracturamiento (4 x VPPc)	4636	0.46	0.42	0.25	0.06
Creación de nuevas fracturas (1 x VPPc)	1159	1.13	1.00	0.63	0.19
Extender fracturas preexistentes (1/4 x VPPc)	290	2.77	2.39	1.59	0.59

#### 4.9.4 Contrastación de la hipótesis específica 3

**H<sub>1</sub>**: La reducción del daño en el macizo rocoso se produce aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados.

**H<sub>0</sub>**: La reducción del daño en el macizo rocoso no se produce aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados.

Se confirma la hipótesis específica 3, debido a que se determinó a través de voladuras de pruebas que el modelo predictivo de vibraciones de Famecorte E-20, genera menor daño en el macizo rocoso en las voladuras de contorno.

#### 4.10 DISCUSIÓN

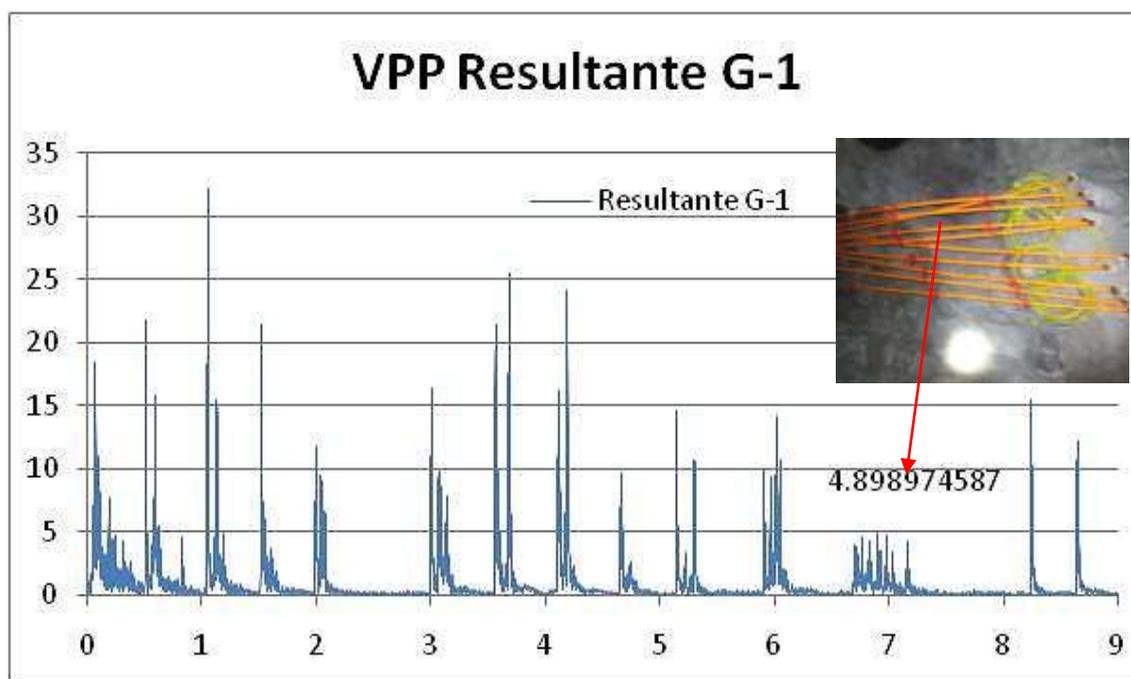
Contreras (2009) en su tesis citada en el subítem de conclusiones concluye que las vibraciones producidas por las voladuras y el conocimiento de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permiten estimar la probabilidad de ocasionar daño en dicho macizo. Los altos niveles de vibración pueden dañar la roca, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto, puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso. Se

muestra también en este trabajo un conjunto de datos representativos de diferentes tipo de rocas y los valores calculados para la Velocidad de Partícula Crítica (PPVc), valor que se puede usar inicialmente como referencia a partir del cual la vibración produce daño a nivel de la matriz de roca, los valores presentados, también dan cuenta de una importante variación en las magnitudes de vibración que es capaz de resistir cada tipo de roca, debiendo en consecuencia tomarse mucha precaución respecto de los valores promedios manejados tradicionalmente.

De esta conclusión se deduce que a través del monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones se reduce el daño en el macizo rocoso, es así que en la presente investigación se logra determinar que el modelo predictivo del Famecorte E-20 es el que controla el daño en el macizo rocoso, ya que este genera menor daño.

Rivera, Jiménez, y De La Vega (2012) en su trabajo técnico arribó a la conclusión que observar el comportamiento de cada columna de taladro disparado con un determinado retardo, y traducido en VPP (Velocidad Pico Partícula) desde los más dañinos. Así como muchos taladros que no desarrollan un trabajo efectivo por su mala configuración geométrica o burden muy cercano o alejado, encontrando un él un pico más alto en el diseño usual que fue de 19.79 mm/s y en el diseño replanteado alcanzamos un promedio de 11.84 mm/s. mediante el modelo predictivo y ley de atenuación se logró reducir en 50% el daño severo ocasionado con la voladura al macizo.

De la investigación, al referirse a taladros de la voladura de contorno cargados con el Famecorte E-20, generan intensidades de vibraciones bajas con respecto a los taladros de producción ya sea arranques, ayudas y cuadradores, son más bajas por el grado de acoplamiento que presenta el Famecorte E-20 con los taladros de contorno, como se puede apreciar en la siguiente figura.

**Figura N° 75: Intensidad de las vibraciones producidas por el Famecorte E-20**

Fuente: Compañía minera Kolpa S.A. (2015)

Scherpenisse, Adamson, y Díaz (2000) en el 4° Seminario Internacional de Seguridad llegó a la conclusión de que un aporte importante del empleo de esta tecnología, es el de obtener los niveles de partícula absolutos, para cada uno de las cargas explosivas, las que asociadas a las distancias en que se registra dicha detonación conforman una buena base de datos, que permite construir modelos confiables de predicción de vibración, con los cuales se puede evaluar diferentes modificaciones a los distintos parámetros de la voladura, tales como tipo y cantidad de explosivo según distancia y evaluar el daño potencial que esa vibración puede producir.

De esta conclusión se deduce que con los modelos predictivos determinados para cada explosivo es posible dimensionar la carga operante para controlar la vibración a una determinada distancia en función a la Velocidad Pico Partícula crítica (VPPc) del macizo rocoso.

## CONCLUSIONES

- En la presente investigación se concluye que el daño en el macizo rocoso se redujo y controló mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en el ByPass 179 de la Compañía Minera Kolpa S.A., para el monitoreo se ubicó sismógrafos a determinadas distancias de la voladura, en cuando al modelamiento se logró determinar el comportamiento de las vibraciones para cada tipo de explosivo adecuado y finalmente en el análisis de vibraciones se determinó el explosivo adecuado que genera menor daño en las voladuras de contorno.
- Los resultados de la investigación muestran que se construyó los modelos predictivos para el control de daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones para los explosivos en estudio
  - Anfo con carga continua y acoplado  $VPP = 492.46\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.597}$  con un grado con confiabilidad de 90%.
  - Emulnor 1000 1 ¼” x 12” con carga continua  $VPP = 737.26\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.542}$  con un grado confiabilidad del 91.25%
  - Emulnor 1000 1 ¼” x 12” con carga espaciada  $VPP = 582.46\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.497}$  con una confiabilidad del 99.5%
  - Famecorte E-20 1 1/16” x 20” con carga desacoplada  $VPP = 158.82\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.215}$  con una confiabilidad del 81.68%

Asimismo, en las pruebas de voladuras realizadas en el ByPass 179 de la Compañía Minera Kolpa S.A, se determina que el modelo predictivo del Famecorte E-20 controla el daño en el macizo rocoso, ya que este genera menor daño por tener el menor factor de velocidad con respecto a los demás explosivos  $K_{E1000 \text{ Corrido}} > K_{E1000 \text{ Espaciado}} > K_{\text{Anfo}} > K_{\text{Famecorte E-20}}$

- Los datos estadísticos muestran que aplicando los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión en campo lejano aplicando los criterios de daños en función de la Velocidad Pico Partícula crítica (VPPc) dio como resultado los siguientes niveles de daño de los explosivos:

Explosivo	Emulnor 1000	Anfo	Emulnor 1000	Famecorte E 20	
Columna	Continua	Acoplado continuo	Espaciado	Desacoplada	
	VPPc (mm/s)	Distancia (m)			
Intenso fracturamiento (4 x VPPc)	4636	0.46	0.42	0.25	0.06
Creación de nuevas fracturas (1 x VPPc)	1159	1.13	1.00	0.63	0.19
Extender fracturas preexistentes (1/4 x VPPc)	290	2.77	2.39	1.59	0.59

El explosivo que genera mayor sobre rotura y daño en las voladuras de contorno es el Emulnor 1000 con un diseño de carga continuo de 0.46 m de intenso fracturamiento y 1.13m de creación de nuevas fracturas de alrededor del perímetro de la labor, por otro lado el uso del explosivo Famecorte E-20 con un diseño de carga desacoplado es el que menor daño genera con 0.06 m de intenso fracturamiento y 0.19 m de creación de nuevas fracturas.

- Finalmente se concluye que el uso del explosivo Famecorte E-20 con un diseño de carga desacoplado en la voladuras de contorno en el ByPass 179 de la compañía minera Kolpa S.A se lograr reducir la sobre rotura en 87% y daño inducido en el macizo rocoso en 70% , estos resultados son respaldados con el modelo predictivo de vibraciones del Famecorte E-20 por generar niveles de vibraciones más bajas por tener un factor de velocidad  $K_{\text{Famecorte E-20}} = 158.82$ , el más bajo con respecto a los demás explosivos estudiados, el mismo que permite reducir la cantidad de material volado producto de la sobreexcavación que se ven beneficiados en los costos de acareo y transporte, costos de sostenimiento y lo más importante contar con labores más estables para el trabajo del personal.

## RECOMENDACIONES

- Para tener una mayor aproximación en los criterios de daño inducido se sugiere realizar el modelamiento de vibraciones en campo cercano, puesto que permitirá conocer las intensidades de vibración reales a distancias muy cercanas a los taladros (un perímetro de la labor), distancias menores a tres veces la longitud de carga
- Para incrementar el grado de confiabilidad de los modelos predictivos, es importante contar con mayor cantidad de registros de vibraciones a diferentes distancias de la voladura de preferencia menores o igual a 30 metros para aproximar el comportamiento de las vibraciones en campo cercano.
- Para las voladuras de contorno es importante mencionar el acoplamiento del explosivo con el taladro que debe ser menor o igual al 25%, esto permite reducir la presión de explosión en las paredes del taladro, por lo tanto el esfuerzo inducido producto de la vibración al macizo rocoso será controlado.
- Finalmente se recomienda continuar con los monitoreos de vibraciones por zonificación geomecánica, para comparar con la Velocidad Pico Partícula crítica y así determinar el tipo de daño inducido por voladura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

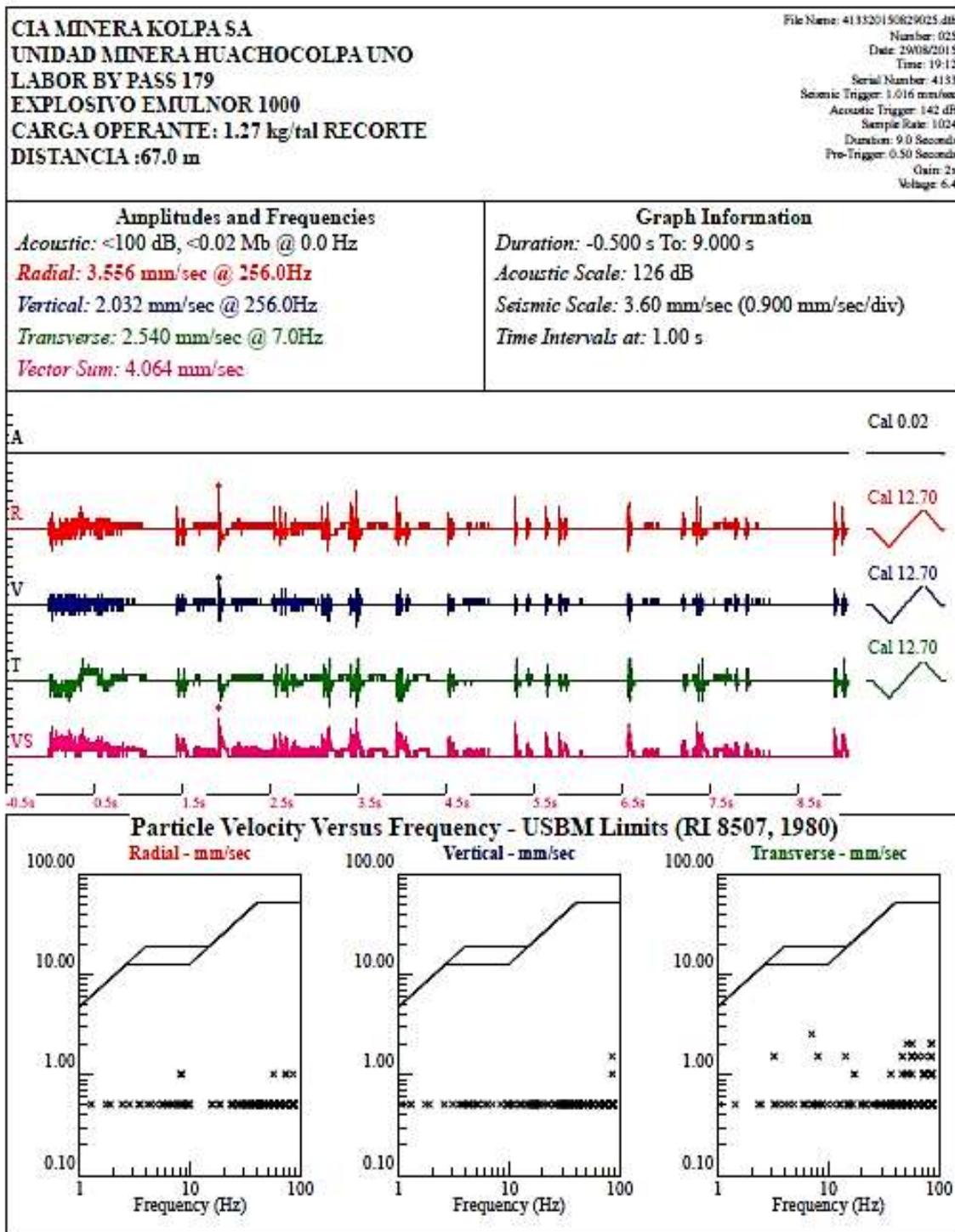
- Ames, V. (2008). *Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- ASP BLASTRONICS. *Instrumentación, monitoreo e interpretación de vibraciones*. Curso de Voladura EXSA. Octubre del 2006, Lima, Perú.
- Carrasco, S. (2007). *Metodología de investigación científica*. Lima, Perú: Editorial San Marcos
- Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de Enaex (2005). *Manual de Monitoreo de Vibraciones generadas por Voladuras, Análisis y Modelamiento*. Chile.
- Contreras, W. (2009). *Selección del explosivo adecuado y carga máxima por retardo usando el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Compañía Minera Kolpa S.A. (2016). *Plan de Minado Unidad Huachocolpa Uno*, Huancavelica, Perú.
- Compañía Minera Kolpa S.A. (2017). *Estudio Geomecánico Unidad Huchocolpa Uno*. Departamento de Geomecánica, Huancavelica, Perú.
- Cruzado, F., Díaz, K. (2017). *Análisis de la máxima carga operante en las vibraciones a campo lejano generado por voladura, en Minera Cerro Negro S.A., Cajamarca 2017*. (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte. Lima, Perú.
- Egaña, M. (2008). *Geoestadística aplicada a parámetros Geotécnicos*. (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Famesa Explosivos S.A.C. (2015). *Informe de Pruebas de Factibilidad Técnica de explosivos en la unidad operativa Huachocolapa Uno*. Huancavelica, Perú.
- Giraldo, F. (2010). *Control de vibraciones para casas de tierra en Perú*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

- Hoek, E., Diederichs M.S. (2006). *Emperical estimation of rock mass modulus*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Canada.
- Instantel (2013). *Manual de Operador Minimate Plus*. Ottawa, Ontario, Canadá.
- Instantel (2015). *Manual de Operador Blastware*. Ottawa, Ontario, Canadá.
- International Society of Explosives Engineers. (2008). *Manual del Especialista en Voladura 17 a Edición*. Cleveland, Ohio EE.UU.
- Pampacata, L. (2015). *Análisis de vibraciones inducidos por la voladura de rocas en cantera Atocongo en zonas cercanas a poblaciones*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Quispe, Y. (2017). *Comportamiento de roca blanda en túnel de exploración diseñado cn el sistema Q*. (tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Quiroz, C. (2014). *Monitoreo e vibraciones causadas por voladuras en Taludes*. (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Perú.
- Thomas, N. (2015). *The relative effect of charge dimensions on elastic vibration attenuation and blast – induced seismic energy concepts*. (tesis de doctorado). Missouri University of Scieince and Technology, EE.UU.
- Scherpenisse, C., Adamson, W., Diaz, J. (2000). *Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras de desarrollo horizontal*. 4° Seminario Internacional de Seguridad Minera. Lima, Perú.
- Vásquez, N. (2013). *Predicción de la Ley de Atenuación, Frecuencia Dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladuras a Cielo Abierto*. (tesis de pregrado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. España.
- White Industrial Seismology, Inc. (2009). *Manual de Operador Mini-Seis Digital Seismograph* Ottawa, Ontario, Canadá.
- White Industrial Seismology, Inc. (2008). *Manual Seismograph Data Analysis versión 9.X*. Ontario, Canadá.

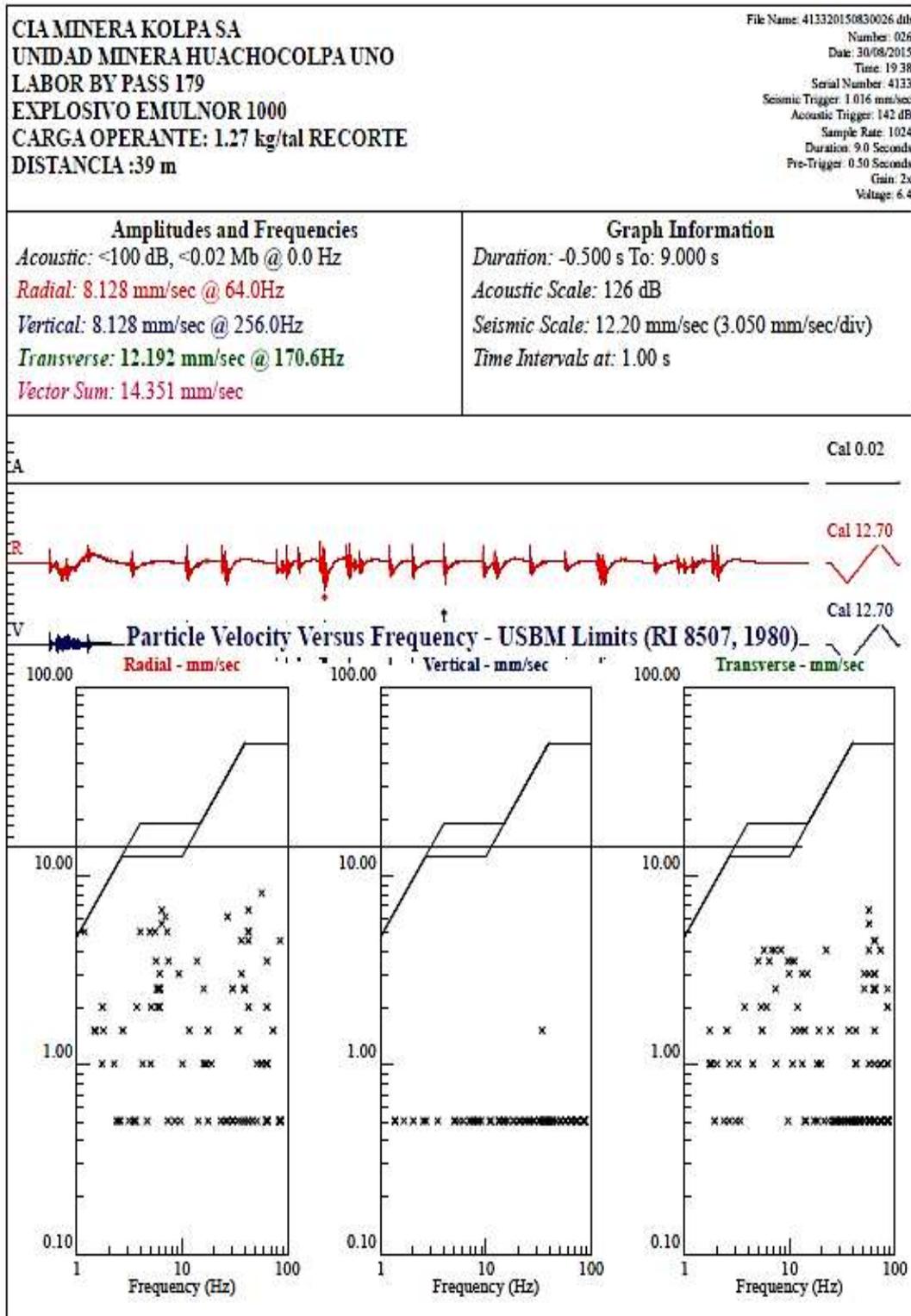
ANEXOS

ANEXO A: REPORTES DE VIBRACIÓN EN EL BP 179

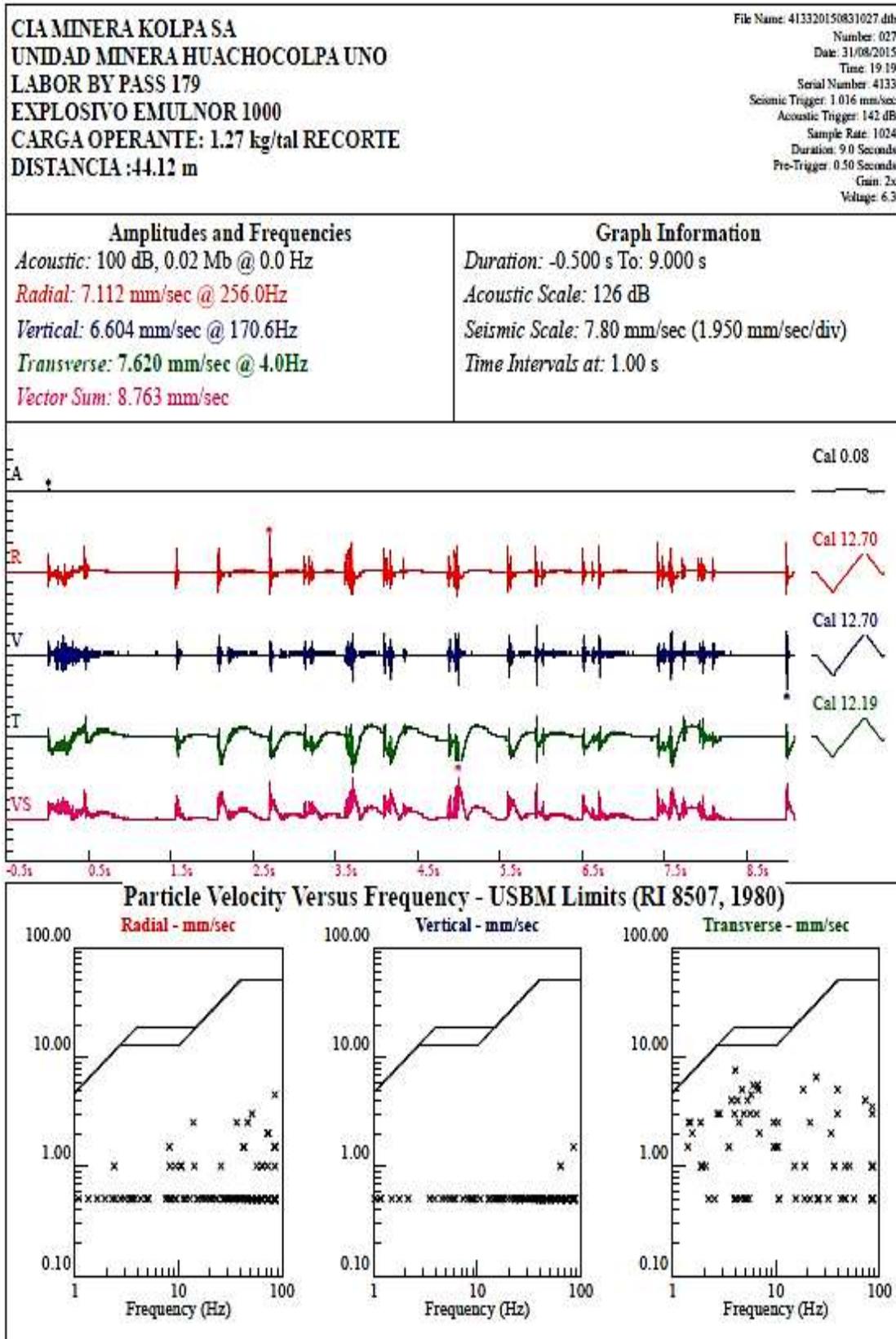
A.1. Reportes de vibración de fecha 29 de agosto del 2015, con sismógrafo White



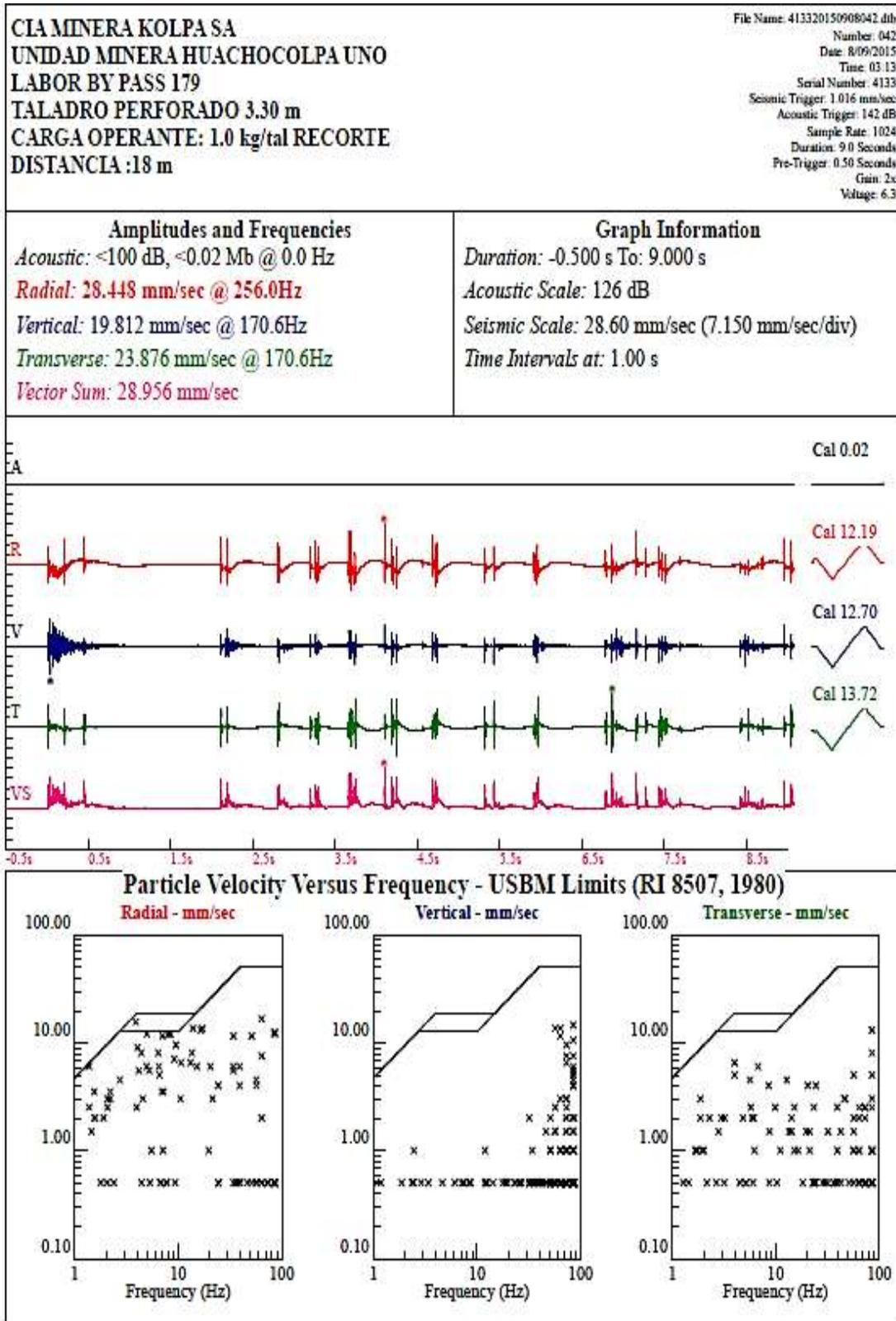
A.2. Reportes de vibración de fecha 30 de agosto del 2015, con sismógrafo White



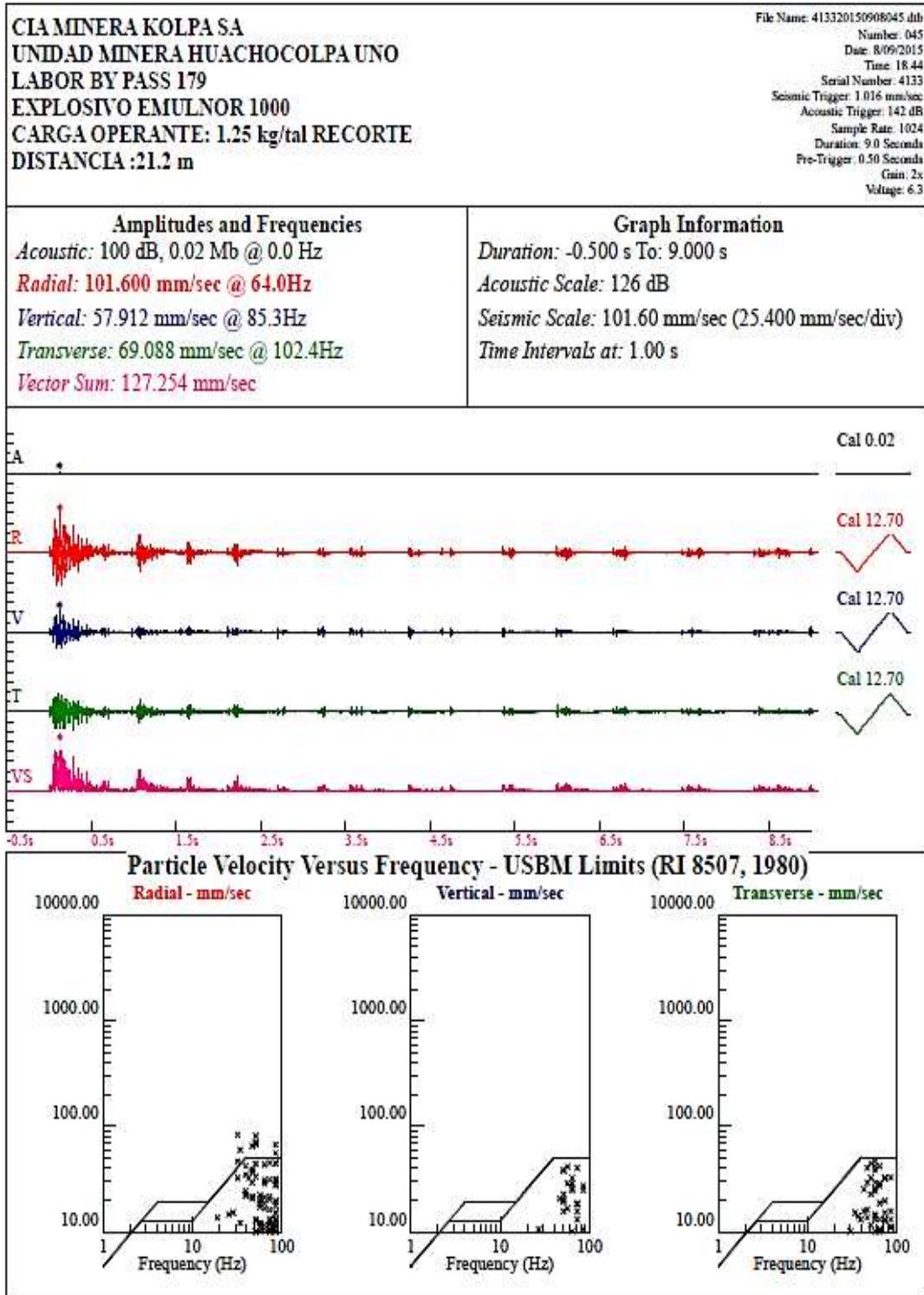
A.3. Reportes de vibración de fecha 31 de agosto del 2015, con sismógrafo White



A.4. Reportes de vibración de fecha 08 de setiembre del 2015, con sismógrafo White



A.5. Reportes de vibración de fecha 08 de setiembre del 2015, con sismógrafo White



### A.6 Reportes de vibración de fecha 18 de setiembre del 2015, geófono 2. Con sismógrafo InstanTel



Event Report

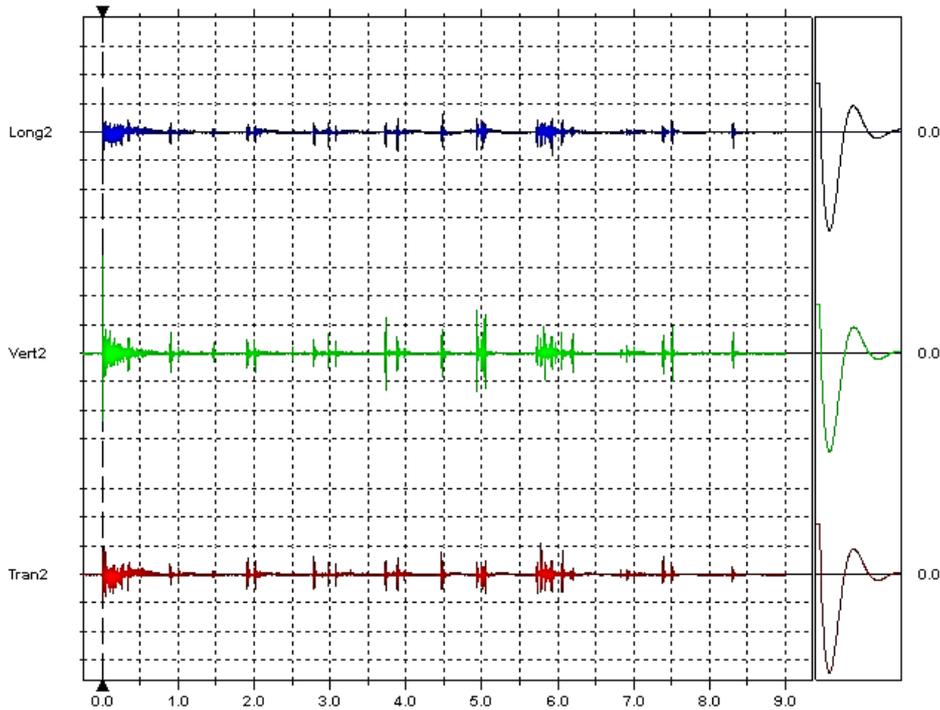
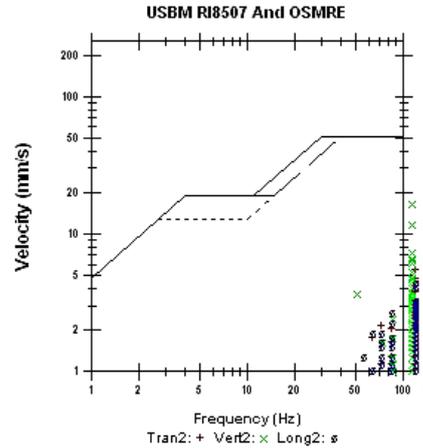


Fecha/Hora Vert en 18:22:29 Septiembre 18, 2015  
 Origen del Disparo Geo 2: 69.0 pa.(L)  
 Rango Geo: 254 mm/s  
 Tiempo Registro 17.25 seg (Auto=9Seg) en 1024 sps  
 Num Trabajo 7  
 Notas  
 Location: CIA. MINERA CAUDALOSA S.A.  
 Client: EKSA S.A.  
 User Name: Geomecanica  
 General: JFWV0.

Numero de Serial BE19469 V 10.60-8.17 MiniMate Plus8  
 Nivel de Bateria 6.2 Voltios  
 Unit Calibration Abril 21, 2014 by Geoinstruments  
 Nombre del Archivo U469G11N.1H0  
 Distancia Escalada 5.1 (16.6 m, 10.5 kg)

	Tran2	Vert2	Long2	
PPV	5.46	16.9	4.44	mm/s
PPV (Ponderado)	1.46	1.55	1.44	mm/s
PPV	65.7	75.6	64.0	dB
Frecuencia ZC	>100	>100	>100	Hz
Tiempo (Rel. al Disparador)	5.782	0.009	0.011	seg
Aceleracion del Pico	0.464	1.67	0.490	g
Desplazamiento del Pico	0.00469	0.0138	0.00465	mm
Chequeo de Sensores	Paso	Paso	Paso	
Frequency	7.3	7.3	7.4	Hz
Overswing Ratio	4.0	3.9	3.9	

Pico Vector Suma 17.2 mm/s en 0.009 seg



Time scale has been modified and may not represent the actual length of the event record  
 Escala Tiempo: 0.50 seg/div Escala Amplitud: Geo: 5.00 mm/s/div Chequeo de Sensores

Impreso: Septiembre 25, 2015 (V 10.52 - 10.52)

Format © 1995-2013 Xmark Corporation

### A.7 Reportes de vibración de fecha 18 de setiembre del 2015, geófono 1. Con sismógrafo InstanTel



#### Event Report

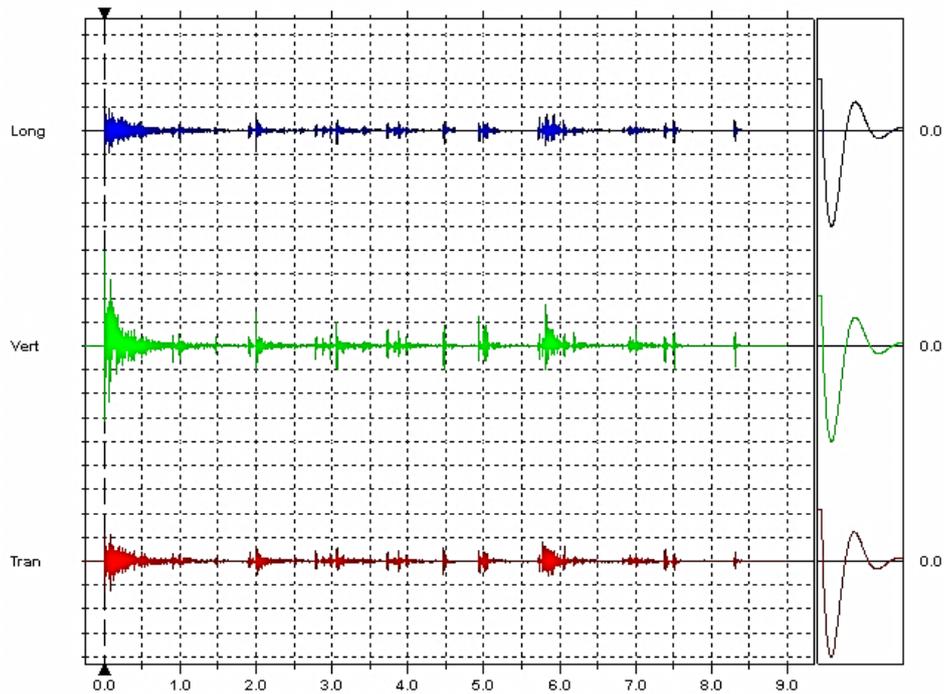
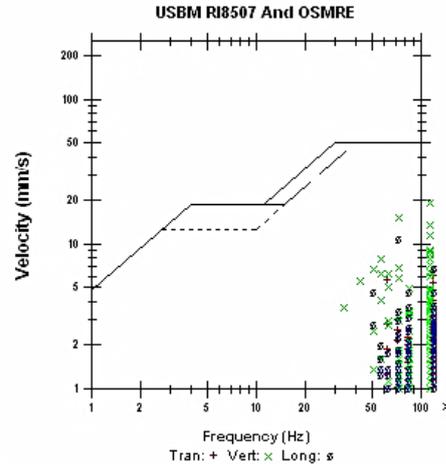


Fecha/Hora Vert en 18:22:29 Septiembre 18, 2015  
 Origen del Disparo Geo: 3.00 mm/s  
 Rango Geo: 254 mm/s  
 Tiempo Registro 17.25 seg (Auto=9Seg) en 1024 sps  
 Num Trabajo 7  
 Notas  
 Location: CIA. MINERA CAUDALOSA S.A.  
 Client: BKSA S.A.  
 User Name: Geomecanica  
 General: JFWV0.

Numero de Serial BE19489 V 10.60-8.17 MiniMate Plus8  
 Nivel de Bateria 6.2 Voltios  
 Unit Calibration Abril 21, 2014 by Geoinstruments  
 Nombre del Archivo U469G11N.1H0  
 Distancia Escalada 5.1 (16.6 m, 10.5 kg)

	Tran	Vert	Long	
PPV	6.60	19.7	11.0	mm/s
PPV (Ponderado)	1.75	4.46	2.89	mm/s
PPV	67.4	76.9	71.9	dB
Frecuencia ZC	>100	>100	73	Hz
Tiempo (Rel. al Disparador)	0.001	0.001	0.004	seg
Aceleracion del Pico	0.689	1.63	0.862	g
Desplazamiento del Pico	0.0116	0.0228	0.0135	mm
Chequeo de Sensores	Paso	Paso	Paso	
Frequency	7.7	7.5	7.4	Hz
Overswing Ratio	3.4	3.5	3.4	

Pico Vector Suma 21.6 mm/s en 0.001 seg



Time scale has been modified and may not represent the actual length of the event record  
 Escala Tiempo: 0.50 seg/div Escala Amplitud: Geo: 5.00 mm/s/div Chequeo de Sensores

### A.8. Reportes de vibración de fecha 24 de setiembre del 2015, geófono 1. Con sismógrafo InstanTel



#### Event Report

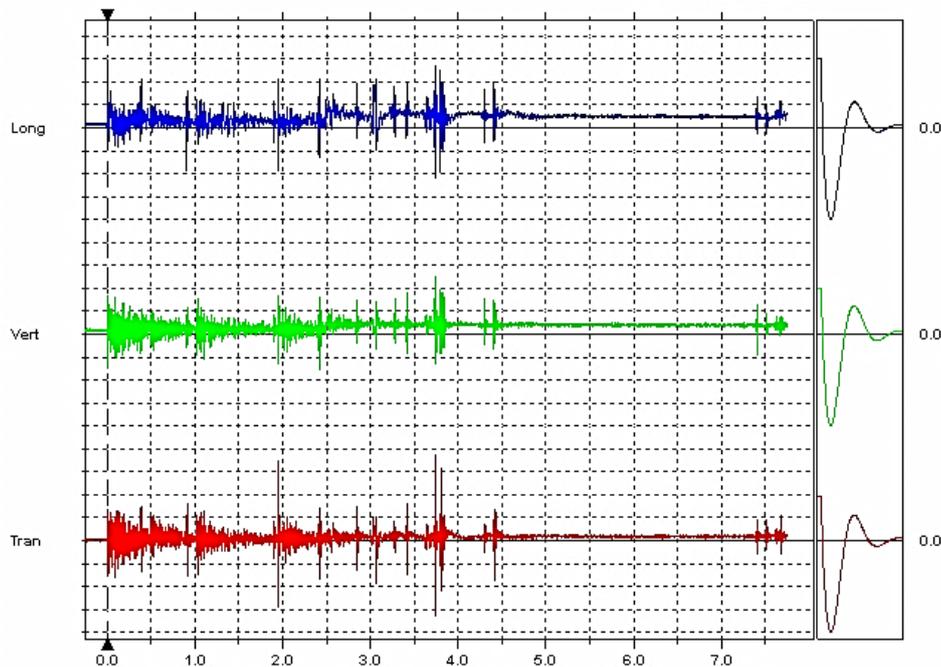
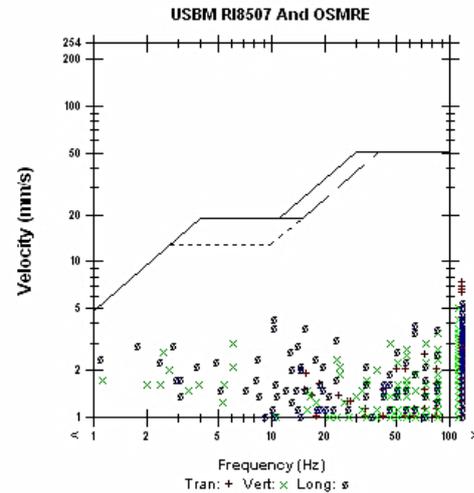


Fecha/Hora Vert en 18:17:15 Septiembre 24, 2015  
 Origen del Disparo Geo: 3.00 mm/s  
 Rango Geo: 254 mm/s  
 Tiempo Registro 7.75 seg (Auto=3Seg) en 1024 sps  
 Num Trabajo 2  
 Notas

Numero de Serial BE14224 V 10.60-8.17 MiniMate Plus8  
 Nivel de Bateria 6.0 Voltios  
 Unit Calibration Mayo 23, 2014 by Geoinstruments  
 Nombre del Archivo P224G1CQ.SRO

	Tran	Vert	Long	
PPV	7.49	5.08	5.46	mm/s
PPV (Ponderado)	1.55	1.32	2.93	mm/s
PPV	68.5	65.1	65.7	dB
Frecuencia ZC	>100	>100	>100	Hz
Tiempo (Rel. al Disparador)	3.744	3.740	3.736	seg
Aceleracion del Pico	0.888	0.437	0.663	g
Desplazamiento del Pico	0.119	1.19	1.51	mm
Chequeo de Sensores	Paso	Paso	Paso	
Frequency	7.6	7.7	7.6	Hz
Overswing Ratio	3.7	3.4	3.7	

Pico Vector Suma 7.94 mm/s en 3.744 seg



Escala Tiempo: 0.50 seg/div Escala Amplitud: Geo: 2.00 mm/s/div

Chequeo de Sensores

Impreso: Septiembre 25, 2015 (V 10.52 - 10.52)

Format © 1995-2013 Xmark Corporation

**A.9. Reportes de vibración de fecha 24 de setiembre del 2015, geófono 1. Con sismógrafo InstanTel**



**Event Report**

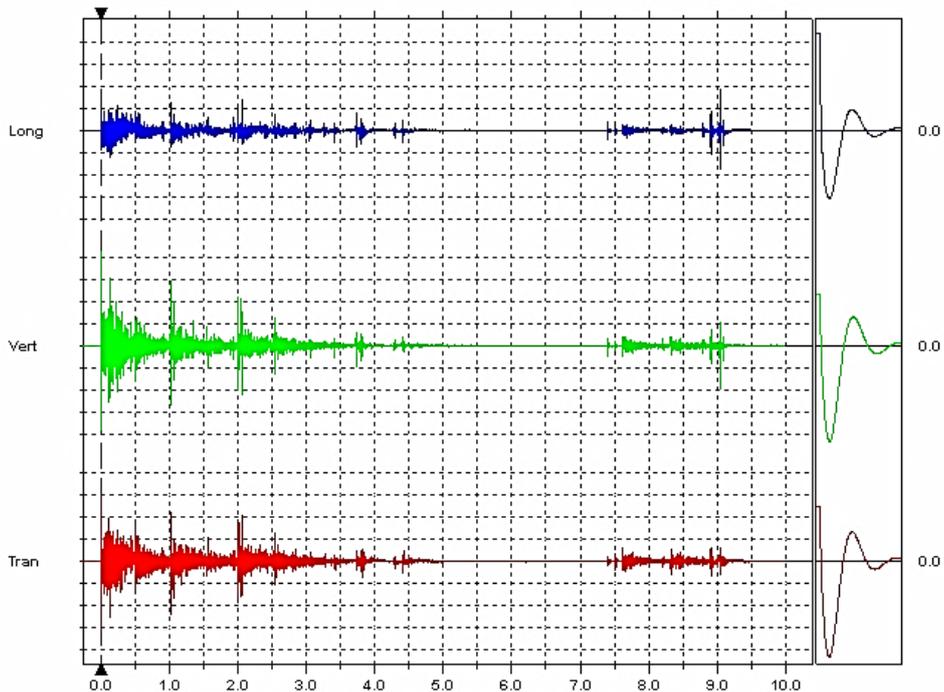
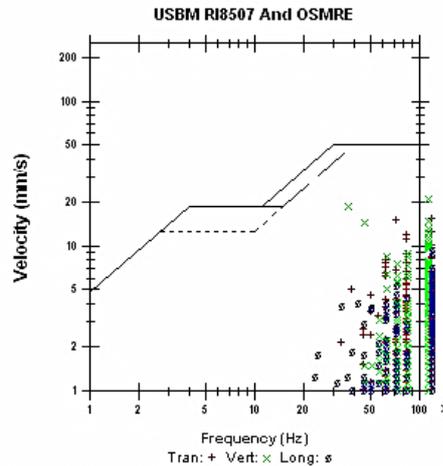


Fecha/Hora Tran2 en 18:14:56 Septiembre 24, 2015  
 Origen del Disparo Geo: 3.00 mm/s  
 Rango Geo: 254 mm/s  
 Tiempo Registro 18.25 seg (Auto=9Seg) en 1024 sps  
 Num Trabajo 7  
 Notas  
 Location: CIA. MINERA CAUDALOSA S.A.  
 Client: BKSA S.A.  
 User Name: Geomecanica  
 General: JFWV0.

Numero de Serial BE19489 V 10.60-8.17 MiniMate Plus/8  
 Nivel de Bateria 6.1 Voltios  
 Unit Calibration Abril 21, 2014 by Geoinstruments  
 Nombre del Archivo U489G1CQ.OWD  
 Distancia Escalada 5.1 (16.6 m, 10.5 kg)

	Tran	Vert	Long	
PPV	15.7	21.5	9.52	mm/s
PPV (Ponderado)	5.62	4.40	3.41	mm/s
PPV	74.9	77.6	70.6	dB
Frecuencia ZC	>100	>100	>100	Hz
Tiempo (Rel. al Disparador)	0.007	0.007	9.046	seg
Aceleracion del Pico	1.42	2.43	0.954	g
Desplazamiento del Pico	0.0340	0.0311	0.0125	mm
Chequeo de Sensores	Paso	Paso	Check	
Frequency	7.9	7.6	7.8	Hz
Overswing Ratio	3.4	3.4	3.3	

Pico Vector Suma 26.7 mm/s en 0.007 seg



Time scale has been modified and may not represent the actual length of the event record  
 Escala Tiempo: 0.50 seg/div Escala Amplitud: Geo: 5.00 mm/s/div  
 Chequeo de Sensores

**A.10. Reportes de vibración de fecha 24 de setiembre del 2015, geófono 2. Con sismógrafo InstanTel**



**Event Report**

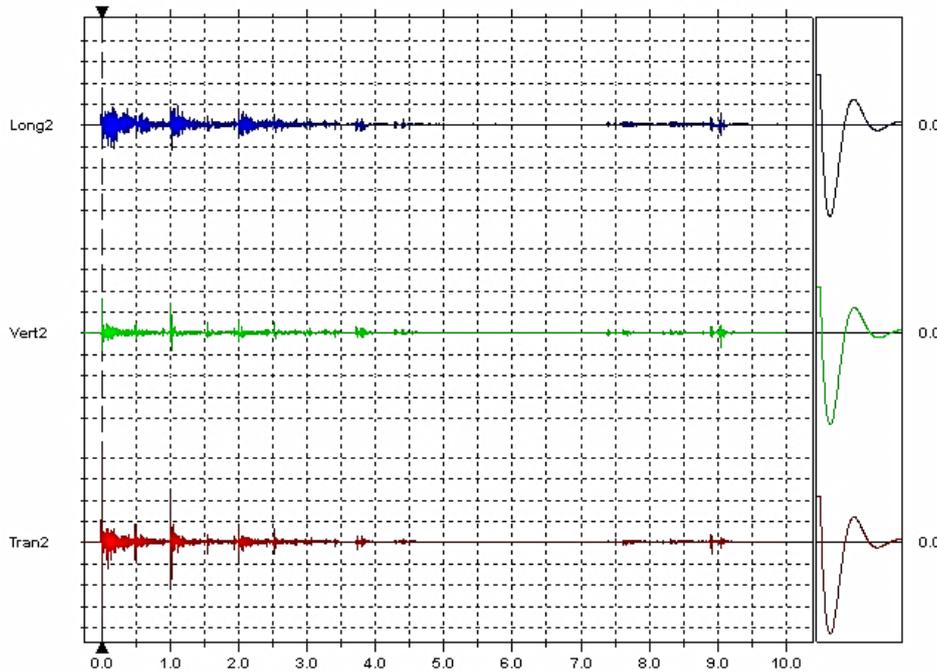
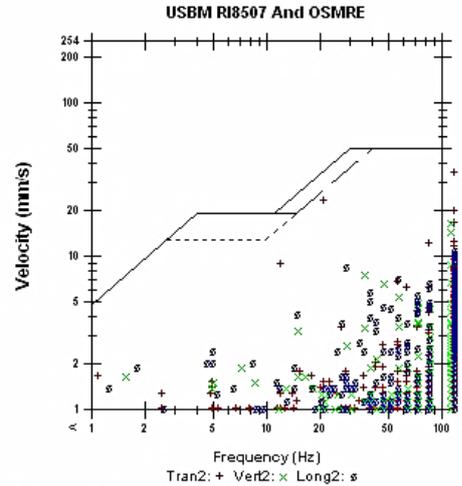


Fecha/Hora Tran2 en 18:14:56 Septiembre 24, 2015  
 Origen del Disparo Geo 2: 69.0 pa.(L)  
 Rango Geo: 254 mm/s  
 Tiempo Registro 18.25 seg (Auto=9Seg) en 1024 sps  
 Num Trabajo 7  
 Notas  
 Location: CIA. MINERA CAUDALOSA S.A.  
 Client: EXSA S.A.  
 User Name: Geomecanica  
 General: JFWVO.

Numero de Serial BE19469 V 10.60-8.17 MiniMate Plus/8  
 Nivel de Bateria 6.1 Voltios  
 Unit Calibration Abril 21, 2014 by Geoinstruments  
 Nombre del Archivo U469G1CQ.DW0  
 Distancia Escalada 5.1 (16.6 m, 10.5 kg)

	Tran2	Vert2	Long2	
PPV	42.4	16.5	16.9	mm/s
PPV (Ponderado)	5.97	4.24	4.79	mm/s
PPV	83.6	75.4	75.6	dB
Frecuencia ZC	N/D	>100	N/D	Hz
Tiempo (Rel. al Disparador)	0.001	0.002	0.001	seg
Aceleracion del Pico	4.63	1.41	1.25	g
Desplazamiento del Pico	0.764	0.595	0.831	mm
Chequeo de Sensores	Paso	Paso	Paso	
Frequency	7.4	7.4	7.6	Hz
Overswing Ratio	3.9	3.8	3.7	

Pico Vector Suma 45.9 mm/s en 0.001 seg  
 N/D:



Time scale has been modified and may not represent the actual length of the event record  
 Escala Tiempo: 0.50 seg/div Escala Amplitud: Geo: 10.00 mm/s/div Chequeo de Sensores



**ANEXO C: EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS DE VOLADURAS DE PRUEBA**

**C.1 Explosivo Famecorte E-20 activado con Fanel**



**C.2 Resultado de voladura de contorno con explosivo Famecorte E-20 en la corona del Bp 179**



**C.3 Resultado de voladura de contorno con explosivo Famecorte E-20 en los hastiales del Bp 179**



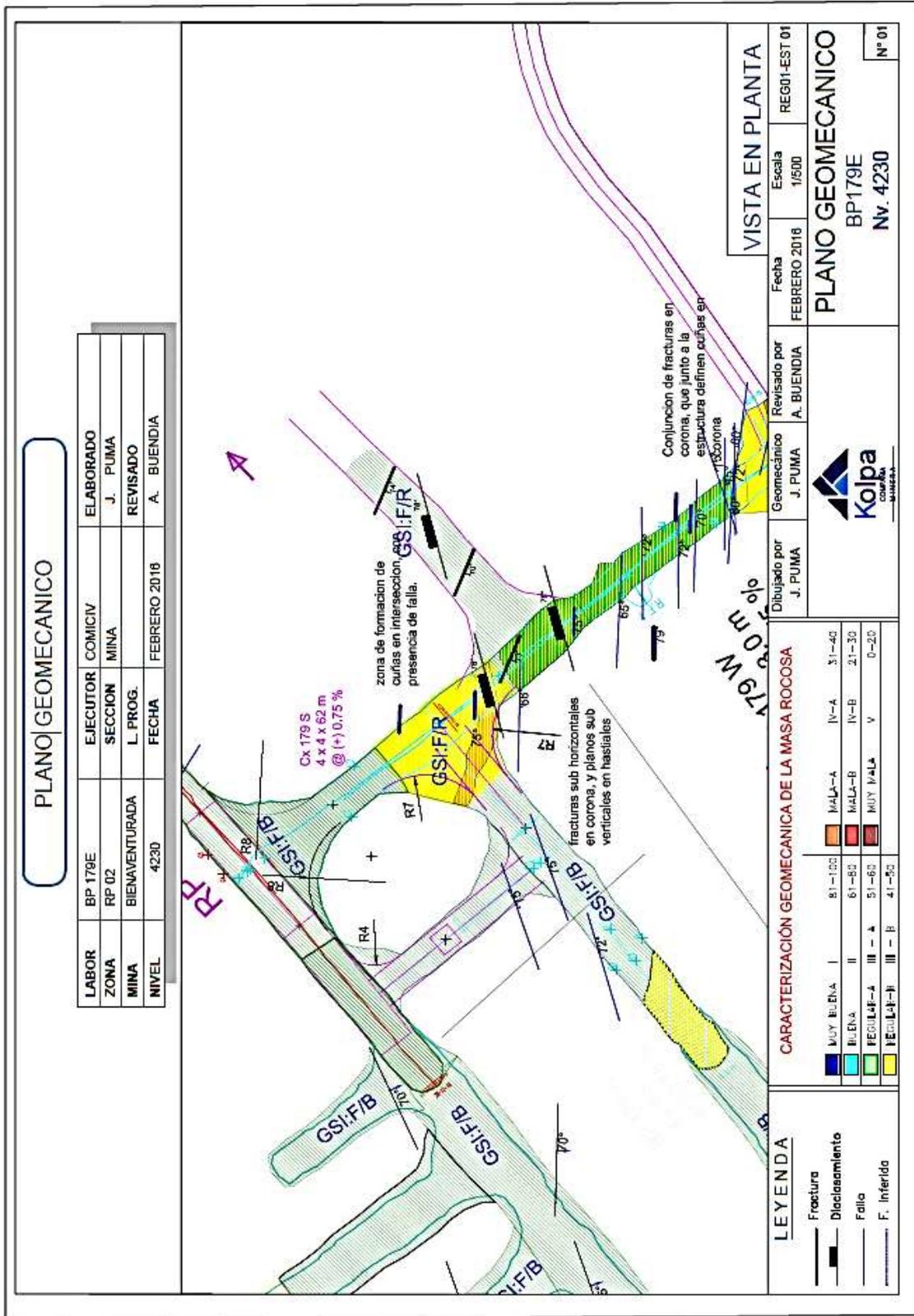
**C.4 Resultado de voladura de contorno con explosivo Famecorte E-20 en los hastiales y corona del Bp 179**



**ANEXO D: MATRIZ DE CONSISTENCIA**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPÓTESIS</b>	<b>VARIABLES E INDICADORES</b>
<p><b>PROBLEMA GENERAL:</b> ¿Cómo se realiza la reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179 en la Compañía Minera Kolpa S.A.?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS:</b> A. ¿Cómo se realiza la construcción del modelo predictivo de vibraciones para reducir el daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones? B. ¿Cómo se determina el nivel de daño de los diseños de voladura con el modelo predictivo mediante la ley de atenuación y la función de regresión? C. ¿Cómo se reduce el daño en el macizo rocoso aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL:</b> Experimentar el proceso de reducción del daño inducido al macizo rocoso mediante monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones por voladuras en el Bypass 179. Compañía Minera Kolpa S.A.</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</b> A. Construir los modelos predictivos de vibraciones para reducir el daño en el macizo rocoso realizando monitoreo y análisis de vibraciones. B. Verificar el nivel de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión. C. Reducir el daño en el macizo rocoso aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados.</p>	<p><b>HIPÓTESIS GENERAL:</b> El nivel de daño inducido al macizo rocoso se reduce mediante el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras en el Bypass 179 en la Compañía Minera Kolpa S.A.</p> <p><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS:</b> A. La construcción de los modelos predictivos para la reducción del daño en el macizo rocoso se realiza con el monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras aplicando el modelo de Divine. B. La determinación de los niveles de daño de los diseños de voladura con los modelos predictivos mediante la ley de atenuación y la función de regresión se realiza en función a los siguientes criterios de daño: Intenso fracturamiento, creación de nuevas fracturas y la extensión de fracturas preexistentes. C. La reducción del daño en el macizo rocoso se produce aplicando el modelo predictivo de vibraciones y su interpretación de resultados</p>	<p><b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b> Monitoreo, modelamiento y análisis de vibraciones de las voladuras Contenidos teóricos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicación de geófonos.</li> <li>• Registro de la VPP</li> <li>• Carga operante de la voladura</li> <li>• Factor de velocidad (K)</li> <li>• Factor de atenuación (<math>\alpha</math>)</li> </ul> <p><b>VARIABLE DEPENDIENTE</b> Reducción del daño inducido al macizo rocoso por voladura.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo predictivo de vibraciones</li> <li>• Velocidad Pico Partícula crítica</li> </ul>
<p><b>MÉTODO Y DISEÑO</b></p> <p><b>MÉTODO</b> Se aplicarán los principios del método científico.</p> <p><b>DISEÑO</b> Se utilizará el diseño experimental puro.</p>	<p><b>POBLACIÓN Y MUESTRA</b> Se trabajará con la Población del proyecto de investigación viene a ser la Compañía Minera Kolpa S.A. en su unidad de producción Huacocolpa – Uno, que tienen la misma zonificación geomecánica del By Pass 179 de la rampa II</p>	<p><b>TÉCNICAS E INSTRUMENTOS</b></p> <p><b>TÉCNICAS</b> Observación</p> <p><b>INSTRUMENTO</b> Reportes de vibración y voladura</p> <p><b>TRATAMIENTO ESTADÍSTICO</b> Se precizarán los criterios pertinentes para la estructuración de instrumentos y luego proceder a su validación y confiabilidad necesarias.</p>	

ANEXO E: PLANO GEOMECÁNICO BP 179



**ANEXO F: VISTAS FOTOGRÁFICAS DE INSTALACIÓN DE SISMÓGRAFO  
PARA MONITOREO DE VIBRACIONES**

**F.1. VISTA FOTOGRÁFICA 1**



**F.2. VISTA FOTOGRÁFICA 2**



**F.3. VISTA FOTOGRÁFICA 3**



**F.4. VISTA FOTOGRÁFICA 4**



**F.5. VISTA FOTOGRÁFICA 5**

