

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**APLICACIÓN DE UN MODELO DE VIBRACIONES  
PARA EL CONTROL DE VOLADURAS EN TAJOS  
SAN GERARDO MINA ATACOCHA**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Elwis Anthony Mucho Ponce

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

TACNA - PERÚ

2016

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela Profesional de Ingeniería de Minas**

**APLICACIÓN DE UN MODELO DE VIBRACIONES  
PARA EL CONTROL DE VOLADURAS EN TAJO  
SAN GERARDO MINA ATACUCHA**

**Tesis sustentada y aprobada el día 12 de agosto 2016,  
estando integrado el Jurado Calificador por:**

**PRESIDENTE**

.....  
**Dr. Julio Miguel Fernández Prado**

**SECRETARIO**

.....  
**MSc. Carlos Huisa Ccóri**

**MIEMBRO**

.....  
**Ing. José David Rodríguez Copare**

**ASESOR**

.....  
**Dr. Dante Ulises Morales Cabrera**

## **DEDICATORIA**

A mi madre Angélica Ponce por haber tenido la responsabilidad de educarme y brindarme su apoyo constante, a mis hermanos por su atención en mi vida Profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi alma Máter, la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, a la Facultad de Ingeniería, y a todos los docentes que con sus enseñanzas me encaminaron en la minería.

## **CONTENIDO**

<b>DEDICATORIA</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XVI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>

### **CAPÍTULO I**

#### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

1.1 Planteamiento del problema	4
1.1.1 Problema general	5
1.1.2 Problemas específicos	5
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
1.3 Justificación del problema	7
1.4 Hipótesis	8
1.4.1 Hipótesis general	8
1.4.2 Hipótesis específicos	8
1.5 Variables de la investigación	9

1.5.1	Variables dependientes	9
1.5.2	Variables independientes	9

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

2.1	Antecedentes de la investigación	11
2.2	Definición de vibraciones	14
2.2.1	Generación de ondas sísmicas por voladura	15
2.2.2	Características del movimiento ondulatorio	17
2.2.3	Tipos de ondas	19
2.3	Velocidad de propagación de onda	25
2.4	Velocidad de partícula	26
2.4.1	Análisis de la velocidad pico partícula	27
2.4.2	Análisis de frecuencia	28
2.5	Efectos de las vibraciones sobre los macizos rocosos	30
2.6	Predicción de vibración del terreno	30
2.7	Modelos australianos	35
2.8	Diferenciación de las voladuras con otras fuentes generadoras de vibración	36
2.9	Normativa de las vibraciones	38

2.9.1	Normativas de la comunidad Europea	41
2.9.2	Normativas americanas	53
2.9.3	Normativas peruanas de vibraciones	56

### **CAPÍTULO III**

#### **MARCO METODOLÓGICO**

3.1	Características de la investigación	66
3.1.1	Tipo de investigación	66
3.1.2	Diseño de la investigación	66
3.1.3	Nivel de investigación	67
3.1.4	Método de investigación	67
3.2	Descripción del ámbito de la investigación	68
3.2.1	Ubicación	68
3.2.2	Acceso	68
3.2.3	Geografía	69
3.2.4	Clima	69
3.2.5	Geología regional	70
3.2.5.1	Contexto geológico estructural	72
3.2.5.2	Implicancia metalogenéticas	75
3.2.5.3	Reservas por sectores geológicos	77

3.2.6	Geología local	78
3.2.6.1	Litología y estratigrafía	78
3.2.6.2	Estructural	93
3.2.6.3	Alteración hidrotermal	96
3.2.6.4	Características mineralógicas de tipos y estilos de mineralización	99
3.3	Diseño de perforación	102
3.3.1	Diseño de malla para taladros de producción	102
3.3.2	Diámetro de taladro	103
3.3.3	Burden	105
3.3.4	Espaciamiento	106
3.3.5	Altura de banco	107
3.3.6	Sobre perforación	109
3.3.7	Longitud del taladro	110
3.3.8	Índice de rigidez del burden	110
3.3.9	Diseño de malla para taladros buffer	112
3.3.10	Burden para taladros buffer	113
3.3.11	Espaciamiento para taladros buffer	113
3.3.12	Diseño de malla para taladros pilotos	114
3.3.13	Diámetro de perforación para taladros piloto	115
3.3.14	Altura de perforación para taladros piloto	115

3.3.15 Burden para taladros piloto	116
3.3.16 Espaciamiento para taladros piloto	117
3.3.17 Diseño de malla para taladros de precorte	117
3.3.18 Diámetro de perforación	119
3.3.19 Inclinación del precorte	119
3.3.20 Altura de perforación	122
3.3.21 Sobre perforación	122
3.3.22 Burden para taladros de precorte	123
3.3.23 Espaciamiento para taladros de precorte	123
3.4 Diseño de carga	125
3.4.1 Carguío de taladros de producción	125
3.4.2 Taladros buffer	130
3.4.3 Taladros piloto	131
3.4.4 Taladros de precorte	133
3.5 Diseño de voladura	134
3.5.1 Evaluación y elección del sistema de voladura	134
3.6 Simulación de voladura	140
3.7 Trabajo de campo	144
3.7.1 Ubicación y posicionamiento de las pruebas	145
3.7.2 Ubicación de los puntos de prueba	145
3.8 Instrumentación	146

3.8.1	Características del equipo utilizado	147
3.8.2	Utilización del equipo de medición	149
3.8.3	Ubicación y acoplamiento del equipo para las pruebas	151
3.9	Trabajo de gabinete	152
3.9.1	Agrupación de datos importantes	152

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Análisis de la información	155
4.1.1	Velocidad pico partícula y frecuencia	155
4.2	Generación del modelo	159
4.2.1	Creación del modelo	160
4.2.2	Comparación del modelo con modelos australianos de Orihuela y Dapello, 2009	167
4.2.3	Comparación del modelo predictivo con el modelo Colque 170	
4.2.4	Límites permisibles de vibraciones por voladura para casas de tierra apisonada	172
4.3	Aplicación del modelo	173
4.3.1	Relación carga - distancia	176

<b>CONCLUSIONES</b>	179
<b>RECOMENDACIONES</b>	181
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	182
<b>ANEXOS</b>	185
Anexo N° 1. Reporte de vibraciones de los ensayos	186
Anexo N° 2. Cuadro resumen de los ensayos realizados	205
Anexo N° 3. Tabla de clasificación del macizo rocoso	206
Anexo N° 4. Plano litológico del tajo San Gerardo	207
Anexo N° 5. Plano de punto de monitoreo de vibraciones	209
Anexo N° 6. Plano en planta de tajo San Gerardo	211
Anexo N° 7. Plano de ubicación de mina Atacocha	213

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Movimiento de partícula dentro de la onda P.	20
<b>Figura 2.</b> Movimiento de partícula dentro de la onda S.	22
<b>Figura 3.</b> Movimiento de diferentes tipos de ondas	23
<b>Figura 4.</b> Típica dispersión de datos, velocidad pico-partícula vs distancia escalada cuadrada	33
<b>Figura 5.</b> Modelo VPP para casa de tierra	63
<b>Figura 6.</b> Normativa de vibraciones para casa de tierra	64
<b>Figura 7.</b> Mapa geológico	71
<b>Figura 8.</b> Columna geológica local mina Atacocha	93
<b>Figura 9.</b> Modelo geológico 3D mina Atacocha	95
<b>Figura 10.</b> Características de estilos y tipos de mineralización	102
<b>Figura 11.</b> Diseño de malla para taladros piloto	114
<b>Figura 12.</b> Inclinación de los taladros de precorte	121
<b>Figura 13.</b> Diseño general de malla de perforación	125
<b>Figura 14.</b> Parámetros de carguío taladros de producción	127
<b>Figura 15.</b> Imagen de la comunidad de San Juan de Milpo	128
<b>Figura 16.</b> Imagen de voladura con factor 0,22 kg/m <sup>3</sup>	129
<b>Figura 17.</b> Imagen de voladura con factor 0,30 kg/m <sup>3</sup>	129
<b>Figura 18.</b> Parámetros de carguío del taladro de buffer	131

<b>Figura 19.</b> Parámetros de carguío del taladro piloto	132
<b>Figura 20.</b> Secuencia de salida en “V” con amarre en “V”	136
<b>Figura 21.</b> Diseño de amarre en “V”	137
<b>Figura 22.</b> Secuencia de salida en “V” con amarre diagonal	138
<b>Figura 23.</b> Diseño de amarre lineal con salida en “V”	139
<b>Figura 24.</b> Diseño de amarre lineal	140
<b>Figura 25.</b> Simulación de voladura	143
<b>Figura 26.</b> Minimate Plus - Instantel	150
<b>Figura 27.</b> Reporte de Vibraciones	157
<b>Figura 28.</b> Correlación de la VPP y Hz	158
<b>Figura 29.</b> Datos de campo VPP vs distancia escalada	162
<b>Figura 30.</b> Modelo de vibraciones	166
<b>Figura 31.</b> Comparación de modelos	168
<b>Figura 32.</b> Representación gráfica de la VPP en función de D y Q	178

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Matriz de Consistencia	10
<b>Tabla 2.</b> Resumen de Normativas Internacionales	40
<b>Tabla 3.</b> Resumen de norma UNE 22-381-93	41
<b>Tabla 4.</b> Valores de VPP y Hz UNE 22-38-93	43
<b>Tabla 5.</b> Valores de VPP DIN 4150 (1999)	45
<b>Tabla 6.</b> Valores Indicativos	46
<b>Tabla 7.</b> Aspectos importantes Suiza SN650 31a	47
<b>Tabla 8.</b> Clases de susceptibilidad	48
<b>Tabla 9.</b> Aspectos importantes SS4604866	49
<b>Tabla 10.</b> Aspectos importantes ISO 4855 (1990)	51
<b>Tabla 11.</b> Rangos típicos de respuesta ISO (1990)	52
<b>Tabla 12.</b> Valores máximos de VPP U.S. Bureau of Mines	55
<b>Tabla 13.</b> Normativa Office off Surface Mining (OSM)	56
<b>Tabla 14.</b> Normativas peruana de vibraciones	58
<b>Tabla 15.</b> Velocidades de partícula en función a la aceleración	62
<b>Tabla 16.</b> VPP máxima para frecuencias < 30 Hz	63
<b>Tabla 17.</b> Reservas probadas y probables 2016	78
<b>Tabla 18.</b> Correcciones	107
<b>Tabla 19.</b> Relación altura/burden	108

<b>Tabla 20.</b> Relación de rigidez	111
<b>Tabla 21.</b> Parámetros del Sismógrafo	149
<b>Tabla 22.</b> Resumen de los diecinueve ensayos realizados	153
<b>Tabla 23.</b> Relación de datos registrados	161
<b>Tabla 24.</b> Aplicando el método de mínimos cuadrados	163
<b>Tabla 25.</b> Valor de constantes k y b	164
<b>Tabla 26.</b> VPP Geófono, modelo Predictivo y Colque	171
<b>Tabla 27.</b> Cálculo de “Q”	175
<b>Tabla 28.</b> Cuadro comparativo de la VPP al 73 % de fiabilidad	177

## RESUMEN

La Compañía Minera Atacocha es una importante empresa productora de metales preciosos, que inició sus operaciones en 1936. La mina se divide en dos zonas de trabajo, Atacocha y Santa Bárbara, cada una de las cuales presenta distintos tipos de mineralización. Dentro de las operaciones de la zona – Atacocha se encuentra el Tajo San Gerardo que viene desarrollándose por empresas especializadas.

Debido a diferentes factores, se optó por aplicar diseños de voladuras con el fin de controlar las vibraciones y proyección de roca, que pudieran afectar las infraestructuras aledañas.

El trabajo se concentra en el análisis y monitoreo de las vibraciones, resultado de diecinueve pruebas realizadas, esta data se procesa mediante un ajuste cuadrático por el cual se puede hallar las incógnitas de una ecuación base (“k” y “b”) usadas para la predicción de las velocidades pico partículas (VPP).

## **ABSTRACT**

The Atacocha Mining is a important precious metals producer Company. That began operations in 1936. The mine is divided in to two work zones, Atacocha and Santa Bárbara, each of which has different types of mineralization. Inside the operations of the zone - Atacocha in the San Gerardo Tagus that is being developed by specialized companies

Proper to different factors, it was decided to apply blasting designs in order to control the vibrations and rock projection, that could affect the surrounding infrastructures.

The work focuses on the analysis and monitoring of the vibrations, resulting of nineteen tests performed, this data is processed by a quadratic adjustment by which one can find the unknowns of a base equation ("k" and "b") used for the prediction of peak particle velocities (PPV).

## INTRODUCCIÓN

La presente Tesis tiene como propósito aplicar un modelo matemático de vibraciones en las voladuras desarrolladas en el tajo San Gerardo de la mina Atacocha. Merece resaltar que la voladura es muy importante dentro de las operaciones mineras y anteriormente, las voladuras en bancos se controlaban experimentalmente, con la metodología prueba y error. El modelo matemático característico del macizo rocoso aplicado se compara, para efectos de validación, con los modelos recomendados en el Estándar Australiano 2187.

El presente trabajo de investigación se desarrolla en el orden siguiente:

- El CAPÍTULO I trata del planteamiento de problema, justificando la aplicación de un modelo de vibraciones para controlar las voladuras del tajo San Eduardo con el fin de evitar daños en las comunidades colindantes a las operaciones mineras.

- El CAPÍTULO II trata de los antecedentes o estudios realizados sobre el tema de investigación y los fundamentos teóricos sobre vibraciones; así mismo, la teoría asociada a la velocidad pico de partícula considerando los efectos de las vibraciones sobre los macizos rocosos, la predicción del nivel de vibración del terreno y la normatividad que da sustento a la aplicación de los modelos de vibraciones para controlar las voladuras en concesiones mineras colindantes con poblaciones agrícolas y pastoriles.
- El CAPÍTULO III trata del Marco Metodológico en el que se detalla el diseño de la investigación, la descripción del ámbito de la investigación, el diseño de la perforación y voladura a aplicarse en la construcción del tajo San Gerardo; así mismo, los procedimientos del trabajo de campo, trabajo de gabinete y procesamiento de la información generada por la instrumentación elegida para el monitoreo de las vibraciones.
- El CAPÍTULO IV trata de los resultados de la investigación, en él se realiza el análisis para la determinación del modelo de vibraciones, el mismo que se compara con los modelos considerados en el marco teórico.

- Se finaliza con las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos donde se adjuntan los estándares internacionales y planos del tajo San Gerardo.

El trabajo de investigación demuestra que es posible determinar modelos de vibraciones, aplicando instrumentos adecuados, con el fin de mitigar los efectos destructivos colaterales de las operaciones de voladura a las propiedades y personas vecinas a las minas.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del problema**

El tajo San Gerardo se viene desarrollando durante un periodo de dos años y se encuentra incluida en las operaciones de la mina Atacocha, que pertenece a la Compañía Minera Atacocha S.A. (CMA) y colinda con los terrenos de la comunidad campesina San Juan de Milpo.

La voladura es la principal operación en el ciclo de minado que genera vibraciones, las cuales pueden afectar instalaciones e infraestructura colindante, situación que puede perturbar la tranquilidad y las buenas relaciones con las comunidades aledañas.

Ante esta situación, es necesario controlar la voladura aplicando un modelo matemático de vibraciones evitando daños a las viviendas

de material noble y las posibilidades de que se perturben las relaciones con las comunidades aledañas.

## **Formulación del problema**

### **1.1.1 Problema general**

¿Se puede aplicar un modelo matemático de vibraciones para controlar las voladuras en el tajo San Gerardo mina Atacocha?

### **1.1.2 Problemas específicos**

- a) ¿Cuáles son las velocidades pico de partículas y frecuencias de las voladuras en el tajo San Gerardo?
- b) ¿Se puede encontrar las constantes  $k$  y  $b$ , que son características del terreno en el modelo de vibraciones?
- c) ¿Se puede encontrar la carga operante máxima de las voladuras en el tajo San Gerardo para no producir daño a estructuras cercanas?

- d) ¿Es posible realizar una clasificación geomecánica a partir de las constantes  $k$  y  $b$  características propias del terreno siguiendo los modelos australianos?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Aplicar un modelo matemático de vibraciones para controlar las voladuras en el tajo San Gerardo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- a) Determinar, mediante un número de pruebas de vibraciones producido por las voladuras, las velocidades pico partículas y frecuencia en el tajo San Gerardo.
- b) Determinar las constantes  $k$  y  $b$  que son características del terreno a partir de un análisis estadístico.
- c) Determinar la carga operante máxima por voladura para no ocasionar daño a estructuras en el tajo San Gerardo.

- d) Determinar la clasificación geomecánica del terreno mediante la comparación con modelos australianos.

### **1.3 Justificación del problema**

A través de una investigación minuciosa se podrá conocer a fondo las vibraciones producidas por las voladuras, a partir de ello controlar las vibraciones que se emiten actualmente.

Una de las operaciones en minería es la voladura, que es la forma en que se apertura labores de acceso hacia un yacimiento económico para posteriormente proceder a explotarlas. En este trabajo se busca aplicar un modelo matemático de vibraciones para la ejecución de voladuras contraladas en el tajo San Gerardo.

En el modelo matemático de vibraciones, las características geomecánicas del terreno juegan un papel importante pues permiten conocer la carga operante máxima para no causar daño a estructuras aledañas al proyecto.

Actualmente, existen teorías o modelos matemáticos que enseñan a predecir las vibraciones producto de las voladuras, pero esto siempre está limitado al universo que se debe aplicar ya que cada proyecto de voladura es distinto en cada yacimiento u zona de operaciones.

## **1.4 Hipótesis**

### **1.4.1 Hipótesis general**

La aplicación de un modelo matemático de vibraciones permite mantener un control de las vibraciones producidas por las voladuras en el tajo San Gerardo mina Atacocha.

### **1.4.2 Hipótesis específicas**

Las hipótesis específicas son:

- a) Las pruebas de vibraciones determinan la velocidad pico partícula y frecuencia que se generan en las voladuras.

- b) Mediante un análisis estadístico son determinadas las constantes  $k$  y  $b$  del modelo de vibraciones.
- c) La carga operante máxima determina no ocasionar daño a estructuras.
- d) La clasificación geomecánica del terreno se realiza comparando con los modelos australianos.

## **1.5 Variables de la investigación**

### **1.5.1 Variable independiente**

- Monitoreo de vibraciones
- Constantes del macizo rocoso
- Diseño de carga

### **1.5.2 Variable dependiente**

- Modelo matemático de vibraciones
- Carga operante
- Clasificación geomecánica.

**Tabla 1**  
**Matriz de consistencia**

<b>Problemas</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Metodología</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Problema general</b>	<b>Objetivos General</b>	<b>Hipótesis principal</b>	<b>Tipo de investigación</b>	<b>Variable Independiente</b>
¿Se puede aplicar un modelo matemático de vibraciones para controlar las voladuras en el tajo San Gerardo mina Atacocha?	Aplicar un modelo matemático de vibraciones para controlar las voladuras en el tajo San Gerardo.	La aplicación de un modelo matemático de vibraciones permite mantener un control de las vibraciones producidas por las voladuras en el tajo San Gerardo Mina Atacocha.	Aplicada  <b>Diseño de Investigación</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Experimental</li> <li>Transaccional</li> <li>Correlacional-Causal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Monitoreo de Vibraciones</li> <li>Constantes del Macizo Rocoso</li> <li>Diseño de Carga</li> </ul>
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Hipótesis específica</b>	<b>Población</b>	<b>Variable Dependiente</b>
a) ¿Cuáles son las velocidades pico partículas y frecuencias de las voladuras en el tajo San Gerardo? b) ¿Se puede encontrar las constantes k y b, que son características del terreno en el modelo de vibraciones? c) ¿Se puede encontrar la carga operante máxima de las voladuras en el tajo San Gerardo para no producir daño a estructuras cercanas? d) ¿Es posible realizar una clasificación geomecánica a partir de las constantes k y b característicos propias del terreno siguiendo los modelos australianos?	a) Determinar mediante un número de pruebas de vibraciones producido por las voladuras las velocidades pico partículas y frecuencia en el tajo San Gerardo. b) Determinar las constantes k y b que son características del terreno a partir de un análisis estadístico. c) Determinar la carga operante máxima por voladura para no ocasionar daño a estructuras en el tajo San Gerardo. d) Determinar la clasificación geomecánica del terreno mediante la comparación con modelos australianos.	a) Las pruebas de vibraciones determinan la velocidad pico partícula y frecuencia que se generan en las voladuras.  b) Mediante un análisis estadístico son determinadas las constantes k y b del modelo de vibraciones..  c) La carga operante máxima determina no ocasionar daño a estructuras.  d) La clasificación geomecánica del terreno se realiza comparando con los modelos australianos.	Registros del Área Técnica de Pevoex Contratistas SAC.  <b>Muestra</b> Se utilizará ensayos realizados a las voladuras.  <b>Técnicas de recolección de datos</b> Observación Análisis documental	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo matemático de vibraciones</li> <li>Carga Operante</li> <li>Clasificación geomecánica.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes de la investigación**

Orihuela y Dapello (2009), en su tesis Diseño de un Modelo Predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una mina modelo, sostienen que: “Se puede hallar un modelo mediante ensayos reales (disparo de cargas y medición de vibraciones), que pueda ayudarnos a obtener la ley de la transmisividad de un terreno específico, que viene a ser el nivel de vibración recibida en un punto y expresado como valor de velocidad de vibración, para así poder predecir los niveles de vibraciones con el objeto de poder delimitarlas y garantizar que no se alcanzará en ningún caso los límites permisibles establecidos por la legislación que se rija en el momento.

De acuerdo a los valores de PPV (velocidad pico de partícula) obtenidos, en las pruebas bajo las características y condiciones de la mina modelo, arrojaron como resultado  $K=1\ 834$  y  $b=1,74$ ; los cuales son cercanos a los obtenidos por las fórmulas teóricas australianas

analizadas, observándose mayor correlación con el modelo donde el parámetro  $K=1\ 140$ , que es cuando se trabaja en una roca con dureza promedio y con una cara libre (RMR entre 41-60, Clasificación de roca: III)".

Anicama A. (2010), en su tesis MONITOREO DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES PRODUCIDAS POR LA VOLADURA DE ROCAS EL MODELO DE VIBRACIONES COLQUE, por su parte sostiene que: "Para realizar la prevención y el control de las vibraciones ocasionadas por la voladura, un método muy usado es establecer la ley de propagación de la velocidad de partículas (PPV), teniendo en cuenta el tipo del macizo rocoso, la carga explosiva y la distancia, es necesario también un adecuado dimensionamiento de los parámetros del plano de perforación y voladura, conteniendo las mallas del diseño respectivo, las cantidades de las mezclas cargadas dentro de los taladros y la secuencia de salida respectiva".

El objetivo de su investigación fue estimar y mejorar uno de los modelos presentados por varios investigadores relacionados con la PPV. Por ejemplo, en la mina Colquijirca se usa el modelo postulado por Devine y como resultado de su trabajo se propuso usar el modelo

Colque, obteniendo un error de 17,24 %; con el modelo Divine es del 21,32 %, esto para mejorar el modelo y evitar todos los impactos negativos que se producirán por las excesivas vibraciones producidas por una voladura de rocas no adecuada.

Giraldo F. (2010) realiza su investigación dirigida a estimar daños a estructuras características de comunidades en zonas altas del Perú, como se puede apreciar a continuación: “Las casas del Tipo Tierra (Adobe y Tapial) tiene problemas en el tema de control de sismos y voladura. Por lo que en el tema de vibraciones se debe actuar con mucho cuidado y seguridad para evitar la fisuración de estas.

El monitorear las vibraciones de las voladuras más cercanas a las zonas habitadas para ello se deben de realizar mediciones de vibraciones producidas por voladuras en la minera y realizar un modelo de vibraciones en campo lejano para poder estimar las vibraciones generadas por las voladuras y llegar a una relación de vibración vs explosivo usado. Estos datos arrojaron valores de vibraciones en la mayoría de los casos por debajo a los 5 mm/s y con frecuencias del orden de 1-5 Hz lo cual nos demuestra la

imposibilidad de daño a las viviendas por encontrarse por debajo del umbral de daño. Sin embargo, las frecuencias obtenidas demuestran que las voladuras si son detectadas y percibidas por los pobladores alertando a la población y pudiendo causar temor sobre sus viviendas”.

## **2.2 Definición de vibraciones**

Las vibraciones en operaciones mineras son provocadas por el repentino aumento de presión en el barreno induciendo a la generación de tensiones dinámicas en la roca circundante, creando ondas de tensión las cuales se propagan concéntricamente al barreno. La intensidad de esta onda vibratoria disminuye con la distancia, ya que la energía transmitida a la roca se debe distribuir en una superficie cada vez mayor (Sanchidrian y Muñiz, 2000).

Esta onda provoca un movimiento vibratorio del terreno que constituye una parte de energía perdida de la voladura, energía que no se traduce en trabajo útil, esto es en fragmentación y arranque de roca. Dichas vibraciones pueden causar daños y molestias en edificios y otras construcciones.

### **2.2.1 Generación de ondas sísmicas por voladuras**

La detonación de una cierta cantidad de explosivo confinado en el interior del barreno genera una onda de choque, caracterizada por una elevación súbita de la presión, que actúa sobre las paredes del barreno y se transmite a la roca circundante; inicialmente como onda de choque, y a una cierta distancia del barreno como onda de compresión. Esta onda de deformación es cilíndrica, en el caso de carga cilíndrica distribuida en el barreno, o esférica, en caso de carga puntual o esférica, aunque a considerable distancia del barreno con relación a su longitud puede considerarse la explosión reducida a un punto y en consecuencia la onda de propagación como esférica. La compresión soportada por el elemento material será, pues, función inversa del cuadro de la distancia.

En el contorno del barreno podemos considerar tres zonas, en función de la magnitud de la presión de la onda de choque (Sanchidrián & Muñiz, 2000):

- a) La zona más inmediata al barreno**, donde la presión de la onda de choque es superior a la resistencia a compresión de la roca, originando su pulverización, lo que produce el consiguiente amortiguamiento de la onda de choque por el elevado consumo de energía. La extensión de esta zona es muy limitada, del orden de algunos diámetros alrededor del barreno y en ella se produce un fuerte amortiguamiento de la onda de choque.
- b) La zona de deformación plástica**, aquí la presión de la onda de choque no excede la resistencia a compresión de la roca, pero sí el límite elástico, produciéndose básicamente deformaciones permanentes (plásticas). En esta zona se producen además grietas radiales, muy intensas en las inmediaciones del barreno, por efecto de las tensiones tangenciales de tracción. Esta zona se extiende varios diámetros a partir de la zona anterior.
- c) La zona elástica** se extiende indefinidamente a partir de la anterior. En esta zona los esfuerzos no superan el límite elástico a compresión del material, lo que hace que este tenga un comportamiento elástico, aunque también en ella se producen algunas fracturas radiales como consecuencia

de esfuerzos de tracción. El consumo de energía es prácticamente nulo y la amortiguación de la onda solo se debe, al aumento de superficie sobre la que actúa.

Entonces, se puede afirmar que a partir de una distancia relativamente pequeña del barreno se genera el efecto de vibración, el cual está constituido principalmente por ondas elásticas, con despreciable consumo de energía.

### **2.2.2 Características del movimiento ondulatorio**

Este se caracteriza por la propagación de vibraciones, no existe movimiento efectivo de masas ni de volúmenes, tampoco se realiza transporte de materia, sino tan solo consta de una transferencia de energía desde un punto a otro.

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

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi) = A \cdot \sin(2\pi f t + \phi) \quad (\text{Ecu. 1})$$

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.

$w$  es la frecuencia angular del movimiento ( $w = 2\pi f$ ), en radianes/s.

$\emptyset$  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 instantánea ( $v$ ) y la aceleración ( $a$ ) son respectivamente la primera y segunda derivada de la Ecu. 1.

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f \cdot A \cos wt = w \cdot A \sin\left(wt + \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{Ecu. 2})$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -(2\pi f)^2 \cdot A \sin(wt) = w^2 \cdot A \sin(wt + \pi) \quad (\text{Ecu. 3})$$

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

### 2.2.3 Tipos de ondas

Aunque las ecuaciones clásicas de ondas elásticas (como por ejemplo, la Ecu. 1) son inadecuadas para describir el fenómeno de las vibraciones por efecto de una voladura, tal y como se manifiesta con sus problemas de atenuación, dispersión, cambio de longitud de onda y superposición de las ondas; ha de considerarse que hasta la fecha es el mejor modelo simplificado que se dispone para el análisis de este fenómeno. Se puede considerar, para efectos de las vibraciones en voladura, la propagación de la onda en la zona exterior o elástica en torno al barreno, y dentro de ellas las únicas ondas significativas que se transmiten resultan ser ondas elásticas de baja energía (Pascual de Blas, 2000).

Esencialmente, se puede clasificar los distintos tipos de ondas elásticas en dos grupos:

**a) Ondas internas**, denominadas así porque se propagan por el interior de la masa rocosa. Dentro de las cuales se encuentran:

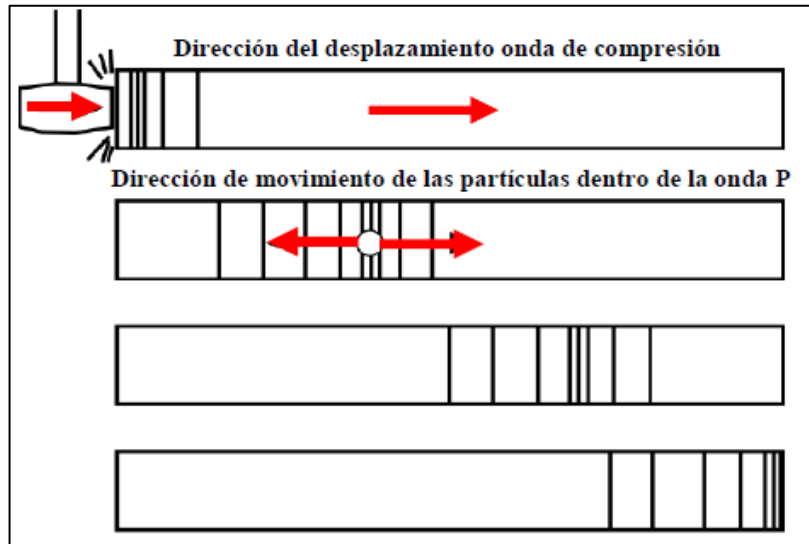


Figura 1. Movimiento de partícula dentro de la onda P.

Fuente: Vásquez, Ned. 2013

- **Ondas longitudinales, de compresión o principales (Ondas P)**

Es la onda que viaja a mayor velocidad, deformando volumétricamente la roca en la dirección de su propagación. A manera de ilustrar el movimiento que experimentan las partículas dentro de la onda P, considérese 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 que la propagación de la onda. El movimiento de la onda P se ilustra en la Figura 1 y 3.

- **Ondas transversales, de cizalladura o secundarias (Ondas S)**

Tras la onda P, se propaga la onda S. Esta onda provoca una deformación en 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 P se ilustra en la Figura 1 y la Figura 3.

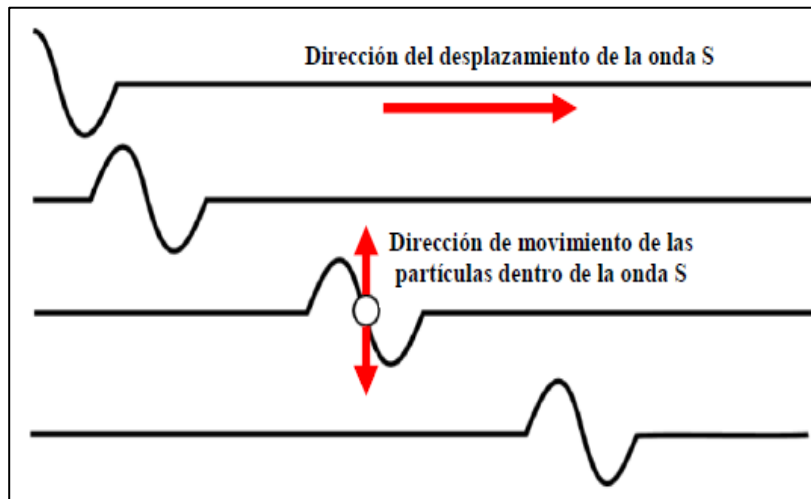


Figura 2. Movimiento de partícula dentro de la onda S.

Fuente: Vásquez, Ned. 2013

**b) Ondas de superficie**, denominadas así porque viajan por la interface de dos medios (por ejemplo, la superficie del terreno, que separa la roca del aire). De éstas, las más importantes son:

- **Onda Rayleigh (Ondas R)**

Fueron llamadas así en honor a lord Rayleigh, que fue el primero en estudiarlas. Su velocidad de propagación es aproximadamente 90% de las ondas S, además, cuenta con mayores amplitudes y longitudes que las ondas P y S. El movimiento de las partículas dentro de la onda es del tipo elíptico retrogrado en un

plano vertical en el mismo sentido que la dirección de propagación. El movimiento de la onda R se ilustra en la Figura 3.

- **Onda Love (Ondas L)**

Otro tipo de ondas superficiales son las ondas 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.

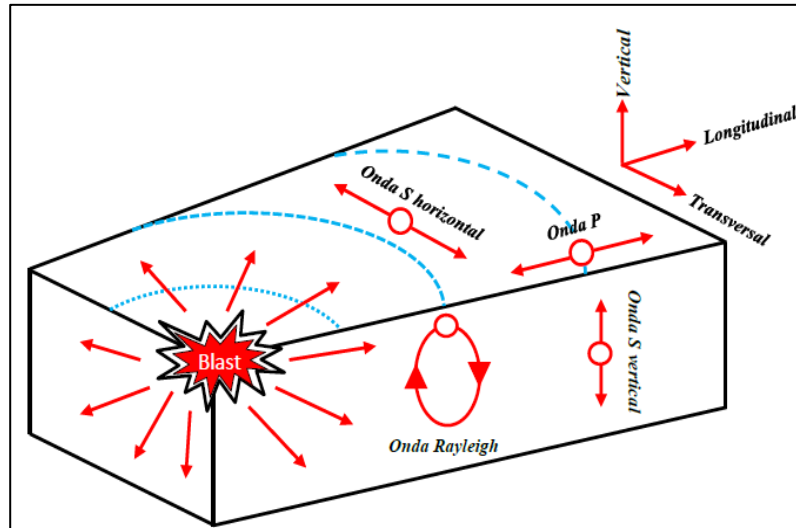


Figura 3. Movimiento de las partículas dentro de diferentes tipos de ondas.

Fuente: Vásquez, Ned. 2013

La onda P es la de mayor velocidad, considerablemente superior a la velocidad de la onda S (50 a 60 % de la velocidad de la onda P); esta, a su vez, es ligeramente más rápida que la onda R (aproximadamente 90 % de la velocidad de la onda S). La velocidad de las ondas P varía desde unos 1 500 hasta algo más de 6 000 m/s para la mayoría de rocas; si la roca está meteorizada o muy fisurada, esta puede ser menor; en suelos, la velocidad está entre 150 y unos 1 300 m/s (Sanchidrián & Muñiz, 2000).

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 alejamos 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 sí los diferentes tipos de ondas que llegan al geófono (Pascual de Blas, 2000).

### 2.3 Velocidad de propagación de onda

Es la velocidad con que viaja una onda en un medio sólido o líquido. La corteza terrestre no es una masa uniforme y homogénea, es una sucesión de rocas que tienen distintos orígenes y naturaleza de allí que se distinguen en cuanto a sus propiedades mecánicas estructurales y que se comportan de una manera particular cuando viaja a través de ellas una onda sísmica.

Cuando se genera un sismo se manifiesta como una complejidad de ondas que se propagan a través del terreno, de varias maneras.

De todos los tipos de ondas presentes en un sismo, se estudia la onda P (López Jimeno, 1980).

#### Velocidad de Onda P

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}} \quad (\text{Ecu. 4})$$

Donde:

$E$  = Módulo de Young

$\gamma$  = Relación de Poisson

$\rho$  = Densidad del medio (roca)

## 2.4 Velocidad de partícula

Analizando el fenómeno de las vibraciones, es importante hacer una distinción entre dos aspectos, que aunque son bien diferenciados, suele caerse en el error de confundirlos y hasta usarlos equivocadamente al momento de realizar ciertos cálculos con relación a la propagación o transmisividad de la vibración por el medio, y al movimiento propio que genera el paso de dichas vibraciones en cada una de las partículas por dicho medio. Por lo tanto, es fundamental comprender que existe una separación entre los conceptos de velocidad de propagación (velocidad con la que la vibración se propaga por un medio) y la velocidad de partícula (aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula, excitada por el paso de las onda de energía vibratoria).

Como se ha mencionado anteriormente, una partícula sometida a una vibración experimenta un movimiento oscilante del cual es importante poder registrar ciertos parámetros medibles que se presentan, como lo son: desplazamiento, velocidad, aceleración de partícula y la frecuencia del movimiento ondulatorio.

Conociendo cualquier pareja de estos parámetros, es posible deducir el valor que tendrán los restantes (Carlos Agreda, 2010).

#### **2.4.1 Análisis de la velocidad pico partícula**

Al efectuar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir que magnitud física debe ser cuantificada, entre las cuales se tiene el desplazamiento, la velocidad y la aceleración. Las velocidades pico partícula o también llamadas PPV están definidas como el valor máximo de cualquiera de las tres magnitudes mencionadas que varía durante cierto intervalo de tiempo.

De todos los parámetros mencionados, universalmente, se consideran a la velocidad de vibración como la mejor

representante del nivel de una vibración y los daños que pueda causar, tanto a edificaciones como a personas.

Los efectos en una voladura están referidos a la cantidad de vibraciones producidas en una masa rocosa, las cuales son medidas mediante las velocidades sísmicas. Por tal motivo, se puede encontrar una relación directa entre la naturaleza del daño producido por dichas vibraciones y la velocidad pico partícula, medida en el disparo de la voladura.

Generalmente, los límites propuestos por distintas normativas son establecidos en base a las medidas de la PPV (Velocidad Pico Partícula), por lo que la correcta medición y almacenamiento de este parámetro no solo es considerado importante, sino también crítico para cualquier operación minera (Carlos Agreda, 2010).

#### **2.4.2 Análisis de frecuencias**

Por otro lado, no solo el valor de la PPV es el único índice de la peligrosidad con respecto a una estructura de una

vibración, sino también, se puede considerar la frecuencia de la misma.

Las dos principales respuestas de una estructura respecto a las vibraciones dependerá del nivel de la frecuencia, para rangos de frecuencias altas los componentes individuales de las estructuras vibran, dicho movimiento es conocido como la “respuesta midwall”; en el caso de tener rangos de frecuencia bajas, se puede producir un movimiento total de la estructura, debido a su frecuencia natural baja de oscilación, la cual normalmente se encuentra entre los rangos de 5-20 Hz.

En este último caso, el daño se origina debido a que la frecuencia de onda producida en un disparo en una voladura, resulta ser igual a la frecuencia natural de dicha estructura, esto originaría la máxima absorción de energía por parte de la estructura y aumentarían las probabilidades de que se puedan causar daños en la misma.

Por este motivo, es muy importante poder determinar cuáles son las frecuencias que participan en el tren de onda

generada por la voladura; sin embargo, un tren de onda puede contener diferentes niveles de frecuencias, por lo que es necesario calcular cuales son las frecuencias que más dominan en dicho tren y eso se puede hacer hallando el espectro de frecuencias del mismo (Carlos Agreda, 2010).

## **2.5 Efectos de las Vibraciones sobre los macizos rocosos**

Las vibraciones tienen un doble ámbito de actuación sobre los macizos rocosos, por un lado, afectan a la integridad de la roca o parámetros resistentes de estas y por otro lado, pueden llegar a provocar colapsos en los taludes al introducir acciones desestabilizadoras (López Jimeno, 1980).

## **2.6 Predicción del nivel de vibración del terreno**

Se sabe que la magnitud de la vibración generada está relacionada de manera proporcional con la cantidad máxima de explosivos que detona al mismo tiempo, por ello a manera de explicación se plantean los siguientes casos:

**a) 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 barreno más cargado.

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

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 (PPV) es proporcional a la masa de explosivo,  $Q$ , e inversamente proporcional a la distancia,  $D$ . A continuación se presenta un resumen de los principales modelos desarrollados:

$$PPV = K \cdot SD^\alpha \quad (\text{Ecu. 5})$$

Donde:

PPV: Velocidad de pico-partícula (mm/s)

SD: Distancia escalada

K: Factor de velocidad

$\alpha$ : Factor de Atenuación, valor comprendido entre 0,5 y 2

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

- **Langefors y Kihisrom, 1973**      $SD = \left( \frac{D}{Q^2} \right)$      (Ecu. 6)

- **Akbraseys y Hendron, 1968**     (Raíz     cúbica  
distancia escalada)      $SD = \left( \frac{D}{Q^3} \right)$      (Ecu. 7)

- **Devine (1962), United States Bureau of Mines (USBM), 1980**  
(Raíz cuadrada distancia escalada)      $SD = \left( \frac{D}{Q^2} \right)$      (Ecu. 8)

El modelo más utilizado en minería superficial es el de la raíz cuadrada, y por ende también será utilizado en el presente estudio. Teóricamente este criterio es el que mejor representa el comportamiento de la vibración en el campo lejano para cargas cilíndricas, donde el análisis dimensional sugiere que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la carga.

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 4.

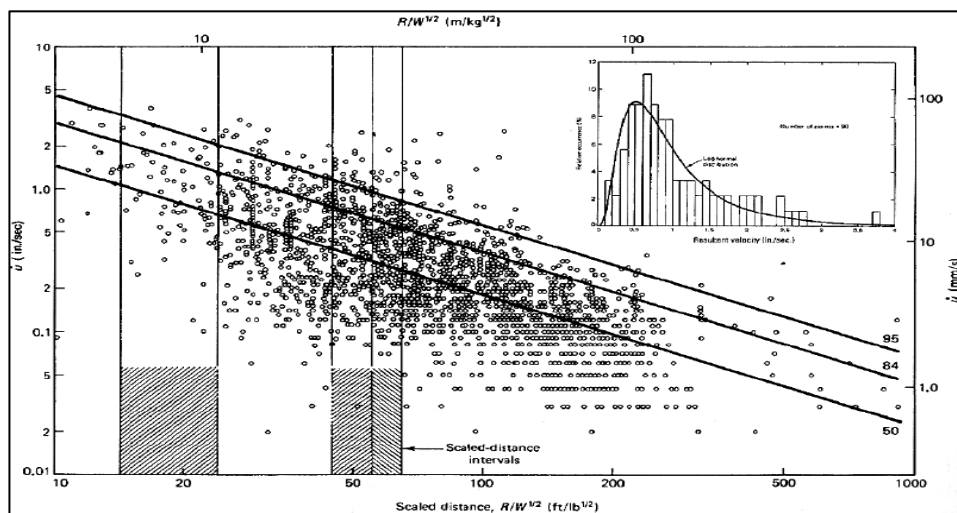


Figura 4. Típica dispersión de datos, velocidad pico-partícula vs distancia escalada cuadrada.

Fuente: Dowding, C. H, 2000

Una forma genérica de expresar la ecuación 9 es la siguiente:

$$\text{PPV} = K \cdot Q^\alpha \cdot D^\beta \quad (\text{Ecu. 9})$$

$K, \alpha$  y  $\beta$  son constantes que engloban la geología del terreno, la geometría de las cargas, las diferencias de cota entre los puntos de disparo y de medida, el tipo de propagación, el nivel de “aprovechamiento” de la energía en generar vibraciones, etc.

Por lo tanto, uno de los objetivos del presente estudio de vibraciones es hallar el valor de cada una de estas constantes ( $K, \alpha$  y  $\beta$ ) a través de:

- Una regresión lineal por mínimos cuadrados
- Una regresión no lineal

Realizado para los valores de PPV, Q y D tomados en los ensayos.

Para todos los métodos el coeficiente de correlación obtenido indicará qué tanto se ajustan los puntos (V, Q, D) a una determinada ley. El coeficiente de correlación alcanza su valor máximo 1 cuando

los puntos se ajustan perfectamente a la ley y su valor mínimo 0 cuando se encuentran aleatoriamente repartidos.

## 2.7 Modelos australianos

Orihuela y Dapello, 2009, recomiendan como una guía conservadora; en las cuales se han asignado un valor a las constantes K y b, tratando de esta manera generalizarlas de acuerdo a ciertas propiedades del terreno y al tipo de voladura.

Así se tiene:

- **Modelo A:** Para voladura donde existe una cara libre y el tipo de roca se encuentra entre dura y altamente estructurada. (RMR\* entre 21 – 40, Clasificación de roca: IV)

$$PPV = 500 \times \left( \frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1,6} \quad (\text{Ecu. 10})$$

- **Modelo B:** Para voladuras donde existe una cara libre y la roca tiene una dureza promedio. (RMR\* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III)

$$PPV = 1\,140 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D}\right)^{1,6} \quad (\text{Ecu. 11})$$

- **Modelo C:** Para voladuras donde las cargas se encuentren totalmente confinadas.

$$PPV = 5\,000 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D}\right)^{1,6} \quad (\text{Ecu. 12})$$

Ver Anexo N° 3. Tabla de clasificación del macizo rocoso.

## **2.8 Diferenciación de las voladuras con otras fuentes generadores de vibración**

Los terremotos y las voladuras, en minas de gran envergadura, producen vibraciones de suelo potencialmente dañinas, también lo hacen otras fuentes de vibración estáticas y cuasi estáticas (tráfico, manejo de pilas, bombas sónicas, etc.). El primer resumen de vibración de voladura en 1942, de la Oficina de Minas de Estados Unidos, examinó los niveles de vibración de terremotos y las intensidades de Mercalli correspondientes para el daño producido, y concluyó que estas no se aplican a las vibraciones generadas por las

voladuras. Los terremotos producen eventos de muy baja frecuencia y larga duración, a diferencia de las voladuras que son eventos de alta frecuencia y corta duración.

Los niveles de aceleración son comúnmente usados por los sismólogos para cuantificar el potencial de daño de un terremoto. Estos pueden ser de niveles moderados y aún más bajos que los generados por un evento de voladura; sin embargo, sus bajas frecuencias producen desplazamiento enormes y grandes velocidades de partícula. Como un ejemplo; Richter establece que una aceleración de 0,1 g a 1 Hz es ordinariamente dañina en la sismología de los terremotos, la velocidad de partícula y el desplazamiento correspondiente son 155,9 mm/s y 24,8 mm respectivamente, asumiendo el movimiento armónico simple. La misma aceleración a 20 Hz solo produciría una velocidad de partícula de 7,8 mm/s y un desplazamiento de 0,06 mm. Richter también observa que el potencial de daño de una vibración dada depende de su duración, con 0,1 g a 1 Hz es probable que no se produzca daño para eventos de poco segundos, pero sí muy serios para eventos del tipo terremotos de 25 a 30 segundos (Fernando Giraldo, 2010).

## 2.9 Normativa de las vibraciones

Según la teoría deformacional de los materiales, la tensión provocada por una onda plana es proporcional a la velocidad de partículas (ver Ecu. 26).

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (\text{Ley de Hooke}) \quad (\text{Ecu. 13})$$

$$\varepsilon = \frac{\text{PPV}}{c} \quad (\text{Ecu. 14})$$

Con las ecuaciones (13) y (14) se deduce lo anteriormente mencionado.

$$\sigma = \frac{E}{c} \cdot \text{PPV} \quad (\text{Ecu. 15})$$

Donde:

- PPV, es la velocidad de partículas
- $\sigma$ , es la tensión de deformación.
- E, módulo de Young
- $\varepsilon$ , esfuerzo del medio.
- c, velocidad de propagaciones de las vibraciones

Por lo tanto, considerando una estructura en particular excitada bajo un pulso vibratorio, la tensión a la que esta se ve sometida depende de la velocidad de vibración.

Para recomendar un cierto nivel máximo de vibración admisible, hay que tener presente la velocidad de vibración límite que imponga las normativas internacionales listadas en la Tabla 2.

A continuación se mencionarán las principales normas desarrolladas y usadas en el mundo entero, para terminar con las normativas de vibraciones que posee el estado peruano. Se presentarán primeramente las normativas internacionales dividiéndolas en europeas primero y después en norteamericanas y después de esa división primaria se hará una división secundaria que consistirá según el orden que se le ha dado por importancia y uso haciendo mención de los factores psicológicos que toman en cuenta las normas. Al terminar con la normativa americana de mayor uso en esta parte del continente se seguirá con mencionar la normativa peruana que está basada en la americana.

**Tabla 2**  
**Resumen de normativas internacionales**

<b>País de procedencia</b>	<b>Nombre de reglamentación</b>	<b>Fecha de expedición</b>
Alemania	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN 50	2000
EE.UU.-Federal	USBM RI8507	1980
EE.UU.-Federal	OSM 817.67	1983
España	UNE 22-381-93	1993
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	1991
Nueva Zelanda	NZS 4403	1976
Portugal	NP2074	1983
Reino Unido	BSI 6472	1992
Reino Unido	BSI 7385	1993
Suecia	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312 <sup>a</sup>	1992

Fuente: Ágreda, Carlos 2010

## 2.9.1 Normativas de la comunidad europea

### a) Norma UNE 22.381.93

**Tabla 3**  
**Resumen de la norma UNE 22-381-93**

<b>Campo de aplicación</b>	<b>Vibraciones producidas por voladuras.</b>
<b>Variables medidas</b>	Máxima velocidad pico en los componentes ortogonales en mm/s y frecuencia en Hz.
<b>Valores indicativos</b>	Ver Tabla 3.
<b>Sensores utilizados</b>	Sensores de tres componentes que registren velocidad (preferiblemente), desplazamiento o aceleración; respuesta lineal del equipo en el rango de 2 a 200 Hz, capacidad de detección de niveles pico de al menos 1 -100 mm/s.
<b>Ubicación sensores</b>	Sobre el suelo cercano a las estructuras que van a estar sometidas a las vibraciones.
<b>Fortalezas</b>	Cubre gran cantidad de tipos estructurales. Por medio de un procedimiento sencillo se puede determinar el tipo de estudio de vibraciones requerido por el proyecto.

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

Tiene como objetivo principal establecer un procedimiento de estudio y control de las vibraciones producidas por la voladura de rocas en los trabajos de explotación minera, canteras, obras civiles, demoliciones, etc.

Llamadas de la tabla 3:

a - Está en el rango de frecuencia 15 y 75 Hz, en el que el nivel está dado en desplazamiento, se podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la siguiente ecuación:

$$V = 2\pi f d \quad (\text{Ecu. 16})$$

Donde:

- V: Velocidad de vibración (mm/s)
- f: Frecuencia principal (Hz)
- d: desplazamiento admisible (mm)

b - Velocidad máxima (mm/s)

c - Desplazamiento máximo (mm)

En esta norma, la frecuencia principal o dominante puede ser determinada por tres métodos:

**Tabla 4**  
**Valores de velocidad máximos en mm/s y frecuencias para la**  
**prevención de daños según la norma española UNE 22-381-93**

Tipo de estructura	Frecuencia principal (Hz)		
	2-15	15-75 <sup>a</sup>	>75
	Vel. <sup>b</sup>	Desp. <sup>c</sup>	Vel. <sup>d</sup>
I. Edificios y naves industriales ligeros, con estructuras de hormigón armado o metálicas.	20	0,212	100
II. Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa española. Edificios y estructuras de valor arqueológico arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.	9	0,095	45
III. Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.	4	0,042	20

Fuente: Ágreda, Carlos. (2010)

- Análisis de Fourier
- Espectro de respuesta de la señal o el pseudo espectro de velocidad
- Análisis de vibraciones armónicas

#### **b) Normativa alemana DIN 4150**

Esta norma ha publicado varios criterios de niveles de vibración; la primera fue en 1975, actualizada en 1999 y luego en 2001.

Los criterios de la DIN 4150 (1975) a partir de la información de Persson et ál. (1994) se muestran a continuación.

Campo de aplicación – Vibraciones producidas por cualquier fuente.

Variables medidas – Velocidad vertical pico (mm/s) y velocidad de partícula pico o resultante (mm/s).

Valores indicativos – Ver la siguiente tabla 5.

**Tabla 5**

**Valores máximos para la velocidad de partícula**

**DIN 4150 (1999)**

Clase de construcción	Frecuencia fundamental (Hz)			NS <sup>a</sup>
	1-10	10-50	50-100	TF <sup>b</sup>
	Hz	Hz	Hz	
1. Edificaciones industriales, oficinas y similares o con diseños robustos.	20 <sup>c</sup>	20-40	40-50	40
2. Edificaciones residenciales y construcciones similares.	5	5-15	15-20	15
3. Otra edificaciones sensibles a vibraciones o las no incluidas en las dos anteriores clases	3	3-8	8-10	8

a. Nivel superior componente horizontal.

b. Todas las frecuencias

c. Velocidades de partículas en mm/s

Fuente: Ágreda, Carlos. (2010)

**Tabla 6**  
**Valores indicativos**

Clase de edificación	Valores Indicativos	
	PPV <sup>a</sup> (mm/s)	PPV <sup>b</sup> (mm/s)
I. Residencias, oficinas y otras similares construidas de forma tradicional y en condiciones normales.	8	4,8-8
II. Edificaciones estables en condiciones normales.	30	18-30
III. Otras edificaciones y monumentos históricos.	4	2,4-448

Tomado de Persson et ál. (1994)

a. Velocidad de partícula pico.  
b. Velocidad vertical pico.

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

Las actualizaciones de esta norma DIN que realizaron en el año 2001 son las siguientes:

1. Predicción de los parámetros de medición
2. Efectos de las personas dentro de edificaciones
3. Efectos en estructuras

### c) Normativa suiza SN 640315a (1992)

Esta norma contempla frecuencias desde 8 hasta 150 Hz, y establece que por encima de este rango deben ser estudiadas con base en otras normas.

**Tabla 7**  
**Aspectos Importantes en la reglamentación Suiza**  
**SN 650 31<sup>a</sup> (1992)**

<b>Campo de aplicación</b>	<b>Vibraciones producidas por voladuras, maquinaria, equipo de construcción, tráfico en carreteras y ferroviario.</b>
<b>Variables medidas</b>	Velocidad resultante de partícula pico (mm/s), frecuencia de la vibración (Hz) relacionada con la componente de máxima velocidad; adicionalmente la cantidad de sacudidas.
<b>Valores indicativos</b>	Ver Tabla 10.
<b>Sensores utilizados</b>	Tres componentes ortogonales de sensores que registren en mm/s con un rango lineal entre 5 y 150 Hz.
<b>Ubicación sensores</b>	Sobre la estructura.
<b>Fortalezas</b>	Brinda criterios para definir daño estructural – fisuras en mampostería. Define una frecuencia de las sollicitaciones.

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

**Tabla 8**  
**Contenido de clases de susceptibilidad**

Clases de susceptibilidad	Frecuencia de solicitaciones	Valores máx. del vector de velocidad resultante (mm/s)		
1) Muy poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el triple de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3).		
	Frecuente			
	Permanente			
2) Poco susceptible	Ocasional	Valores indicativos: hasta el doble de los valores correspondientes de la clase de susceptibilidad 3).		
	Frecuente			
	Permanente			
3) Susceptibilidad normal	Ocasional	<b>Frecuencia dominante</b>		
		<b>&lt;30 Hz</b>	<b>30-60 Hz</b>	<b>&gt;60 Hz</b>
		15	20	30
		6	8	12
	Permanente	3	4	6
4) Particularmente susceptible	Ocasional	Valores indicativos: entre valores indicativos de la clase 3) y la mitad de éstos.		
	Frecuente			

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

#### **d) Normativa sueca SS 460 48 66 (1991)**

Esta norma contempla el efecto de las vibraciones producidas por la voladura de rocas.

A continuación, se presenta los aspectos más resaltantes de esta norma Suiza.

**Tabla 9**  
**Aspectos importantes en la norma SS4604866 (1991)**

<b>Campo de aplicación</b>	<b>Vibraciones por voladuras.</b>
<b>Variables medidas</b>	Velocidad pico vertical (mm/s) y dado el caso de la velocidad de partícula pico (mm/s).
<b>Valores indicativos</b>	Proporciona una multitud de valores indicativos, los cuales se calculan a partir de una ecuación sencilla.
<b>Sensores utilizados</b>	Sensor vertical que registre velocidad.
<b>Ubicación sensores</b>	Sobre el suelo junto a la estructura de interés.
<b>Fortalezas</b>	La inclusión de la geología y la gran cantidad de valores indicativos que se pueden obtener.
<b>Debilidades</b>	Está sustentado únicamente en mediciones verticales, no tiene en cuenta la frecuencia.

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

#### **e) Normativa ISO 4866 (1990)**

Se corrigió en 1994 y 1996. La medición de niveles de vibración según este estándar tiene como propósitos los siguientes:

1. Reconocimiento de problemas donde se reporta vibraciones en edificaciones, preocupando a los habitantes de esta zona, por lo que es necesario evaluar los niveles de vibración que garantice integridad estructural.
2. Monitoreo de control de donde los niveles de vibración máximos permitidos han sido establecidos por alguna institución y requieren ser reportados.
3. Documentación de cargas dinámicas que hayan sido consideradas en el diseño estructural, donde se realizan las mediciones para verificar la predicción y reajustar parámetros en nuevos diseños.
4. Diagnóstico cuando los niveles establecidos de vibraciones requieren más investigación.

A continuación en la Tabla 10, se describen aspectos importantes referentes a esta norma.

**Tabla 10**  
**Aspectos importantes en la reglamentación**  
**ISO 4855 (1990)**

<b>Campo de aplicación</b>	<b>Vibraciones en general (voladuras, tráfico, hincado, maquinaria, etc.) excluyendo vibraciones acústicas.</b>
<b>Variables medidas</b>	Dependen del campo de aplicación, pero en general aceleración o velocidad (Tabla 11), frecuencia y duración de la oscilación.
<b>Valores indicativos</b>	No aplica.
<b>Sensores utilizados</b>	Recomienda acelerómetros o sensores que midan velocidad (geófonos), dependiendo del tipo de aplicación.
<b>Ubicación de sensores</b>	En el suelo, cerca de estructuras sometidas a vibraciones y dado el caso sobre la estructura.
<b>Fortalezas</b>	Son lineamientos muy generales basados en principios básicos, que sirven de guía en el momento de elaborar una norma o al realizar un trabajo en el área de vibraciones.
<b>Debilidades</b>	No provee valores indicativos.

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

**Tabla 11**  
**Rangos típicos de respuesta estructural para varios tipos de**  
**fuentes de la ISO (1990)**

Tipo de vibración	Frec. (Hz)	Amp. (um)	V.P. <sup>a</sup> (mm/s)	A.P. <sup>b</sup> (mm/s <sup>2</sup> )	Caract. Temporal	Variable medida
Tráfico Carreteras rieles, vibraciones	1-80	1-200	0,2-50	0,02-1	C/T	vp
Voladuras Vibraciones	1-300	100-2500	0,2-500	0,02-50	T	vp
Hincado de pilotes Vibraciones	1-100	10-50	0,2-50	0,02-2	T	vp
Maquinaria Vibraciones	1-300	10-1000	0,2-50	0,02-1	C/T	vp/ac
Maquinaria Vibraciones	1-1 000	1-100	0,2-30	0,02-1	C/T	vp/ac
Actividad Humana					T	vp/ac
a) Impacto	0,1-100	100-500	0,2-20	0,02-5		
b) Directa	0,1-12	100-5000	0,2-5	0,02-0,2		
Sismos	0,1-30	10-10 <sup>5</sup>	0,2-400	0,02-20	T	vp/ac
Viento	0,1-10	10-10 <sup>5</sup>			T	ac

a, velocidad pico partícula  
b, aceleración

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

## **2.9.2 Normativas americanas**

### **a) United States Bureau of Mines (USBM)**

El USBM es una organización líder en el campo de la investigación de los efectos de una voladura, analizando desde hace varias décadas la generación de vibraciones, su propagación y el impacto que tienen en las diferentes estructuras que existen.

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

movimientos telúricos, y a varios proyectos, se fabricaron algunos modelos, los cuales fueron los precursores de los modernos sismógrafos de ingeniería.

Una nueva síntesis del USBM fue hecha por Fogelson en 1971, en el cual incluía el análisis de nuevos datos, pero se mantenía como límite los 50 mm/s (PPV), bajo el cual, la probabilidad de daños era muy pequeña. Sin embargo, fue en el año 1980 donde este valor, el cual era visto bastante alto en otras partes del mundo e incluso para algunos estados norteamericanos; se decide introducirle la frecuencia, considerándolo como un parámetro tan importante como la velocidad de partícula. Los valores que se propusieron son mostrados en la Tabla 12 siguiente.

Lamentablemente, este análisis no predice el comportamiento de una onda, sólo es una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo.

**Tabla 12**  
**Valores máximos de velocidad de partícula según**  
**propuesta por el U.S. Bureau of Mines en 1980**

<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Baja Frecuencia</b>	<b>Alta Frecuencia</b>
Casas modernas con paredes revestidas de material diferente del revoque común (yeso, etc.)	19 mm/s	50 mm/s
Casas antiguas, con paredes revocadas	12,5 mm/s	50 mm/s

Baja frecuencia: <40 Hz, todo pucos espectral que se produzca por debajo de 40 Hz y dentro de una faja de 6 dB (o sea, 5% de la amplitud verificada a la frecuencia predominante) justifica el empleo del criterio de baja frecuencia.  
Alta frecuencia: >40 Hz.

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

Debido a que el daño en las estructuras se encuentra directamente relacionado a las velocidades de la partícula y al nivel de la frecuencia, el USBM creó un gráfico donde se combinan ambos parámetros, para así, establecer los límites donde es posible que ocurra una falla.

## b) Office of Surface Mining (OSM)

Por último, la Oficina de Minería de Superficie (OSM), cuando preparaba sus normas, modificó los criterios propuestos por la USBM basados en contrapropuestas que recibieron y que contenían estándares menos rigurosos, similares al criterio alternativo de voladuras de la USBM. Reconociendo una dependencia de la frecuencia para la vibración asociada con la distancia, la Oficina de Minería de Superficie presentó su norma de la siguiente manera:

**Tabla 13**  
**Normativa de la Office off Surface Mining (OSM)**

Distancia al área de voladura (m)	Velocidad máxima de partícula (mm/s)	Distancia reducida (m/kg <sup>1/2</sup> )
0-90	32	22,30
90-1500	25	24,50
>1500	19	29,00

Fuente: Ágreda, Carlos (2010)

### 2.9.3 Normativa peruana de vibraciones

- a) La única normativa peruana sobre vibraciones se expone implícitamente en la **Guía Ambiental para Perforación y**

**Voladura en Operaciones Mineras.-Sub Sector de Minería – Dirección General de Asuntos Ambientales – Septiembre 1995**

En dicha guía se establece que los límites de vibración son importantes; el nivel por encima del cual es probable la ocurrencia de daños y el nivel por encima del cual es probable que se quejen los residentes vecinos. No hay un nivel preciso en el cual empiecen a ocurrir daños. El nivel de daños depende del tipo, condición y edad de la estructura, el tipo del terreno sobre el cual se ha construido la estructura y la frecuencia de la vibración en hertz. En general, todos los edificios públicos y privados, viviendas y otras instalaciones (por ejemplo torres de agua, tuberías y otros servicios públicos, túneles, minas subterráneas, represas, pozas, etc.) deberán protegerse de daños inducidos por voladuras, que sean el resultado de vibraciones de tierra.

Asimismo, indica que la vibración máxima de tierra no deberá exceder los límites en donde se encuentre cualquier

vivienda, edificio público, colegio, iglesia, fuera del área de voladura, mostrados en la Tabla 14.

**Tabla 14**  
**Normativa peruana de vibraciones**

Distancia (D) desde el área de voladura (m)	Velocidad de partícula pico máxima permitida (Vmax) para vibración de tierra (mm/s)	Factor de distancia a escala por aplicación sin monitoreo sísmico DS (m/kg <sup>1/2</sup> )
0 a 91,44	31,75	22,30
91,44 a 1 524	25,40	24,50
1 524 a más	19,05	29,00

Fuente: Guía ambiental para perforación y voladura (1995)

La vibración de tierra se medirá como velocidad de partícula. La velocidad de partícula deberá registrarse en tres direcciones recíprocamente perpendiculares. La velocidad de partícula pico máxima permitida se deberá aplicar a cada una de las tres mediciones. Aplicable a la ecuación de distancia a escala.

También un operador podrá usar la ecuación de distancia a escala  $Q=(D/D_s)^2$ , para determinar el peso de carga permitido de los explosivos por detonarse en cualquier período de 8 milésimas de segundo, sin monitoreo sísmico, donde:

El desarrollo de un factor de distancia a escala modificado puede ser utilizado por el operador, si se justifica en base a registros sismográficos de las operaciones de voladura en el área de la mina. El factor de distancia a escala modificado deberá ser determinado de manera tal que la velocidad de partícula de la vibración de tierra pronosticada no exceda los valores establecidos en el cuadro anterior.

En general, las vibraciones de tierra de menos de 51 mm/s rara vez ocasionan daños a la propiedad o a estructuras construidas.

**b)** Por otro lado, Giraldo F. (2010), realiza su investigación dirigido a estimar daños a estructuras características a

comunidades de zonas altas en el Perú, como se puede redactar a continuación: “Las casas del tipo Tierra” (Adobe y Tapial).

Con datos obtenidos y con los análisis realizados a las estructuras se define un límite en función a los análisis sísmicos y de la aceleración obtenida y consideradas como dañinas para ese tipo de estructuras.

Se realiza, entonces, una tabla en excel con los datos obtenidos. Con estos datos se puede saber que la aceleración en donde se presenta daño a las estructuras de tierra es de 0,08 g, y por encima de este valor aparecen los daños a las estructuras.

Entonces, el dato de la aceleración va a la formulación de una onda sinusoidal y resulta una relación entre la aceleración crítica, la velocidad de partícula y la frecuencia, entonces, dando valores a la frecuencia y teniendo como valor la aceleración se puede hallar la velocidad de partícula

crítica, bajo lo cual la casa podría tener daños en su estructura.

A continuación se muestra la tabla de Excel desarrollada y el gráfico correspondiente. Con estos datos se puede buscar una frecuencia dominante en las voladura de campo lejano y tomar el valor de velocidad que se tiene a esa frecuencia con una aceleración de 0,08 g y así ese valor se convertiría en el límite permisible de velocidad para las casas fabricadas de adobe o tapial.

**Tabla 15**  
**Velocidades de partículas en función a la aceleración**

Cálculo de velocidad pico partícula crítica						
Frecuencia	Aceleración					
Hz	0,08 g No Daños	0,12 g Leve Fisuración	0,16 g Pequeñas Fisuras	0,20 g Pequeñas Fisuras	0,25 g Fisuración	0,30 g Grietas Visibles
1	124,9	187,36	249,81	312,26	390,33	468,39
2	62,45	93,68	124,90	156,13	195,16	234,20
3	41,63	62,45	83,27	104,09	130,11	156,13
4	31,23	46,84	62,45	78,07	97,58	117,10
5	24,98	37,47	49,96	62,45	78,07	93,68
6	20,82	31,23	41,63	52,04	65,05	78,07
7	17,84	26,77	35,69	44,61	55,76	66,91
8	15,61	23,42	31,23	39,03	48,79	58,55
9	13,88	20,82	27,76	34,70	43,37	52,04
10	12,49	18,74	24,98	31,23	39,03	46,84
11	11,35	17,03	22,71	28,39	35,48	42,58
12	10,41	15,61	20,82	26,02	32,53	39,03
13	9,61	14,41	19,22	24,02	30,03	36,03
14	8,92	13,38	17,84	22,30	27,88	33,46
15	8,33	12,49	16,65	20,82	27,88	33,46
16	7,81	11,71	15,61	19,52	24,40	29,27
17	7,35	11,02	14,69	18,37	22,96	27,55
18	6,94	10,41	13,88	17,35	21,68	26,02
19	6,57	9,86	13,15	16,43	20,54	24,65
20	6,25	9,37	12,49	15,61	19,52	23,42
21	5,95	8,92	11,90	14,87	18,59	22,30
22	5,68	8,52	11,35	14,19	17,74	21,29
23	5,43	8,15	10,86	13,58	16,97	20,36
24	5,20	7,81	10,41	13,01	16,26	19,52
25	5,00	7,49	9,99	12,49	15,61	18,74
26	4,80	7,21	9,61	12,01	15,01	18,02
27	4,63	6,94	9,25	11,57	14,46	17,35
28	4,46	6,69	8,92	11,15	13,94	16,73
29	4,31	6,46	8,61	10,77	13,46	16,15
30	4,16	6,25	8,33	10,41	13,01	15,51

Fuente: Giraldo, Fernando (2010)

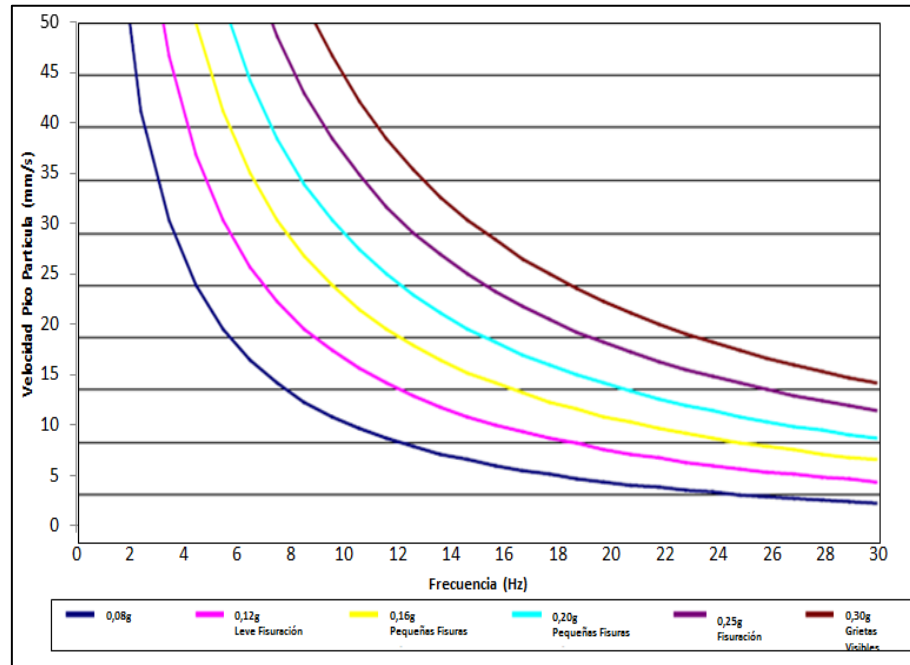


Figura 5. Modelo de PPV para casa de tierra

Fuente: Giraldo, Fernando (2010)

**Tabla 16**  
**PPV máxima para frecuencias < 30 Hz**

Cálculo de velocidad pico partícula crítica						
Frecuen.	Aceleración					
Hz	0,08 g	0,12 g	0,16 g	0,20 g	0,25 g	0,30 g
	No Daños	Leve Fisuración	Pequeñas Fisuras	Pequeñas Fisuras	Fisuración	Grietas Visibles
<30 Hz	4,16	6,25	8,33	10,41	13,01	15,61

Fuente: Giraldo, Fernando (2010)

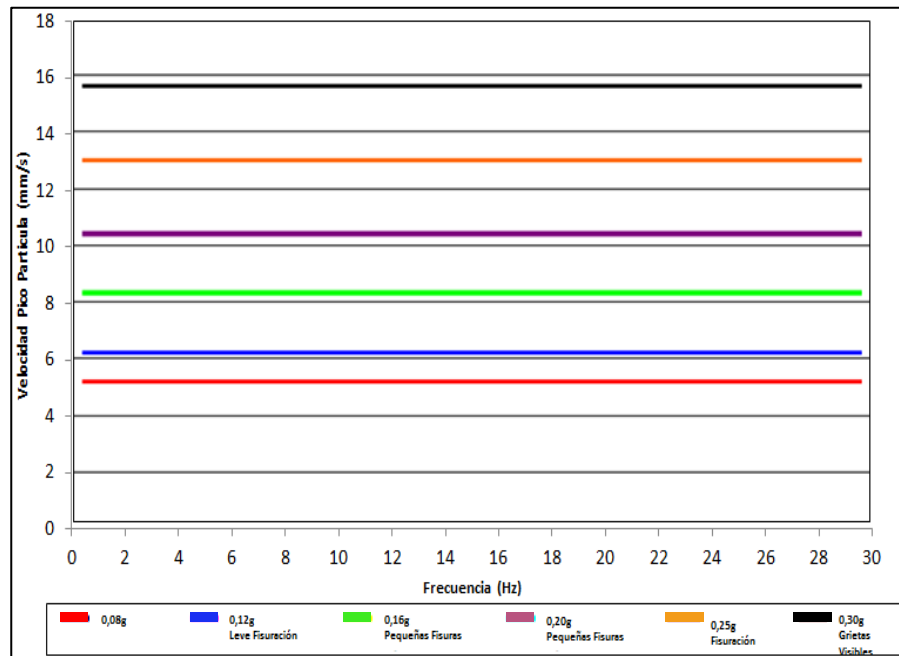


Figura 6. Normativa de vibraciones para casas de tierra

Fuente: Giraldo, Fernando (2010)

Revisando la tabla se puede decir que para no causar daños en un rango de frecuencias de 0 – 30 Hz se debe tener un 0,08 g de aceleración máxima por lo que la velocidad pico partícula sería de unos 4,16 mm/s promedio y menos que los 6,26 mm/s porque a ese nivel se tendría leve figuración de las casas o daño cosmético. Entonces, sacando un valor promedio entre ellos para saber el límite permisible de velocidad pico partícula para una aceleración de 1 – 30 Hz, que son las frecuencias en los que se maneja las vibraciones en campo

lejano. Entonces, el valor promedio entre esos valores es de 5,25 mm/s o 5,30 mm/s que será el límite admisible para el rango de 1 – 30 Hz.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Características de la investigación**

##### **3.1.1 Tipo de investigación**

El presente trabajo considera una investigación aplicada, el tipo de ensayos que se realizarán serán de una estrategia experimental, de Causa-Efecto; la causa básica será la formulación de un modelo predictivo de vibraciones que busca como efecto una voladura controlada que minimice las vibraciones.

##### **3.1.2 Diseño de la investigación**

Para efectos de la contrastación de la hipótesis se utilizó el diseño experimental, transaccional y correlacional-causal.

### **3.1.3 Nivel de investigación**

El grado de profundidad con el que se va a realizar el presente trabajo de investigación ha considerado los niveles siguientes:

- Descriptiva,
- Correlacional, y
- Explicativa.

### **3.1.4 Método de investigación**

Considerando el diseño de la perforación y el diseño de la voladura, el método experimental manipulará las variables de estudio.

Para controlar el aumento o disminución de las variables y su efecto en las conductas observables, se utilizará un gráfico de dispersión donde se expresa el comportamiento de

la VPP referente a las Normas Internacionales para la clasificación de daños.

## **3.2 Descripción del ámbito de la investigación**

### **3.2.1 Ubicación**

La unidad de producción Atacocha, de la Compañía Minera Atacocha S.A. está ubicada a 15 km al NE de Cerro de Pasco, en el paraje Atacocha, políticamente pertenece al departamento de Cerro de Pasco, provincia de Pasco y distrito de Yanacancha. Sus coordenadas geográficas son:

Latitud : 10° 35´ S

Longitud : 76° 14´ W

Altitud : 4 000 m.s.n.m

### **3.2.2 Acceso**

Es accesible por carretera desde la ciudad de Cerro de Pasco, la cual está unida a la ciudad de Lima por carretera y

ferrocarril centra vía la Oroya, con un recorrido de 346 km y 387 km respectivamente hasta Cerro de Pasco.

### **3.2.3 Geografía**

En el área bajo estudio se presentan la superficie Puna, la zona Cordillerana y la zona de valles; así mismo, se encuentran las lagunas de origen glaciario de Lulicocha y Nahuelpum.

El relieve del área bajo estudio es accidentado por la presencia de numerosas quebradas que convergen en la laguna, la cual viene a desembocar en el valle del Huallaga teniendo como referencia la localidad de Chicrin.

### **3.2.4 Clima**

El clima en Atacocha tiene dos estaciones bien marcadas, lluviosa y seca, característico de las zonas con esta altitud.

### **3.2.5 Geología regional**

En la cordillera de los andes centrales peruanos se emplaza la mina Atacocha cuyo marco geológico regional está constituido por rocas metamórficas, sedimentarias e intrusivas del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, respectivamente; separadas por discordancias en un contexto estructural gobernado por los sistemas de fallas NS y NW-SE, donde se ubican los distritos mineros de Cerro de Pasco – Colquijirca y el de Milpo – Atacocha - Machcan con orientaciones Este a Oeste.

El distrito minero de Cerro de Pasco, Colquijirca (11 a 15 millones de años) corresponde a un sistema de alta sulfuración en carbonatos y el distrito minero de Milpo-Atacocha-Machcan (25 a 30 millones de años) corresponde a sistemas tipo skarn-hidrotermal.

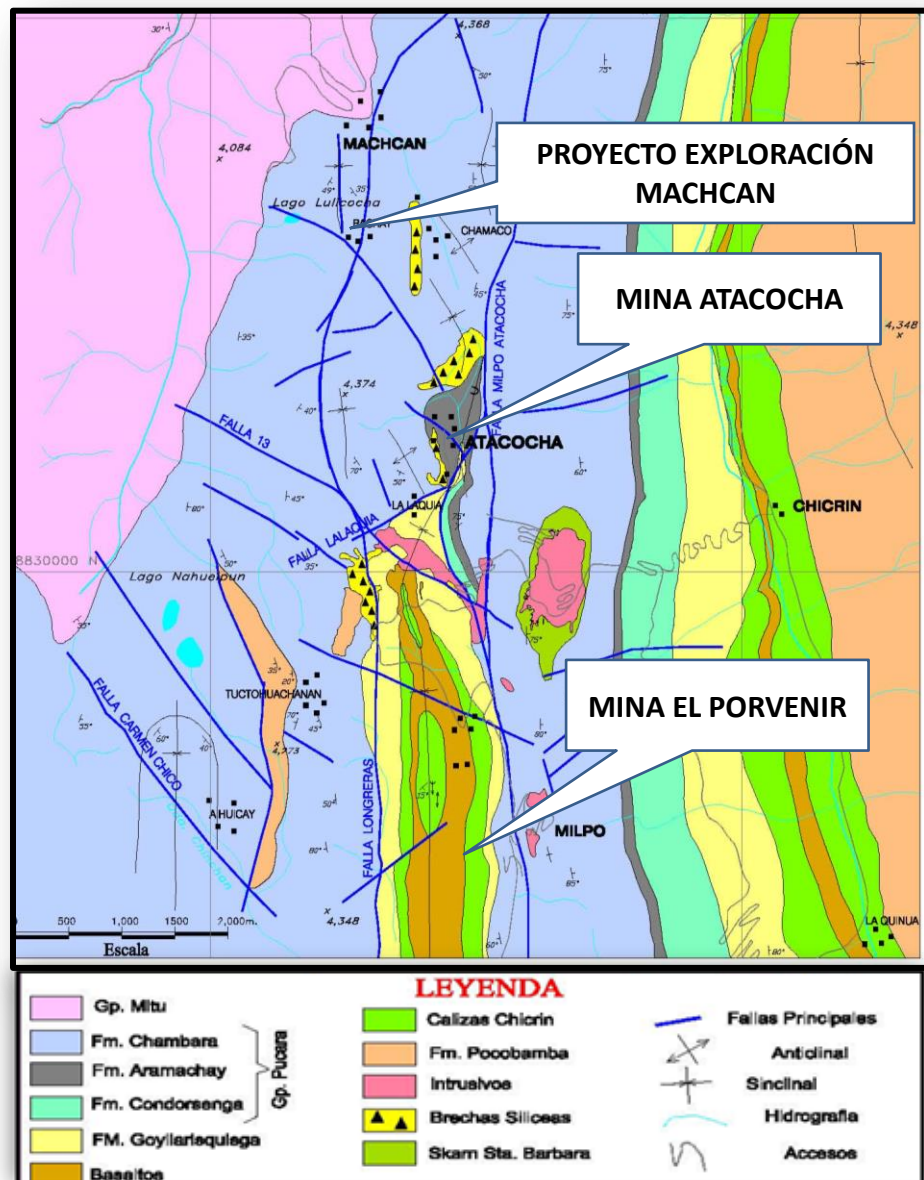


Figura 7. Mapa geológico

Fuente: Planoteca departamento de geología de C.M.A.

### **3.2.5.1 Contexto geológico-estructural**

El basamento rocoso está constituido por rocas metamórficas del Silúrico Devónico constituido por filitas y cuarcitas ubicadas al oeste de Cerro de Pasco, controlada por una falla longitudinal (Jenks, 1951). Al este de Tíclacayan aflora esquistos y meta sedimentos del Paleozoico inferior al Precambriano limitadas por la falla Ulcumayo (Cobbing et al 1996) que en cierta forma son casi paralelas al sistema N-S y a la vez son fallas de basamento que han encontrado la sedimentación. Entre ambas fallas están emplazadas las fallas Atacocha (Johnson 1952), y Longreras que son del sistema longitudinal. El otro sistema de fallas corresponde a sistemas transversales de dirección NW, siendo la falla Carmen Chico la mejor desarrollada.

En discordancia sobre el basamento paleozoico se acumularon sedimentos clásticos rojizos en ambiente continental, constituyendo el Grupo Mitu de amplitud regional. Cubriendo en discordancia erosional

regional a paso gradual local se inicia la sedimentación marina carbonatada en plataforma somera del Grupo Pucará que constituye la principal secuencia estratigráfica de la mina Atacocha, la cual ampliaremos en los acápite siguientes. El Grupo Pucará se deposita controlado por las estructuras longitudinales evidenciadas en Cerro de Pasco por el grosor, así como las facies someras de borde de cuenca evidenciadas en Ulcumayo, las cuales concuerdan con las isópacas regionales del Pucará, al terminar la sedimentación carbonatada del Pucará en la zona de la mina Atacocha, específicamente al Oeste de la falla Atacocha, se depositó en forma para concordante una secuencia denominada brecha Chat por Jonson (1952-1955), el techo aflorante de la citada brecha está cortada por la Falla 1 poniendo en contacto fallado la brecha contra el Goyllarisquizga.

Siguiendo la secuencia se observa las areniscas cuarzosas de la formación Goyllarisquizga dentro de la cual se emplazaron basaltos, los cuales están

concordantes, pero en algunos lugares cortan las areniscas y a los carbonatos tanto del Pucará como del Cretáceo. Termina el Cretaceo con las calizas Chicrin que constan de calizas y margas beige claras.

Culminando la secuencia sedimentaria, aflora la Formación Pocobamba del Terciario que consta de brechas con fragmentos subangulosos a subredondeados de calizas del Pucará, los eventos geológicos principales terminan con la intrusión de stocks y diques denominados Santa Bárbara, San Gerardo y Atacocha. Según composición química, estos intrusivos son félsicos y de acuerdo a la clasificación realizadas por K. A. Gunnesch et al (1984), se adoptó la denominación de cuarzodioríticos, con hornblenda o biotita.

### **3.2.5.2 Implicancias metalogenéticas**

Según las condiciones geológicas regionales que presentan eventos de intrusiones cuarzodioríticas en contexto de rocas calcáreas del Grupo Pucará y detríticas del Grupo Goyllarisquizga y sistemas de fallas activas durante los eventos de mineralización y pre-condicionando a estos, se describen los sistemas estructurales-geológicos que condicionan la ocurrencia de mineralización.

La intersección de estructuras tipos fallas y/o paleo-fallas activas durante la sedimentación son evidenciadas en el distrito Atacocha-Milpo por la acumulación de unidades litológicas locales, así como la complejidad o desarmonía estructural en relación al contexto estructural de la zona. Por otro lado, la presencia de intrusivos alterados y las evidencias de actividad hidrotermal pre-mineralizantes relacionas tipo skarn cálcicos o magnesianos, brechas silíceas, silicificación, sericitización, cloritización, propilitización,

etc. y principalmente las evidencias de mineralización de sulfuros económicos acompañados de metales como Ag, Pb, Cu, y Au, caracterizan esta región metalogenética y que han sido acumulados de manera preferente en trampas litológicas, estructurales, químicas o combinadas de las citadas.

En Atacocha, el evento geológico mineralizante se pone en manifiesto por la formación de skarn de granates en el sector de Santa Bárbara con mineralización de Zinc, Plomo, Plata y Bismuto; mientras que, entre San Gerardo y Falla 1, en profundidad, se formaron cuerpos mineralizados de reemplazamientos (orebodies), vetas, brechas heterolíticas con mineral de Ag, Pb y Zn, asociados a alteraciones de skarn magnesianos y eventos hidrotermales de mediana-baja temperatura en forma adyacente o asociado a sistemas síliceos caracterizados por ensambles de sílice-sericita-halloysita.

Las características geológicas descritas indicadas en los mapas geológicos interpretativos permiten caracterizar, desde el punto de vista metalogénico, las áreas a ser exploradas y pronosticar el potencial o guiar hacia las nuevas áreas de exploración en relación a los tipos de mineralización en el yacimiento.

### **3.2.5.3 Reserva por sectores geológicos**

La mina Atacocha comprende tres sectores geológicos:

- Atacocha
- Santa Bárbara
- San Gerardo

**Tabla 17**  
**Reservas probadas y probables 2016 – Mina Atacocha**

	<b>TMS</b>	<b>% Pb</b>	<b>% Zn</b>	<b>Oz/TMS Ag</b>	<b>% Cu</b>	<b>Oz/TMS Au</b>	<b>% Bi</b>
Probado	2 610 879	3,05	4,71	4,02	0,30	0,013	<b>0,020</b>
Probable	5 556 736	1,99	5,30	2,84	0,37	0,013	<b>0,027</b>
<b>Total</b>	<b>8 167 615</b>	<b>2,33</b>	<b>5,11</b>	<b>3,22</b>	<b>0,35</b>	<b>0,013</b>	<b>0,025</b>

Fuente: Departamento de geología. Unidad de producción Atacocha

### **3.2.6 Geología local**

#### **3.2.6.1 Litología y estratigrafía**

En el área de operaciones mineras del Yacimiento de Atacocha se han diferenciado las siguientes unidades litológicas, que del piso hacia el techo son:

**Grupo Pucará:** Unidades, A, B, C, D, E, F y dolomías.

**Brecha Chértica**

**Formación Goyllarisquizga:** Arenicas Cuarzosas.

**Basaltos**

**Intrusivos:** Dacita, Pórfido Dacítico, Cuarzo Diorita con hornblenda o biotita.

**Skarn:** Mármol, Sílice Wollastonita, Skarn de granates, Sílice skarn, Pirita-arcillas-skarn

**Brecha Silicea:** Sílice Masiva, brecha silícea Sílice-skarn-clorita, sílice terrosa.

**Brecha Hidrotermal:** Brechas calcáreas, Brechas heterolíticas

**Brechas monolíticas,** Brechas cársticas.

Las rocas carbonatadas del Grupo Pucará constituyen las principales unidades estratigráficas que han sido diferenciados en 6 unidades litológicas. Estas son:

**Unidad A:** Se encuentra al Este de la falla Atacocha. Consta de calizas grises a gris oscuras, micritas a esparíticas con niveles de dolomías finas, calcarenitas y volcánicos finos verdosos, también se observa limolitas a dolomicritas compactas de tonalidad gris amarillenta.

**Unidad B:** Se ubica al este de la unidad anterior definida por posición estratigráfica suprayacente. La principal característica es su color gris oscuro a negro. En litología se caracteriza por la presencia de calizas micritas y dolomicritas gris oscuras a negras en estratos delgados a tabulares con niveles lenticulares bituminosos. Se caracteriza en muchos lugares de la mina por la obliteración de marmolización, silicificación, en sus niveles más competentes.

**Unidad C:** Esta unidad estratigráfica se observa en el lado Este de la zona de trabajo. Consta de calizas chérticas monótonas grises micríticas a esparíticas en estratos métricos, también se ha delimitado niveles dolomíticos. Se caracteriza por la dureza de las secuencias litológicas que las representa.

**Unidad D:** Esta unidad litológica tiene amplia distribución y ha sido identificada en la sección Atacocha y en la sección Santa Bárbara. Consta de calizas beige claras variando de mudstone a

grainstone intercalado con niveles dolomíticos de tonalidad beige clara, también se observan horizontes chérticos y bituminosos.

**Unidad E:** Es la unidad litológica guía del yacimiento de Atacocha por sus características litológicas que consta de calizas negras micríticas, margas a lutitas negras, en muchos lugares la característica de este conjunto rocoso es obliterada por la marmolización, silicificación, sílice-sericita-arcillas, etc. En muchos lugares de la mina, la roca se encuentra alterada conformando calizas recristalizadas con decoloración teniendo tonalidades claras sin llegar a mármol (decalcificación). Estas rocas corresponden a la Formación Aramachay del Grupo Pucará.

**Unidad F:** Se le ha observado en la sección Atacocha y corresponde a los niveles superiores del Grupo Pucará denominado como la Formación Condorsinga. Consta de calizas gris a gris claras

mudstone a packstone con horizontes fosilíferos y niveles dolomíticos.

**Dolomías:** Se le observa en diversa posición estratigráfica dentro del Grupo Pucará. Se caracteriza por su tonalidad gris clara variando de dolomicrita a doloeparita con estratificación definida y compacta. Por la alteración ha perdido la estratificación que caracteriza a todo el Grupo Pucará en el yacimiento de Atacocha.

**Brecha Chértica:** Esta unidad litológica se observa en la sección de Atacocha, está ubicada según su posición estratigráfica entre el Grupo Pucará y el Grupo Goyllarisquizga. Según características en litología, consta de brechas chérticas rojizas con fragmentos de chert, calizas de tamaño seriado anguloso a subanguloso, la matriz es calcárea a silícea, habiéndose observado dos litologías una donde predomina los fragmentos y matriz calcáreos y la otra con fragmentos y matriz silícea, en algunas muestras se observa tanto en la matriz como en los

fragmentos silíceos elementos fosilíferos lo que indica su asociación marina, por áreas la coloración es blanquecina a grisácea producto de la alteración sílice-sericita-halloysita o serpentina–jasperoides respectivamente .

**Areniscas Cuarzosas:** Esta unidad litológica corresponde a parte del Grupo Goyllarisquizga que se caracteriza por la predominancia de areniscas con abundantes granos de cuarzo del tamaño de arena. Algunos niveles tienen abundantes granos de feldespatos o elementos arcillosos adquiriendo la denominación de arcosas. La matriz es arcillosa a silícea, en los niveles sobre el 4000, las características litológicas y de estratificación están definidas y fáciles de reconocer aunque existen áreas con fuerte alteración hidrotermal formando brechas hidrotermales con matriz de sílice-sericita-arcillas (halloysita, montmorillonita, kaolinita), debajo del nivel 4000, la alteración ha obliterado con fuerte intensidad la roca original formando brechas silíceas, sílice masiva en la que aún es factible

reconocer la presencia de granos de cuarzo y en escasos lugares la estratificación.

**Basaltos:** esta unidad subvolcánica a volcánica se observa en sondajes al suroeste de la mina debajo de las zonas de Cherchere y San Gerardo. Está constituida por basaltos grises a verdosos en masa fundamental constituida por vacuolas verdosas de zeolitas con indicios de flujos que engloba fenocristales de olivino, ilmenita, magnetita.

El conjunto de rocas intrusivas tiene forma de diques sub paralelos de dirección principal Norte-Sur lo que evidencia un control estructural de los diques. Se observa en tres lugares una en la parte central de Santa Bárbara, la segunda en la parte sur y a lo largo de la falla Atacocha y la tercera al sur de la sección 3. Según características litológicas se presentan similares habiendo sido observadas dos unidades litológicas principales definidas por la presencia de cuarzo en forma de fenocristales que son dacita y pórfido dacita

**Dacita:** Se caracteriza por fenocristales de feldespatos y muy escaso cuarzo en masa fundamental microlítica. Se tienen dos variedades: una con predominio de biotita y la otra con mayor porcentaje de hornblenda.

**Pórfido Dacítico:** Se caracteriza por la abundancia de fenocristales de cuarzo y se observan las dos variedades (biotita u hornblenda) citadas anteriormente.

**Cuarzo Diorita:** Está constituida por cristales alargados de feldespatos de tamaño hasta 6 milímetros de eje mayor, con algunos ojos de cuarzo y agregados de cristales bien formados de biotitas negruscas alterándose a colores verduscos y blanquecinos transparentes o cristales puntuales de hornblendas, en una matriz microcristalina de color grisáceo, compuesta de plagioclasas y cuarzo fino, acompañan disseminaciones de pirita. También se puede distinguir las dos variedades citadas anteriormente biotita u hornblenda.

El siguiente grupo litológico está asociado a la alteración metasomática de contacto con la definición de rocas del sistema skarn. Las principales son las siguientes:

**Mármol:** La roca es de coloración blanquecina de textura cristalizada- esparítica, fuerte reacción al ácido clorhídrico (HCl) y se ha observado dos tipos principales mármol calcáreo y mármol dolomítico. Se observan relictos de textura de caliza fosilífera (bivalvos) y nódulos irregulares de sílice gris (chert) bordeados de wollastonita blanquecina y calcita.

**Sílice-Wollastonita:** Esta asociación mineralógica forma parte del sistema de skarn cálcico y es de color gris claro a blanco lechoso con textura brechoide de agregados masivos y ocasionalmente de textura fibrosa radial de wollastonita, ocasionalmente quedan relictos de mármol blanquecino con bordes silíceos, además agregados de sílice gris en forma de nódulos irregulares las

que presentan un zoneamiento de sílice gris a los bordes pasando a sílice masiva gris brechada.

**Skarn de granates:** Se ha adoptado la denominación de skarn cuando el porcentaje de granates es mayor de 50 %, lo que ha permitido diferenciar varias unidades que están relacionadas a la mineralización. El skarn cálcico se caracteriza por la presencia de granates marrones y verdes que se caracterizan por su grado de cristalización media a fina, de coloración marrón claro con tonalidades amarillentos (andradita) de aspecto sacaroideo, también se presentan de color verde claro (grosularia) de cristalización fina.

**Sílice-skarn:** Esta asociación mineralógica está constituida por sílice fina masiva con skarn en porcentaje menor de 30 %, siendo la sílice mayor de 50 %, ocasionalmente está asociada a wollastonita, arcillas, el skarn está en venillas, en ojos o diseminada ocupando la segunda etapa de cristalización.

**Pirita-arcillas-skarn:** la siguiente asociación mineralógica está constituida por pirita fina masiva (Pyl) variando entre 80 y 30 %, arcillas blanquecinas que van del 10 a 30 % y skarn verde de grano medio a fino que va de 0 a 20 %. En algunas zonas la pirita está reemplazando o adquiriendo la forma pseudomórfica de macrogranates.

La siguiente litología es del sistema sílice y está relacionada a la alteración sílice – sericita - halloysita observada principalmente al oeste de la falla Atacocha, habiéndose diferenciado las siguientes litologías:

**Sílice Masiva:** Es la litología principal de este tipo de roca y está constituida por sílice masiva fina blanquecina, la cual ha reemplazado en forma total al protolito que principalmente fue caliza. Cuando el protolito corresponde a arenisca o brecha crética, los granos o fragmentos de sílice son factibles de reconocer, el color de la roca es blanco y de alta

dureza, masivo compacto, habiendo perdido los signos de sedimentación original.

**Brecha silíceea:** Se caracteriza por su color blanquecino de textura brechada, constituidas de fragmentos subredondeados a subangulares de tamaños variables desde milímetros hasta centímetros, de sílice opalina gris, sílice opalina blanco lechoso y sílice granular, englobadas en una matriz de sílice granular blanquecina, con venillas delgadas de sílice blanca, ocasionalmente se observan desarrollo de pequeñas cavidades con inter-crecimientos de cristales de cuarzo. También engloba fragmentos de areniscas así como de calizas del Grupo Pucará dependiendo del protolito brechado.

**Sílice-skarn-clorita:** Esta asociación litológica consta principalmente por sílice gris a blanquecina masiva en una primera etapa seguida por venas a vetillas de skarn verde acompañada de venillas de clorita y en algunas zonas con hematita. Esta

asociación mineralógica está alineada y relacionada a un fuerte fracturamiento que está acompañada por mineralización económica.

**Sílice terrosa:** Esta litología consta de sílice gris blanquecina suelta constituida por elementos de sílice, los cuales han sido pobremente cementados por arcillas en escasa proporción. En algunos lugares tiene la apariencia de fuerte fracturamiento.

Las rocas del sistema de brechas hidrotermales y relacionadas al último evento de alteración-mineralización han sido diferenciadas según las siguientes unidades litológicas:

**Brechas calcáreas:** Esta unidad consta de fragmentos subangulosos a subredondeados de calizas, mármol, etc. En algunas zonas los fragmentos son monolíticos y en otros sectores son heterolíticos, de tamaños variados, la matriz es calcárea y de coloración gris y en algunas zonas gris oscura algo bituminosa con muy escasa pirita.

**Brechas heterolíticas:** Se ha denominado así a las unidades de roca de color gris clara plomiza, de textura brechada, constituida por fragmentos y matriz. Los fragmentos tienen formas subangulosas, de calizas negras mudstone, sílice-blanquecinos, sílice con venillas de sílice-pirita, mármol con sílice-wollastonita y calcita. Los tamaños de los fragmentos varían en tamaño y están englobadas en una matriz color negro bituminoso de raya suave y sedoso, acompañada de pirita diseminada. La mineralización está emplazada en la matriz en forma de venillas, diseminada, ojos o formas subredondeadas que son crecimiento o reemplazamiento de mena.

**Brechas monolíticas:** Esta unidad litológica es muy similar a la brecha heterolítica y la única diferencia radica en que los fragmentos solo son de una litología bien sea caliza o intrusivo predominando este último.

**Brechas karsticas:** Este conjunto de unidades litológicas está constituido por fragmentos de calizas, mármol, sílice, skarnoides, intrusitos. Los fragmentos de brechas son subangulosos a subredondeados y se diferencian de otras brechas por la presencia en la matriz de sedimentos subhorizontales de material carbonatado con fragmentos de mineral. En algunos casos, el material está constituido por sedimentos laminares de sílice-sericita arcillas lo que implica la mezcla de dos procesos kársticos calcáreos y kársticos hidrotermales.

### COLUMNA GEOLÓGICA LOCAL MINA ATACOCHA

ERA	SISTEMA	UNIDADES ESTRATIGRAFICAS	COLUMNA	LITOLOGIA	ALTERACION Y MINERALIZACION	
MESOZOICO	CRETACEO	Basaltos	bto	Basaltos con textura vesicular (zeolitas)		
		Fm. Goyllarisquizga	am	Areniscas cuarzosas, ortocuarzitas con estratificación cruzada.	Ag - Pb - Au en vetas	
	JURASICO	Brecha chertica	Bx	Brecha chertica con matriz detrítico calcáreo rojizo, con clastos de chert y calizas.		
		Fm. Condorsinga	F	Calizas micríticas grises claras con cherts y abundantes pseudomorfos, fósiles.	Ag - Pb - Zn en vetas	
		Fm. Aramachay	E	Margas y calizas negras, fosilíferas (bt)		
	TRIÁSICO	Cpo. Pucará	Fm. Chambará	D	Dolomias y calizas gris	Ag - Pb - Zn en Brechas Hidrotermales
				C	Calizas y dolomias cherticas gris oscuras	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼▼▼ Brechas Karsticas (Bxk)</li> <li>▲▲▲ Brechas Monolíticas (Bxmc)</li> <li>◆◆◆ Brechas Heterolíticas (Bxh)</li> <li>■ Brechas Calcáreas (Bxc)</li> <li>■ Brecha Silíceas</li> <li>● Silíce Terrosa (ST)</li> <li>▨ Silíce -Skam-Clorita (Si-Sk-Cl)</li> <li>▨ Brechas Silíceas (Bxsil)</li> <li>■ Silíce Masiva (SiM)</li> <li>■ Zn - Pb - Ag - Bi, Skam</li> <li>■ Pirita-Arcillas-Skam (P-y-ar-sk)</li> <li>■ Silíce-Skam (Si-sk)</li> <li>■ Skam de Granates (skgr)</li> <li>■ Silíce-Wollastonita (Si-Wo)</li> <li>■ Marmol (mm)</li> </ul>
				B	Dolomias y calizas negras micríticas en estratos delgados (bt)	
				A	Nivel fosilífero	
				A	Calizas y dolomias micríticas	
		Bx_sinsedimentaria		<ul style="list-style-type: none"> <li>××××× Intrusivos, Dacita, Pórf. Dac., Czo. Dio.</li> </ul>		

D. DÁVILA / DIC. 2005

Figura 8. Columna Geológica Local Mina Atacocha

Fuente: Fuentes Fernández, Reynold 2007

#### 3.2.6.2 Estructural

Las zonas de operación minera actuales de Atacocha, secciones Atacocha y Santa Bárbara están ubicadas al Norte-Noroeste y Noreste respectivamente de la intersección de las fallas principales Atacocha, Falla 1 y Falla 13.

Se observan dos zonas estructurales separadas por la falla Atacocha, la primera es la sección Santa Bárbara que se encuentra al Este de la Falla Atacocha en el homoclinal con estratos de dirección Norte-Sur buzando  $80^{\circ}$  al Este atravesado por el intrusivo Santa Bárbara que en realidad es un sistema de diques con dirección general Norte-Sur siendo la parte Sur de rumbo Norte-Noroeste, la parte central es Norte-Sur y la parte norte con dirección Noreste que implica fuerte control estructural. La sección Atacocha está al Oeste de la falla Atacocha y se ubica en profundidad y a lo largo del eje del sinclinal fallado y volcado, con dirección casi Norte-Sur, lo cual indica fuerte compresión hacia el Este. En esta sección a medida que se profundiza hacia el Sur se caracterizan mayores ocurrencias de cuerpos intrusivos que en realidad constituyen diques con dirección Norte-Sur.

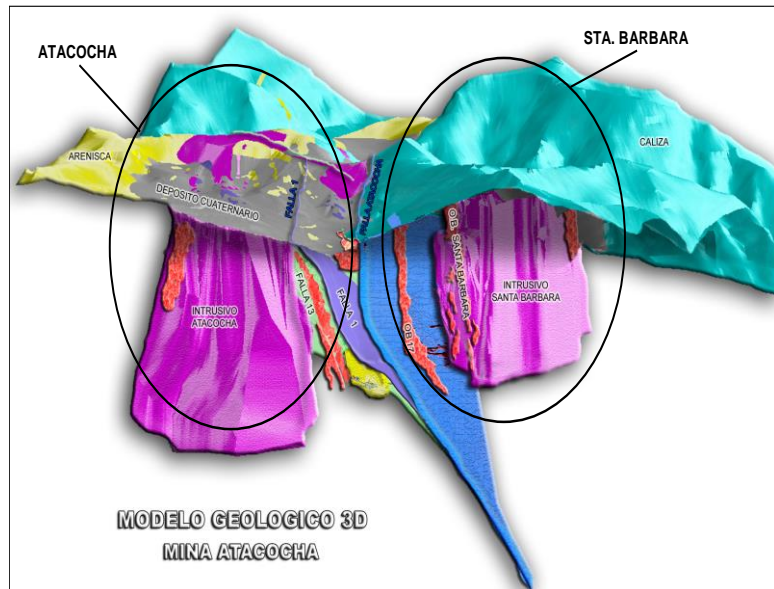


Figura 9. Modelo Geológico 3D Mina Atacocha

Fuente: Fuentes Fernández, Reynold 2007

Se han determinado tres sistemas o cuerpos intrusivos, el primero son los intrusivos con dos direcciones principales uno NS (Santa Bárbara) y el otro NW (San Gerardo), el segundo es el sistema síliceo de dirección Norte-Sur y el tercero es el conjunto de Brechas Heterolíticas de dirección principal Norte-Sur, con fuerte control estructural relacionado a las fallas Atacocha, 1 y 13. Un segundo control de emplazamiento de intrusivos corresponde a

las direcciones Norte-Sur y buzamientos subverticales de secuencias de estratificación que se muestran claramente debajo de los niveles 3600 en la sección 3 y 3900 en la sección 2-4.

### **3.2.6.3 Alteración hidrotermal y procesos metasomáticos**

El emplazamiento de zonas mineralizadas tienen como guía las alteraciones hidrotermales o los procesos metasomáticos, para el caso de Atacocha se ha detectado dos tipos de mineralización, uno es del tipo skarn y el otro es del tipo hidrotermal, por las relaciones de campo, sucesión de eventos geológicos y secuencia paragenética, se ha determinado que el primer evento mineralizante fue el skarn y el segundo corresponde al hidrotermal.

- **Tipos de alteración hidrotermal y su relación de emplazamiento**

De acuerdo a lo observado en las labores mineras en ambas secciones se ha diferenciado dos tipos

principales de alteración una está relacionada a skarn, habiendo desarrollado los siguientes ensambles: mármol, Sílice-Wollastonita, Skarn de granates, Sílice-skarn, Pirita-arcillas-skarn y la otra está asociada a Sílice-Sericita-Halloysita que corresponde al sistema hidrotermal habiéndose diferenciado las siguientes 2 fases mineralógicas una silícea constituida por: Sílice Masiva, Brecha Silícea, Sílice-skarn-clorita y Sílice terrosa y la otra fase es del sistema de brechas conformada por: Brecha Calcáreas, Brechas Heterolíticas, Brechas Monolíticas y Brechas Karsticas.

Las relaciones de emplazamiento se muestran en el gráfico adjunto las cuales son sustentadas por los siguientes datos geológicos:

Los intrusivos son datados en 25 a 30 millones de años, la alteración de skarn corta dichos cuerpos de igual forma la mena asociada al metasomatismo está caracterizada por estrellas de esfalerita en calcopirita

y las maclas de calcopirita, en hojas de laurel nos indican alta temperatura coincidente con asociación a skarn.

El sistema silíceo bien sea masiva, brechoide, en flujo y terrosa corta al conjunto de metasomatismo (skarn) es más se desarrolla un skarn asociado a la sílice que es posterior a la sílice, en las zonas de brecha silicea engloba fragmentos de mármol, skarnoides que nos indica que el sistema silíceo es posterior.

El sistema de brechas es el último evento de la mineralización en Atacocha esto es evidenciado porque los fragmento que constituyen dicha brecha son de caliza, mármol, sílice masiva, brecha silicea, skarn, lo que nos indica que fue posterior a los eventos citados.

#### **3.2.6.4 Características mineralógicas de tipos y estilos de mineralización**

Según las características mineralógicas, alteración, roca caja, modo de emplazamiento, relleno y/o reemplazamiento, distribución espacial, proximidad de intrusivo, etc., se ha definido los siguientes tipos y estilos de mineralización:

- **Cuerpos de Skarn (Santa Bárbara, Vasconia)**, estos cuerpos de skarn se caracteriza por la siguiente asociación mineralógica pirita, calcopirita, esfalerita, galena y en algunos lugares se observan pirrotita, pirita II, bournonita y covelita predominando las piritas en los niveles inferiores.
- **Brechas calcáreas (Anita, Cristina)**, la mena se encuentra en matriz constituida por pirita, esfalerita, galena, sulfuros finos. Además, se han identificado la asociación de pirita, oropimente, rejalgar y sulfuros finos (Nivel 3600)

hacia los contactos de la brecha, se tiene calizas marmolizadas con débil mineralización.

- **Brechas heterolíticas (OB-17, OB-15)**, la mena se encuentra principalmente en la matriz de la brecha heterolítica y consta de pirita, escalerita, galena, sulfuros finos, hacia la denominada veta T se observa pirita I, pirita II siendo la esfalerita de colocación clara.
- **Vetas (Veta-P, Veta-R)**, la mena consta de venillas de mena asociada a venas de skarn en contacto con mármol, la mineralogía consta de pirita, calcopirita, esfalerita, galena, cuarzo y carbonatos.
- **Brechas silíceas (OB-9)**, la roca consta de brecha silícea la mena está en venas de pirita, galena, esfalerita, sulfuros finos, distribuidos en la matriz de sílice-sericita-arcillas.

- **Brechas heterolíticas (OB-13B, OB-13C)**, la mineralogía es de pirita, calcopirita, esfalerita, galena y sulfuros finos, distribuida en la matriz de las brechas, también se observa mineralización en los contactos con mármol.

Esta asociación es de esfalerita, galena, pirita.

- **Cuerpos de mármol (OB-13)**, presenta la asociación mineralógica de pirita, esfalerita, galena, calcopirita y sulfuros finos, se encuentra emplazada como cuerpos de reemplazamiento en skarn de granates verdes, mármol, sílice en la parte central.

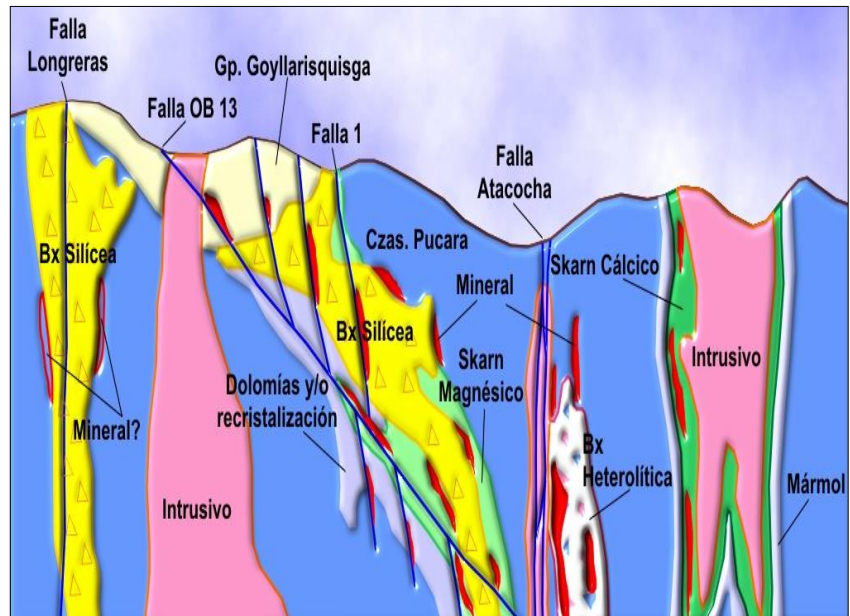


Figura 10: Características de tipos y estilos de mineralización

Fuente: Fuentes Fernández, Reynold (2007)

### 3.3 Diseño de perforación

#### 3.3.1 Diseño de malla para taladros de producción

Para el diseño de los taladros de producción se tuvo que tomar las siguientes consideraciones:

- Las vibraciones producidas por la voladura tienen que ser mínimas para que no afecten a las viviendas de adobe y quincha de la población que se encuentran a 650 metros del punto de las voladuras.
- Se tienen que evitar las proyecciones de rocas y la polución de los fragmentos.

Por lo tanto, se aplicará un factor de carga moderada y esto llevará a usar una malla de perforación reducida y una altura de perforación proporcional al burden, con la finalidad de evitar lo antes mencionado y obtener la fragmentación de roca requerida por los equipos de acarreo.

### **3.3.2 Diámetro de taladro**

Como parámetro inicial de cálculo de la malla de perforación se tomó el diámetro de la broca de 101,6 mm pulgadas, la cual se tomó de la experiencia del área de oficina técnica de Pevoex Contratistas S.A.C. y de otros proyectos similares, además de los equipos de perforación que se

emplearon en el proyecto, los cuales tienen una capacidad máxima de perforación de 114,4 mm de diámetro.

Se utilizó la siguiente fórmula del manual de voladura de ENAEX:

$$D = \frac{H}{K} \quad (\text{Ecu. 17})$$

Donde:

D = diámetro (pulg)

H = altura de **banco** (m)

K = 1,2 a 1,8

Introduciendo valores a la Ecu. 17:

$$D = \frac{7,5 \text{ m}}{1,8} = 4 \text{ pulg} = 101,6 \text{ mm}$$

### 3.3.3 Burden

Para el cálculo del burden se utilizó la fórmula de KONYA (1983), también tomada de la experiencia del área de oficina técnica de Pevoex Contratistas S.A.C.:

$$B = \left[ \left( \frac{\delta_{exp} \times 2}{\delta_{roca}} + 1,8 \right) \times \frac{\phi_{exp}}{25,4} \right] \times 0,304 \quad (\text{Ecu. 18})$$

Donde:

$B$  = burden (m)

$\delta_{exp}$  = densidad del explosivo (g/cc)

$\delta_{roca}$  = densidad de la roca (g/cc)

$\phi_{exp}$  = diámetro del explosivo (mm)

$K_r$  = corrección por el número de hileras

$K_d$  = corrección por el tipo de deposito

$K_s$  = corrección por estructuras geológicas

$B_c$  = burden corregido (m)

Introduciendo valores a la Ecu. 18:

$$B = \left[ \left( \frac{0,8 \times 2}{2,62} + 1,8 \right) \times \frac{101,6}{25,4} \right] \times 0,3048$$

$$B = 2,94 \text{ m}$$

$$B_c = B \times K_r \times K_d \times K_s \quad (\text{Ecu. 19})$$

$$B_c = 2,94 \times 0,9 \times 0,95 \times 1,1 = 2,8 \text{ m}$$

Se obtuvo como resultado de Burden dos metros con ochenta centímetros, debido a que se corrigió el burden con los factores de corrección de acuerdo a la literatura del libro del Konya en la página 95.

### **3.3.4 Espaciamento**

Con esta longitud de burden, al aplicar la siguiente fórmula extraída de la experiencia del área de oficina técnica de Pevoex Contratistas S.A.C. se puede calcular el espaciamento:

$$E = 1\,154 B_c \quad (\text{Ecu. 20})$$

Donde:

E = espaciamento (m)

$B_c$  = burden corregido (m)

Introduciendo valores a la Ecu. 4:

$$E = 1\,154 (2,8)$$

$$E = 3,2 \text{ m}$$

**Tabla 18**  
**Correcciones**

<b>ESTRUCTURA GEOLÓGICA</b>	<b>Ks</b>
Altamente fracturada, juntas frecuentes y débiles, capas poco cementante	1,3
Capas delgadas bien cementadas con juntas estrechas	1,1
Roca intacta y masiva	0,95
<b>HILERAS</b>	<b>Kr</b>
Una o dos hileras.	1
Tercera hilera y subsecuente o voladuras con apilamientos anteriores.	0,9
	<b>Kd</b>
<b>ORIENTACIÓN DE LOS ESTRATOS</b>	
Estratos hacia el corte.	1,18
Estratos hacia la cara.	0,95
Otros tipos de depósitos.	1,00

Fuente: Konya, J. (1 998)

### **3.3.5 Altura del banco**

Para obtener una voladura eficiente es importante que el burden y la altura del banco sean razonablemente compatibles, se recomienda emplear la siguiente relación para obtener la altura mínima del banco.

$$H_{\min} = 2 \times B \quad (\text{Ecu. 21})$$

Donde:

H = altura del banco (m)

B = burden (m)

Introduciendo valores a la Ecu. 5:

$$H_{\min} = 2 \times 2,8 = 5,6 \text{ m}$$

La definición de la altura de banco más adecuado para conseguir el mayor desplazamiento se suele expresar en términos de relación Altura/Burden, tal como se indica en la tabla 2.

**Tabla 19**  
***Relación altura/burden***

ALTURA DEL BANCO	DESPLAZAMIENTO RELATIVO
< 1,5 B	Mala
1,5 B - 2,5 B	Normal
> 2,5 B	Buena

Fuente: López Jimeno (1 995)

$$H > 2,5 \times B$$

$$H > 7 \text{ m}$$

$$H = 7,5 \text{ m}$$

Por lo tanto, la altura de banco será de siete metros con cincuenta centímetros, esto debido a que las banquetas del talud son de 15 m. Se optó por realizar dos voladuras por banqueta con la finalidad de minimizar el factor de carga y así minimizar también las vibraciones y posibles proyecciones de roca que pudieran afectar a la población.

### **3.3.6 Sobre perforación**

Para conseguir una rotura buena a nivel del piso y permitir adecuadamente el desplazamiento de la roca hacia el frente, es necesaria una sobre perforación para asegurar que la totalidad de la cara libre de roca sea removida.

Se utilizó la siguiente fórmula del manual de voladura de ENAEX:

$$J = (0,2 \text{ a } 0,5) \times B \quad (\text{Ecu. 22})$$

Donde:

J = sobre perforación (m)

B = burden (m)

Introduciendo valores a la Ecu. 22:

$$J = 0,2 \times 2,8$$

$$J = 0,5 \text{ m}$$

### 3.3.7 Longitud del taladro

Está dada por la suma de la altura del banco (H) más la sobre perforación (J).

$$L_{\text{tal}} = H + J \quad (\text{Ecu. 23})$$

$$L_{\text{tal}} = 7,5 + 0,5$$

$$L_{\text{tal}} = 8 \text{ m}$$

### 3.3.8 Índice de rigidez del burden

Se define como la longitud del taladro dividida entre la distancia del burden o L/B. La tabla 19 es un resumen

en general de los problemas potenciales relacionados con la relación de rigidez.

**Tabla 20**  
**Relación de rigidez**

RELACIÓN DE RIGIDEZ	1	2	3	4
Fragmentación	Pobre	Regular	Buena	Excelente
Sobrepresión de aire	Severa	Regular	Buena	Excelente
Roca en vuelo	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibración del terreno	Severa	Regular	Buena	Excelente

Fuente: J. Konya (1 998)

$$\frac{L}{B} = \frac{8}{2,8} = 2,85 \quad (\text{Ecu. 24})$$

Se obtiene un valor de 2,85 que es un valor adecuado muy cercano a 3, lo cual significa que se tendrá un buen control y fragmentación.

### **3.3.9 Diseño de malla para taladros buffer**

Consiste en modificar la última fila de la voladura de producción reduciendo el burden, espaciamento y concentración de carga explosiva, para amortiguar la acción de la onda de compresión proveniente de los taladros de producción en la pared del banco.

Para este caso se mantendrá el diámetro de perforación de 101,6 mm, la sobre perforación será de cero esto debido a que los taladros buffer serán perforados verticalmente a 90 grados en dirección hacia las banquetas que se encuentran a 7,5 metros de distancia de la superficie, con la finalidad de no dañar las banquetas del talud. Los únicos parámetros a modificar serán el burden y espaciamento.

A continuación se muestra un resumen de los parámetros:

Diámetro de perforación: 101,6 mm

Altura de perforación: 7,5 m

Sobre perforación: 0,0 m

### 3.3.10 Burden para taladros buffer

El burden para los taladros buffer se reduce de acuerdo a la siguiente fórmula del manual de voladura de ENAEX:

$$B_{\text{buffer}} = 0.5 \text{ a } 0.7 B_{\text{produc}} \quad (\text{Ecu. 25})$$

$$B_{\text{buffer}} = 0.7 * 2.8 = 2 \text{ m}$$

### 3.3.11 Espaciamiento para taladros buffer

El espaciamiento para los taladros buffer se reduce de acuerdo a la siguiente fórmula del manual de voladura de ENAEX:

$$E_{\text{buffer}} = 1,0 \text{ a } 1,25 B_{\text{buffer}} \quad (\text{Ecu. 26})$$

$$E_{\text{buffer}} = 1,25 \times 2$$

$$E_{\text{buffer}} = 2,5 \text{ m} \cong 3 \text{ m}$$

Por lo tanto, se aproxima el espaciamiento del buffer a tres metros, esto debido a que se realizarán taladros piloto con la finalidad de fragmentar el área entre los taladros de precorte que son inclinados y los taladros buffer.

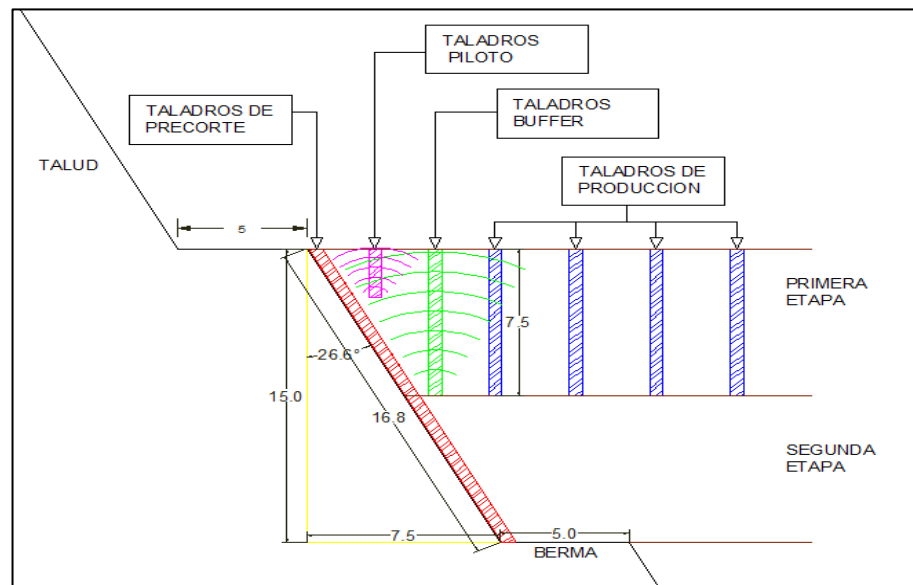


Figura 11. Diseño de malla para taladros piloto

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.12 Diseño de malla para taladros piloto

Los parámetros de perforación de los taladros piloto se basaron en los diseños de los taladros buffer ya que el objetivo es fragmentar el área a donde las ondas

compresivas de los taladros buffer no llegarán debido a una reducida concentración de carga, y también no dañan la pared final del talud, para lo cual, también será cargado con explosivo como un taladro buffer.

### **3.3.13 Diámetro de perforación para taladros piloto**

El diámetro de perforación se mantendrá en 101,6 mm, debido a la operatividad de los equipos de perforación, y minimizar los tiempos de perforación.

$$D_{\text{tal}} = 101,6 \text{ mm}$$

### **3.3.14 Altura de perforación para taladros piloto**

La altura de perforación será definida a un 55,6 % de la distancia total que existe entre la superficie del terreno y el taladro de precorte, esto con la finalidad de no afectar a la pared final del talud.

$$H_{\text{perf}} = 55,6\% * d_{\text{s-tp}} \quad (\text{Ecu. 27})$$

Donde:

$H_{\text{perf}}$  = altura de perforación (m)

$d_{\text{s-tp}}$  = distancia entre la superficie de perforación y el taladro precorte (m)

Introduciendo valores a la Ecu. 27:

$$H_{\text{perf}} = 55,6\% * 4,5$$

$$H_{\text{perf}} = 2,5 \text{ m}$$

### 3.3.15 Burden para taladros piloto

El burden para los taladros piloto se reduce de acuerdo a la siguiente fórmula del manual de voladura de ENAEX:

$$B_{\text{piloto}} = 0,5 \text{ a } 0,7 B_{\text{produc}} \quad (\text{Ecu. 28})$$

$$B_{\text{piloto}} = 0,7 \times 2,8$$

$$B_{\text{piloto}} = 2 \text{ m}$$

### 3.3.16 Espaciamiento para taladros piloto

El espaciamiento para los taladros piloto se reduce de acuerdo a la siguiente fórmula del manual de voladura de ENAEX:

$$E_{\text{piloto}} = 1,0 \text{ a } 1,25 B_{\text{piloto}} \quad (\text{Ecu. 29})$$

$$E_{\text{piloto}} = 1,25 \times 2$$

$$E_{\text{piloto}} = 2,5 \text{ m}$$

### 3.3.17 Diseño de malla para taladros de precorte

El desarrollo del precorte tiene por finalidad generar una línea de debilidad tras la voladura, cuyos beneficios pueden ser los siguientes:

- Formación de una pared de banco más estable.
- Generar el límite de penetración de la pala.
- Obtener las bermas programadas.
- Crear una percepción de seguridad.

Como se sabe, el precorte debe permitir fracturar un plano para atenuar vibraciones en la tronadura principal, lo anterior depende mucho de la calidad de las fracturas que se formen. Las vibraciones serán menores, mientras éstas crucen fracturas lo más abiertas y limpias posibles. Así como las vibraciones generadas en las tronaduras son responsables de los daños producidos en la pared final, lo es también el empuje de gases de explosión, por lo tanto, la línea de fractura generada por el precorte también debe actuar como zona de evacuación de gases.

El objetivo de un precorte es minimizar las presiones en el pozo, lo suficiente para generar grietas entre pozos adyacentes de la línea del precorte. Para obtener buenos resultados, tres requerimientos deben tomarse en cuenta:

- Una línea de pozos con pequeño espaciamiento.
- Una baja densidad lineal de carga de explosivo.
- Una simultaneidad en la iniciación de los pozos.

El plano de debilidad se genera mediante una grieta que se extiende a lo largo de los pozos de precorte, la presión en las paredes del pozo (presión de barreno) debe ser del orden de la resistencia a la compresión de la roca.

### **3.3.18 Diámetro de perforación**

Es ampliamente reconocido que los mejores resultados de precorte se obtienen con diámetros pequeños de perforación, sin embargo, hay que tomar en cuenta la longitud del banco a perforar y las desviaciones de los taladros.

$$D_{\text{tal-precorte}} = 88,9 \text{ mm}$$

### **3.3.19 Inclinación del precorte**

Los máximos beneficios en términos de mejorar la estabilidad de los taludes, se obtienen cuando el precorte

se perfora inclinado. Estas inclinaciones fluctúan en el rango de 15 a 30 grados, siendo mejores los resultados a medida que se utiliza una mayor inclinación, aumentando ciertamente la dificultad en la perforación.

De acuerdo a los planos y parámetros de construcción se obtuvo una inclinación de 26,57 grados como se muestra a continuación.

$$\alpha_{talud} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{2}\right) \quad (\text{Ecu. 30})$$

$$\alpha_{talud} = 26,57^\circ$$

Para controlar la inclinación de los taladros se utilizaron reglas llamadas en clinómetros, los cuales se colocaron en las torres de perforación en donde se encuentran los barrenos de 3 metros de longitud.

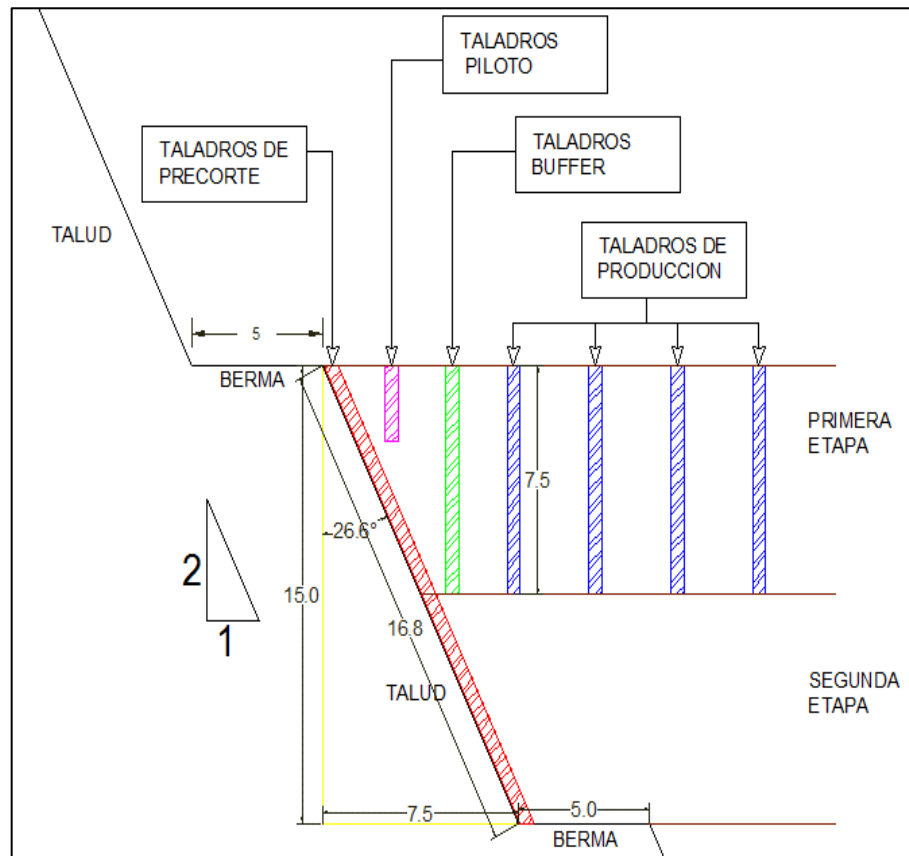


Figura 12. Inclinación de los taladros de precorte

Fuente: Elaboración propia

La importancia de la exactitud de la perforación puede no ser considerada cuando se diseña un precorte, pero ésta tiene una gran relevancia debido al paralelismo que debe existir entre pozos, ya que de lo contrario, puede ser la causa de perfiles irregulares.

### 3.3.20 Altura de perforación

La altura de perforación en los taladros de precorte será de 16,80 metros, este valor se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\cos \alpha = \frac{H_{\text{banqueta}}}{H_{\text{perforación}}} \quad (\text{Ecu. 31})$$

$$\cos 26,60 = \frac{15}{H_{\text{perforación}}}$$

$$H_{\text{perforación}} = 16,8 \text{ m}$$

La perforación de los taladros de precorte se realizó en una sola etapa, esto debido a la dificultad que generaría realizar la continuación de la perforación en la segunda etapa de trabajos, ya que por banqueta se realizarán dos etapas de trabajos de perforación y voladura.

### **3.3.21 Sobre perforación**

La sobre perforación en los taladros de precorte será de cero, para no dañar las banquetas de los taludes.

### **3.3.22 Burden para taladros de precorte**

La relación de espaciamiento a burden es inversa a la normal; es decir que el espaciamiento es menor que el burden, para el presente caso el burden está definido a partir de los taladros de precorte hasta los taladros piloto, esta distancia es de dos metros.

$$B_{\text{precorte}} = 2 \text{ m}$$

### **3.3.23 Espaciamiento para taladros de precorte**

A diferencia de los taladros de voladura normal, los de voladura controlada deben espaciarse de tal modo, que las fracturas creadas se dirijan a los puntos de menor resistencia, es decir de taladro a taladro, alineándose para

formar un plano de corte, con lo que se disminuye o elimina la formación de fracturas radiales.

El espaciamiento entre los pozos del precorte se reduce, si se compara con el espaciamiento en una fila amortiguada. Esta disminución de espaciamiento se aplica principalmente para que exista una interacción entre pozos, debido a que a éstos se les ha reducido la carga considerablemente con el objeto de generar bajas presiones en sus paredes. La fórmula general que se utiliza y aplica para el cálculo de espaciamiento es la siguiente:

$$S = D_h * \frac{(P_b + T)}{T} \quad (\text{Ecu. 32})$$

Para hallar el espaciamiento entre los taladros de precorte se necesitará la resistencia a la tracción y la resistencia a la compresión de la roca caliza, dichos valores fueron obtenidos de tablas petrográficas.

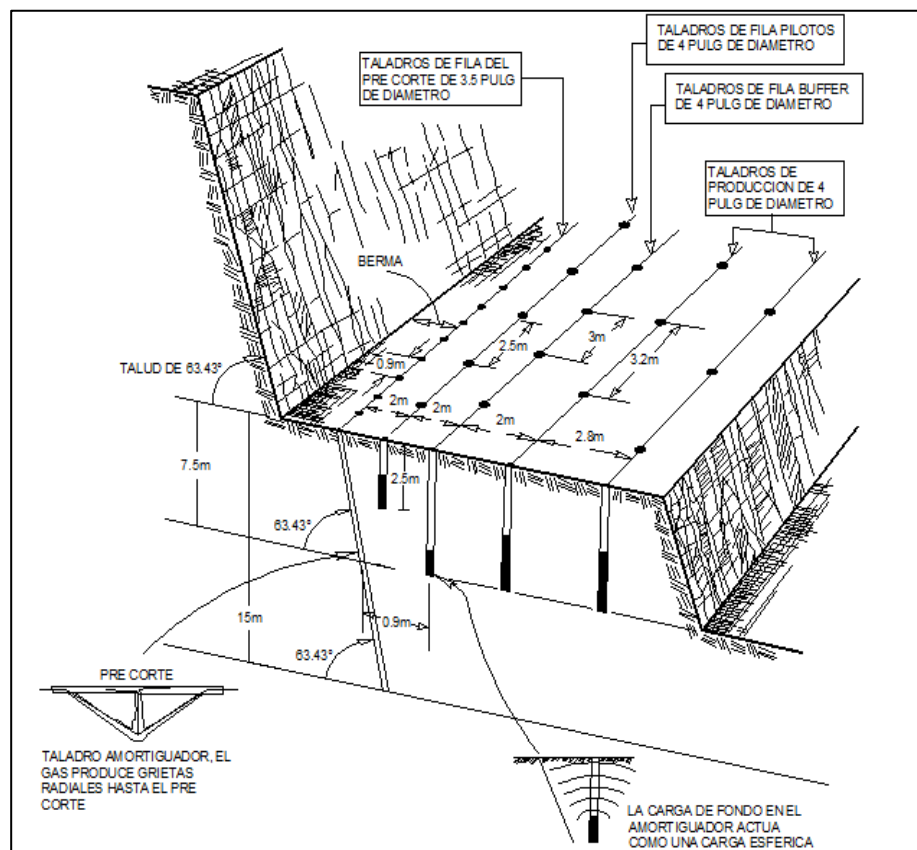


Figura 13. Diseño general de la malla de perforación

Fuente: Konya, J. (1 998)

### 3.4 Diseño de carga

#### 3.4.1 Carguío de taladros de producción

Los taladros de producción fueron cargados con material explosivo, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Se deben disminuir las vibraciones, que son producidas durante las voladuras para no afectar a las viviendas de adobe y quincha de los pobladores.
- Se deben disminuir los ruidos que son producidos durante las voladuras.
- Se deben evitar los fly rocks debido a la presencia de viviendas dentro del radio de influencia de la voladura.
- Se deben obtener una fragmentación adecuada para no generar problemas a los equipos de movimiento de tierras que realizan la limpieza del área volada.
- Los taladros de producción que se encuentran en los contornos se les reducirá el factor de carga ( $\text{kg/m}^3$ ), debido a que presentan un alto riesgo al momento de la voladura, esto se debe a su cercanía a la cresta o cara libre del talud.
- En épocas de lluvia y por presencia de aguas subterráneas, se trabajó con explosivos que son adecuados para estas condiciones.
- La primera voladura que se realizó se trabajó con un factor de carga de  $0,22 \text{ kg/m}^3$ , debido a las consideraciones mencionadas anteriormente, pero los

resultados no fueron los esperados, por lo cual en las próximas voladuras se incrementa el factor de carga a 0,25 – 0,28 y por último a 0,30 kg/m<sup>3</sup> el cual muestra mejores resultados en cuanto a la fragmentación y controlando los riesgos como los fly rocks, vibraciones, ruidos, etc.

- Para los taladros de producción de contorno se trabajó con un factor de carga de 0,26 kg/m<sup>3</sup>, para evitar los fly rocks debido a la cercanía de la cara libre del talud.

Por lo tanto, con los siguientes datos se tiene los siguientes cuadros y gráficos que muestran los parámetros de carguío de los taladros de producción:

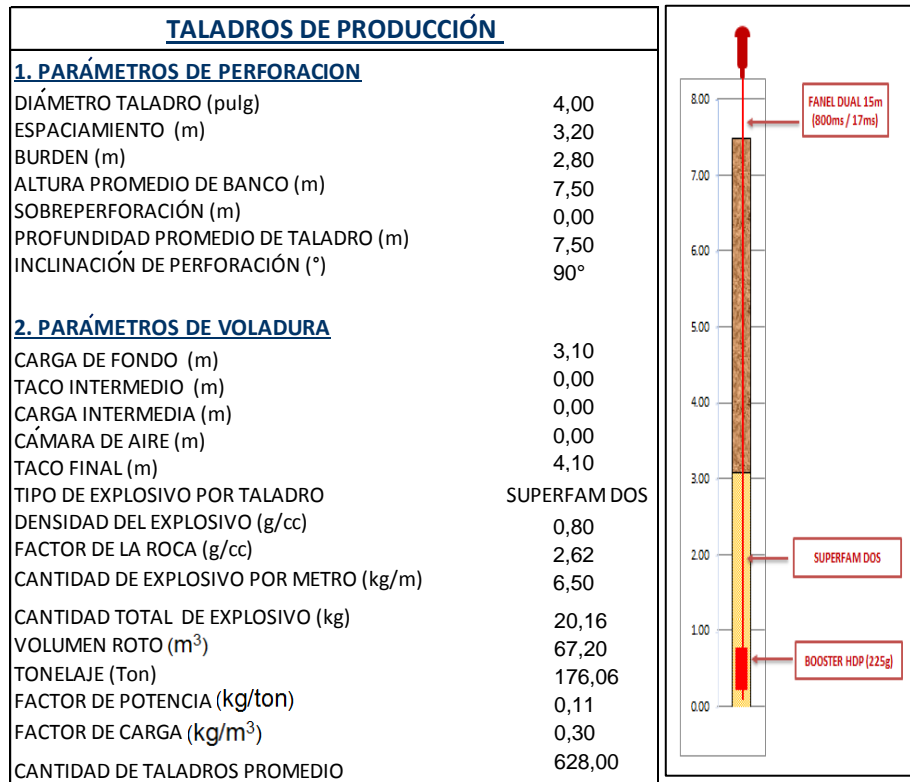


Figura 14. Parámetros de carguío taladros de producción

Fuente: Elaboración propia.



Figura 15. Imagen de la Comunidad de San Juan de Milpo

Fuente: Elaboración propia.



Figura 16. Imagen de voladura con factor  $0,22 \text{ kg / m}^3$

Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Imagen de voladura con factor  $0,30 \text{ kg / m}^3$

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2 Taladros de buffer

Los taladros de buffer fueron cargados con material explosivo, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Los taladros buffer tienen por finalidad amortiguar la acción de la onda de compresión proveniente de los taladros de producción en la pared del banco.
- En la primera voladura se trabajó con un factor de carga de  $0,15 \text{ kg/m}^3$ , y los resultados no fueron los esperados, debido a que la fragmentación no fue lo planeado, el talud no fue afectado por las ondas de compresión provenientes de los taladros de producción.
- Para las siguientes voladuras se incrementó el factor de carga de  $0,18 \text{ kg/m}^3$  a  $0,20 \text{ kg/m}^3$ , en donde se observó excelentes resultados en cuando a fragmentación de roca y control en la estabilidad de taludes.
- En el diseño de los taladros buffer se aplicó cámara de aire con la finalidad de reducir las ondas de compresión para no afectar los taladros de precorte y el objetivo

solo es fragmentar la roca de la circunferencia de los taladros buffer.

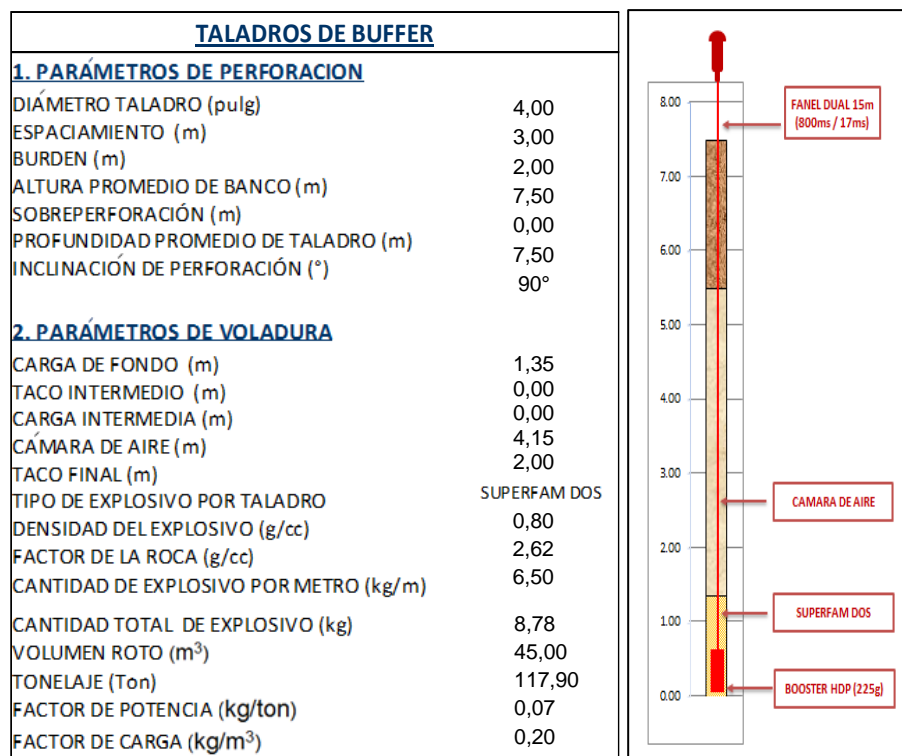


Figura 18. Parámetros de carguío del taladro de buffer

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.3 Taladros piloto

Los taladros piloto fueron diseñados con el objetivo de fragmentar la roca que se encuentra entre los taladros piloto y taladros buffer, esta zona se encuentra en la parte

superior de dichos taladros donde las ondas de compresión y los gases del explosivo no llegan en un cien por ciento.

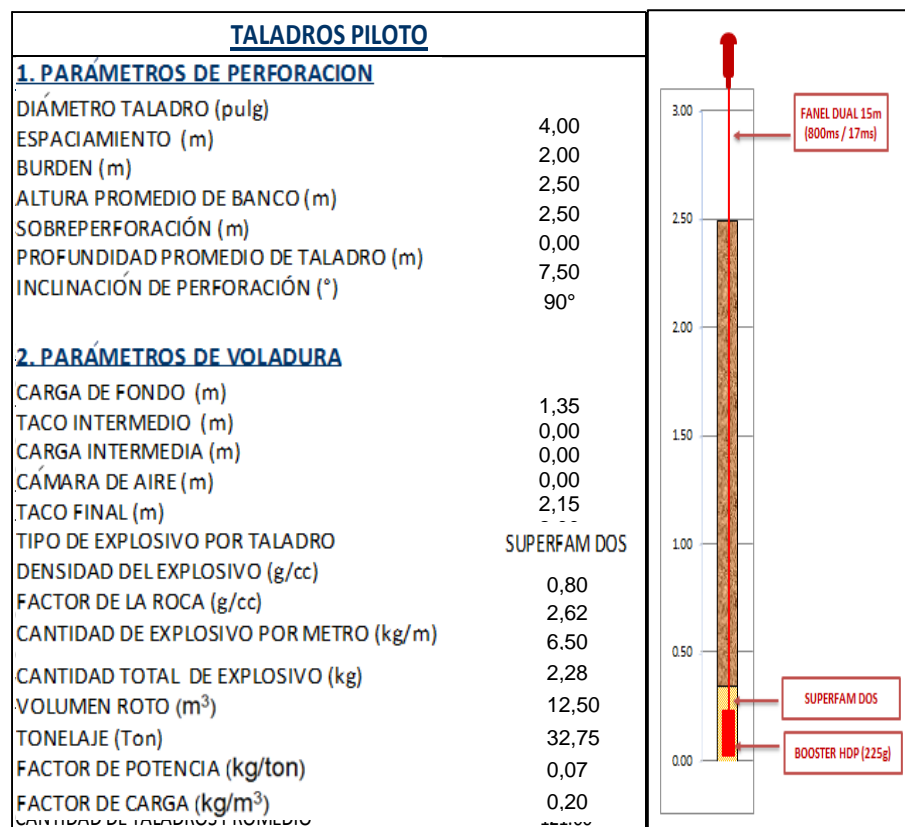


Figura 19. Parámetros de carguío del taladro piloto

Fuente: Elaboración propia

Los taladros fueron cargados con un factor de carga mínimo para no afectar la pared final del talud, este factor de carga en el inicio del proyecto fue de  $0,15 \text{ kg/m}^3$ , pero para mejorar la fragmentación de la roca se tuvo que incrementar el factor de carga a  $0,20 \text{ kg/m}^3$ , el cual dio resultados buenos en la fragmentación y estabilidad del talud del banco.

#### **3.4.4 Taladros de precorte**

El objetivo es controlar los efectos de una voladura y minimizar los daños en las paredes finales, conservando la calidad de la estructura rocosa. Se basa en el principio de producir una falla de tensión a lo largo de la fila de taladros de contorno, tratando de evitar que la roca se rompa por compresión, es decir, la presión generada por la expansión de gases dentro del taladro no debe sobrepasar la resistencia a la compresión de la roca.

La fractura generada permitirá la disipación de la onda de compresión y de los gases provenientes de los taladros de producción.

### **3.5 Diseño de voladura**

#### **3.5.1 Evaluación y elección del sistema de voladura**

Para seleccionar un sistema de voladura, el cual cumpla con todos los requerimientos exigidos para realizar las voladuras controladas, se evaluaron las condiciones del entorno del área de voladura y la proximidad que estas tienen a la población, por lo cual, las precauciones que se deben tener en cuenta son:

- Controlar las vibraciones.
- Controlar la proyección de rocas.
- Controlar el ruido.

Así como también se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Controlar la fragmentación.
- Control del perfil de la pila.
- Control del desplazamiento.
- Control del sobre quiebre y control del daño.

Una vez culminado con la evaluación se eligió los siguientes sistemas de voladura:

**a) Malla Triangular, Amarre en “V” y salida en “V”**

Este tipo de malla, amarre y salida se aplicó para las primeras voladuras y se caracterizó por los siguientes aspectos:

- El inicio de la voladura, como se observa en el gráfico, es a un costado, esto con el objetivo de no generar proyección de roca hacia la población.
- También se decidió iniciar a un costado con la finalidad de no afectar la pared final del talud, debido a la sumatoria de las fuerzas de compresión que van dirigidas hacia la parte posterior.

- Los taladros de precorte serán iniciados antes que el primer taladro de producción inicie.
- Estos taladros de precorte son iniciados con cordón detonante 5P, que se encuentran en las líneas descendentes y troncales.

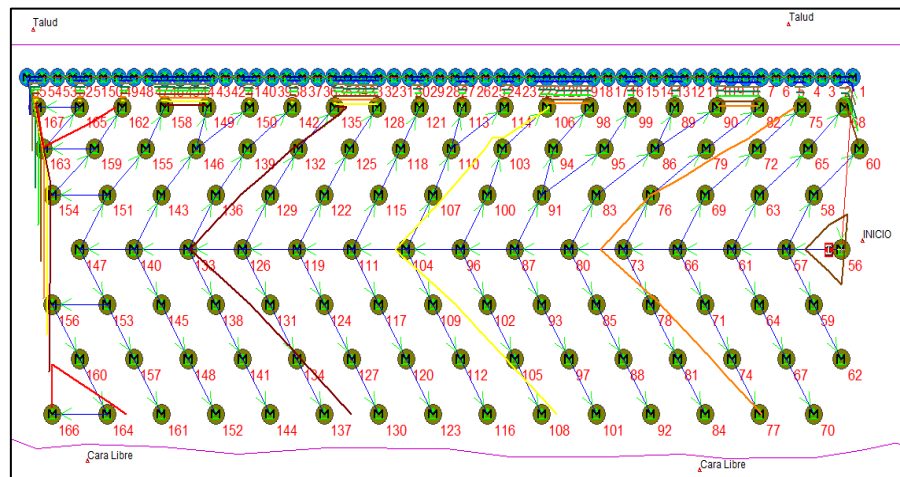


Figura 20. Secuencia de salida en “V” con amarre en “V”

Fuente: Elaboración propia

- Los taladros de producción, buffer y piloto serán iniciados con los faneles duales que tienen retardo de fondo de 800 ms y de superficie 17 ms.
- El amarre superficial será como se muestra en el siguiente gráfico.

- Como línea troncal se colocaron los faneles CTD de 42 ms.
- Se colocaron faneles CTD de 25 ms hacia uno de los costados para generar la diferenciación y así obtener una salida escalonada de los taladros.
- En los taladros de contorno se colocaron faneles CTD de 42 ms para no generar proyección de rocas.

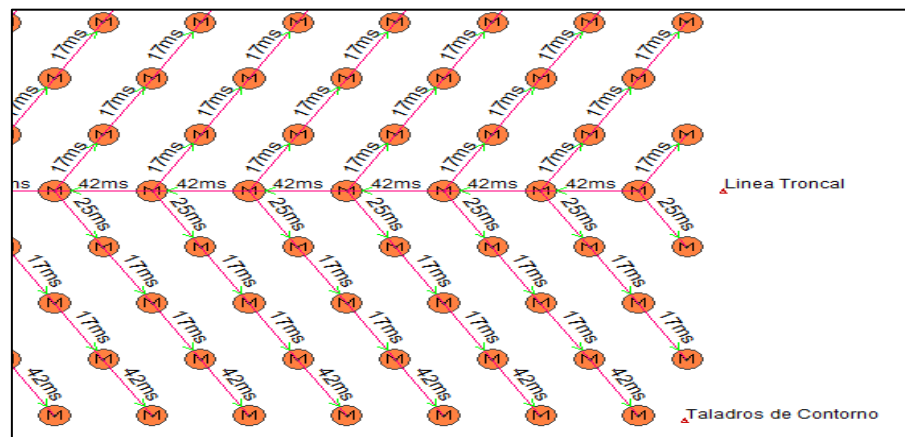


Figura 21. Diseño de amarre en "V"

Fuente: Elaboración propia

## b) Malla triangular, amarre diagonal y salida en “V”

Este tipo de amarre y salida es otra variante de las aplicadas en el proyecto, pero con la diferencia que se obtiene una salida en “V” más abierta.

También se tiene taladros de precorte y el inicio también se realiza en un costado y en los taladros de contorno también se coloca faneles CTD de 42 ms.

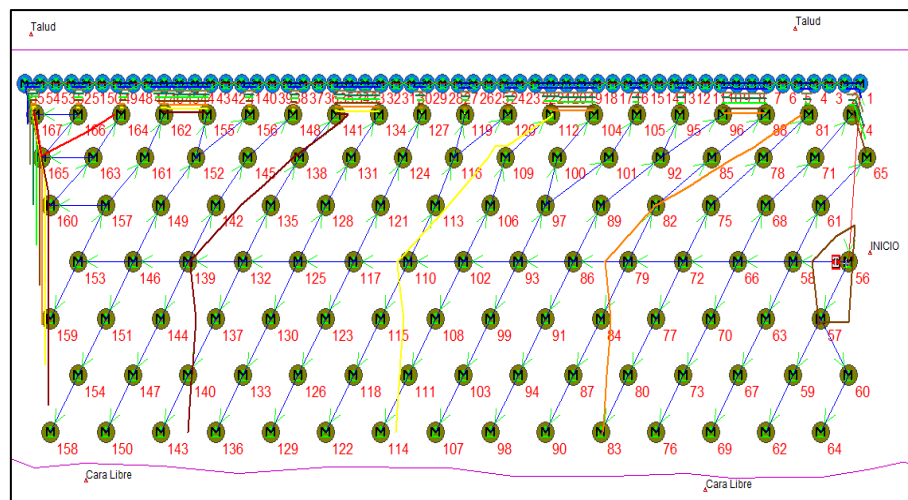


Figura 22. Secuencia de salida en “V” con amarre Diagonal

Fuente: Elaboración propia

### c) Malla triangular, amarre lineal y salida en “V”

Este tipo de amarre se utilizó en las banquetas 1; 2; 3 y 4 en donde las plataformas son más amplias y no se tiene taladros de precorte, y el inicio se realiza en la parte delantera del área de voladura debido a que la proyección no afectará a la población debido a la presencia de amplias plataformas de trabajo.

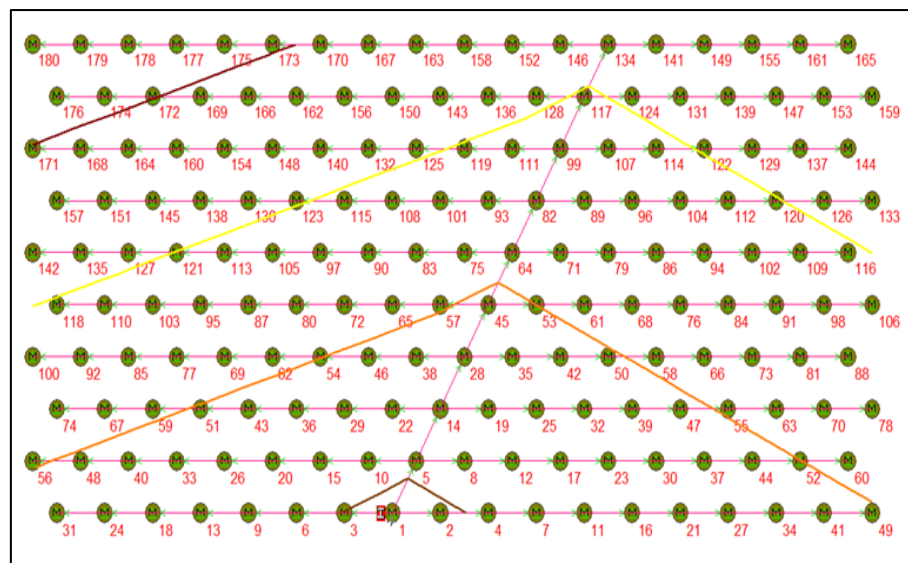


Figura 23. Diseño de amarre lineal con salida en “V”

Fuente: Elaboración propia

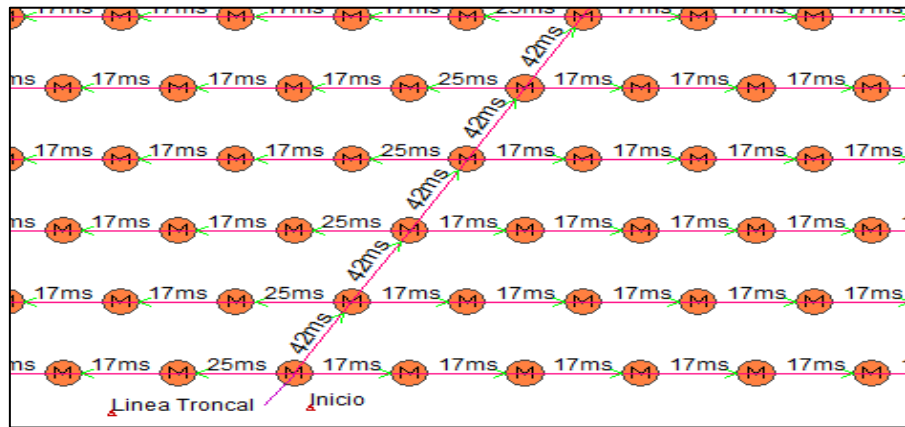


Figura 24. Diseño de amarre lineal

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 Simulación de voladura

El uso del Software JK Simblast es con el fin de optimizar la operación unitaria de perforación y voladura antes de su ejecución, mediante la simulación de la voladura.

Es un programa que permite simular y realizar un análisis básico de la voladura a partir del diseño previamente establecido de:

- La perforación de los taladros.
- La carga de explosivos.
- La distribución de los tacos.

- Los desfases de tiempo.
- Los retardos de fondo y superficie
- Conectores
- Primers (cebo), etc.

Para después ejecutar una simulación de la voladura y encontrar el performance ideal con la finalidad de calcular:

- Las secuencias de detonación.
- Los tiempos de detonación por cada taladro.
- El cálculo de la velocidad pico partícula (PPV) y Airblast.
- El factor de carga y energía en base al volumen definido y a los parámetros del diseño.
- El total de los componentes del diseño (contorno, cantidad, masa, costo, etc.).
- La predicción de la fragmentación.

A la vez era muy útil para poder evitar y corregir deficiencias que se pudieran dar en la voladura previamente diseñada como:

- Minimizar las vibraciones evitando que se acoplen varios taladros en un determinado tiempo, modificando los retardos de superficie y así evitar que varios taladros se inicien a la vez.
- Determinar si los retardos de fondo de los faneles excedían a los retardos de superficie originando el riesgo a tiros cortados.
- En los proyectos de voladura se realizaban disparos simultáneos en diferentes banquetas y mediante el software se determinaba la secuencia de salida de cada paquete de voladura.

En los siguientes gráficos se observará los resultados:

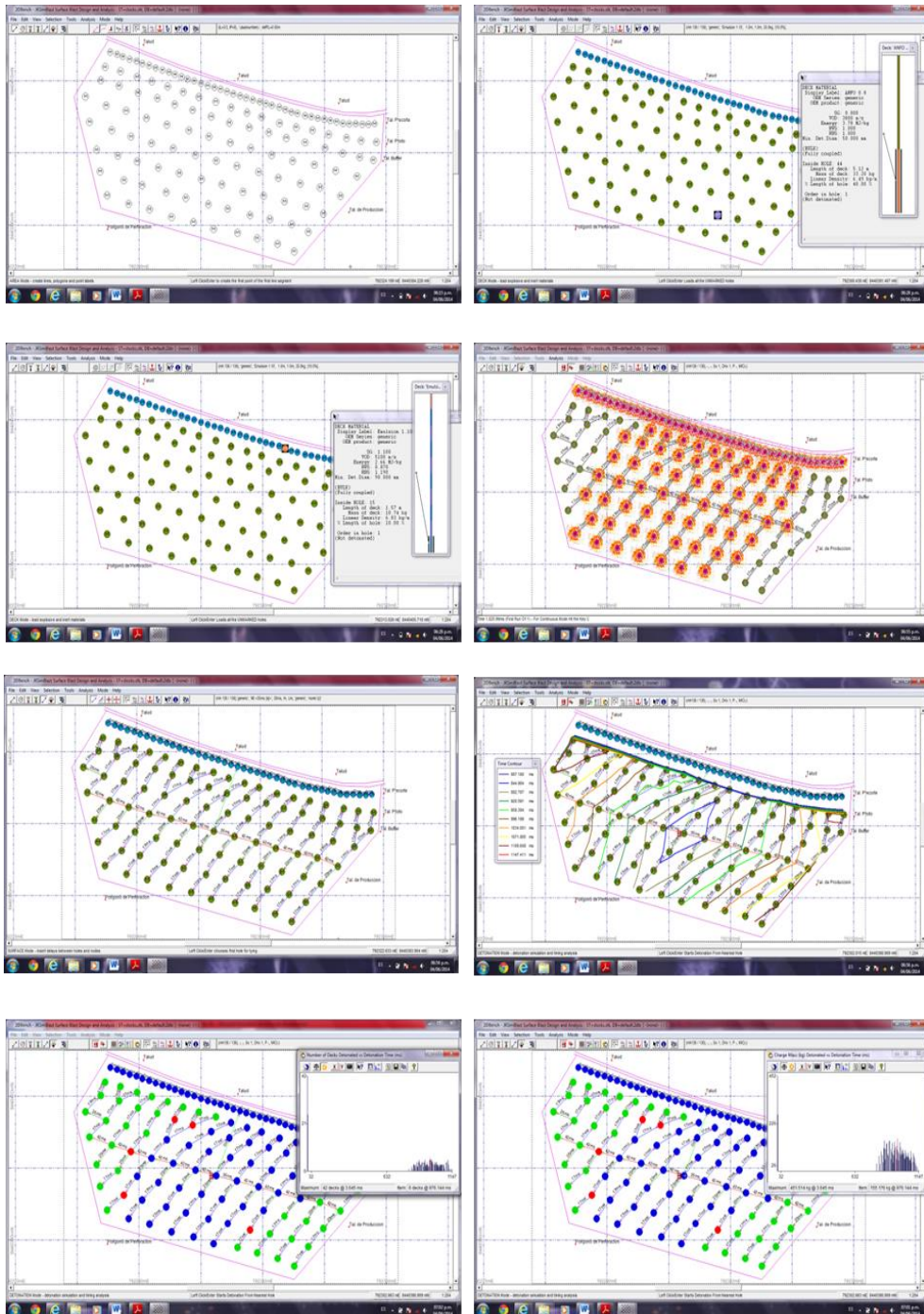


Figura 25. Simulación de voladura

Fuente: Elaboración propia.

### **3.7 Trabajo de campo**

Los límites permisibles para vibraciones son establecidos para que se puedan evitar los daños a las construcciones o efectos dañinos a la salud humana, producto de una operación minera.

En busca del cumplimiento de las diferentes normativas existentes, la empresa minera debe tener un programa de control y seguimiento de vibraciones. Antes de la aprobación de un proyecto, el proyectista debe entregar toda la información referente a los análisis realizados, con el objetivo de conocer con antelación los futuros niveles que podría traer las vibraciones sobre construcciones o molestias a los habitantes cercanos.

Entonces, en mira de una situación futura, estos cálculos se efectúan en base a modelos que representen las condiciones de propagación de ondas sísmicas en un macizo rocoso. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el terreno suele ser lo suficientemente heterogéneo como para no poder encontrar en dichos modelos, los cuales solo se basan en el comportamiento del macizo frente a las vibraciones de forma analítica, los resultados

más confiables; incluso si las características del terreno a analizar sean bastante similares a las ya analizadas.

### **3.7.1 Ubicación y posicionamiento de las pruebas**

Todas las pruebas realizadas para llevar a cabo este proyecto se efectuaron en el tajo “San Gerardo”, donde se realizaron diferentes pruebas sobre las vibraciones inducidas por la voladura.

### **3.7.2 Ubicación de los puntos de prueba**

Como se mencionó en la parte de metodología, los dos principales parámetros a ser tomados en cuenta fueron la distancia y la carga, por lo que, alternando ambos datos como punto de inicio se realizará 19 pruebas.

### 3.8 Instrumentación

Para la medición de vibraciones originadas por una voladura se utilizan diferentes tipos de sistemas, ya que existen diversos tipos de fenómenos vibratorios de muy distinto comportamiento. Dentro de los dispositivos más empleados por la industria minera están:

- Los medidores de desplazamiento: generalmente constituidos por galgas extensométricas. Este sistema se emplea en la medición de onda de choque muy cercana al taladro.
- Los medidores de velocidad de vibración: también conocidos como geófonos, son de tipo electrodinámicos. Estos sensores son los más extendidos en la medida de vibraciones en voladuras y además arrojan datos bastante confiables.
- Los medidores de aceleración: también reciben el nombre de acelerómetros. En voladura los más utilizados son los del tipo piezómetro. Se emplean para la medida de ondas de choque y también para medidas en estructuras.

### **3.8.1 Características del equipo utilizado**

Las mediciones de las diferentes variables fueron hechas utilizando el sismógrafo Mini mate Plus de la compañía InstanTEL, proporcionados por la empresa Pevoex Contratistas S.A.C.

Un sismógrafo es un instrumento que registra el movimiento del suelo causado por el paso de las ondas sísmicas. Los sismógrafos en minería están contruidos especialmente para realizar los estudios de vibraciones, producto de una voladura, y sobre todo, para poder establecer el cumplimiento con las normas y evaluar el desempeño de los explosivos.

Sus partes esenciales son el geófono, un amplificador y un registrador. Un geófono es el encargado de captar las vibraciones mecánicas y la transforma en corriente eléctrica, transmitida por cable al amplificador que a su vez registra en la memoria, para luego transmitir toda la data a

un microcomputador. Los datos resultantes son suministrados en términos de velocidad y frecuencia.

Las velocidades de la partícula son representadas por un vector de tres componentes, el cual tiene la dirección vertical, longitudinal y la transversal. La velocidad pico no se produce simultáneamente en las tres direcciones, de este modo, lo que debe ser medido, de acuerdo a las normas técnicas, es la velocidad resultante a cada intervalo de tiempo de tal manera que se pueda obtener la velocidad máxima.

Los sismógrafos utilizados constaban de un geófono, el cual media las vibraciones en el suelo; y el micrófono, encargado de medir las ondas aéreas que se generaban.

Las características de fabricación de los sismógrafos se pueden apreciar en la siguiente tabla, extraída del manual de dichos equipos.

**Tabla 21**  
**Parámetros del sismógrafo**

		Rango	Hasta 250 mm/s
Geófono Triaxial Estándar	Sísmica	Activación	0,125 a 254 mm/s
		Precisión	+/- 5% o 0,5 mm/s, cualquiera que sea mayor, entre 4 y 125 Hz
Sobre Presión de Aire	Acústica	Rango	88 al 148 dB
		Activación	100 a 148 dB
		Precisión	+/- 10% o +/- 1 dB, cualquiera que sea mayor, entre 4 y 125 Hz

Fuente: Manual Minimate Plus

### 3.8.2 Utilización del equipo de medición

Los sismógrafos se disponen en el lugar para registrar los niveles de vibraciones en el suelo; la exactitud, confiabilidad y consistencia de cada registro es esencial; y dependerá en su mayoría del manejo correcto del sismógrafo.

Antes de empezar con el monitoreo y registro de datos, fue necesario leer el manual que venía con el sismógrafo (MiniMate Plus Operator Manual, software Versión 10,72-8,17) y asegurarse que el equipo había sido calibrado según la fecha que le correspondía (anualmente).

Otro punto importante era el de almacenar ordenadamente todos los registros apropiados; desde la fecha, hora y lugar del evento, hasta las distancias horizontales, lo más precisas posibles, entre el punto de disparo y los equipos que realizaban la medición.

Es muy importante conocer la capacidad de memoria y registro del sismógrafo; como además, su nivel de activación por vibraciones en el suelo, el cual debe ser programado lo suficientemente bajo como para activar la unidad a causa de las vibraciones por la voladura y lo suficientemente alto como para minimizar la ocurrencia de falsos eventos.



Figura 26. Minimate Plus - Instantel

Fuente: Elaboración propia.

### **3.8.3 Ubicación y acoplamiento del equipo para las pruebas**

La ubicación y acoplamiento del sensor de vibraciones son los dos factores que deben considerarse con mayor importancia si se busca lograr registros exactos y fiables. Así se tiene:

- Ubicación del sensor, es preferible que el sensor sea enterrado y dirigido hacia la voladura; y que este se encuentre lo más nivelado posible. En el caso de que el geófono sea instalado cerca a alguna estructura, se debe mantener una distancia adecuada y ubicarlo en el suelo; ya que lo que se pretende es medir las vibraciones, producto de un disparo, en la roca y no la respuesta de la estructura.
- Acoplamiento del sensor, debido a que los niveles de aceleración podrían exceder lo previsto y causar el resbalamiento del sensor, ocasionando error en los datos registrados; es conveniente excavar un hoyo de aproximadamente tres veces la altura del sensor (ANSI

S2.47-1990, R1997) para luego clavar el geófono en el fondo, compactando firmemente el suelo.

### **3.9 Trabajo de gabinete**

Para poder seleccionar la data se basa en diferentes criterios:

- La hora de la voladura
- La gráfica
- Datos no relacionados

#### **3.9.1 Agrupación de datos importantes**

Una vez seleccionados los datos necesarios, se agruparon en una tabla, detallando cada uno de los parámetros influyentes y útiles para la elaboración del modelo predictivo, objetivo principal de este proyecto.

A continuación se muestra la tabla de los ensayos:

**Tabla 22**  
**Resumen de los diecinueve ensayos realizados**

<b>N°</b>	<b>Lugar</b>	<b>Fecha</b>	<b>Q (kg)</b>	<b>Dist. (D)</b>	<b>VPP (mm/s)</b>	<b>Frec. (Hz)</b>	<b>Mic (dB)</b>
1	Fase 0	10-ene-16	266,25	507,47	0,45	76	39,0
2	Fase 0	11-ene-16	87,50	496,25	1,03	100	58,5
3	Fase 0	13-ene-16	111,25	535,06	0,84	27	56,4
4	Fase 0	15-ene-16	42,50	617,96	0,13	20	30,3
5	Fase 0	18-ene-16	312,50	525,14	1,75	9,1	60,8
6	Fase 0	25-ene-16	310,00	514,16	1,08	37	60,6
7	Fase 0	07-feb-16	163,75	488,1	0,24	30	47,7
8	Fase 0	09-mar-16	141,25	497,68	0,18	100	33,6
9	Fase 0	10-mar-16	18,75	475,94	0,93	10	65,3
10	Fase 0	17-mar-16	210,00	494,23	0,90	24	49,98
11	Fase 0	21-mar-16	60,00	559,59	0,07	73	27,06
12	Fase 0	04-abr-16	472,50	529,18	1,14	17	51,2
13	Fase 0	22-abr-16	358,75	518,31	1,02	7,4	49,98
14	Fase 0	30-abr-16	278,75	604,48	0,54	7,4	45,12
15	Fase 0	06-may-16	141,25	597,45	0,11	7,4	30,58
16	Fase 0	13-may-16	535,40	524,27	0,07	7,3	24,56
17	Fase 0	14-may-16	568,30	588,58	0,08	7,3	24,56
18	Fase 0	14-jun-16	720,90	416,04	0,77	4,7	47,27
19	Fase 0	25-jun-16	385,90	502,84	0,85	8,8	117,5

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El principal objetivo del presente proyecto es realizar el estudio de vibraciones generadas por la voladura, a partir de información real que fue tomada directamente en campo. Este capítulo se enfocará al análisis de dicha información y la generación de un modelo que determine la velocidad pico partícula del área en estudio.

La capacidad de una onda para generar daño a una estructura se debe a dos variables críticas: la velocidad pico partícula y la frecuencia. Como resultado, instituciones como el Bureau of Mines de los Estados Unidos han realizado un gran número de estudios para poder controlar los efectos negativos de las vibraciones. Uno de dichos estudios derivó en la creación de un cuadro de control de vibraciones. Lamentablemente, la gráfica no predice el comportamiento de una onda, solo es una herramienta de gestión que permite monitorear las vibraciones para que estas se encuentren en valores aceptados y libres de riesgo. Sin embargo, otros estudios realizados crearon modelos orientados a predecir

el comportamiento de una onda para condiciones específicas y estándares. A pesar de los resultados aceptables que se puedan obtener, se aconseja desarrollar un modelo a partir de información real de campo para los diferentes casos en estudio.

Por estos motivos, se considera que la generación de un modelo predictivo únicamente aplicable para el Tajo San Gerardo puede resultar un tema importante para las operaciones de perforación y voladura.

#### **4.1 Análisis de la información**

##### **4.1.1 Velocidad pico partícula y frecuencia**

Al considerar ambas variables determinantes para el desarrollo del presente estudio, es importante comprobar la posible correlación que pueda existir entre ellas. Para el presente análisis se utilizará dos herramientas estadísticas.

La primera herramienta es el “diagrama de correlación”, la cual consiste en graficar una nube de puntos en un sistema de pares coordenados, en el cual los ejes de las abscisas y

ordenadas son los dos parámetros en estudio. Además, se puede aproximar una recta que permitirá determinar la correlación de las variables en forma gráfica.

Los valores se toman de los reportes que emiten el sismógrafo Minimate Plus con ayuda del Software Blastware el cual se verá a continuación:

Para mejor visualización de los reportes de vibraciones ver el Anexo N°01.

En general, la correlación de las dos variables de la gráfica está muy lejos de ser perfecta (es decir, 1:1), sin embargo, se puede observar una tendencia de proporcionalidad entre la frecuencia y la velocidad pico partícula.

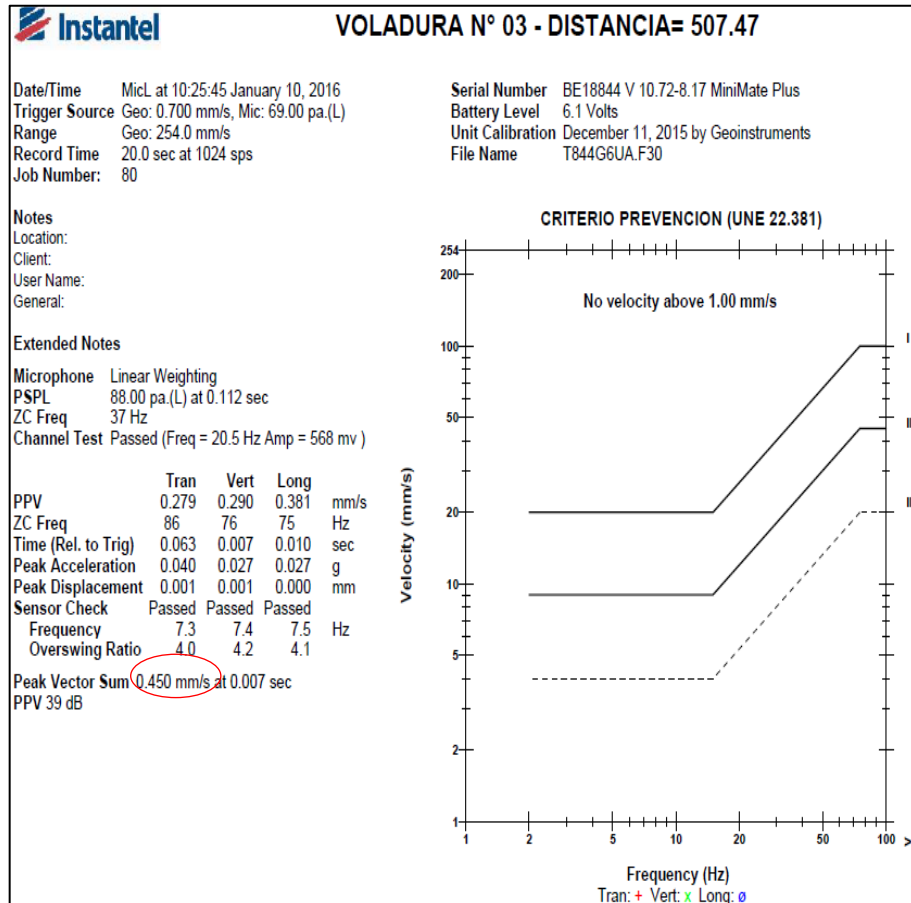


Figura 27: Reporte de vibraciones

Fuente: Blastware

El siguiente gráfico muestra el diagrama de correlación de la PPV vs Frecuencia que se obtuvo con los datos registrados de campo, y una recta cuya correlación es 1:1.

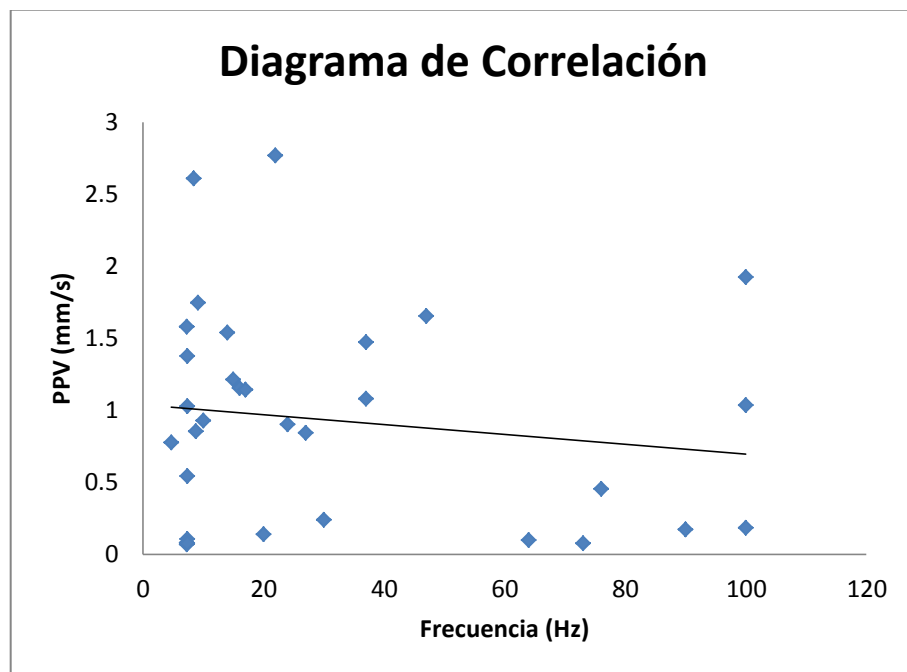


Figura 28: Correlación de la PPV vs Hz

Fuente: Elaboración propia

La segunda herramienta estadística es numérica, y se denomina coeficiente de correlación. Dicha herramienta se define como la razón entre la covarianza de las dos variables en estudio (a y b) y el producto de la desviación estándar de la variable a y la desviación estándar de la variable b.

## 4.2 Generación del modelo

Cuando se utilizan cargas explosivas cilíndricas, como es el caso del presente trabajo; se ha visto por análisis dimensional que las distancias deben ser corregidas dividiéndolas por la raíz cuadrada de la carga.

$$PPV = K \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-b} \quad (\text{Ecu. 33})$$

$$\text{Distancia Escalada (Ds)} = \frac{D}{\sqrt{Q}} \quad (\text{Ecu. 7})$$

Donde:

- D = Distancia entre la explosión y el sitio de control (m)
- Q = Cantidad de explosivo detonado por intervalo (kg)
- K, b = propiedades estructurales y elásticas del macizo rocoso (adimensional)

Esta relación se conoce como la “Ley de Propagación” ya que muestra cómo cambia la velocidad de partícula (VPP) con la distancia (D) y la cantidad de carga de explosivo (Q).

#### **4.2.1 Creación del modelo**

Una vez definida la distancia escalada y su relación con la velocidad pico partícula se procede a generar el modelo predictivo. Para ello se debe transformar los datos de carga explosiva y distancia a una sola variable. La tabla que a continuación se presenta muestra los valores de la velocidad pico partícula y la distancia escalada para las diecinueve muestras realizadas.

Ver Anexo N° 1: Reporte de vibraciones y ver Anexo N° 2: Cuadro Resumen de los ensayos realizados.

Una vez calculada la distancia escalada, se procede a plasmar dicha información en una gráfica en donde el eje vertical es la variable dependiente (PPV) y el eje horizontal es la independiente (Ds). Para esto se comienza a discriminar ciertos datos que se consideran como error por estar fuera de los rangos mayoritarios. Como se puede apreciar de la gráfica, la mayoría de pares coordenados están dentro de una tendencia.

**Tabla 23**  
**Relación de datos registrados**

Pruebas N°	VPP Pico (mm/s)	DS (m/Kg <sup>1/2</sup> )
1	0,45	31,10
2	1,032	53,05
3	0,842	50,73
4	0,136	94,79
5	1,746	29,71
6	1,078	29,20
7	0,236	38,14
8	0,18	41,88
9	0,925	109,91
10	0,898	34,11
11	0,073	72,24
12	1,14	24,34
13	1,024	27,36
14	0,539	36,21
15	0,105	50,27
16	0,065	22,66
17	0,079	24,69
18	0,773	15,50
19	0,852	25,60

Fuente: Elaboración propia.

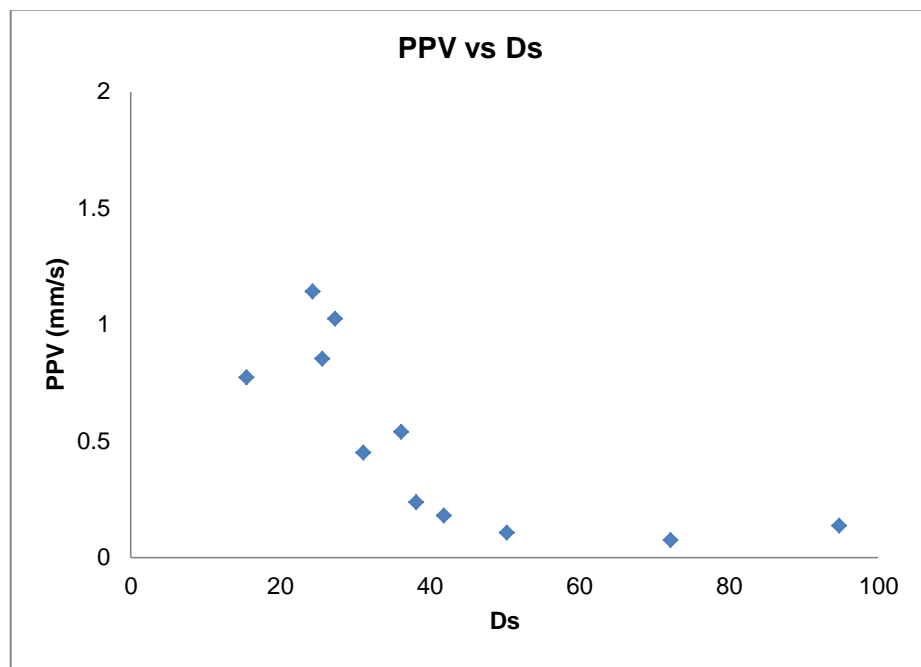


Figura 29: Datos de Campo PPV vs Distancia Escalada

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de las constantes a y b, es necesario hacer una regresión no lineal y se procede a realizar en el programa Microsoft Excel.

Datos:

1. Velocidad Pico Partícula (VPP = Y), variable dependiente
2. Distancia Escalada (Ds = X), variable independiente
3. Modelo de Ecuación Potencial:

**Tabla 24**  
**Aplicando el método de Mínimos Cuadrados:**

Nº	X	Y	X'=logX	Y'=logY	X'Y'	X' <sup>2</sup>	Y' <sup>2</sup>
1	31,10	0,45	1,49	-0,35	-0,52	2,23	0,12
2	94,79	0,14	1,98	-0,87	-1,71	3,91	0,75
3	38,14	0,24	1,58	-0,63	-0,99	2,50	0,39
4	41,88	0,18	1,62	-0,74	-1,21	2,63	0,55
5	72,24	0,07	1,86	-1,14	-2,11	3,46	1,29
6	24,34	1,14	1,39	0,06	0,08	1,92	0,00
7	27,36	1,02	1,44	0,01	0,01	2,07	0,00
8	36,21	0,54	1,56	-0,27	-0,42	2,43	0,07
9	50,27	0,11	1,70	-0,98	-1,67	2,89	0,96
10	15,50	0,77	1,19	-0,11	-0,13	1,42	0,01
11	25,60	0,85	1,41	-0,07	-0,10	1,98	0,00
$\Sigma$	457,43	5,51	17,21	-5,08	-8,76	27,43	4,16
<b>Prom</b>	41,58	0,50	1,56	-0,46	-0,80	2,49	0,38

Fuente: Elaboración Propia.

$$Y = AX^B \quad (\text{Ecu. 34})$$

Aplicando logaritmo en base 10 en la ecuación anterior se tiene la siguiente expresión:

$$\text{Log}Y = \text{Log}AX^B$$

$$\text{Log}Y = \text{Log}A + \text{Log}X^B$$

$$\text{Log}Y = \text{Log}A + B\text{Log}X$$

Convirtiendo la expresión en una ecuación lineal:

$$\text{Log}Y = Y'$$

$$\text{Log}A = A'$$

$$\text{Log}X = X'$$

Se obtiene la siguiente expresión:

$$Y' = A' + BX' \quad (\text{Ecu. 35})$$

$$B = \frac{n(\sum X'Y') - (\sum X')(\sum Y')}{n\sum X'^2 - (\sum X')^2} \quad (\text{Ecu. 36})$$

$$B = -1,63$$

$$A' = \bar{Y}' - BX' \quad (\text{Ecu. 37})$$

$$A' = 2,08 = \text{Log}A$$

$$A = 10^{2,08} = 12,69$$

Por lo tanto, la ecuación potencial se expresaría de la siguiente manera:

$$Y = 122,7X^{-1,63} \quad (\text{Ecu. 38})$$

Se calculará el Coeficiente de Correlación:

$$r = \frac{n(\sum X'Y') - (\sum X')(\sum Y')}{\sqrt{(n\sum X'^2)(n\sum Y'^2 - (\sum Y')^2)}} \quad (\text{Ecu.39})$$

$$r = -0,85 = 85\%$$

Se calculará el Coeficiente de Determinación:

$$r^2 = -0,85 = 0,73 \quad (\text{Ecu. 40})$$

$$r^2 = 73 \%$$

Encontrando las constantes:

**Tabla 25**  
**Valor de constantes K y b**

<b>K</b>	122,7
<b>b</b>	-1,63

Fuente: Elaboración propia.

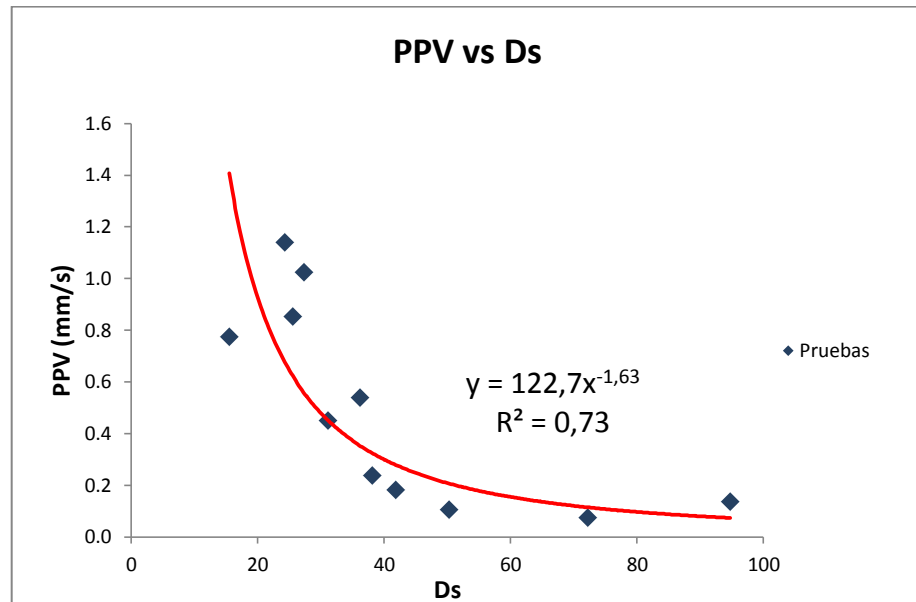


Figura 30: Modelo de vibraciones

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el modelo para el lugar de pruebas se define como:

$$PPV = 122,7 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,63} \quad (\text{Ecu. 41})$$

La gráfica de dicha ecuación junto con las pares coordenadas de las pruebas se muestra en la siguiente gráfica.

#### 4.2.2 Comparación del modelo con los modelos australianos de Orihuela y Dapello, 2009

Modelos recomendados como una guía conservadora; en las cuales se han asignado un valor a las constantes K y b, tratando de esta manera generalizarlas de acuerdo a ciertas propiedades del terreno y al tipo de voladura.

Así se tiene:

- **Modelo A:** Para voladura donde existe una cara libre y el tipo de roca se encuentra entre dura y altamente estructurada. (RMR\* entre 21 – 40, Clasificación de roca: IV)

$$PPV = 500 \times \left( \frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^{1,6} \quad (\text{Ecu. 35})$$

- **Modelo B:** Para voladuras donde existe una cara libre y la roca tiene una dureza promedio. (RMR\* entre 41 – 60, Clasificación de roca: III)

$$PPV = 1\,140 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D}\right)^{1,6} \quad (\text{Ecu. 36})$$

- **Modelo C:** Para voladuras donde las cargas se encuentren totalmente confinadas.

$$PPV = 5\,000 \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D}\right)^{1,6} \quad (\text{Ecu. 37})$$

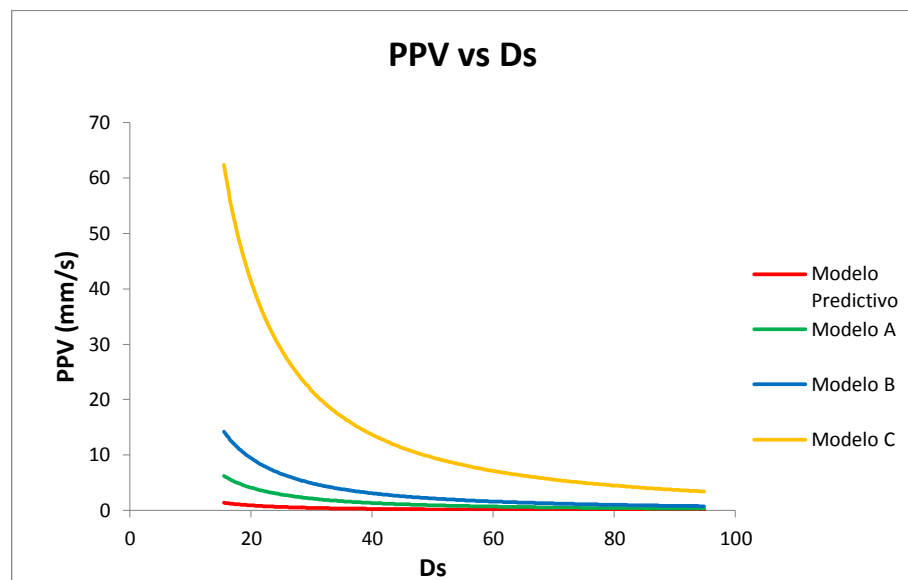


Figura 31: Comparación de modelos

Fuente: Elaboración propia.

Ver Anexo N° 3: Tabla de clasificación del macizo rocoso.

Lo primero que se observa es que el modelo calculado se asemeja más al modelo A, mientras que este es muy diferente del modelo C. Estas semejanzas y diferencias se deben a las condiciones de la voladura, que traen como consecuencia una distribución de la energía del explosivo diferente para cada caso en particular.

Se concluye entonces que el modelo predictivo se asemeja mucho al modelo "A", y por ende, es muy diferente al modelo "B y C". Ello por dos motivos. El primero es la condición en la cual se realiza la detonación. A pesar que son situaciones muy diferentes, en cuanto al confinamiento del explosivo, la forma en la que la energía que se distribuye para una misma Distancia Escalada, las VPP del modelo predictivo y del modelo "A", representado en sus RMR (para el modelo está entre 21 y 40, Clasificación de Roca: IV). Es por la combinación de ambas que las constantes  $k$  y  $b$  del modelo predictivo y del modelo "A" son tan parecidas y a comparación del modelo predictivo por Orihuela y Dapello, 2009, donde su modelo se asemeja al

modelo "B", representando en sus RMR (41-60, Clasificación de roca: III)

#### 4.2.3 Comparación del modelo Predictivo con el modelo Colque

El método más eficaz para validar un modelo de regresión con respecto a su eficiencia de predicción es reunir datos y comparar en forma directa las predicciones del modelo con esos datos. Si el modelo produce predicciones exactas para nuevos datos, el usuario tendrá más confianza tanto en el modelo como en el proceso de su obtención. A veces, a esas nuevas observaciones se les llama corridas de confirmación.

A continuación se aplica el modelo Colque de acuerdo a nuestros antecedentes por Anicama A. 2010 y el modelo Predictivo realizado en el tajo San Gerardo.

#### Modelo Predictivo

$$PPV = 122,7 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,63} \quad (\text{Ecu. 38})$$

### Modelo Colque

$$PPV = 0,27 \times K \times \left(\frac{\sqrt{Q}}{D}\right)^b \quad (\text{Ecu. 39})$$

**Tabla 26**  
**PPV del geófono, modelo predictivo y Colque**

Pruebas N°	VPP Geófono (mm/s)	VPP Modelo Predictivo (mm/s)	VPP Modelo Colque (mm/s)
1	0,450	0,453	0,257
2	0,136	0,074	0,060
3	0,236	0,324	0,197
4	0,180	0,279	0,175
5	0,073	0,115	0,086
6	1,140	0,675	0,354
7	1,024	0,557	0,304
8	0,539	0,353	0,211
9	0,105	0,207	0,138
10	0,773	1,409	0,637
11	0,852	0,622	0,332
Media	0,501	0,461	0,250

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{Error del Modelo Predictivo} = \frac{(0,501 - 0,461)}{0,501} \times 100 = 8\%$$

$$\text{Error del Modelo Colque} = \frac{(0,501 - 0,250)}{0,501} \times 100 = 50\%$$

Con estos datos de vibraciones en el tajo San Gerardo y con los modelos de Colque y modelo Predictivo, se puede decir se obtiene menor error de estimación de la VPP por parte del modelo predictivo en el tajo San Gerardo, con esto se confirma que las constantes K y b del macizo rocoso son diferentes en cada zona de estudio y es necesario realizar un estudio de vibraciones con voladuras de pruebas para poder mitigar futuros daños que pudiesen ocasionar los efectos de las voladuras.

#### **4.2.4 Límites permisibles de vibraciones por voladura para casas de tierra apisonada**

Giraldo F. (2010) realiza su investigación dirigido a estimar daños a estructuras característicos a comunidades de zonas altas en el Perú, como se puede redactar a continuación:” Las casas del tipo Tierra (Adobe y Tapial).

Revisando la figura 21, se define que para no causar daños en un rango de frecuencias de 0 – 30 Hz se debe tener un 0,08 g de aceleración máxima, por lo que la velocidad pico

partícula sería de unos 4,16 mm/s promedio y menos que los 6,26 mm/s porque a ese nivel se tendría leve figuración de la casas o daño cosmético. Entonces, sacando un valor promedio entre ellos para saber el límite permisible de velocidad pico partícula para una aceleración de 1 – 30 Hz que son las frecuencias en los que se maneja las vibraciones en campo lejano, resulta la siguiente normativa. Entonces, el valor promedio entre esos valores es de 5,25 mm/s o 5,30 mm/s que será el límite admisible para el rango de 1 – 30 Hz.

Por lo tanto, en el presente caso las velocidades pico partículas no sobrepasan los 2 mm/s y con frecuencias de 5 – 30 Hz, por lo cual, demuestra la imposibilidad de daño a las viviendas por encontrarse por debajo del umbral de daño, por lo que se puede decir que se está fuera de cualquier daño a casas de tierras o de adobe.

### **4.3 Aplicación del modelo**

El modelo obtenido es una herramienta de gestión que permite predecir la velocidad pico partícula que se puede generar para

cualquier voladura en dicho lugar. Sabiendo la cantidad de explosivo que se usará y la distancia del sitio de pruebas a un punto cualquiera del terreno, se puede predecir la VPP en dicho punto simplemente haciendo uso del modelo predictivo a través de la gráfica o de la ecuación; pero también se puede predecir cualquiera de las variables independientes haciendo un uso inverso del modelo.

Para el área de pruebas del tajo San Gerardo se detectaron un lugar cercano donde había estructuras, las cuales estaban expuestas a las vibraciones. Estas son la comunidad de San Juan, donde sus viviendas están hechas de material noble.

Con la ayuda de una estación total se obtiene la distancia geográfica del pueblo hasta el tajo San Gerardo, de 650 metros.

Para el caso de esta aplicación, se usará los límites de la VPP establecidos por Giraldo F. 2010, para casas de tierra y adobe en Perú que son de 5,3 mm/s.

Se busca obtener el valor de Q para el caso de las viviendas, con la condición de que el VVP no sobrepase el límite permitido por el 5,3 mm/s, y utilizando como base la siguiente fórmula:

$$VPP = 122,7 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,63} \quad (\text{Ecu. 33})$$

Despejando Q, para los valores indicados en la tabla 26, de modo que, para llegar al límite máximo se debe detonar 8 943,54 kg de explosivo. Entre los valores de carga de explosivo, los cuales varían por el ajuste de las variables “k” y “b” para este terreno en particular.

**Tabla 27**  
**Cálculo de “Q”**

	VPP	K	D	b	Q
<b>Modelo Pr.</b>	5,30	122,70	650,00	1,63	<b>8 943,54</b>

Fuente: Elaboración propia

Trabajar con modelos ajustados a una realidad específica puede mejorar la calidad de un análisis de riesgo, minimizando el factor error, para proyectos que impliquen voladuras.

Ver Anexo N° 5: Plano de punto de monitoreo de vibraciones.

Este modelo estima cualquiera de las tres variables en juego y por ende se puede tomar cualquier medida antes de una prueba.

#### **4.3.1 Relación carga - distancia**

Utilizando la ley de atenuación al 73 % de fiabilidad, se obtiene los valores mostrados en la tabla 28 que relaciona el trío de las variables medidas (PPV, Q y D).

A partir de la asignación de valores progresivos para la distancia (D) y la carga (Q) se obtiene los valores de la velocidad pico partícula (PPV) que se muestra en la Tabla 27, donde se referencia tres colores colocando valores dentro de rangos de < 6,34 mm/s de color verde, < 117,68 mm/s de color amarillo y < 1 127,32 mm/s de color rojo.

**Tabla 28**  
**Cuadro comparativo de la PPV en función de la distancia y**  
**carga haciendo uso de la ley de atenuación al 73 % de**  
**fiabilidad.**

Distancia (m)	PPV (mm/s)								
	1 000	1,08	1,36	1,63	1,90	2,40	2,52	2,64	2,76
900	1,28	1,62	1,94	2,25	2,85	2,99	3,13	3,28	3,97
800	1,55	1,96	2,35	2,73	3,45	3,62	3,80	3,97	4,93
700	1,93	2,44	2,92	3,39	4,29	4,51	4,72	4,93	6,34
600	2,48	3,13	3,76	4,36	5,51	5,79	6,07	6,34	8,54
500	3,34	4,22	5,06	5,87	7,42	7,80	8,17	8,54	12,28
400	4,80	6,07	7,28	8,45	10,68	11,22	11,75	12,28	19,63
300	7,67	9,70	11,64	13,50	17,07	17,93	18,79	19,63	38,02
200	14,86	18,79	22,53	26,14	33,05	34,72	36,38	38,02	60,77
150	23,75	30,03	36,01	41,78	52,82	55,50	58,15	60,77	112,60
100	45,99	58,15	69,74	80,92	102,3	107,48	112,60	117,68	364,22
50	142,3	179,9	215,8	250,4	316,6	332,66	348,52	364,22	979,9
25	440,6	557,0	668,1	775,1	979,9	1	1	1	127,32
0	3 000	4 000	5 000	6 000	8 000	8 500	9 000	9 500	

**Carga Q (Kg)**

Fuente: Elaboración propia.

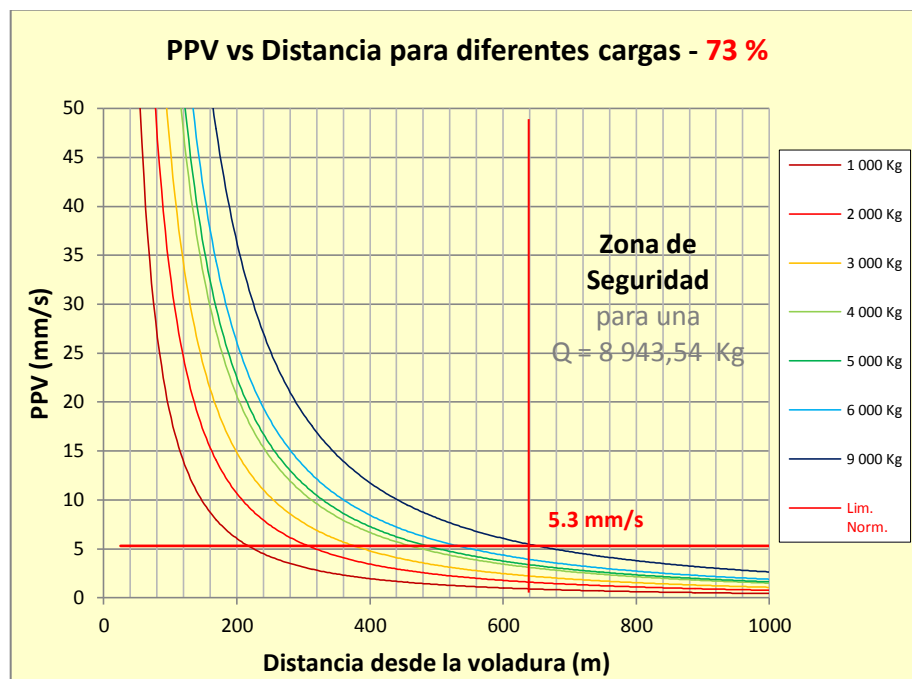


Figura 32: Representación gráfica de la PPV en función de la distancia (D), manteniendo constante la carga

Fuente: Elaboración propia.

A manera de ejemplo en la Figura 32, se puede apreciar un valor de 8 943,54 kg para la máxima carga instantánea (Q) produce una zona de seguridad a partir de los 650 metros, ello quiere decir que existe una mínima probabilidad de superar el límite establecido por la norma para casas de tierras en el Perú a distancias mayores de 650 metros con una carga de 8 943,54 kg.

## CONCLUSIONES

Se aplicó y se logró establecer una ecuación de comportamiento en función de la distancia y la carga operante, con la cual se estimó las vibraciones máximas para las voladuras, esto se pudo generar gracias a las regresiones que se hacen para hallar la PPV con una correlación de 73 % lo que indica que el modelo es fiable para realizar estimaciones de eventos de voladura.

Los valores de PPV obtenidos en las pruebas bajo las características y condiciones del terreno arrojaron como resultado  $k= 122,7$  y  $b=1,63$  que son diferentes a otros modelos comparados en el presente trabajo debido a la zona de estudio dando mayor error en el cálculo de la PPV.

El modelo es cercano a los obtenidos por las fórmulas teóricas australianas analizadas observándose mayor correlación con el modelo donde el parámetro  $K=500$ , que es cuando se trabaja en una roca con dureza promedio y con una cara libre (RMR\* entre 21-40, Clasificación de roca: IV)

El modelo permite predecir cualquiera de las siguientes variables en cuestión: distancia (D), carga (Q) y PPV; conociendo dos de ellas y basándose en el comportamiento de las ondas vibratorias generas por una voladura dentro del radio de influencia del tajo San Gerardo.

Sobre la base del modelo diseñado se puede concluir que toda prueba de voladura realizada en el tajo no generará vibraciones mayores al límite establecido para casa de tierras y adobe en Perú (5,3 mm/s) y por ende no significarán una amenaza a las estructuras que se encuentren a su alrededor.

## RECOMENDACIONES

El geófono debe colocarse en sitios adecuados para hacer mejor las mediciones de la PPV.

De acuerdo a nuestro objetivo del presente trabajo se puede ver que el límite máximo de carga de explosivo por taladro es de 8 943,54 kg, esto para que no sobrepasemos el límite máximo permisible.

Se debe tomar como base para futuras voladuras el modelo predictivo de vibraciones realizados en este proyecto, así como realizar mayores pruebas para aumentar la confiabilidad del modelo.

Los ingenieros especialistas en perforación y voladura de rocas deben estar muy bien capacitados y actualizados para que cuando realicen su trabajo traten de minimizar las excesivas vibraciones producidas por la detonación de las mezclas explosivas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anicama Lujan, Alberto. (2010). “Tesis de Monitoreo de los efectos de vibraciones producidas por la voladura de rocas el modelo de vibraciones colque”, Tesis para optar el Grado de Maestro en Ciencias de Ingeniería de Minas, Lima-Perú, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología 2010.

Agreda, Carlos. (2010). “Curso de Perforación y Voladura de Rocas”, Lima-Perú, 2010.

Dowding C. (2000). “Constructions Vibrations. USA; McCormick School of Engineering & Applied Science”.

Enaex, “Manual de Voladura” (Pág. 70,71).

Fuentes Fernández, Reynol Renzo. (2007). “Trabajo Informe Balanced Score Card Aplicado a la Optimización de Procesos en Mina, para optar el Título de Ingeniero de Minas, Tacna-Perú,

Universidad Jorge Basadre Grohmann, Facultad de Ingeniería de Minas.

Iriarte, Fernando, (2010). “Tesis de Control de vibraciones para casas de tierra en Perú”, Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, Lima-Perú, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología 2010.

Instantel (2014) “Minim ate Plus Software Manual. Software Version 10.72.”

Orihuela Castillo, Stefanie.y Dapello Vizcarra, José (2009). “Tesis Diseño de un modelo predictivo a partir de un estudio de vibraciones en una voladura en una Mina Modelo”, Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas, Lima-Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería 2009.

Pascual de Blas (2000). “Informe Problemática de las vibraciones en las voladuras, medición, control y regulación legal”, Madrid-Unión Española de Explosivos, S.A.

Konya C. (1998): “Diseño de Voladuras” (Pág. 95 - tabla 6.4).

López C. (1995). “Manual de Perforación y Voladura de rocas” (Pág. 269 - 278 – tabla 20.11)

Sanchidrián, J.Á., & Muñiz, E. (2000): “Curso de Tecnología de explosivos”, Madrid- Fundación Gómez Pardo.

Vásquez Sánchez, Ned, (2013). “Proyecto fin de carrera Predicción de la ley de atenuación, frecuencia dominante y espectro de respuesta en vibraciones producidas por voladura a cielo abierto”, Titulación: Ingeniería de Minas Plan: 1996.

## **ANEXOS**

**ANEXO N° 1**  
**REPORTE DE VIBRACIONES DE LOS DIECIOCHO ENSAYOS**  
**REALIZADOS**



# VOLADURA N° 03 - DISTANCIA= 507.47

**Date/Time** MicL at 10:25:45 January 10, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 69.00 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 20.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 80

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.1 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G6UA.F30

**Notes**

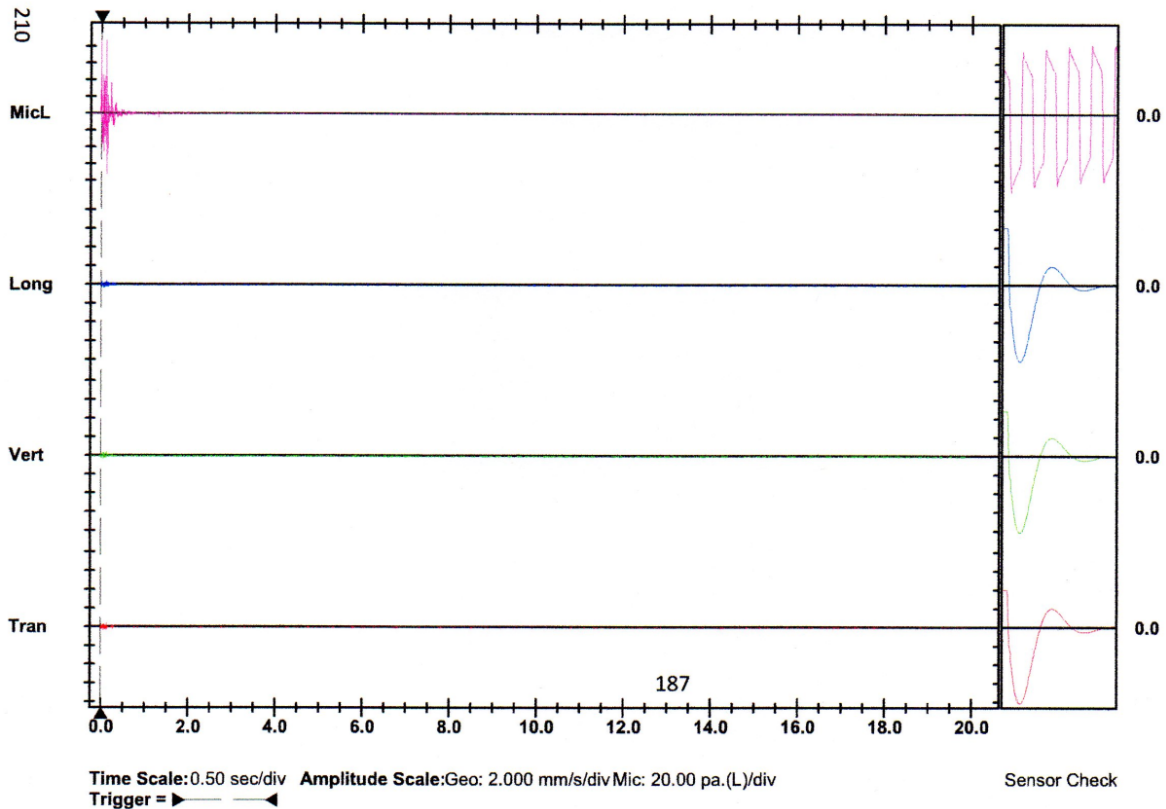
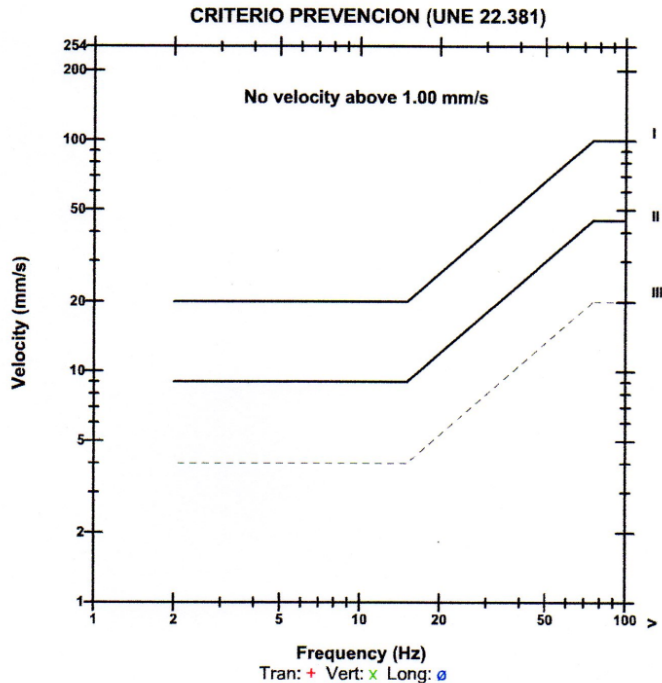
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 88.00 pa.(L) at 0.112 sec  
**ZC Freq** 37 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 568 mv )

	Tran	Vert	Long	
<b>PPV</b>	0.279	0.290	0.381	mm/s
<b>ZC Freq</b>	86	76	75	Hz
<b>Time (Rel. to Trig)</b>	0.063	0.007	0.010	sec
<b>Peak Acceleration</b>	0.040	0.027	0.027	g
<b>Peak Displacement</b>	0.001	0.001	0.000	mm
<b>Sensor Check</b>	Passed	Passed	Passed	
<b>Frequency</b>	7.3	7.4	7.5	Hz
<b>Overswing Ratio</b>	4.0	4.2	4.1	

**Peak Vector Sum** 0.450 mm/s at 0.007 sec  
**PPV** 39 dB





# VOLADURA N° 04 - DISTANCIA = 496.25 m

**Date/Time** Long at 10:11:59 January 11, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 69.00 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 20.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 80

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.2 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G6XY.ZZ0

### Notes

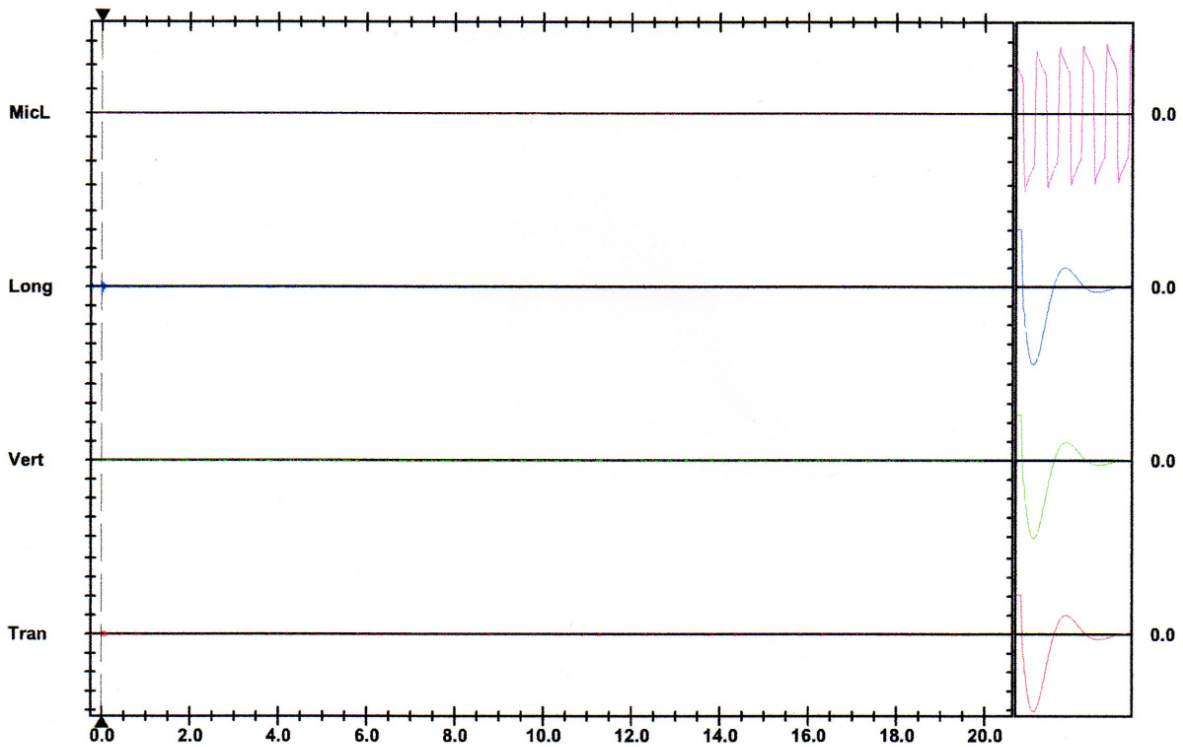
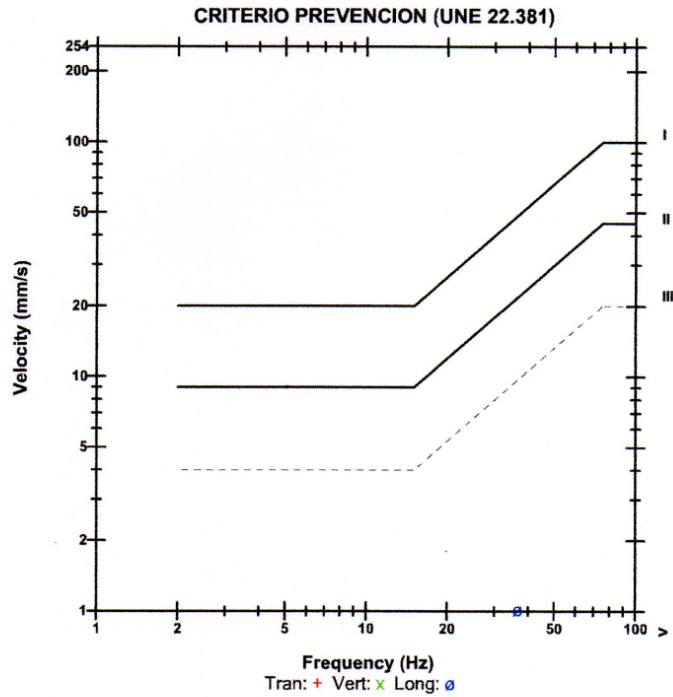
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 0.500 pa.(L) at -0.009 sec  
**ZC Freq** >100 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 595 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.381	0.127	1.016	mm/s
ZC Freq	64	>100	37	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.054	-0.229	0.004	sec
Peak Acceleration	0.027	0.027	0.027	g
Peak Displacement	0.001	0.000	0.004	mm
<b>Sensor Check</b>	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.4	7.6	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.2	4.0	

**Peak Vector Sum** 1.032 mm/s at 0.004 sec  
**PPV** 58.5 dB



Time Scale: 0.50 sec/div    Amplitude Scale: Geo: 2.000 mm/s/div Mic: 10.000 pa.(L)/div  
 Trigger =



**VOLADURA N° 05 - DISTANCIA= 535.06**

**Date/Time** Tran at 10:08:18 January 13, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 69.00 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 20.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 80

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.2 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G71O.5U0

**Notes**

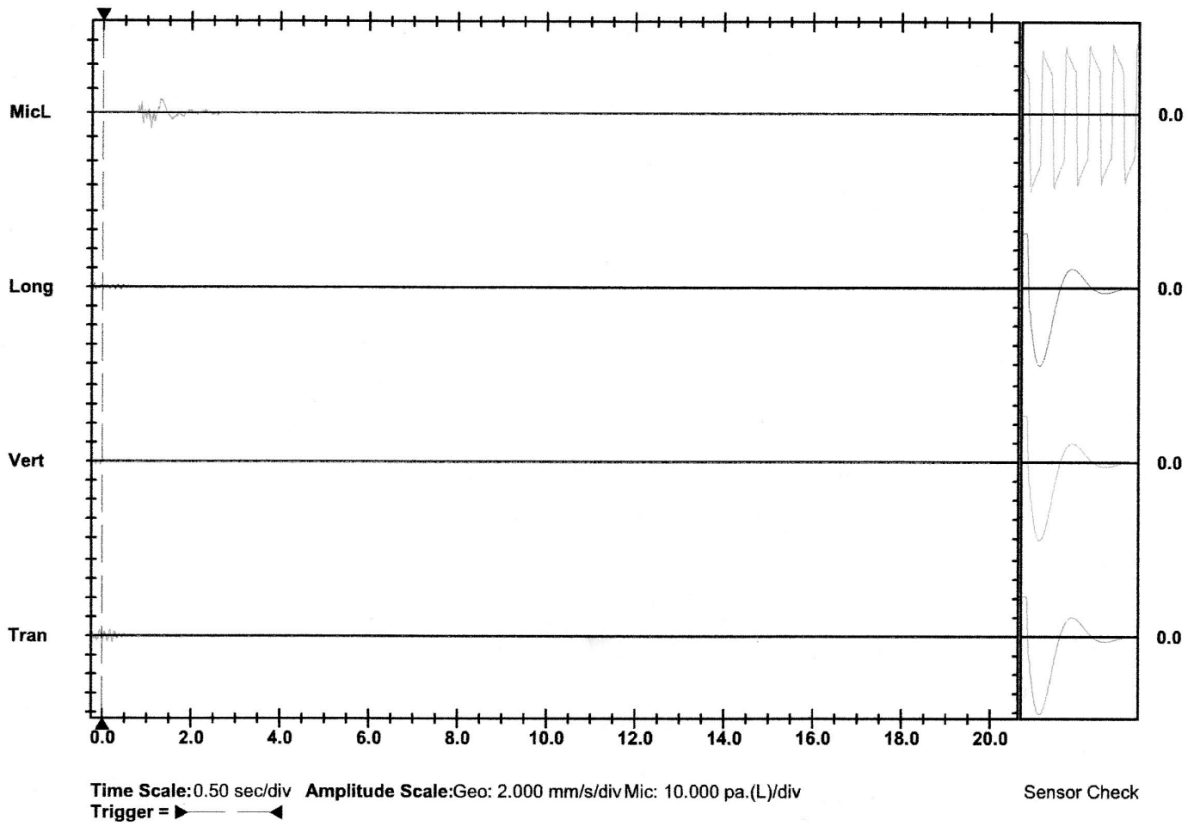
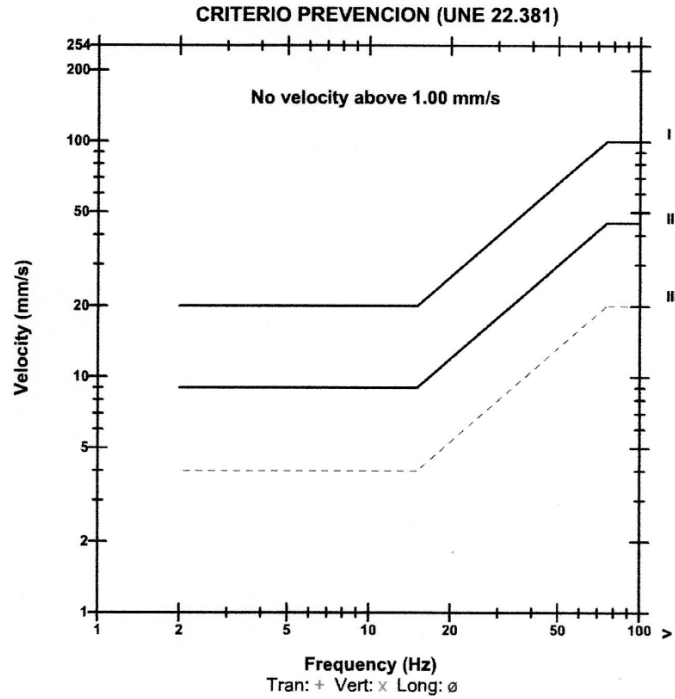
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 6.750 pa.(L) at 1.080 sec  
**ZC Freq** 5.0 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 582 mv )

	Tran	Vert	Long	
<b>PPV</b>	0.762	0.381	0.381	mm/s
<b>ZC Freq</b>	15	27	37	Hz
<b>Time (Rel. to Trig)</b>	0.000	-0.148	-0.239	sec
<b>Peak Acceleration</b>	0.027	0.027	0.027	g
<b>Peak Displacement</b>	0.011	0.004	0.004	mm
<b>Sensor Check</b>	Passed	Passed	Passed	
<b>Frequency</b>	7.3	7.3	7.4	Hz
<b>Overswing Ratio</b>	4.0	4.2	4.1	

**Peak Vector Sum** 0.842 mm/s at 0.002 sec  
**PPV** 56.4 dB





# VOLADURA N° 06 - DISTANCIA = 617.96 m

**Date/Time** MicL at 10:17:19 January 15, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 2.000 pa.  
**Range** (L) Geo: 31.75 mm/s  
**Record Time** 3.25 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 34

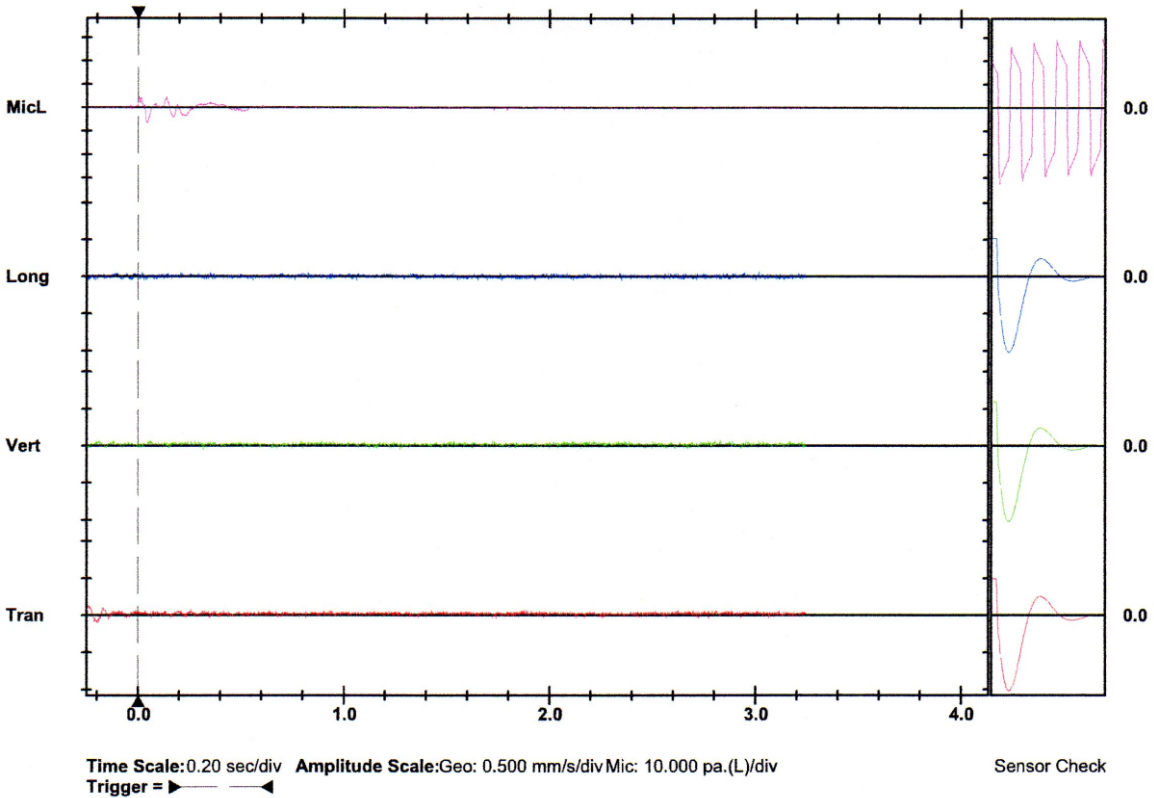
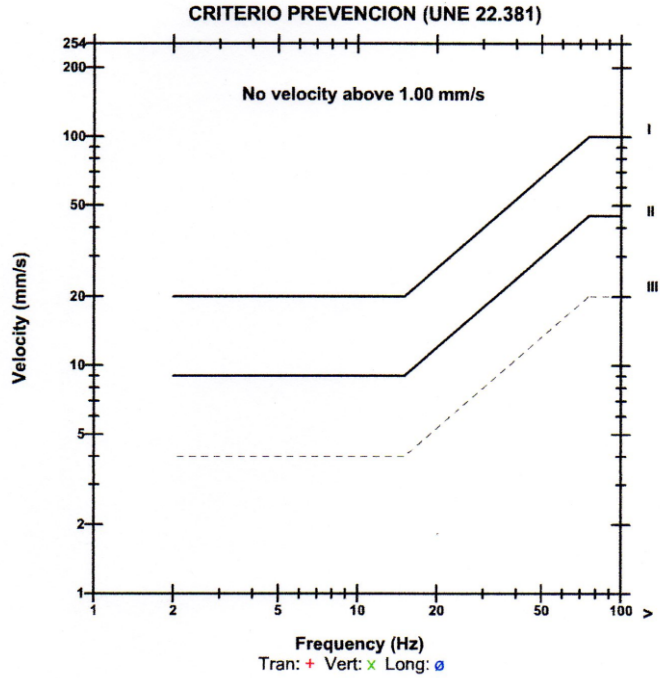
**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.0 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G9Q4.R70

**Notes**

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 6.250 pa.(L) at 0.042 sec  
**ZC Freq** 16 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 604 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.139	0.080	0.064	mm/s
ZC Freq	12	20	89	Hz
Time (Rel. to Trig)	-0.240	-0.198	-0.103	sec
Peak Acceleration	0.007	0.007	0.007	g
Peak Displacement	0.001	0.001	0.000	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.4	7.3	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.2	4.2	

**Peak Vector Sum** 0.136 mm/s  
 at -0.240 sec **N/A: Not**  
**Applicable**  
**PPV** 30.3 dB





# VOLADURA N° 08 - DISTANCIA= 525.14 m

**Date/Time** Long at 10:07:00 January 18, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 69.00 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 20.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 80

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.2 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G7AX.F00

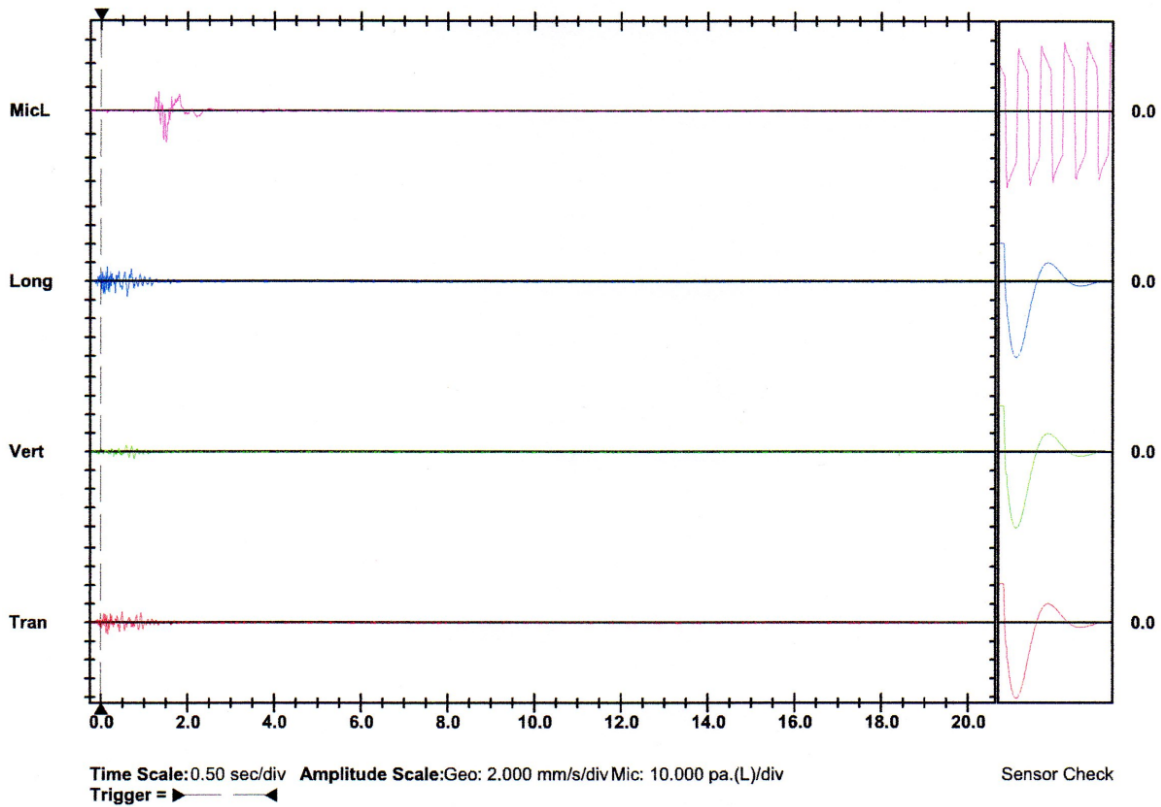
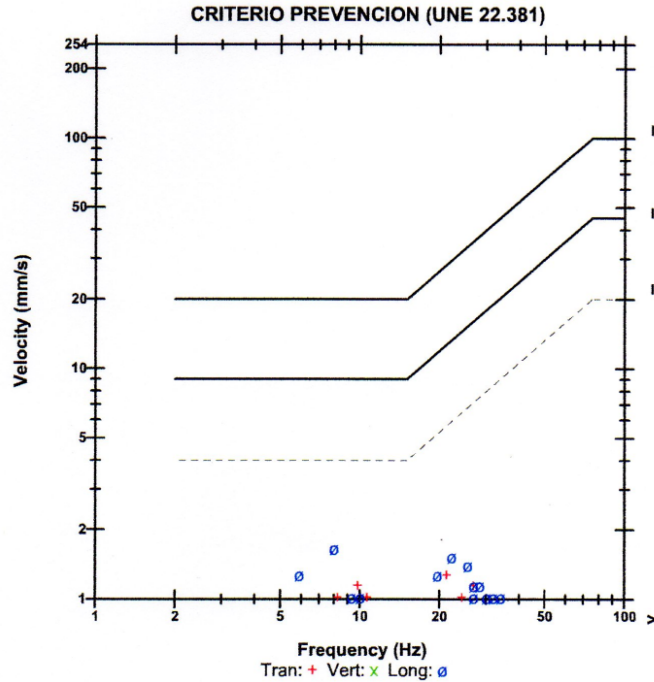
**Notes**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 13.25 pa.(L) at 1.507 sec  
**ZC Freq** 3.6 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 586 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.270	0.762	1.651	mm/s
ZC Freq	21	9.1	8.0	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.163	0.765	0.602	sec
Peak Acceleration	0.027	0.027	0.027	g
Peak Displacement	0.017	0.014	0.030	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.3	7.3	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.2	4.1	

**Peak Vector Sum** 1.746 mm/s at 0.602 sec  
**PPV** 60.8 dB





# VOLADURA N° 13 - DISTANCIA= 514.16 m

**Date/Time** Tran at 10:13:47 January 25 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 69.00 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 20.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 80

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.2 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G7K7.2Z0

### Notes

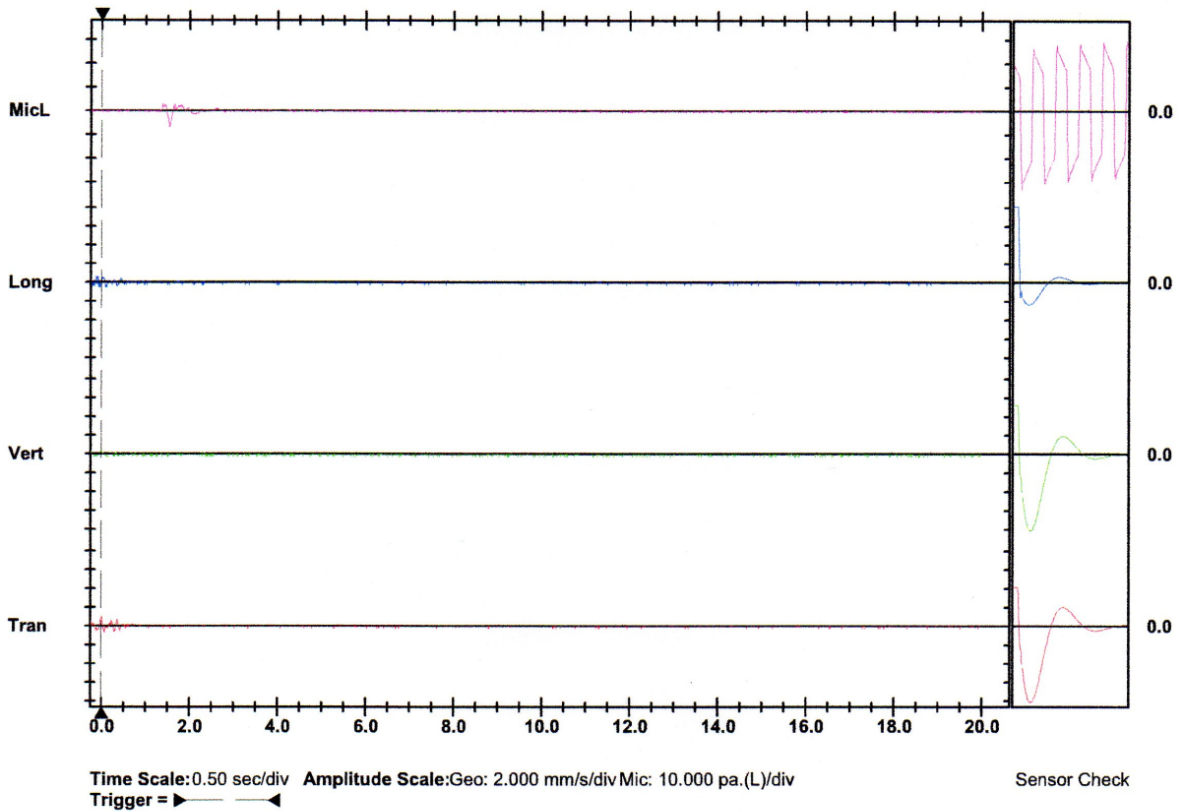
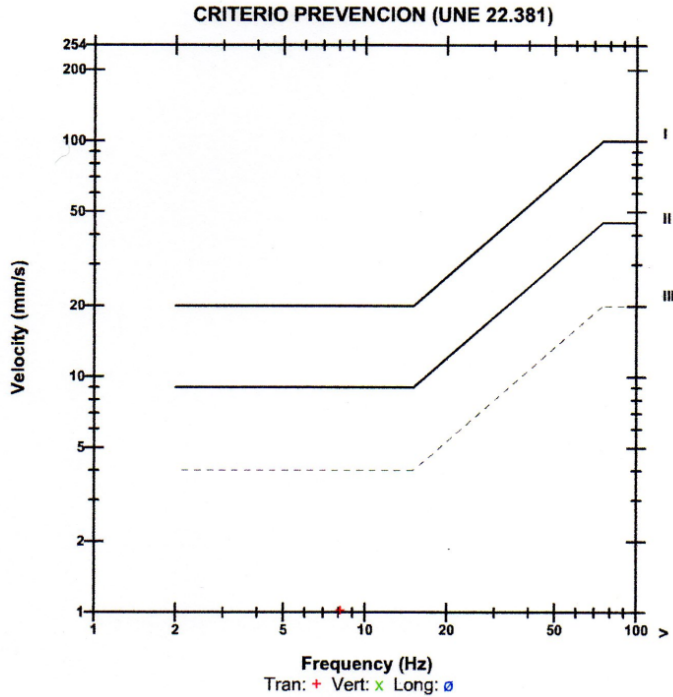
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 6.750 pa.(L) at 1.538 sec  
**ZC Freq** 3.6 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 576 mv )

	Tran	Vert	Long	
<b>PPV</b>	1.016	0.381	0.635	mm/s
<b>ZC Freq</b>	8.1	37	24	Hz
<b>Time (Rel. to Trig)</b>	0.011	-0.235	-0.121	sec
<b>Peak Acceleration</b>	0.027	0.027	0.027	g
<b>Peak Displacement</b>	0.019	0.005	0.013	mm
<b>Sensor Check</b>	Passed	Passed	Check	
<b>Frequency</b>	7.3	7.4	8.2	Hz
<b>Overswing Ratio</b>	4.1	4.3	3.9	

**Peak Vector Sum** 1.078 mm/s at 0.011 sec  
**PPV** 60.6 dB





# VOLADURA N° 20 - DISTANCIA = 488.10 m

**Date/Time** MicL at 10:23:19 February 07, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 31.75 mm/s  
**Record Time** 3.25 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 34

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.0 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G9Q4.R70

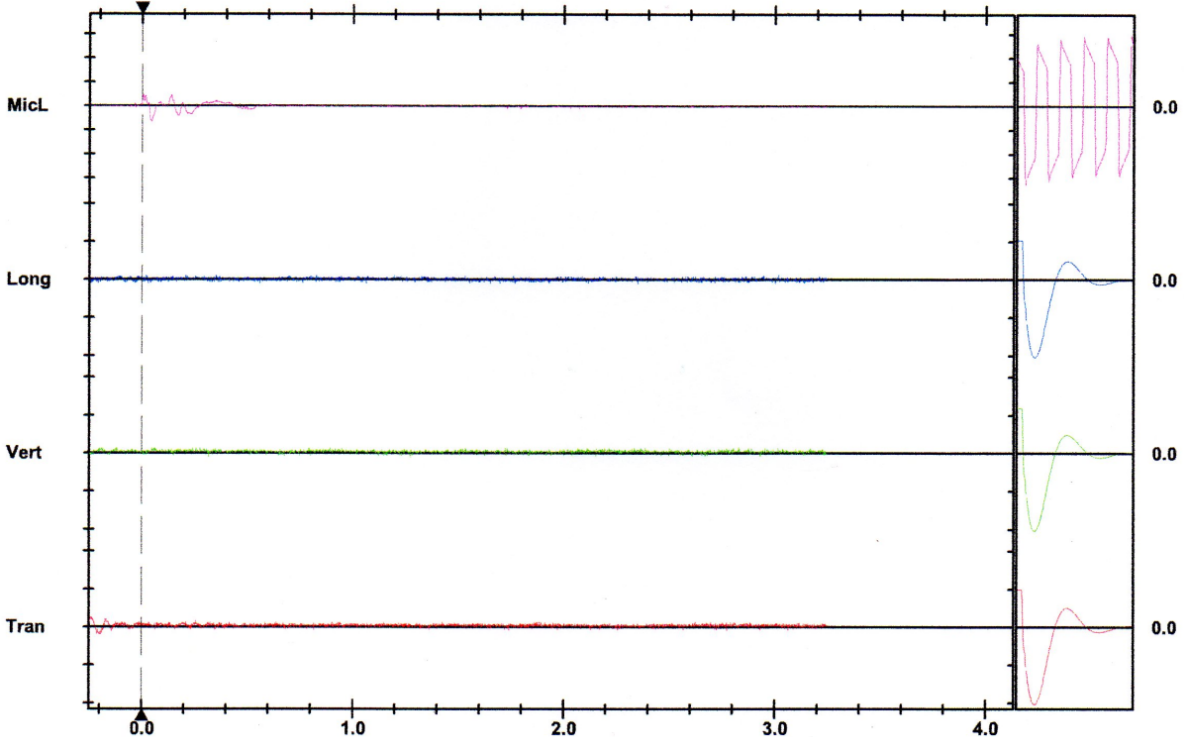
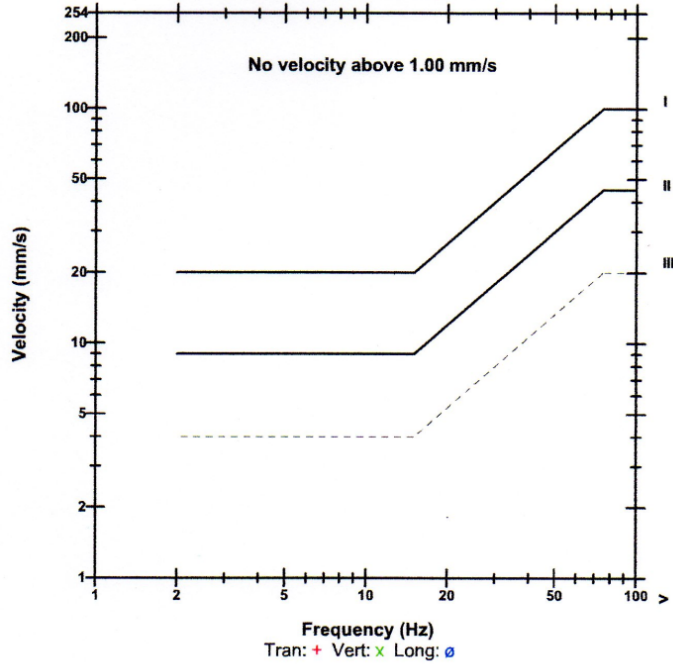
**Notes**

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 6.250 pa.(L) at 0.042 sec  
**ZC Freq** 16 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 604 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.234	0.132	0.087	mm/s
ZC Freq	25	30	90	Hz
Time (Rel. to Trig)	-0.240	-0.198	-0.103	sec
Peak Acceleration	0.007	0.007	0.007	g
Peak Displacement	0.001	0.001	0.000	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.4	7.3	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.2	4.2	

**Peak Vector Sum** 0.236 mm/s  
 at -0.240 sec N/A: Not  
**Applicable**  
**PPV** 47.7 dB

**CRITERIO PREVENCIÓN (UNE 22.381)**



**Time Scale:** 0.20 sec/div **Amplitude Scale:** Geo: 0.500 mm/s/div Mic: 10.000 pa.(L)/div  
**Trigger** =



# VOLADURA N° 44 - DISTANCIA= 497.68 m

**Date/Time** MicL at 10:17:55 March 9, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 4.25 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 44

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.2 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G9XD.XV0

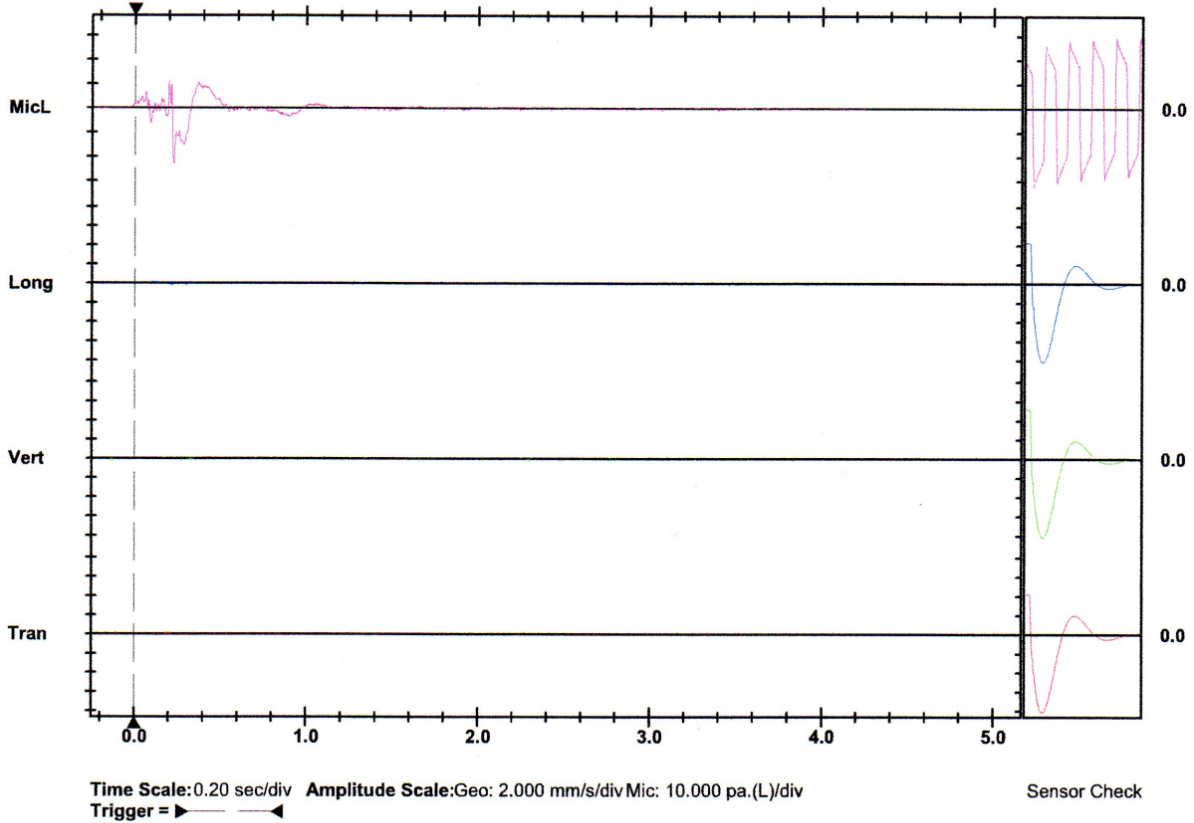
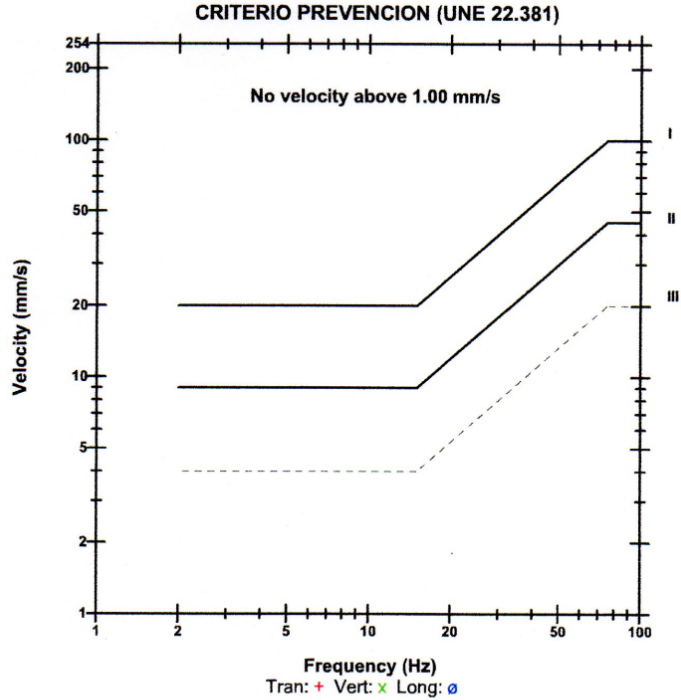
**Notes**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 22.75 pa.(L) at 0.227 sec  
**ZC Freq** 4.6 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 630 mv)

	Tran	Vert	Long	
<b>PPV</b>	0.127	0.127	0.127	mm/s
<b>ZC Freq</b>	>100	>100	>100	Hz
<b>Time (Rel. to Trig)</b>	-0.208	-0.145	-0.186	sec
<b>Peak Acceleration</b>	0.013	0.013	0.027	g
<b>Peak Displacement</b>	0.000	0.000	0.000	mm
<b>Sensor Check</b>	Passed	Passed	Passed	
<b>Frequency</b>	7.4	7.4	7.3	Hz
<b>Overswing Ratio</b>	4.1	4.3	4.3	

**Peak Vector Sum** 0.180 mm/s at 0.017 sec  
**PPV** 38.9 dB





# VOLADURA N° 46 - DISTANCIA= 475.94 m

**Date/Time** Long at 10:04:02 March 10, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 4.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 44

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.1 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G9Z7.YQ0

### Notes

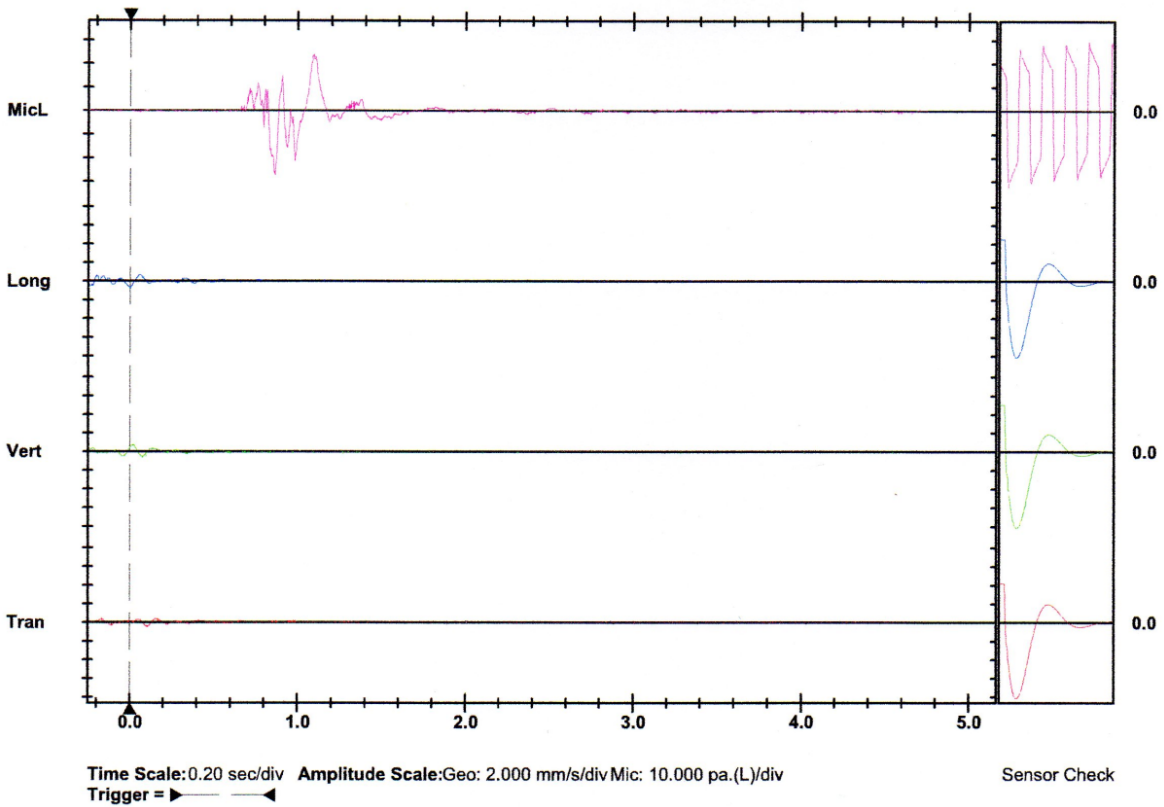
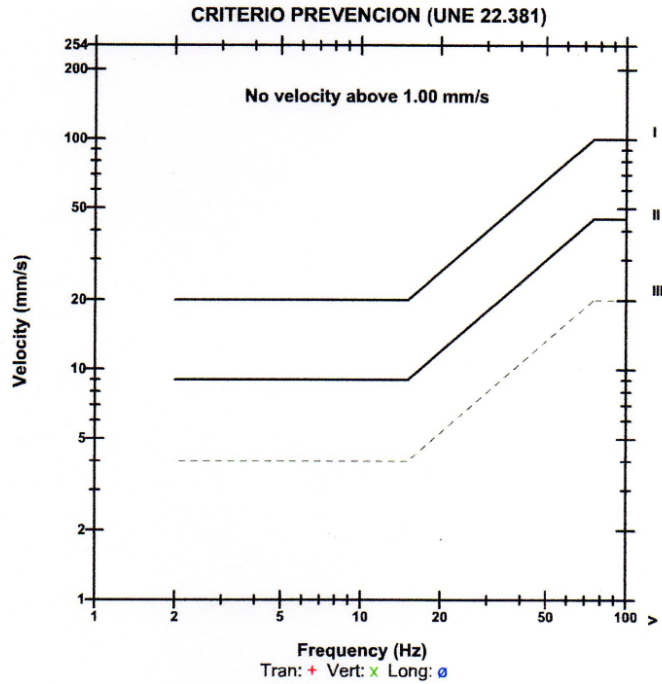
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 27.25 pa.(L) at 0.863 sec  
**ZC Freq** 8.1 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 652 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.508	0.762	0.762	mm/s
ZC Freq	12	10	9.8	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.099	0.017	-0.003	sec
Peak Acceleration	0.013	0.027	0.013	g
Peak Displacement	0.008	0.012	0.012	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.3	7.4	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.4	4.2	

**Peak Vector Sum** 0.925 mm/s at 0.002 sec  
**PPV** 31.1dB



Fecha/Hora MicL en 09:53:46 Marzo 21, 2016  
 Origen del Disparo Geo: 5.000 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
 Rango Geo: 31.75 mm/s  
 Tiempo Registro 3.25 seg (Auto=3Seg) en 1024 sps  
 Num Trabajo 51

Numero de Serial BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
 Nivel de Batería 6.1 Voltios  
 Unit Calibration Diciembre 11, 2015 by Geoinstruments  
 Nombre del Archivo \_TEMP.EVT

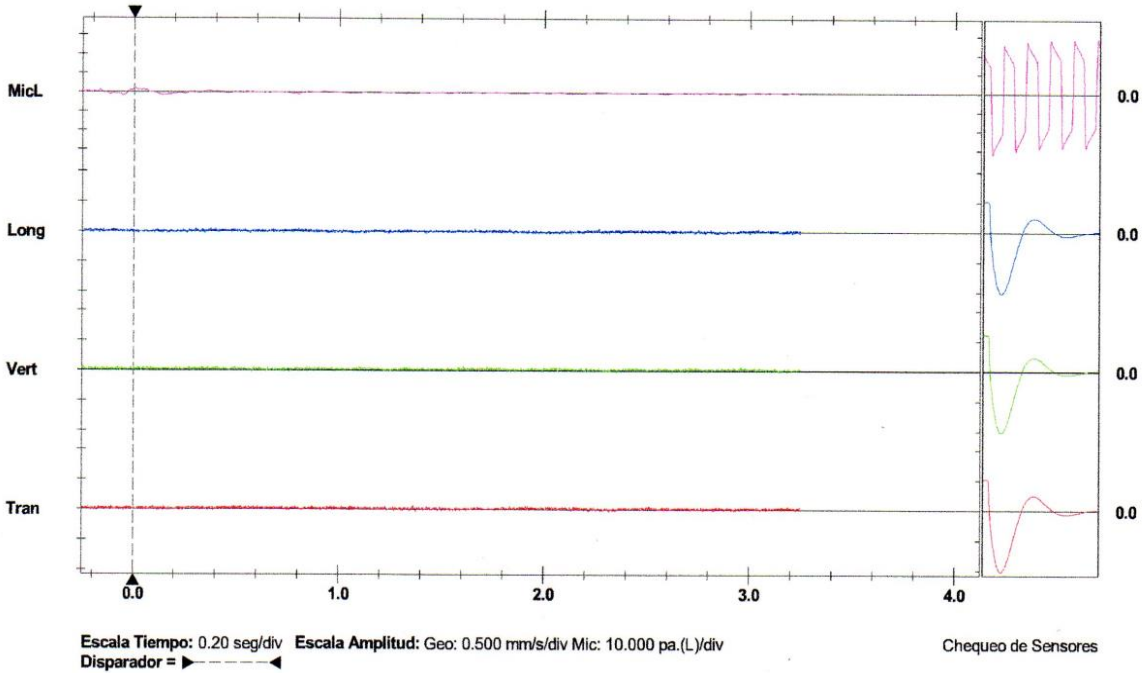
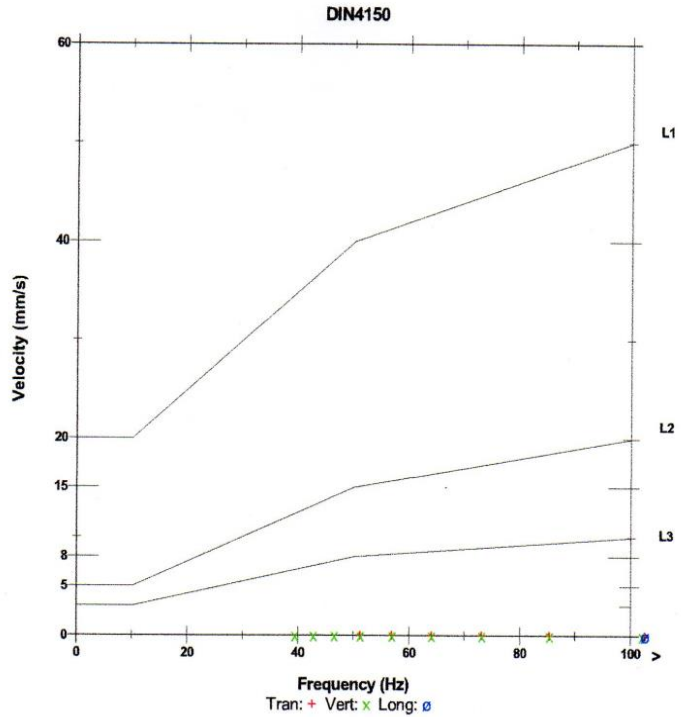
**Notas**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

**Microfono**  
 PSPL 2.250 pa.(L) en 0.000 seg  
 Frecuencia ZC 5.1 Hz  
 Prueba de Canal Paso (Frec = 20.1 Hz Amp = 592 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.063	0.063	0.048	mm/s
PPV	27.06	27.06	24.56	dB
Frecuencia ZC	>100	73	>100	Hz
Tiempo (Rel. al Disparador)	1.363	-0.244	0.304	seg
Aceleracion del Pico	0.005	0.005	0.005	g
Desplazamiento del Pico	0.000	0.000	0.000	mm
Chequeo de Sensores	Paso	Paso	Paso	
Frequency	7.3	7.3	7.3	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.3	4.3	

Pico Vector Suma 0.073 mm/s en 0.363 seg





**VOLADURA N° 60 - DISTANCIA = 529.18**

**Date/Time** Vert at 16:51:32 April 4, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.510 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 5.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 1

**Serial Number** BE15667 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.2 Volts  
**Unit Calibration** March 9, 2016 by Geoinstruments  
**File Name** \_\_TEMP.EVT

**Notes**

Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

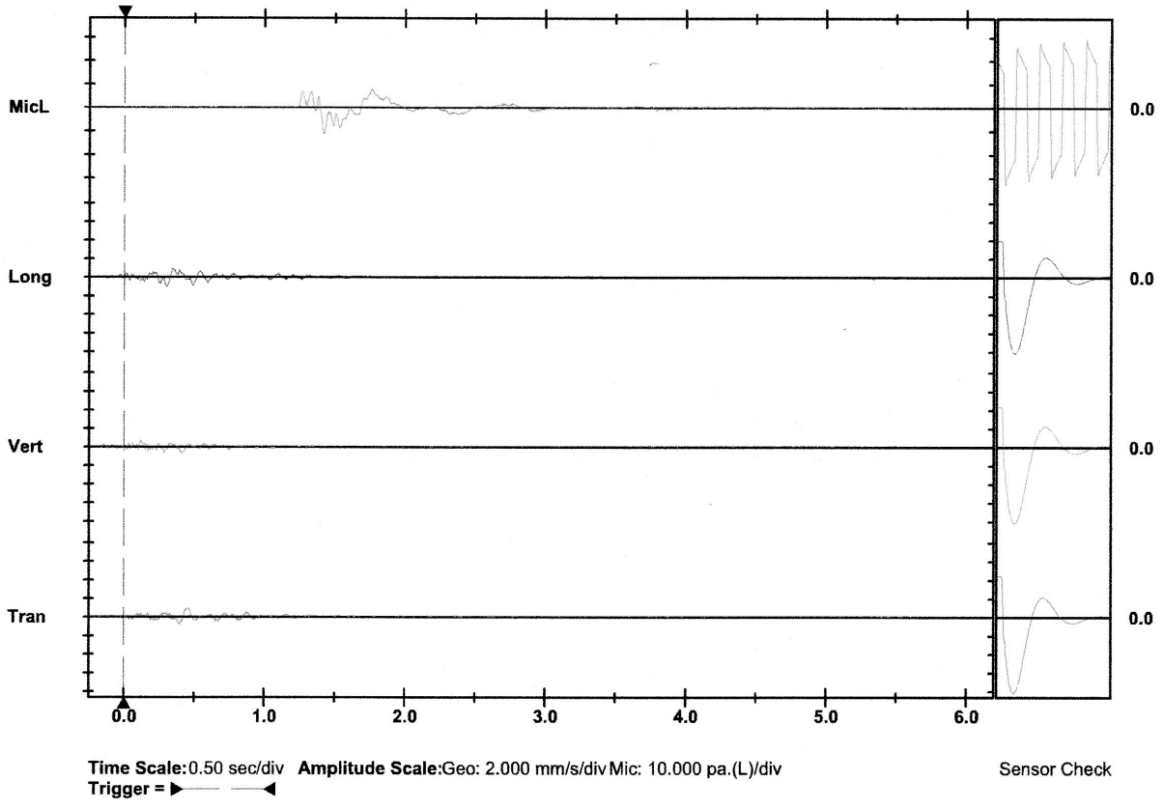
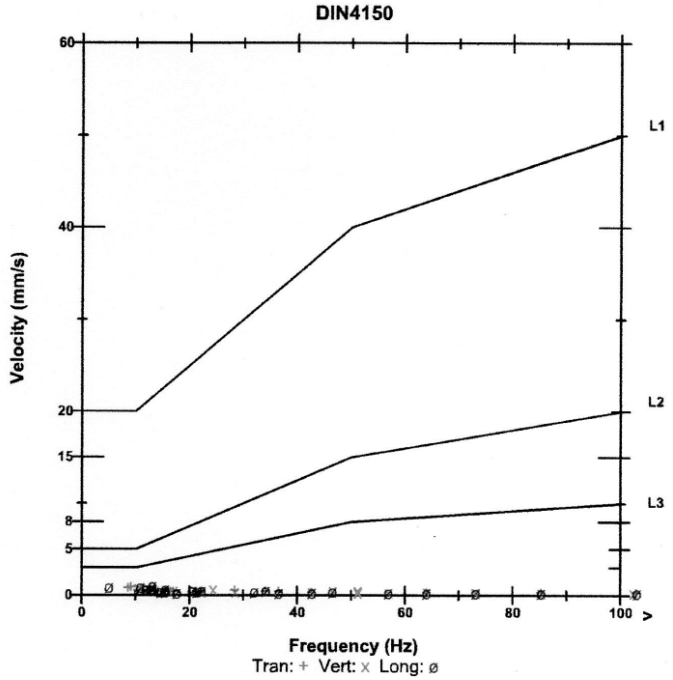
**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 11.00 pa.(L) at 1.418 sec  
**ZC Freq** 2.4 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 596 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.889	0.762	1.016	mm/s
PPV	49.98	48.64	51.14	dB
ZC Freq	9.1	12	13	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.445	0.121	0.300	sec
Peak Acceleration	0.027	0.027	0.027	g
Peak Displacement	0.019	0.011	0.026	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.9	7.6	7.5	Hz
Overswing Ratio	3.7	3.6	3.7	

**Peak Vector Sum** 1.136 mm/s at 0.300 sec

**Monitor Log**

Apr 4 /16 16:45:22 Apr 4 /16 16:51:38 Event recorded.



Time Scale: 0.50 sec/div Amplitude Scale: Geo: 2.000 mm/s/div Mic: 10.000 pa.(L)/div  
 Trigger = ▶ ◀



**VOLADURA N°69 - DISTANCIA = 518.31**

**Date/Time** Tran at 16:53:46 April 22, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.510 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 1.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 69

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.0 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** \_TEMP.EVT

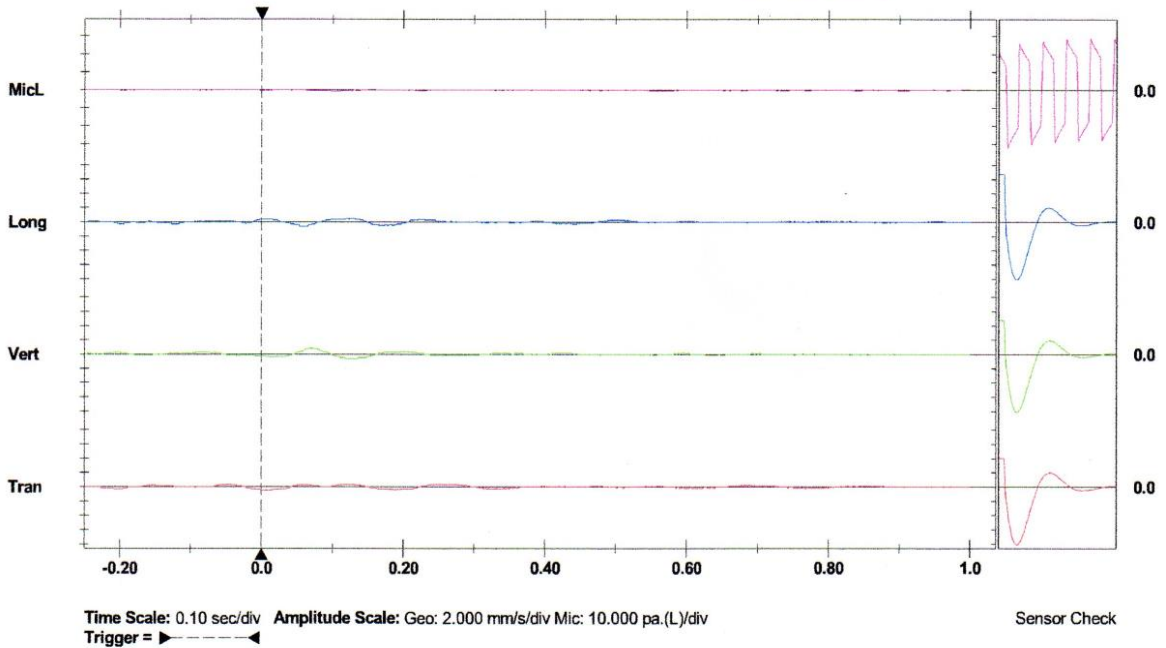
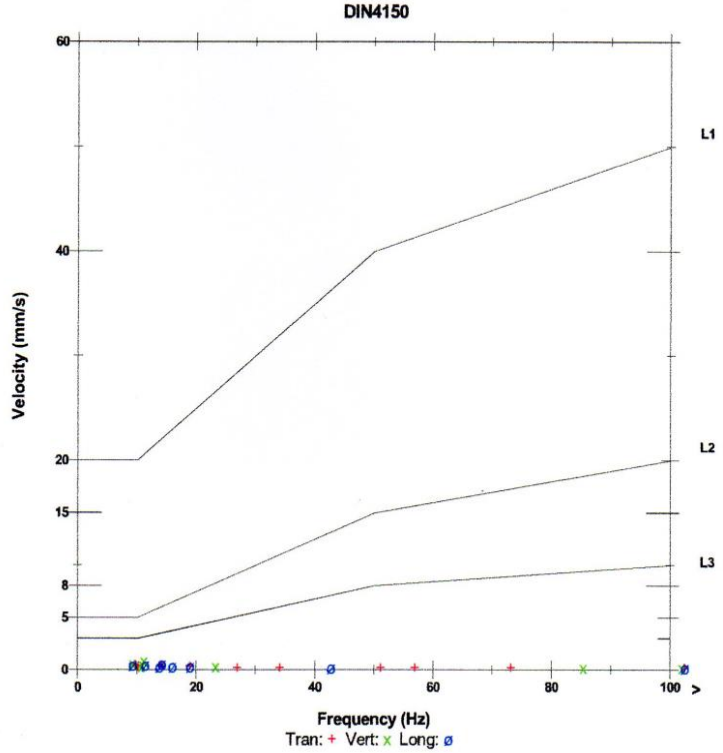
**Notes**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 0.500 pa.(L) at 0.097 sec  
**ZC Freq** 47 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 646 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.508	0.889	0.635	mm/s
PPV	45.12	49.98	47.06	dB
ZC Freq	9.7	11	14	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.000	0.069	0.053	sec
Peak Acceleration	0.027	0.013	0.027	g
Peak Displacement	0.009	0.013	0.010	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.4	7.6	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.3	4.1	

**Peak Vector Sum** 1.024 mm/s at 0.063 sec



You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (<http://www.novapdf.com>)



# VOLADURA N°74 - DISTANCIA = 604.48 m.

Date/Time Tran at 16:57:41 April 30, 2016  
Trigger Source Geo: 0.510 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
Range Geo: 254.0 mm/s  
Record Time 1.0 sec at 1024 sps  
Job Number: 74

Serial Number BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
Battery Level 6.1 Volts  
Unit Calibration December 11, 2015 by Geoinstruments  
File Name \_TEMP.EVT

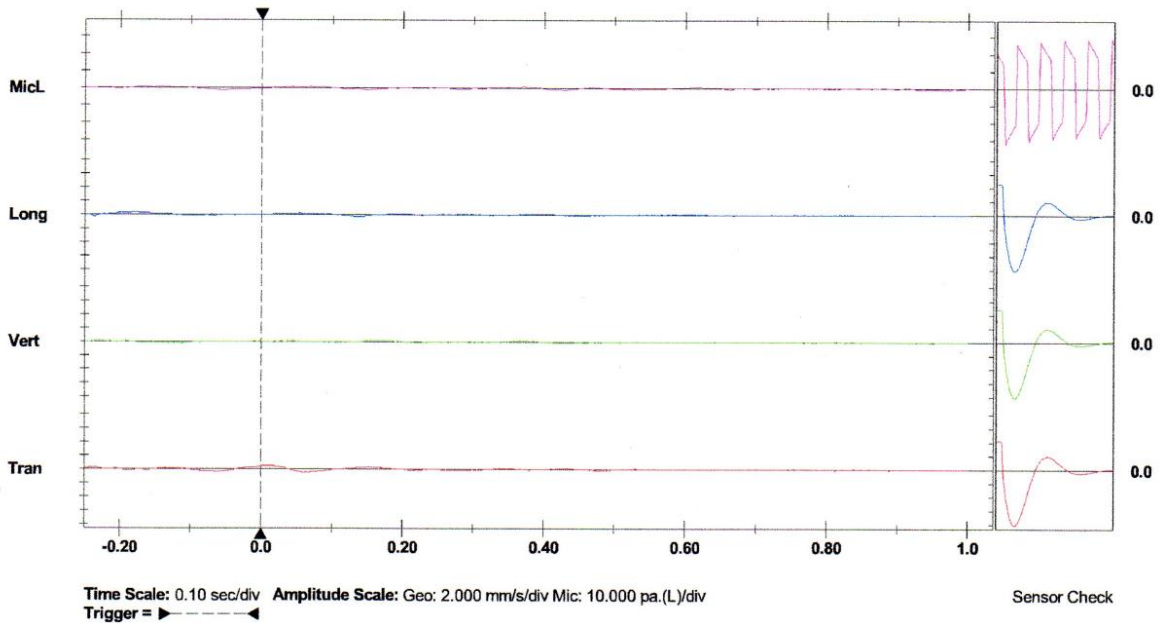
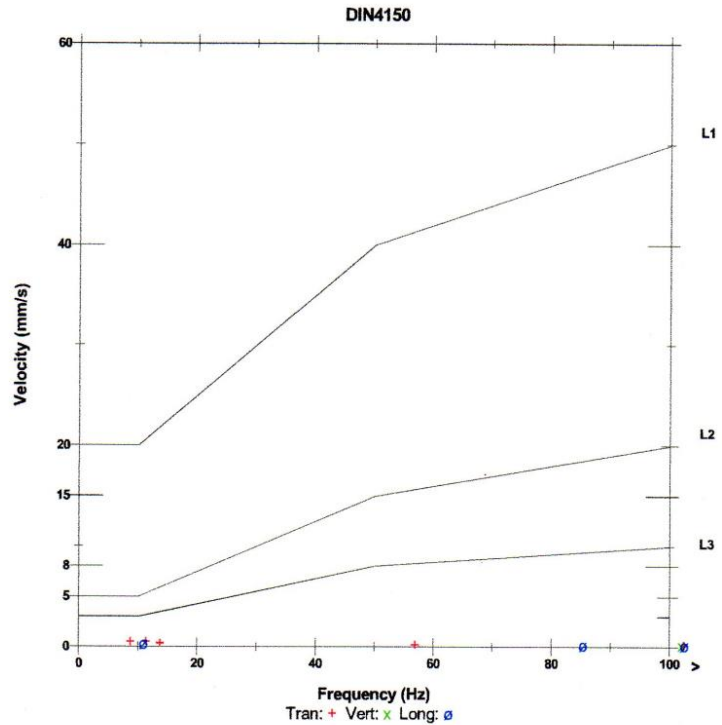
Notes  
Location:  
Client:  
User Name:  
General:

### Extended Notes

Microphone Linear Weighting  
PSPL 1.250 pa.(L) at -0.060 sec  
ZC Freq 7.8 Hz  
Channel Test Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 589 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.508	0.254	0.381	mm/s
PPV	45.12	39.10	42.62	dB
ZC Freq	8.7	>100	11	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.000	-0.132	-0.199	sec
Peak Acceleration	0.013	0.027	0.013	g
Peak Displacement	0.011	0.000	0.007	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.4	7.4	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.2	4.1	

Peak Vector Sum 0.539 mm/s at 0.017 sec



You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (<http://www.novapdf.com>)



# VOLADURA N°76

**Date/Time** MicL at 11:57:18 May 6, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.510 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 31.75 mm/s  
**Record Time** 1.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 77

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.0 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** \_TEMP.EVT

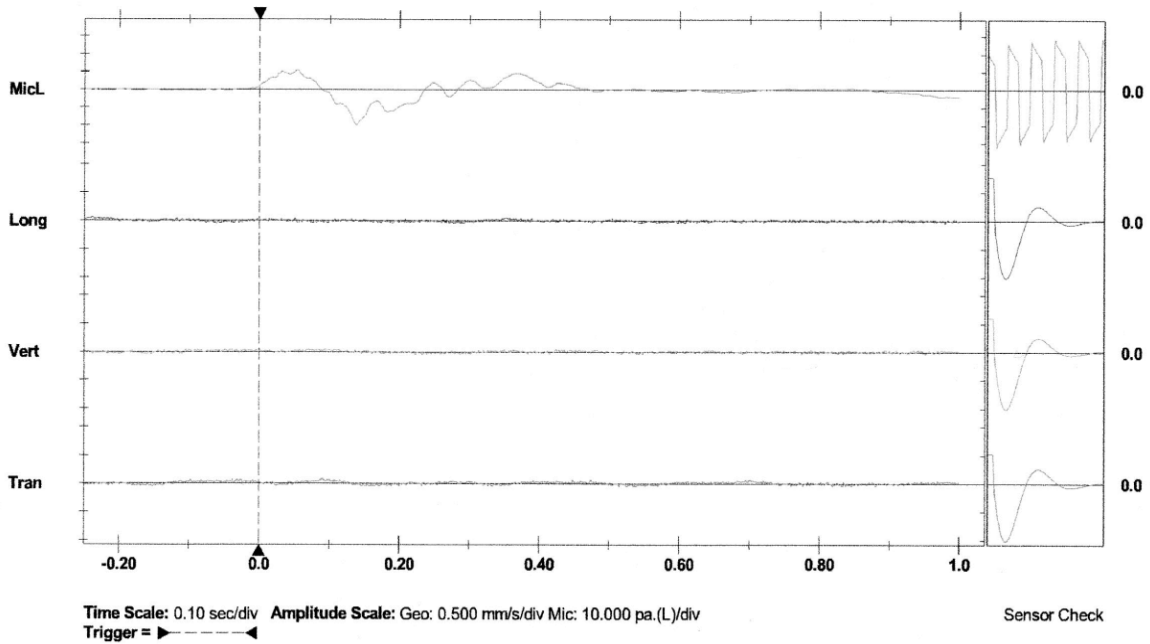
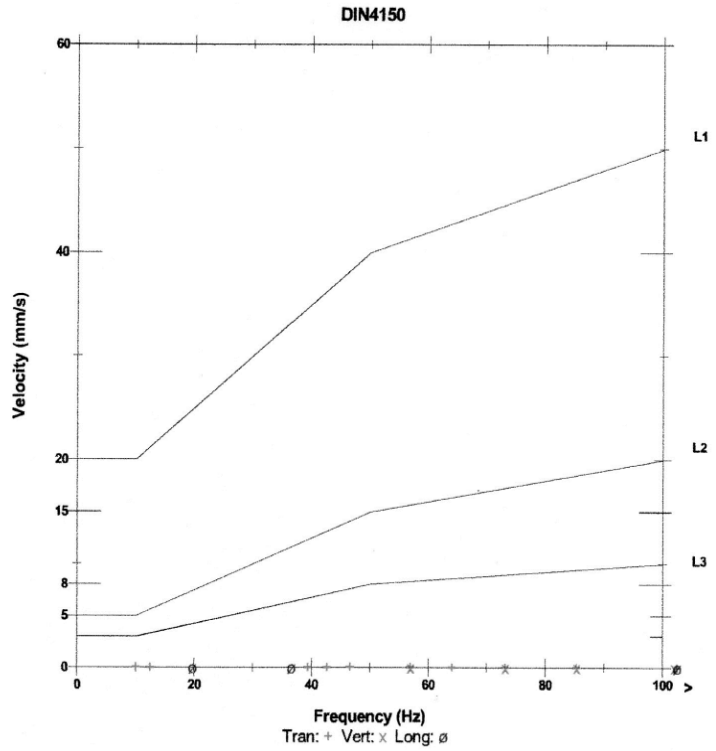
**Notes**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 19.50 pa.(L) at 0.137 sec  
**ZC Freq** 3.5 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 550 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.095	0.048	0.063	mm/s
PPV	30.58	24.56	27.06	dB
ZC Freq	10	>100	20	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.090	-0.200	-0.241	sec
Peak Acceleration	0.007	0.005	0.007	g
Peak Displacement	0.001	0.000	0.001	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.4	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.1	4.0	

Peak Vector Sum 0.105 mm/s at 0.090 sec



You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (<http://www.novapdf.com>)



**Date/Time** Long at 10:23:02 March 17, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.700 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 254.0 mm/s  
**Record Time** 4.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 44

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.1 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844G9Z7.YQ0

**Notes**

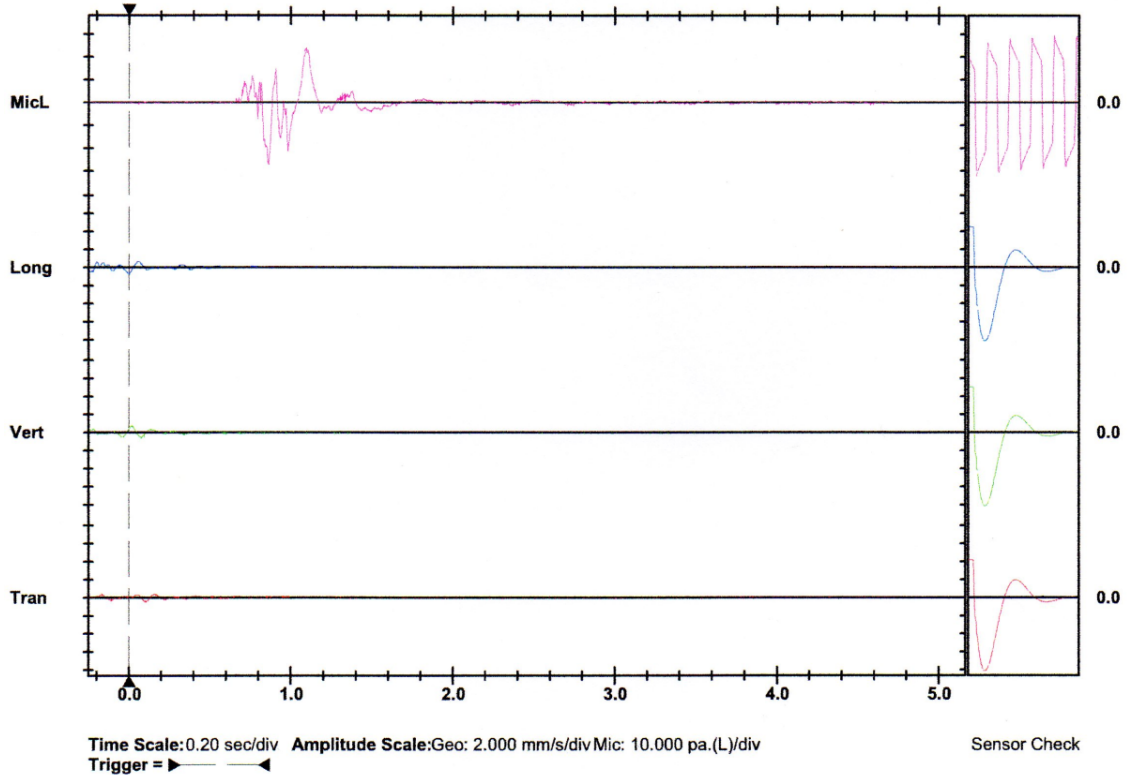
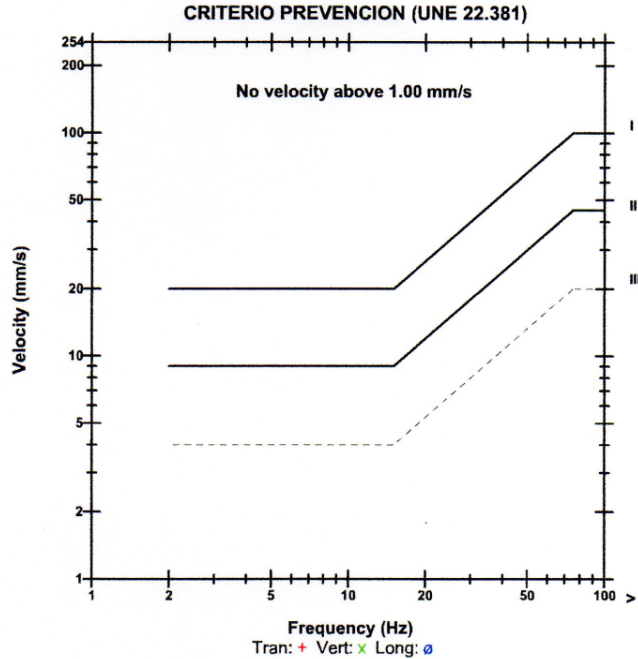
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 27.25 pa.(L) at 0.863 sec  
**ZC Freq** 8.1 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.5 Hz Amp = 652 mv )

	Tran	Vert	Long	
<b>PPV</b>	0.640	0.380	0.890	mm/s
<b>ZC Freq</b>	26	24	9.5	Hz
<b>Time (Rel. to Trig)</b>	0.099	0.017	-0.003	sec
<b>Peak Acceleration</b>	0.013	0.027	0.013	g
<b>Peak Displacement</b>	0.008	0.012	0.012	mm
<b>Sensor Check</b>	Passed	Passed	Passed	
<b>Frequency</b>	7.4	7.3	7.4	Hz
<b>Overswing Ratio</b>	4.1	4.4	4.2	

**Peak Vector Sum** 0.90 mm/s at 0.002 sec  
**PPV** 31.1dB





# VOLADURA N°80 - 503.36 m.

**Date/Time** MicL at 11:56:58 May 13, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.510 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 31.75 mm/s  
**Record Time** 1.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 80

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.1 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** \_\_TEMP.EVT

### Notes

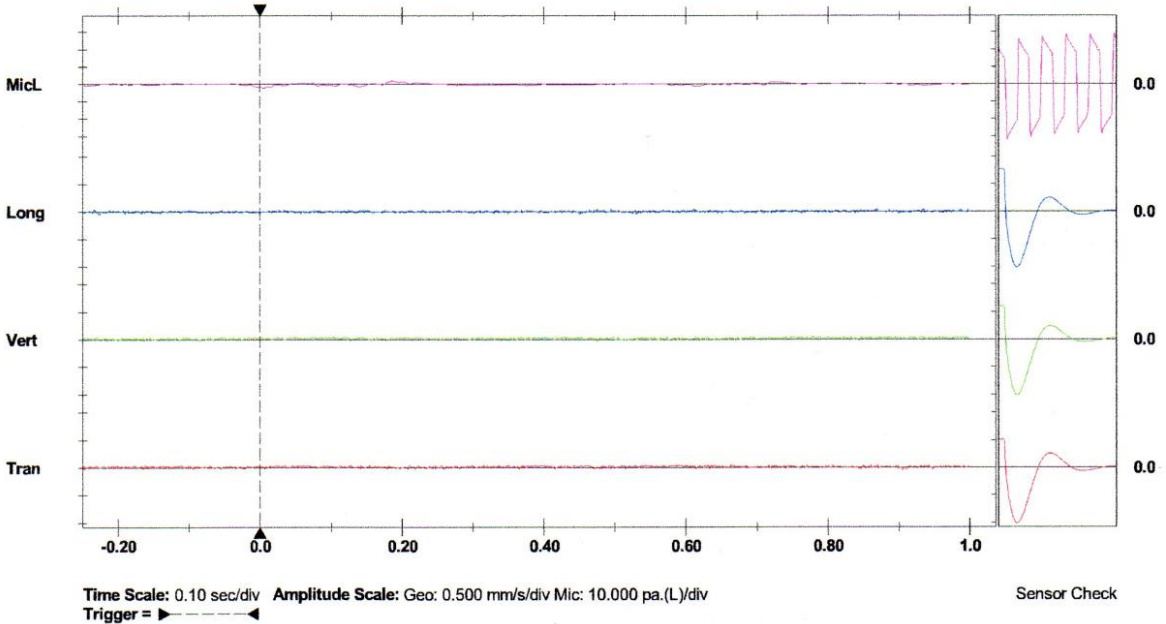
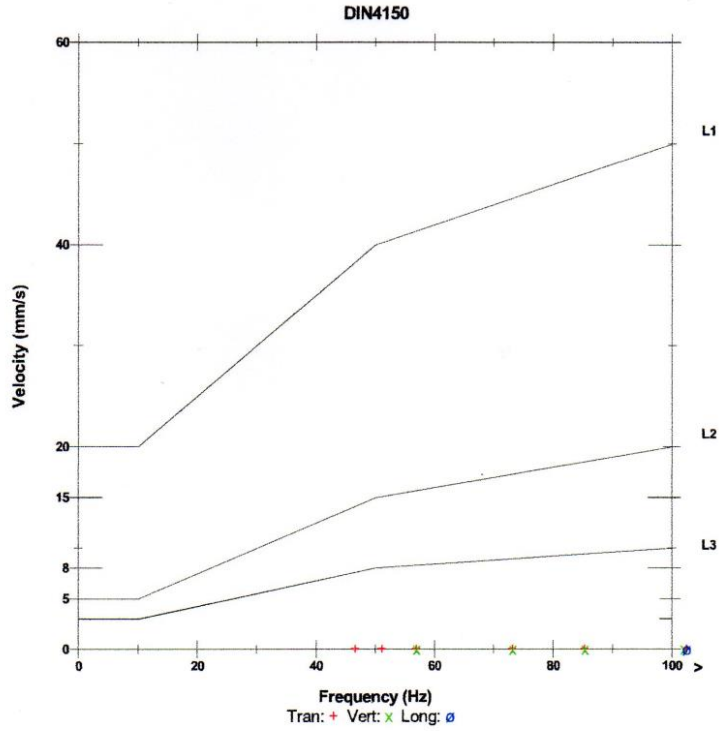
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 2.250 pa.(L) at 0.004 sec  
**ZC Freq** 15 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 607 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.048	0.048	0.048	mm/s
PPV	24.56	24.56	24.56	dB
ZC Freq	>100	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	-0.162	-0.107	-0.227	sec
Peak Acceleration	0.007	0.005	0.007	g
Peak Displacement	0.000	0.000	0.000	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.3	7.5	Hz
Overswing Ratio	4.1	4.3	4.1	

Peak Vector Sum 0.065 mm/s at 0.464 sec



Time Scale: 0.10 sec/div Amplitude Scale: Geo: 0.500 mm/s/div Mic: 10.000 pa.(L)/div  
 Trigger =

You created this PDF from an application that is not licensed to print to novaPDF printer (<http://www.novapdf.com>)

**Date/Time** MicL at 12:00:14 May 16, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.510 mm/s, Mic: 100.0 dB(L)  
**Range** Geo: 31.75 mm/s  
**Record Time** 1.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 81

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.1 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** T844GDFG.0E0

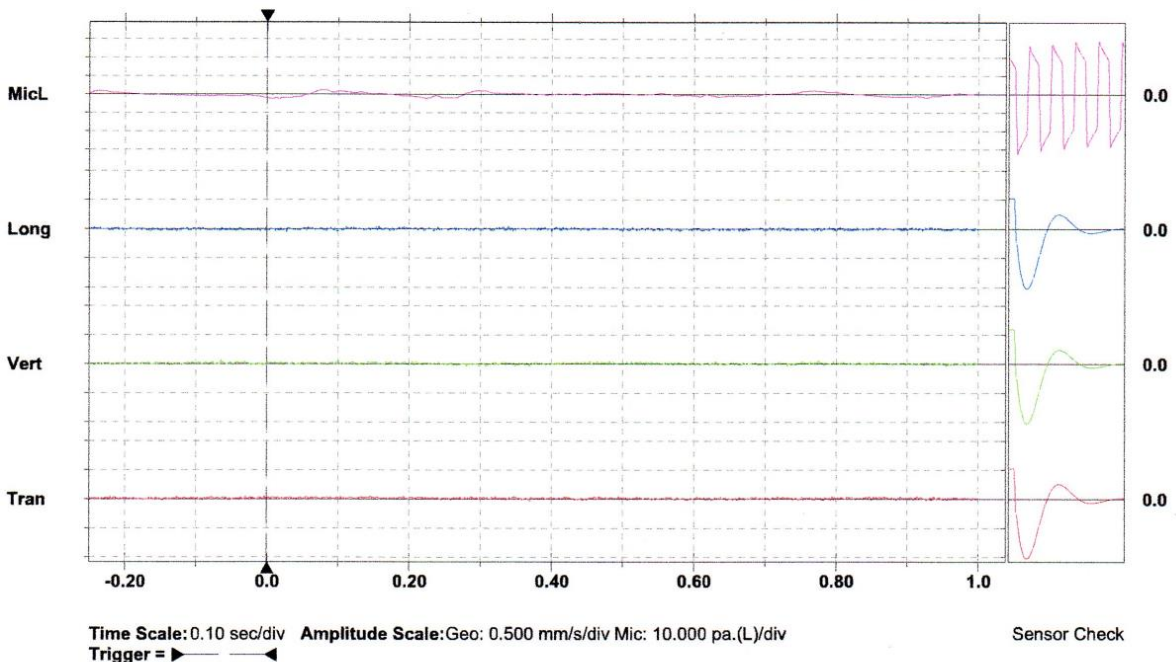
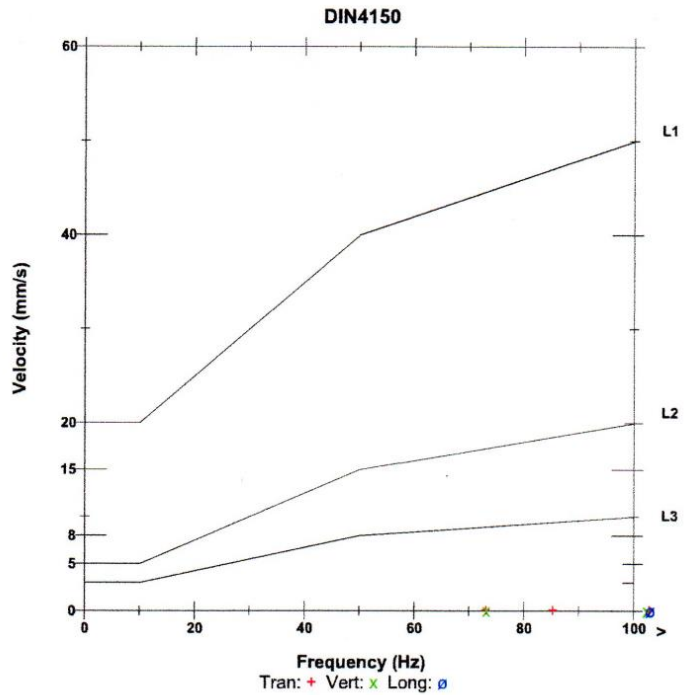
**Notes**  
 Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

**Extended Notes**

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 101.0 dB(L) at 0.002 sec  
**ZC Freq** 2.6 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 625 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.048	0.063	0.048	mm/s
PPV (Ponderated)	0.032	0.037	0.026	mm/s
PPV	24.56	27.06	24.56	dB
ZC Freq	>100	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	-0.221	-0.064	0.027	sec
Peak Acceleration	0.007	0.005	0.007	g
Peak Displacement	0.000	0.000	0.000	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.3	7.4	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.2	4.1	

Peak Vector Sum 0.067 mm/s at -0.064 sec





# VOLADURA N°96

**Date/Time** Tran at 13:05:48 June 14, 2016  
**Trigger Source** Geo: 0.510 mm/s, Mic: 2.000 pa.(L)  
**Range** Geo: 31.75 mm/s  
**Record Time** 1.0 sec at 1024 sps  
**Job Number:** 96

**Serial Number** BE18844 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
**Battery Level** 6.0 Volts  
**Unit Calibration** December 11, 2015 by Geoinstruments  
**File Name** \_TEMP.EVT

### Notes

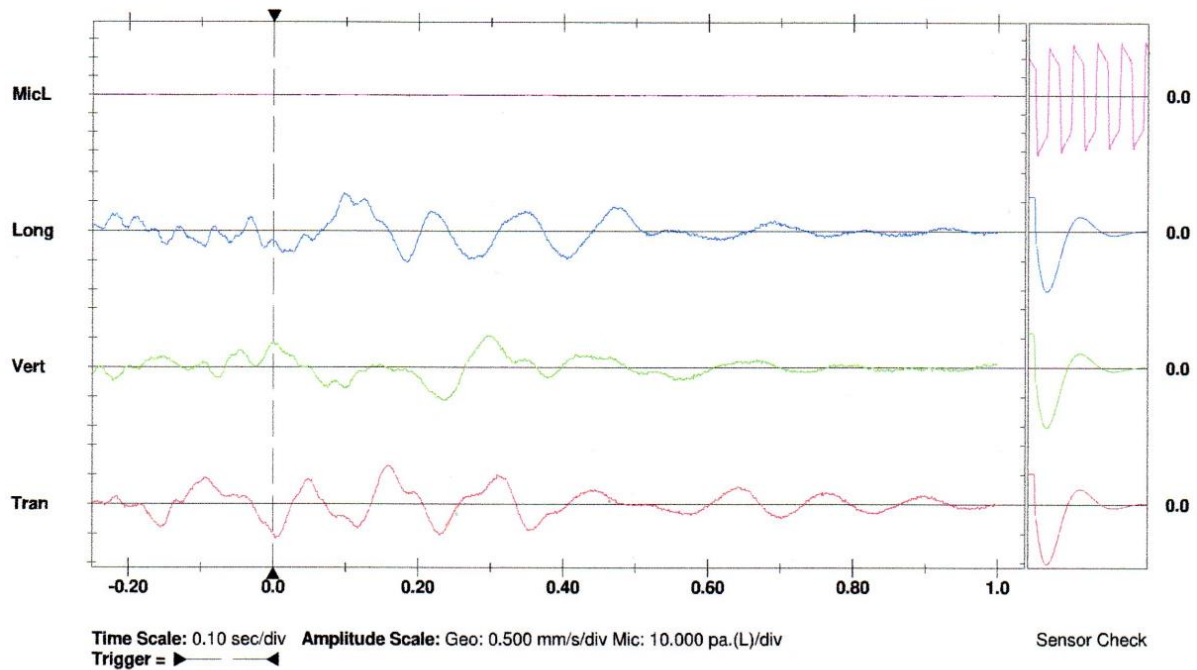
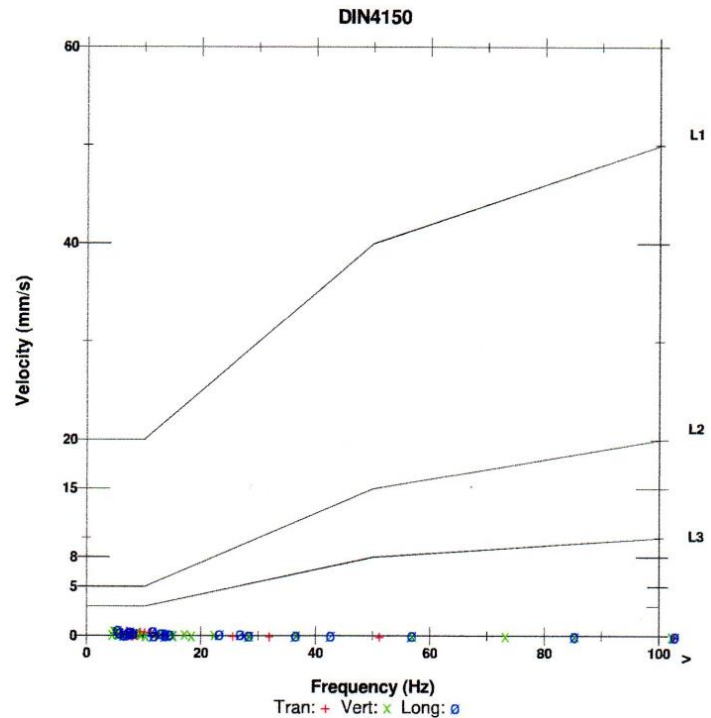
Location:  
 Client:  
 User Name:  
 General:

### Extended Notes

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 0.500 pa.(L) at -0.232 sec  
**ZC Freq** >100 Hz  
**Channel Test** Passed (Freq = 20.1 Hz Amp = 621 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.651	0.556	0.651	mm/s
PPV	47.27	45.90	47.27	dB
ZC Freq	7.1	4.7	5.5	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.157	0.233	0.097	sec
Peak Acceleration	0.007	0.007	0.008	g
Peak Displacement	0.012	0.013	0.016	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.4	7.3	Hz
Overswing Ratio	4.0	4.2	4.1	

Peak Vector Sum 0.773 mm/s at 0.229 sec











## ANEXO N° 2

### CUADRO RESUMEN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Pruebas N°	Fecha	Frente	Nivel	Horario de Disparo	Material Removido (m³)	Material Removido (t)	Cantidad de Explosivo (kg)	Carga Operante Q (Kg)	F. P. (Kg/t)	Distancia Monitoreo (m)	Comp. Tran. (mm/s)	Comp. Vert. (mm/s)	Comp. Long. (mm/s)	VPP Pico (mm/s)	Frec. Tran. (Hz)	Frec. Vert. (Hz)	Frec. Long. (Hz)	Micrófono (dB)
1	10-ene-16	Fase 0	4 318	10:25	19 999,06	53 997,45	5 325,00	266,25	0,10	507,47	0,28	0,29	0,38	0,45	86,00	76,00	75,00	39,00
2	11-ene-16	Fase 0	4 318	10:11	26 284,83	70 969,05	1 750,00	87,50	0,02	496,25	0,38	0,13	1,02	1,03	64,00	100,00	37,00	58,50
3	13-ene-16	Fase 0	4 324	10:08	20 335,98	54 907,15	2 225,00	111,25	0,04	535,06	0,76	0,38	0,38	0,84	15,00	27,00	37,00	56,40
4	15-ene-16	Fase 0	4 312	10:17	4 048,66	10 931,38	850,00	42,50	0,08	617,96	0,14	0,08	0,06	0,14	12,00	20,00	89,00	30,30
5	18-ene-16	Fase 0	4 312	10:07	42 117,40	113 716,99	6 250,00	312,50	0,05	525,14	1,27	0,76	1,65	1,75	21,00	9,10	8,00	60,80
6	25-ene-16	Fase 0	4 312	10:13	12 748,40	34 420,68	6 200,00	310,00	0,18	514,16	1,02	0,38	0,64	1,08	8,10	37,00	24,00	60,60
7	07-feb-16	Fase 0	4 312	10:23	20 898,62	56 426,28	3 275,00	163,75	0,06	488,10	0,23	0,13	0,09	0,24	25,00	30,00	90,00	47,70
8	09-mar-16	Fase 0	4 306	10:17	19 922,49	53 790,72	2 825,00	141,25	0,05	497,68	0,13	0,13	0,13	0,18	100,00	100,00	100,00	33,60
9	10-mar-16	Fase 0	4 306	10:10	39 758,58	107 348,17	375,00	18,75	0,00	475,94	0,51	0,76	0,76	0,93	12,00	10,00	9,80	65,30
10	17-mar-16	Fase 0	4 306	10:23	43 212,10	116 672,67	4 200,00	210,00	0,04	494,23	0,64	0,38	0,89	0,90	26,00	24,00	9,50	49,98
11	21-mar-16	Fase 0	4 324	09:53	10 838,15	29 263,01	1 200,00	60,00	0,04	559,59	0,06	0,06	0,05	0,07	100,00	73,00	100,00	27,06
12	04-abr-16	Fase 0	4 300	17:33	57 384,18	154 937,29	9 450,00	472,50	0,06	529,18	0,26	0,57	1,55	1,14	46,00	17,00	26,00	51,20
13	22-abr-16	Fase 0	4 300	16:53	17 944,86	48 451,12	7 175,00	358,75	0,15	518,31	0,51	0,89	0,64	1,02	7,30	7,40	7,60	49,98
14	30-abr-16	Fase 0	4 306	16:57	18 576,53	50 156,63	5 575,00	278,75	0,11	604,48	0,51	0,25	0,38	0,54	7,30	7,40	7,40	45,12
15	06-may-16	Fase 0	4 306	11:57	9 261,40	25 005,78	2 825,00	141,25	0,11	597,45	0,10	0,05	0,06	0,11	7,40	7,40	7,50	30,58
16	13-may-16	Fase 0	4 300	11:56	19 852,50	53 601,75	10 708,00	535,40	0,20	524,27	0,05	0,05	0,05	0,07	7,30	7,30	7,50	24,56
17	14-jun-16	Fase 0	4 294	13:05	35 005,05	94 513,64	14 418,00	720,90	0,15	416,04	0,65	0,56	0,65	0,77	7,10	4,70	5,50	47,27
18	25-jun-16	Fase 0	4 294	01:03	52 546,57	14 1875,73	77 18,00	385,90	0,05	502,84	0,51	0,51	0,76	0,85	8,70	8,80	8,00	117,50

ANEXO N° 3

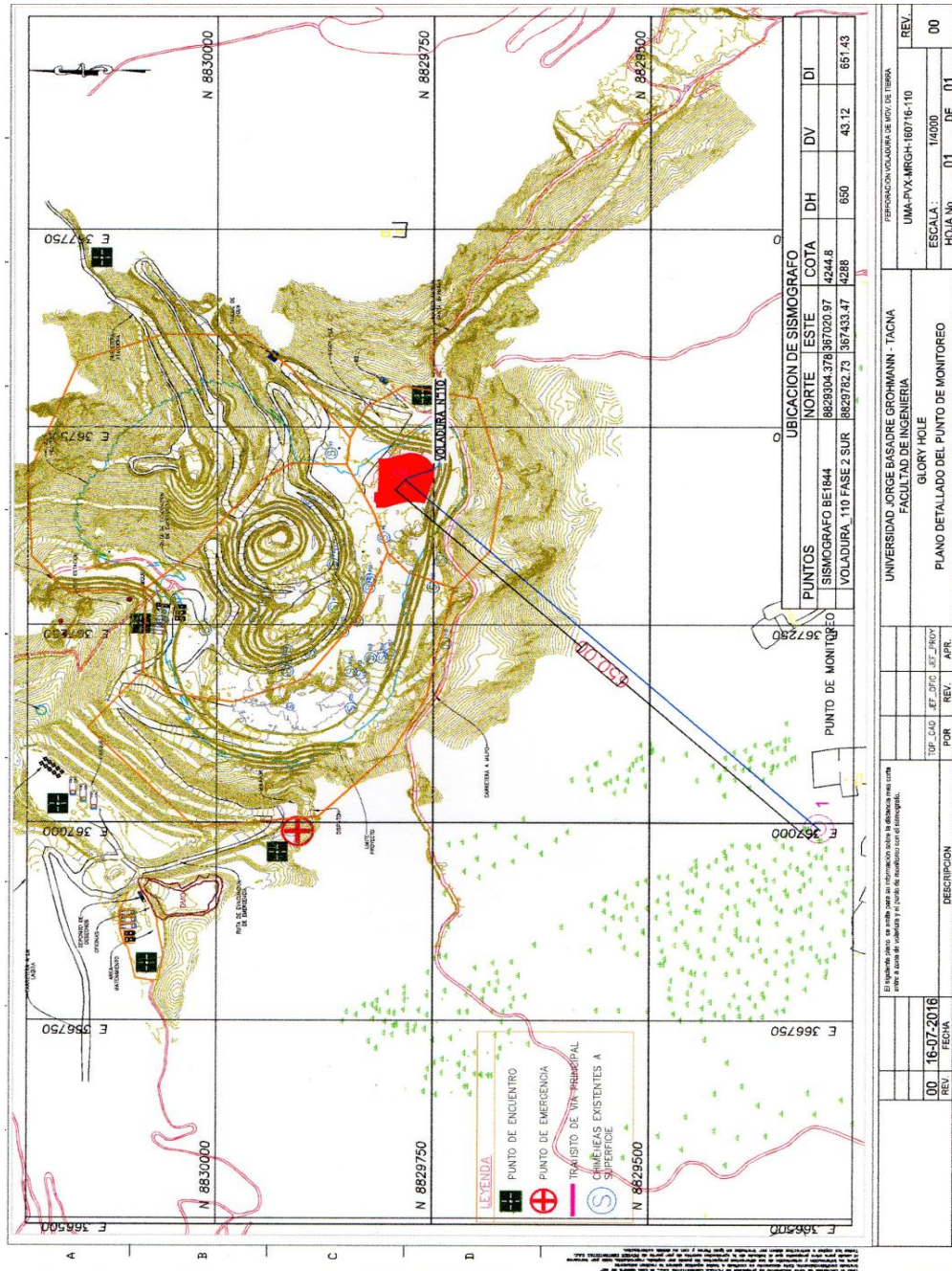
TABLA DE CLASIFICACION DE MACIZO ROCOSO

SECCION MECANICA DE ROCAS					
<b>SISTEMA DE CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO</b>					
TIPO ROCA	RMR	DESCRIPCION	FIG. FRACT.	CARACTERISTICAS	RESIST. DE LA ROCA
I	81 - 90	MUY BUENA 'B'		Roca dura con muy pocas fracturas, leve alteración, terreno seco	Solo se puede romper esquivas de la muestra con el martillo de geólogo.
	71 - 80	BUENA 'A'		Roca dura con pocas fracturas, leve alteración, terreno seco con alta humedad	Con varios golpes con el martillo de geólogo se puede romper pequeños fragmentos de la muestra
II	61 - 70	BUENA 'B'		Roca dura con regular cantidad de fracturas, leve alteración, húmedo en algunos casos.	Se requieren varios golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.
	51 - 60	REGULAR 'A'		Roca de regularidad, con regular a mayor cantidad de fracturas, ligeramente a moderadamente alterada, pequeñas fallas con panizo, terreno con ligero humedecimiento.	Se requiere tres golpes firmes con el martillo de geólogo para romper la muestra.
III	41 - 50	REGULAR 'B'		Roca poco blanda con regular a mayor cantidad de fracturas, ligeramente a moderadamente alterada, pequeñas fallas con panizo, terreno con goteo ocasional.	Con dos golpes con el martillo de geólogo se puede producir fracturamiento.
	31 - 40	MALA 'A'		Roca blanda que presenta muchas fracturas, roca alterada, fallas un poco significativas con panizo y goteo de agua.	No se puede rayar o desmenuar con una navaja. La muestra se puede romper con dos golpes firmes del martillo.
IV	21 - 30	MALA 'B'		Roca blanda que presenta muchas fracturas, roca muy alterada, fallas significativas con panizo, goteo o flujo constante de agua.	Se puede rayar con dificultad con una navaja. La muestra se puede romper con un golpe firme del martillo de geólogo.
	0 - 20	MUY MALA 'A'		Roca muy blanda, intensamente alterable con muchas fracturas. Roca intensamente fracturada, fallas significativas con mucho panizo, flujo continuo de agua en las fracturas.	Puede desmenuarse con dificultad con una navaja. Se puede hacer marcas poco profundas golpeando firmemente con el martillo de geólogo.



# ANEXO N° 5

## PLANO DE PUNTO DE MONITOREO DE LAS VIBRACIONES PRODUCTO DE LA VOLADURA

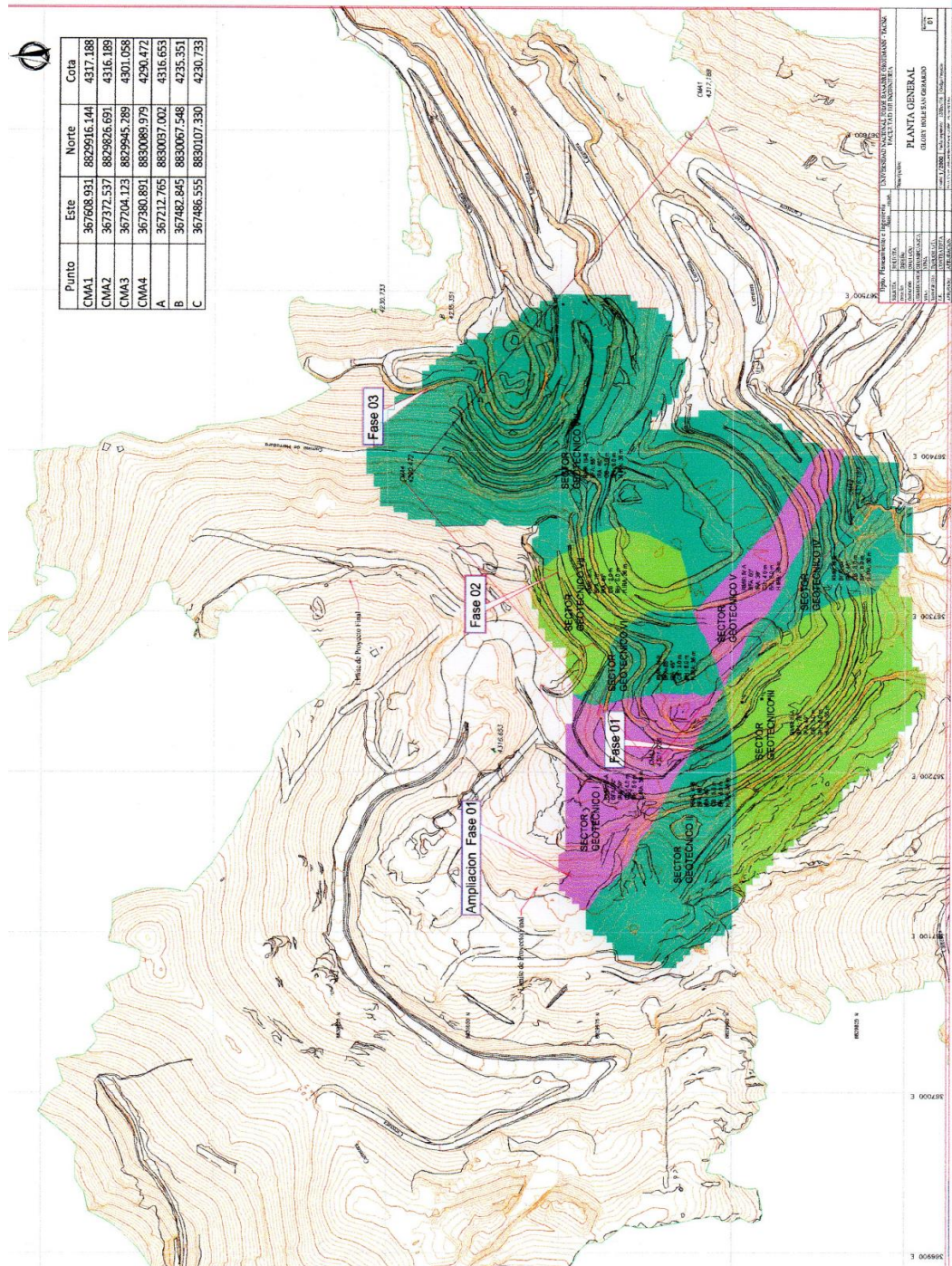


UBICACION DE SISMOGRAFO			
NORTE	ESTE	COTA	DI
8629304.378	367020.97	4244.8	
VOLADURA, 110 FASE 2 SUR			
8629782.73	367433.47	4288	651.43
PUNTO DE MONITOREO			
SISMOGRAFO BE1644			
		650	43.12

UNIVERSIDAD JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA		FEEDBACK VOLADURA DE MOV. DE TIERRA	
FACULTAD DE INGENIERIA		UMA-PYX-MRGH-160716-110	
GLORY HOLE		REV. 00	
PLANO DETALLADO DEL PUNTO DE MONITOREO		ESCALA: 1/4000	
16-07-2016		HOJA No. 01 DE 01	
REV. 00	FECHA	DESCRIPCION	TOP. CAD. E.F. DTC. J.S.T. J.N.O.V.
			POR. I. REV. I. APR.

# ANEXO N° 6

## PLANO EN PLANTA DEL TAJO SAN GERARDO



## ANEXO N° 7

### PLANO DE UBICACIÓN DE LA MINA ATACOCHA

