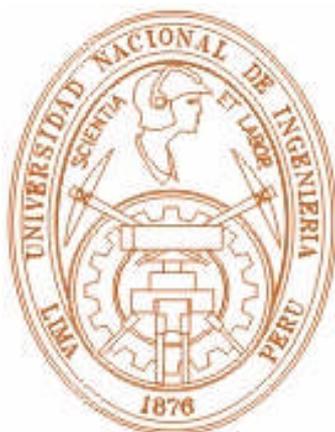


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA,
MINERA Y METALÚRGICA**



**“SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO ADECUADO Y CARGA
MÁXIMA POR RETARDO USANDO EL MONITOREO,
MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES”
“Aplicación en minas Ares”**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

Presentado por:

WILLY JOSÉ CONTRERAS PÉREZ

Lima – Perú

2009

“SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO ADECUADO Y CARGA MÁXIMA POR RETARDO USANDO EL MONITOREO, MODELAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES”

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
OBJETIVOS.....	5
RESUMEN.....	6
GENERALIDADES.....	8

CAPITULO I

1.1.- INTRODUCCIÓN.....	11
1.2.- FUNDAMENTOS DE VIBRACIONES.....	12
1.2.1.- La Naturaleza Cíclica de las Vibraciones.....	12
1.2.2.- Propiedades Básicas de las Ondas.....	14
1.2.2.1.- Frecuencia de las Vibraciones.....	14
1.2.2.2.- Amplitud de las Vibraciones.....	15
1.2.2.3.- Duración de las Vibraciones.....	16
1.2.2.4.- Longitud de Onda de las Vibraciones.....	17
1.2.2.5.- Velocidad de Propagación.....	18
1.2.3.- Tipos de Ondas en Vibraciones.....	19
1.2.4.- Primer arribo de Ondas.....	20
1.2.5.- Las unidades de Vibraciones.....	22
1.2.5.1.- Velocidad de las Vibraciones.....	22
1.2.5.2.- Aceleración de las Vibraciones.....	23
1.2.6.- Vibraciones y Esfuerzo.....	24
1.3.- CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES ORIGINADAS POR LAS VOLADURAS.....	25

1.3.1.- Vibraciones de un solo taladro.....	26
1.3.1.1.- Frecuencia de las Vibraciones.....	27
1.3.1.2.- Amplitud de las Vibraciones.....	28
1.3.1.3.- Duración de las Vibraciones.....	28
1.3.2.- Vibraciones producidas por una voladura.....	29
1.3.2.1.- Frecuencia de las Vibraciones.....	29
1.3.2.2.- Amplitud y Duración de las Vibraciones.....	29
1.4.- ECUACIONES DE PROPAGACIÓN DE LAS VIBRACIONES.....	30
1.4.1.- Disipación Geométrica.....	30
1.4.2.- Pérdida Friccional.....	31
1.4.3.- Consecuencias combinadas del efecto de Geometría y Fricción.....	33
1.4.4.- Cambio de la frecuencia con la distancia.....	34
1.5.- INSTRUMENTACIÓN PARA MONITOREAR LAS VIBRACIONES.....	36
1.5.1.- Transductores de vibraciones.....	37
1.5.1.1.- Acelerómetros.....	38
1.5.1.2.- Geófonos.....	39
1.5.2.- Equipo de Adquisición.....	45
1.5.2.1.- Modo de Activación del Sismógrafo.....	47
1.5.3.- Equipo de Análisis.....	47
1.5.3.1.- Minimate Plus TM	48
1.5.3.2.- Blastware III.....	51
1.6.- VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA.....	59
1.6.1.- Análisis de Vibraciones producidas por Voladura.....	59
1.6.2.- Modelos de la Velocidad Pico de Partícula.....	61
1.6.2.1.- Modelo de Campo Lejano.....	62
1.6.2.2.- Modelo de Campo Cercano.....	64
1.6.2.3.- Comparación entre los modelos de Devine y Holmberg&Pearsson.....	66
1.6.3.- Estimación de la Velocidad Pico de Partícula Crítica.....	67

1.7.- MONITOREO DE LAS VIBRACIONES.....	70
1.7.1.- Objetivo del Monitoreo de las Vibraciones.....	70
1.7.2.- Obtención de datos a partir del monitoreo de las Vibraciones.....	71
1.7.2.1.- Verificación del Máximo Desplazamiento.....	71
1.7.2.2.- Eficiencia Relativa del Explosivo.....	72
1.7.2.3.- Cargas Detonando en una secuencia determinada.....	73
1.7.2.4.- Dispersión de los tiempos de encendido de los retardos....	74
1.7.2.5.- Resultados de Campo.....	75
1.8.- MODELAMIENTO DE VIBRACIONES – CAMPO LEJANO.....	77
1.8.1.- Datos de Laboratorio.....	77
1.8.1.1.- Ensayo de Propiedades Físicas.....	77
1.8.1.2.- Ensayo de Compresión Simple.....	77
1.8.1.3.- Ensayo de Compresión Triaxial.....	78
1.8.1.4.- Ensayo de Propiedades Elásticas.....	78
1.8.1.5.- Cálculo de la Velocidad de Onda P.....	79
1.8.2.- Cálculo de la Velocidad Pico de Partícula Crítica de los tajeos.....	80
1.8.3.- Modelamiento de los tajeos.....	81
1.9.- ANÁLISIS DE LOS DAÑOS ORIGINADOS POR LA VOLADURA DE ROCAS.....	84
1.9.1.- Normatividad Internacional en el Manejo de las Voladuras.....	85
1.9.2.- Índice de Daños Originados por Voladuras (Blast Damage Index)..	86
1.9.3.- Criterio de Daño.....	87
1.10.- TÉCNICAS USADAS PARA REDUCIR LAS VIBRACIONES.....	94
1.11.- CÁLCULO DE LA CARGA MÁXIMA POR RETARDO.....	96
1.11.- APLICACIÓN EN OTRAS UNIDADES MINERAS EN OPERACIONES DE TALADROS LARGOS.....	98

CAPÍTULO II

Conclusiones

CAPÍTULO III

Recomendaciones

CAPÍTULO IV

Bibliografía

CAPÍTULO V

Apéndices

DEDICATORIA

Con mucho amor y cariño a Martha y Guillermo, mis padres.

AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera colaboraron para la realización del presente trabajo, en especial al Ing. Oscar Rosas, por su apoyo y pautas para el desarrollo del mismo.

Quiero hacer una mención especial a los profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas en especial al Dr. Carlos Agreda Turriate y al Ing. José Corimanya Mauricio; quienes con sus sabias enseñanzas, consejos y observaciones han contribuido a la realización del presente trabajo.

INTRODUCCION

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

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

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

Los puntos más importantes que se deben considerar cuando se hacen voladuras son:

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

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

OBJETIVOS:

1.- Objetivo general:

- Investigar el campo de las vibraciones causadas por los trabajos de explotación de minerales, mediante el acopio y análisis de la literatura técnica existente en el ámbito mundial. Ejemplarizar la problemática de la evaluación y control de sus efectos mediante el monitoreo, modelamiento, análisis e interpretación de datos reales en condiciones de trabajo normales, para llegar a recomendaciones de procedimiento aplicables en la práctica de la Ingeniería en nuestro medio.

2.- Objetivos específicos:

- Investigar y establecer procedimientos de análisis de vibraciones generadas por voladuras.
- Selección del explosivo adecuado capaz de realizar un trabajo determinado usando el monitoreo de vibraciones.
- Determinación de la cantidad máxima de explosivo por retardo en los taladros minimizando de esta manera el daño al macizo rocoso, creando ambientes de trabajo más seguros.

RESUMEN

La voladura representa una de las operaciones unitarias de mayor relevancia en toda operación de extracción de mineral. Su objetivo final es lograr un adecuado grado de fragmentación de la roca, de tal modo que haga mínimo el costo combinado de las operaciones de perforación, voladura, transporte y chancado primario de la roca, produciendo a la vez el menor daño posible en las cercanías de ésta.

El alto grado de influencia de los resultados de la voladura, en los restantes procesos del ciclo operacional, hace evidente la necesidad de contar con la experiencia y tecnología que permitan evaluar y posteriormente optimizar esta operación minera unitaria.

El empleo adecuado del Monitoreo de Vibraciones producto de voladuras, es una técnica que provee múltiples ventajas en términos de poder examinar en detalle el proceso de la voladura. En efecto, la medición de los niveles de velocidad de partículas que provoca la detonación de cada carga explosiva, es un medio a través del cual es posible conocer su eficiencia relativa, su interacción con las cargas adyacentes y en definitiva el rendimiento general del diseño.

Así, el monitoreo de las vibraciones en la roca causadas por una voladura, ha sido utilizado como una herramienta de diagnóstico de ésta, ya que la adecuada interpretación del registro de vibraciones permite determinar el grado de interacción entre las variables de una voladura, pudiéndose evaluar por ejemplo: cargas detonando en una secuencia de encendido incorrecta; dispersión en los tiempos de encendido de los retardos; detonación deficiente de cargas; detonaciones instantáneas; detonación de cargas adyacentes por simpatía; además de la cuantificación de los niveles de velocidad, frecuencia, aceleración y desplazamiento de las partículas de roca.

Otro aporte importante del empleo de ésta tecnología, es el de obtener los niveles de velocidad de partícula absolutos, para cada una de las cargas explosivas, las que asociadas a las distancias en que se registra dicha detonación conforman una base de datos con la cual se ajustan los modelos de comportamiento y se evalúa el daño potencial que esa vibración puede producir.

Las vibraciones producidas por las voladuras y el conocimiento de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permite estimar la probabilidad de ocasionar daño en dicho macizo. Los altos niveles de vibración pueden dañar al macizo rocoso, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto, puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso.

Se describe en este trabajo algunos casos de aplicación de la técnica de monitoreo de vibraciones particularmente en Minería Subterránea y su importancia en el diagnóstico, control, modelamiento y optimización del proceso de la voladura. Se analiza su potencial en términos de alcanzar substantivas mejoras técnico-económicas, aumentar los rendimientos y minimizar los costos operacionales en esta etapa de la explotación minera.

GENERALIDADES

1.- UBICACIÓN Y ACCESO

El yacimiento minero Ares se encuentra a 275 km. al NW de la ciudad de Arequipa, en el parque de Cajchaya, distrito de Orcompampa, provincia de Castilla, departamento de Arequipa, a una altitud de 4950 msnm.

El área de estudio que comprende 8000 hectáreas, se ubica en la mina Ares y sus alrededores, comprendiendo también el caserío de Vizcacuto, el caserío de Quimsachata, el Cerro Sauce y la laguna Machucocha.

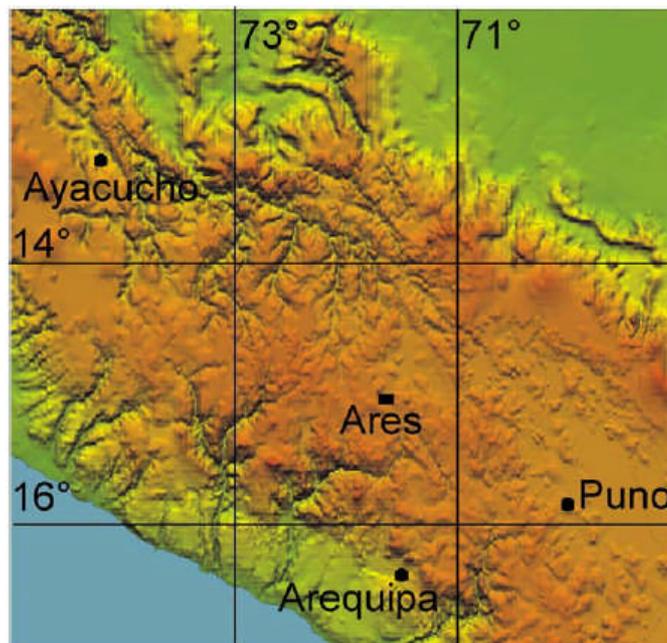
El punto central de toda el área de estudio tiene las siguientes coordenadas UTM

Norte 8'337,000 Este 807,000

Y las coordenadas geográficas:

Longitud Oeste: 72°10'00"

Longitud Sur: 15°02'00"



Ubicación de la Mina Ares

Para llegar a Arequipa desde Lima, existe un acceso de carretera:

Vía Terrestre	Km	Tiempo
1.- Lima – Arequipa	1030	14 horas

Vía Aérea

Aeropuerto Lima – Aeropuerto Arequipa – Aeropuerto Orcopampa – Ares

(De Orcopampa a Ares hay 40 km por carretera en 1 hora)

Para llegar desde Arequipa a la mina Ares existen dos accesos carreteros de los cuales el más utilizado es el primero:

	Km	Tiempo
1. Arequipa – Sibayo – Caylloma – Mina Ares.	275	7 horas
2. Arequipa – Aplao – Viraco – Orcopampa – Minas Ares	330	9 horas

2.- FISIOGRAFÍA Y TOPOGRAFÍA

La fisiografía de la región consiste básicamente de valles en U, cuencas de recolección, lagunas y glaciares, los cuales se encuentran sobre los 4950msnm.

La topografía de la región es muy irregular y escarpada con pendientes pronunciadas que terminan en quebradas profundas.

3.- CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima presenta 2 épocas bien diferenciadas; la primera con intensas nevadas y una temperatura promedio de -5°C se da en los meses de Diciembre a Marzo, la segunda con poca presencia de nevadas pero bastante hielo y una temperatura promedio de -12°C se da durante los meses de Abril a Noviembre.

En las partes más bajas como es el valle del río Collpa, crecen pastos y bofedales. La vegetación de la zona es muy limitada solo se encuentra el Ichu, Tolas y especies vegetales hemicriptofíticas.

4.- GANADERÍA

La ganadería es una actividad importante, sobre todo en Vizcacuto y Quimsachata, donde se cría principalmente camélidos (llamas y alpacas) y ganado ovino.

En la laguna Machucocha existe un criadero de truchas.

5.- HISTORIA DE LA MINA

La compañía Minera Ares S.A.C. es una Empresa Peruana que pertenece al Grupo HOCHSCHILD cuya actividad minera en el beneficio de minerales de Oro y Plata. Actualmente es una de las más importantes minas subterráneas productoras de Oro y Plata en el Perú.

1989: DESCUBRIMIENTO DEL YACIMIENTO (Fotografía aérea y confirmado por muestreo de afloramientos – 1990 y 1991).

1993: Inicio de las **EXPLORACIONES** (Desarrollo de 2 inclinados sobre Veta Victoria y de una galería de 800 m a lo largo de la misma).

1996: Inicio de los Trabajos de **PREPARACIÓN DE LA MINA** (Construcción de la rampa principal).

1997: Inicio de las Operaciones de **EXPLORACIÓN**.

Abril 1998: Inicio de Operaciones de **TRATAMIENTO METALÚRGICO** en la Planta de Beneficio.

Sus leyes de cabeza son las siguientes:

Au: 26 gr/TM

Ag: 8.03 oz/TC

6.- RECURSOS HUMANOS:

El personal que participa en los trabajos mineros son en un importante porcentaje habitantes de los poblados aledaños como: Chilcaimarca, Orcompampa, Chapoco, Huancarane, Huilluco, Tintamiarca, Misahuanca y Panagua.

CAPÍTULO I

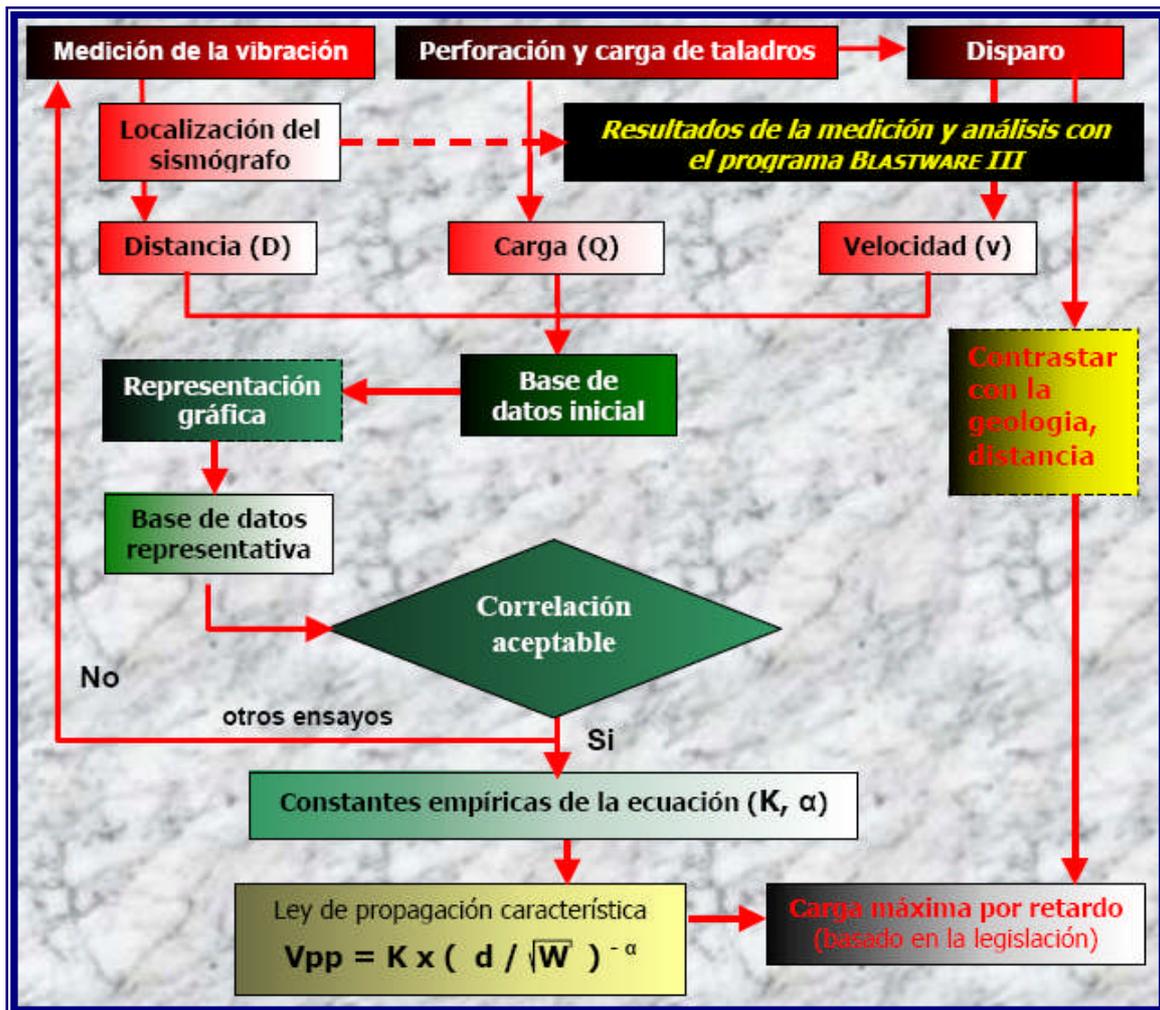
1.1.- INTRODUCCIÓN

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

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

Además de la acción de reducir el tamaño y mover la roca, la energía de una voladura genera ondas sísmicas que pueden causar un daño significativo a la roca a grandes distancias, pudiendo afectar a fallas o estructuras principales como también a instalaciones industriales y edificaciones. Las ondas de vibraciones pueden ocasionar un daño potencial mayor cuando se presenta con altos niveles de vibraciones y frecuencia dominante más bajas, lo que determina mayores desplazamientos y mayor riesgo de daño al macizo rocoso.

Para reducir la probabilidad de que se generen daños producto de las vibraciones, se describe a continuación un método de modelamiento que permite predecir la señal y niveles de las vibraciones, las que pueden ser modificadas alterando la carga explosiva, el tamaño de la voladura o número de taladros y la secuencia de iniciación de modo de minimizar el riesgo de daño.



Metodología propuesta para la prevención y control de vibraciones de voladuras
 Fuente: Departamento de Asistencia Técnica EXSA S.A.

1.2. FUNDAMENTOS DE VIBRACIONES

1.2.1.- LA NATURALEZA CÍCLICA DE LAS VIBRACIONES:

Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión. Con respecto a las vibraciones por voladuras inducidas en la roca, generalmente se considera que las vibraciones son producidas por la detonación del explosivo.

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

Después de la fase de compresión, la roca sufre una fase de expansión en un intento a volver a su estado original. Ya que todos los materiales se comportan, en mayor o menor medida, como un resorte, una vez que la fuerza de compresión es removida, la roca se relaja y vuelve a su estado original pasando más allá de ésta. Como la roca se mueve más allá de su posición original, esto crea una fase de tensión del ciclo de vibraciones. El ciclo completo es mostrado en la Figura 1.

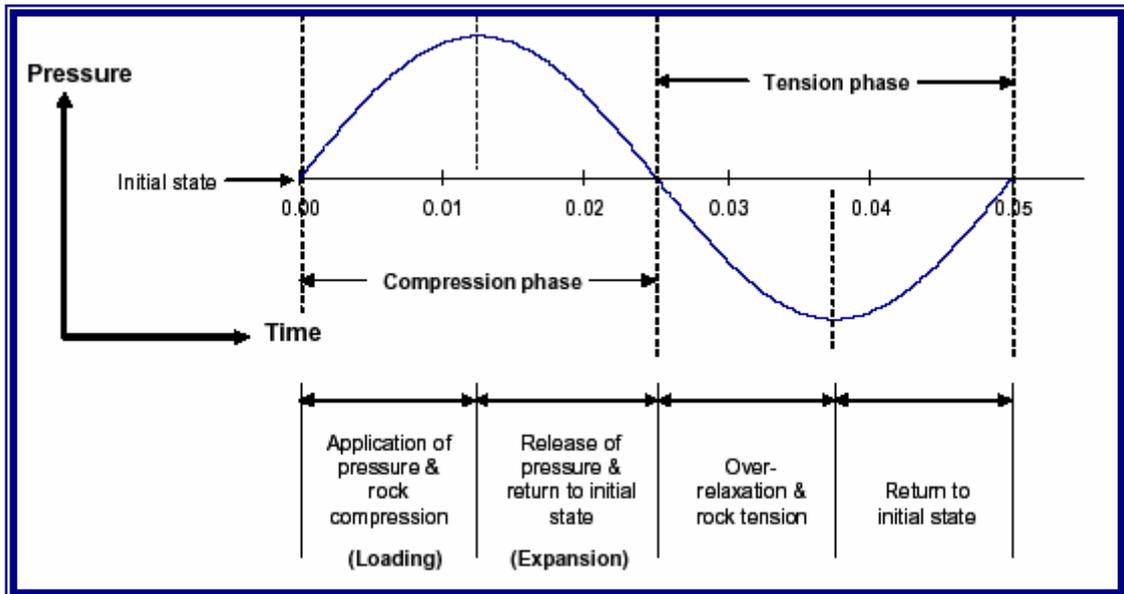
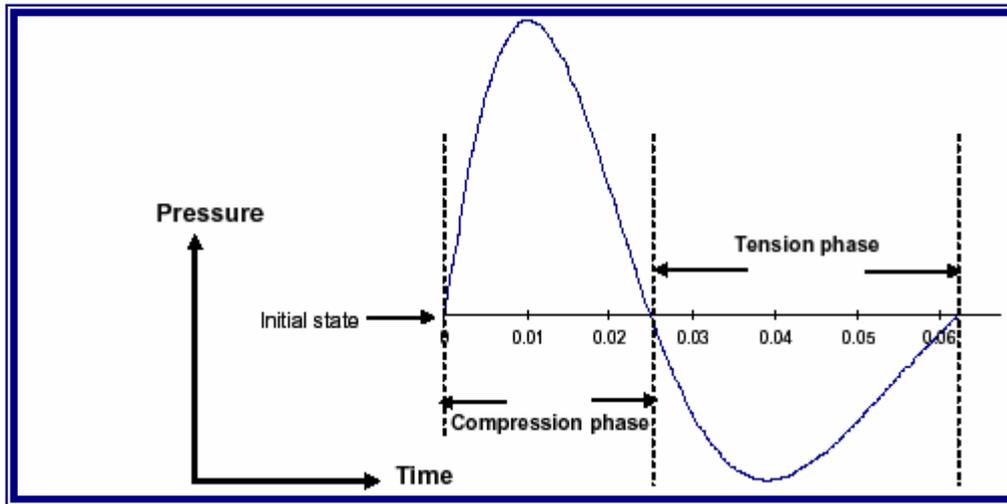


Figura 1: Ciclo de Esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión
Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Ya que la roca responde como un resorte al paso de las ondas de vibraciones, (el modulo de Young representa la rigidez del resorte), el ritmo al cual la roca se relaja puede ser diferente al ritmo a la cual es sometida la roca por un pulso de corta duración, que genera la detonación de una carga explosiva. En este caso, no es inusual ver, en rocas débiles con modulo de Young relativamente bajos, que las fases de compresión y tensión tienen diferentes amplitudes y diferentes duraciones como se ilustra en la Figura 2.



*Figura 2: Presión y relajación no simétrica a un elemento de roca.
Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)*

La ecuación que explica las características del movimiento de una partícula por el paso de una onda suele ser de la siguiente forma:

$$A(t) = A_0 \text{sen}(2\pi f t)$$

Donde $A(t)$ representa la amplitud de la onda en un tiempo t , A_0 es el peak de amplitud sobre la onda completa y f es la frecuencia de la onda.

1.2.2.- PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS ONDAS:

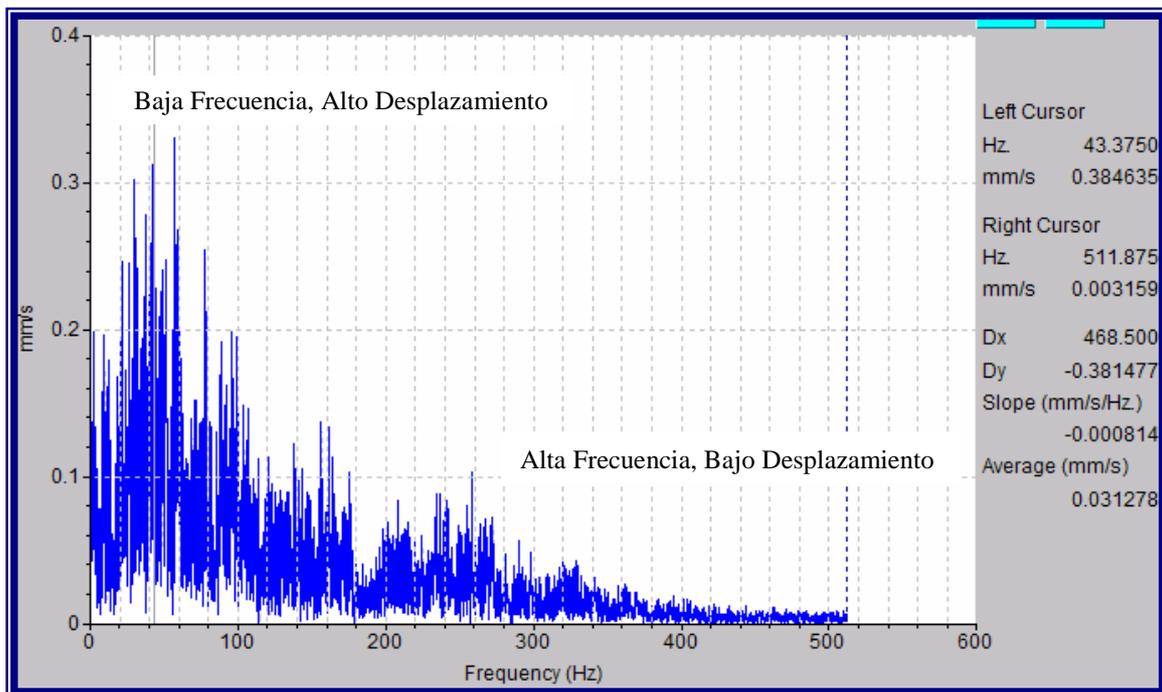
Las propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones son:

1.2.2.1.- Frecuencia de las vibraciones:

La frecuencia de las vibraciones indica el número de veces por segundo que la onda de propagación pasa por un ciclo completo de compresión y tensión. El factor que tiene una gran influencia en esto son las dimensiones de las cargas, columnas grandes de carga tienden a producir bajas frecuencias. Sin embargo otros importantes factores incluyen los módulos de la roca y la razón de carga producida por la detonación (es decir la velocidad de detonación). La frecuencia dominante es considerada generalmente como el inverso del tiempo del ciclo completo

Se observará generalmente que las ondas de vibraciones registradas a grandes distancias tienden a tener bajas frecuencias en comparación a aquellas registradas a cortas distancias. Es importante saber que una onda con una frecuencia única, y que se propaga a través de un medio homogéneo, mantiene su frecuencia en toda su distancia de viaje y

a través de todo tipo de roca. El hecho que las ondas registradas a grandes distancias tengan frecuencias menores a aquellas registradas a cortas distancias confirma que las ondas de vibraciones contienen un amplio rango de frecuencias, y que las ondas de altas frecuencias son atenuadas preferentemente, dejando un espectro dominado por componentes de bajas frecuencias. Si la frecuencia es baja, el desplazamiento es mayor, por lo que se produce un mayor daño en el medio en que se transmite las vibraciones.



Fuente: Blastware III, InstanTel – Operador Manual

1.2.2.2.- Amplitud de las Vibraciones:

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

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

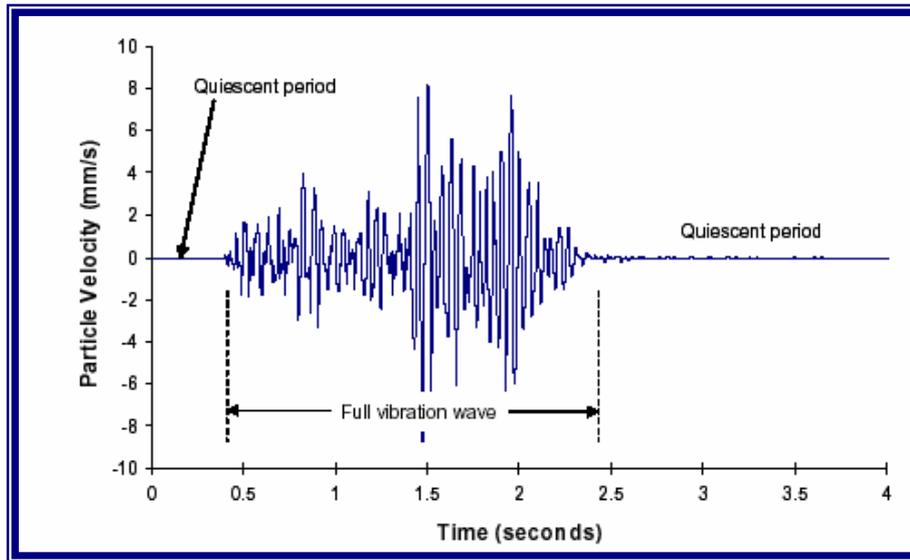
Las unidades de amplitud dependen del tipo de sensor utilizado para detectar el paso de la onda cíclica de esfuerzo. El paso de las ondas de vibraciones resulta en un

desplazamiento real de la partícula, y es posible medir ese desplazamiento real, la velocidad de la partícula en movimiento, o su aceleración. Ya que la frecuencia del movimiento de la partícula puede ser alta (cientos de Hertz), en la práctica es fácil encontrar y usar dispositivos que tengan una adecuada respuesta a la frecuencia y sensibilidad para medir velocidad (geófonos) o aceleración (acelerómetros). Debido a que el desplazamiento, velocidad y aceleración están relacionados, la medida de cualquiera de éstas, teóricamente podría permitir el cálculo de las otras dos. Los dispositivos más baratos y fáciles de usar para medir las vibraciones son los geófonos, y con estos dispositivos las vibraciones son medidas en términos de velocidad de partículas y tiene la unidad de mm/s (pulgadas/s en USA).

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

1.2.2.3.- Duración de las Vibraciones:

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



Fuente: Blastware III, InstanTel – Operador Manual

La onda total de vibración, que es medida a partir de una voladura de producción, es el resultado de pulsos individuales producidos por cada taladro de voladura combinados todos en el punto de medición. El modelo en el cual ellas se combinan para formar la onda resultante variará de acuerdo a la dirección y distancia de la voladura, por lo tanto, dos registros de la misma voladura no producirán la misma onda de vibración. La duración de la vibración será un poco mayor que la duración de la voladura (es decir el tiempo entre la detonación del primer y último taladro). Normalmente la duración de la vibración es alrededor de 200 a 300 ms más larga que la duración de la voladura, debido al tiempo requerido para que la vibración llegue desde el último taladro detonado al punto de medición. La duración de la vibración se incrementa con el aumento de la distancia de propagación, ya que en grandes distancias, la refracción y reflexión de la onda se combinan con la onda directa, y un lento movimiento de ondas de superficie y ondas de corte comienzan a aumentar, separadas del rápido movimiento de las ondas de cuerpo. A 500 metros la onda de vibración puede ser de 500 a 1000 ms más larga que la duración de la voladura.

1.2.2.4.- Longitud de Onda de las Vibraciones:

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

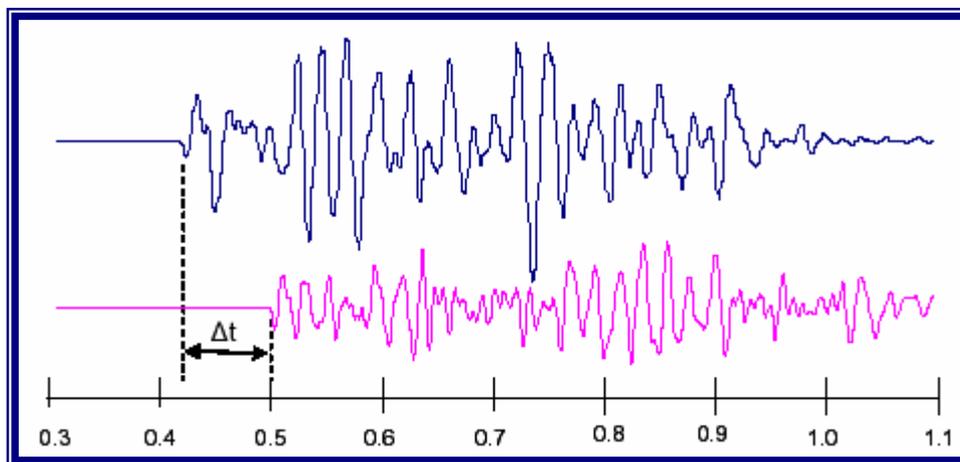
La longitud de onda, λ , se puede calcular a partir de una onda de vibración con una frecuencia única, f , (es decir una onda armónica simple) por la fórmula $\lambda = V_p / f$ donde V_p es la velocidad de propagación de la onda P.

1.2.2.5.- Velocidad de Propagación:

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

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

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



Fuente: Blastware III, InstanTel – Operador Manual

La mayoría de las rocas tienen una velocidad de propagación entre 3000 m/s y 5000 m/s. Mediciones de la velocidad de propagación en roca menores que 1500 m/s son consideradas poco confiables, y se debe revisar cuidadosamente el sistema de medición antes de aceptar un valor tan bajo, ya que ellas implican un grado de fracturamiento muy alto y que las distancias de transmisión de vibración sean probablemente muy

cortas. Mediciones de velocidades de propagación que excedan los 6000 m/s son consideradas también poco confiables, y nuevamente los sistemas de medición debieran ser cuidadosamente analizados antes de aceptar dichos valores tan altos.

1.2.3.- TIPOS DE ONDAS EN VIBRACIONES:

La onda de choque generada por la detonación de cargas explosivas crea tensiones que producen el fracturamiento en la roca. Esta además se propaga en forma esférica (en todos los sentidos) y transfiere una energía vibracional al macizo rocoso que es transmitida por una combinación de mecanismos que se representa fundamentalmente a través de ondas.

Los tres tipos principales de onda que se pueden observar cuando se monitorean las vibraciones generadas por voladura, aunque no todas ellas siempre se presentan o detectan- son los siguientes: Ondas de Compresión; Ondas de Corte o Cizalle y Ondas de Superficie. Las ondas de compresión y de corte viajan dentro de la roca y pueden penetrar cientos de metros, aún kilómetros en la corteza terrestre, y están referidas como ondas de cuerpo. Las ondas de superficie, sin embargo, se transmiten muy cercanas a la superficie del terreno, y penetran dentro de la corteza terrestre no más que 1,5 a 2 veces su longitud de onda (aunque esto pueda representar algunos cientos de metros).

Onda Longitudinal - Onda de Compresión (P): Normal a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento a lo largo de una línea que une la fuente y el punto de registro. Consiste en una serie de movimientos de compresión y tensión, con oscilaciones de las partículas en la misma dirección de propagación. El término primario se origina en que esta onda tiene una gran velocidad de propagación y por ende, es la primera en llegar al punto de medición.

Onda Transversal (S): Perpendicular a la dirección de la voladura en el plano Horizontal, movimiento en ángulos rectos a una línea que une la fuente y el punto de registro.

Al momento que se genera la onda P, se produce un segundo tipo de onda que corta o tiende a cambiar la forma del material transmisor y genera movimientos en las partículas perpendiculares al frente de choque, acentuadas por el pulso de presión

inicial; por la duración de la onda P o por discontinuidades del macizo rocoso. A este tipo de onda se le denomina de Onda S, de Corte, Forma o Secundaria.

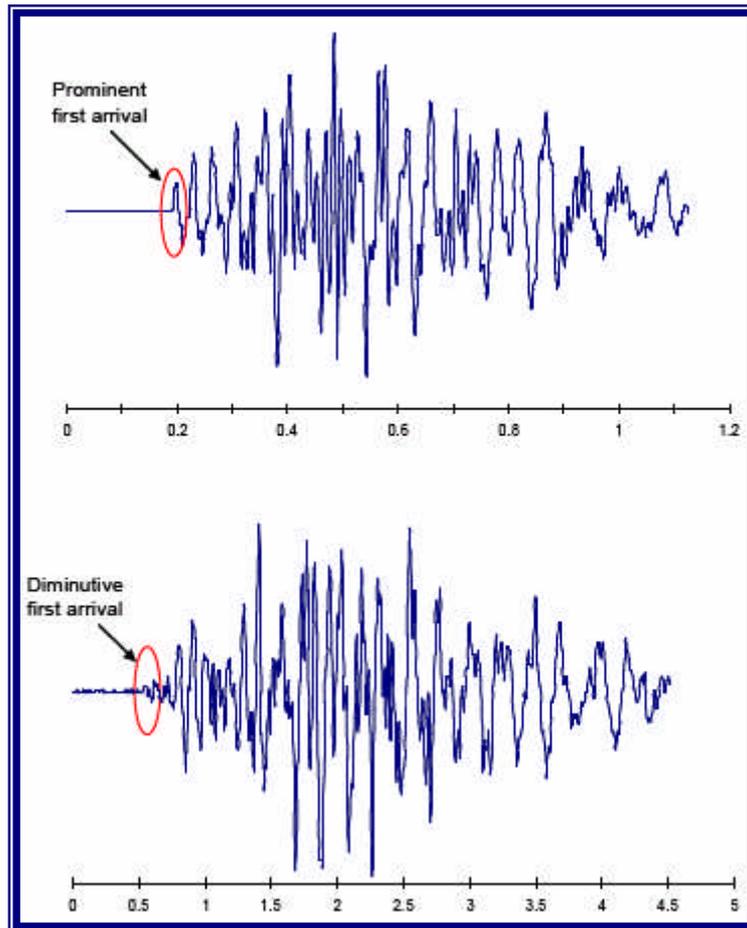
Las ondas P pueden desplazarse a través de un sólido, un líquido o gas, porque que estas materias resisten compresión o cambios de volumen. En cambio las ondas S viajan sólo en los sólidos, puesto que su existencia depende de módulos de corte o de la habilidad del material transmisor para resistir cambios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

Onda de Superficie: Son generadas en la superficie en respuesta a la interacción de las ondas P y S con la superficie.

Cuando las ondas de cuerpo alcanzan la superficie de la tierra, ésta experimenta movimientos verticales y horizontales. Las ondas así producidas son denominadas “elásticas de superficie” y también como ondas Rayleigh y Love. La onda Rayleigh, predicha matemáticamente por Lord Rayleigh, imprime un movimiento en trayectoria elíptica contraria a la de propagación de avance de la onda. La onda Love (onda-Q) más rápida que la Rayleigh, da lugar a un movimiento transversal, relativo a la dirección de avance de la onda.

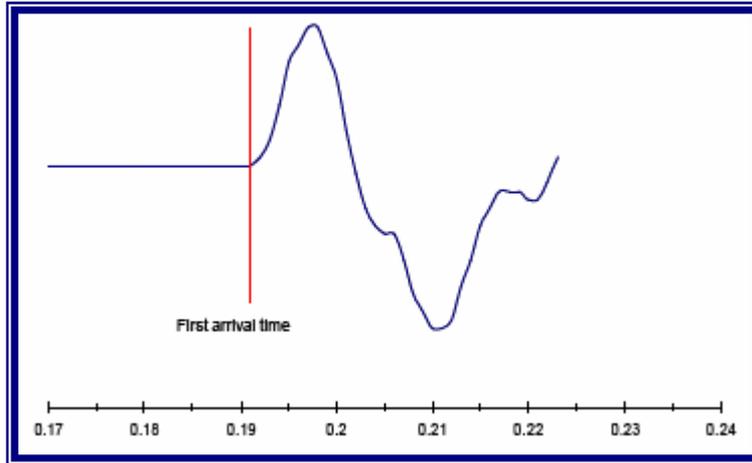
1.2.4.- PRIMER ARRIBO DE ONDAS:

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



Fuente: Blastware III, Instantel – Operador Manual

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



Momento de arribo de la onda
Fuente: Blastware III, Instantel – Operador Manual

1.2.5.- LAS UNIDADES DE VIBRACIONES:

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

1.2.5.1.- Velocidad de las Vibraciones:

La mayoría de los instrumentos que monitorean vibraciones por voladuras utilizan geófonos, y por lo tanto producen una señal de voltaje que varía con el tiempo, $V(t)$, proporcional a la velocidad del movimiento de la partícula, $v(t)$, la cual también varía con el tiempo. La velocidad es el método preferido de medición de las vibraciones generadas por voladura, ya que la velocidad de vibración es proporcional al esfuerzo y por lo tanto al potencial daño.

Si la onda de vibración es continua y armónica simple, (es decir una única frecuencia sinusoidal, f), ésta puede ser representada por una simple ecuación, $v(t) = A_0 \text{seno}(2\pi ft)$, donde A_0 representa el peak de amplitud de la velocidad de partícula. En la práctica, el peak de amplitud está controlado fuertemente por la cantidad de explosivo por taladro,

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

A partir de un registro de velocidad de vibración, se puede obtener el registro de aceleración $a(t)$, por la derivación de la señal de velocidad con respecto al tiempo, y el desplazamiento, $s(t)$, se puede obtener por la integración de la señal con respecto al tiempo.

$$s(t) = \int v(t) dt \quad y \quad a(t) = \frac{dv(t)}{dt}$$

1.2.5.2.- Aceleración de las Vibraciones:

El movimiento de las partículas puede ser medido también en términos de aceleración, mediante el uso de acelerómetros. En este caso el instrumento entregará una señal de voltaje dependiente del tiempo, $V(t)$ la cual es proporcional a la aceleración de partículas en el tiempo, $a(t)$, con una constante de proporcionalidad determinada por la sensibilidad del acelerómetro usado para realizar la medición. Si la onda de vibración es continua y armónica simple (es decir una única frecuencia sinusoidal, f), ésta puede ser representada por una ecuación simple $a(t) = A_0 \text{seno}(2\pi f t)$, donde A_0 representa el peak de amplitud de la aceleración. Para convertir la aceleración en velocidad es necesario integrar la señal con respecto al tiempo

$$v(t) = \int a(t) dt = \frac{A_0}{2\pi f} \cos(2\pi f t)$$

Donde el factor $(A_0 / 2\pi f)$ representa el peak de velocidad (cuando $\cos(2\pi f t) = 1$). Hay que notar que el peak de aceleración estará desfasado con respecto al peak de velocidad.

(Es decir el peak de aceleración ocurre cuando el peak de la velocidad es cero y no en el mismo instante del peak de la velocidad).

En forma similar, para obtener el desplazamiento desde la señal de aceleración, la señal original de la aceleración debe ser doblemente integrada, a partir de la cual se puede observar que el desplazamiento de la partícula está en fase con la aceleración, pero fuera de fase con la velocidad de la partícula, es decir el peak del desplazamiento de la partícula ocurre en el mismo instante que el peak de la aceleración.

$$s(t) = \iint a(t) dt = \frac{A_0}{(2\pi f)^2} \sin(2\pi f t)$$

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Cercano a la voladura, los niveles de aceleración son muy altos, y usualmente mayores que la aceleración debido a la gravedad (es decir >1g). Niveles de aceleración alrededor de 100 g son bastante realistas cuando las mediciones son hechas muy cercanas a las voladuras (<10 metros).

1.2.6.- VIBRACIONES Y ESFUERZO:

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

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

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

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

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

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

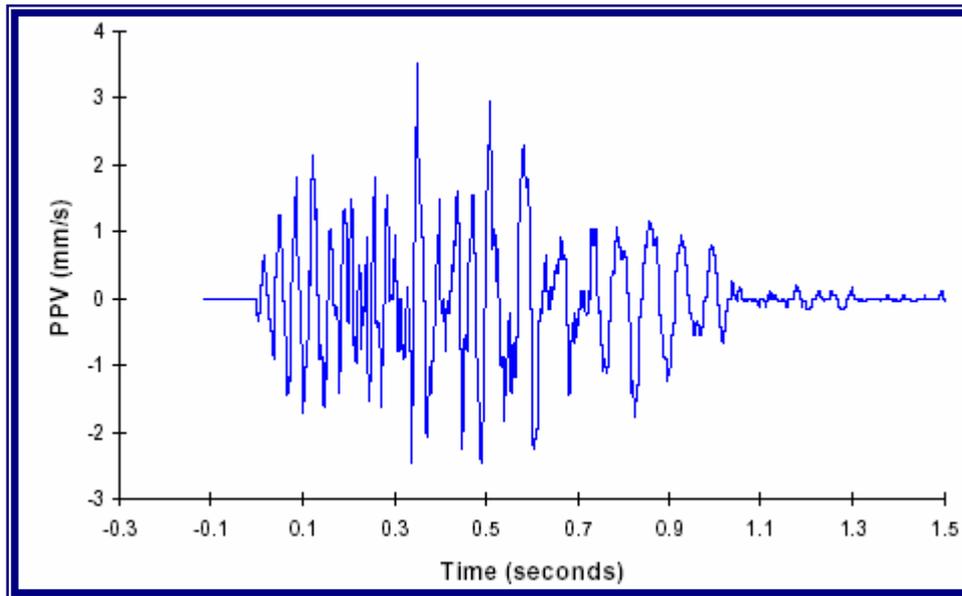
$$PPV_{max} = \varepsilon_{max} V_p = \frac{\sigma_t V_p}{E} \approx \frac{UCS \times V_p}{12 \times E}$$

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

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

1.3.- CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES ORIGINADAS POR LAS VOLADURAS:

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



Registro de onda de la velocidad de vibración de una voladura de producción, mostrando variación de amplitud y frecuencia respecto al tiempo.

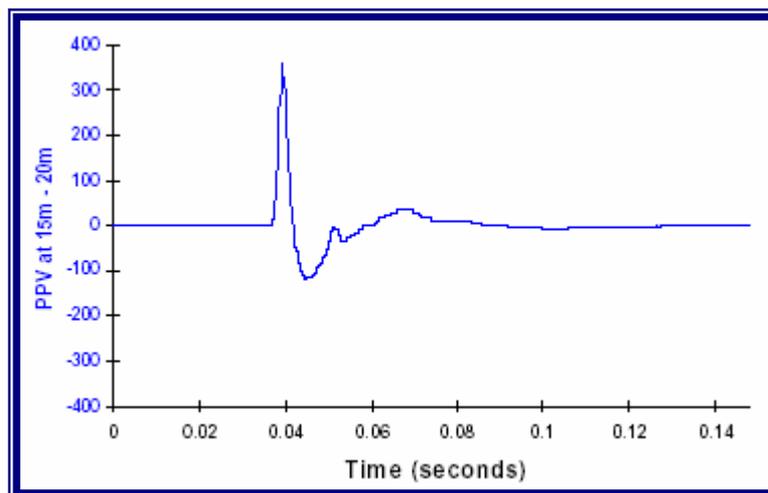
Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

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

1.3.1.- VIBRACIONES DE UN SOLO TALADRO

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

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



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

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

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

1.3.1.1.- Frecuencia de las Vibraciones:

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

El método de Fourier es el único método confiable y efectivo para análisis de frecuencia, aunque cuando se utiliza este método, se transforma muy difícil describir la frecuencia por un único valor, tal como la frecuencia dominante, puesto que se observa

muy a menudo que muchas frecuencias están asociadas a valores similares de amplitud ya sea en el espectro de amplitud o energía.

1.3.1.2.- Amplitud de las Vibraciones

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

Es interesante notar la asimetría en la onda de vibración, lo que sugiere que el esfuerzo de compresión (360 mm/s) es mucho más alto que el esfuerzo de tensión (114 mm/s). Comúnmente esta asimetría se observa cerca de las cargas grandes y desaparece después de unos 100 metros de propagación, donde la componente de tensión tiene esencialmente la misma amplitud que la componente de compresión. A menudo se considera que el gran esfuerzo de compresión cercano a los taladros es el causante del intenso quebrantamiento alrededor del taladro, mientras que en zonas más alejadas del taladro ocurren fallas por tensión.

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

1.3.1.3.- Duración de las Vibraciones:

La duración del pulso de la detonación de un único taladro no es fácil de medir, ya que no es claro determinar cuando la vibración desaparece. La duración de la primera fase de compresión y tensión es de aproximadamente 23 milisegundos, la cual debiera ser comparada con el tiempo de detonación de la columna de explosivo. Asumiendo una VOD de aproximadamente 4000 m/s en un taladro de 4" de diámetro y cuya longitud de carga sea aproximadamente de 15 metros, la columna debiera detonar completamente en aproximadamente 4 milisegundos. El tiempo adicional es aquel para que el macizo

rocoso vuelva a su estado original, y este tiempo es controlado principalmente por el módulo de la roca, pero también por el tiempo de retención de los gases de detonación en el taladro.

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

1.3.2.- VIBRACIONES PRODUCIDAS POR UNA VOLADURA:

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

1.3.2.1.- Frecuencia de las vibraciones:

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

1.3.2.2.- Amplitud y Duración de las vibraciones:

De la misma manera de lo difícil que es describir el espectro de la frecuencia de una onda usando el promedio o el valor dominante, es igualmente difícil describir la

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

1.4.- ECUACIONES DE PROPAGACIÓN DE LAS VIBRACIONES:

Es muy común querer realizar una predicción sobre el nivel de vibraciones, basado en un limitado número de mediciones, y algunas veces sin ninguna medición. Esto requiere una comprensión razonable de los principios de propagación de onda a través de la roca.

La amplitud de la onda de vibración decrece con el aumento de la distancia de propagación, como resultado de dos mecanismos diferentes e independientes – disipación geométrica y pérdida friccional (algunas veces llamado histéresis).

1.4.1.- DISIPACIÓN GEOMÉTRICA:

La vibración comienza en un punto, con una energía que es dependiente de la fuente (por ejemplo el impacto de un martillo, la detonación del explosivo, o la caída de objetos). La energía contenida en el impulso inicial de vibración se irradia hacia el exterior con un frente de onda esférico, si la fuente inicial de vibración está concentrada en un punto, y el medio de propagación es homogéneo. Después de un tiempo de iniciado el impulso, el frente de onda esférico se hace cada vez más grande. Sin embargo, la energía total no puede aumentar y en un medio perfectamente elástico se mantendrá constante, independiente del diámetro del frente de onda esférico. Por lo tanto, la energía por unidad de área debe decrecer, debido a que la energía total es irradiada en una superficie total en aumento. Para un frente de onda esférico, el área de la esfera ($4\pi r^2$) es proporcional al cuadrado de la distancia de propagación, por lo tanto la energía por unidad de área debe decrecer inversamente con el cuadrado de la distancia, es decir:

$$\frac{E}{A} \propto \frac{1}{A} = -\frac{1}{4\pi r^2}$$

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Debido a que la energía es proporcional al cuadrado de la amplitud, debiéramos esperar que la amplitud decrezca de acuerdo al inverso de la distancia, si el frente de onda en expansión es esférico. Para una forma general del frente de onda, se espera que la velocidad de vibración a cierta distancia r , $V(r)$, esté relacionada con la velocidad V_0 a la distancia $r = 1$ por:

$$V(r) = V_0(r)^{-n}$$

Donde n varía típicamente entre 1 y 2 para los eventos de voladura.

La disipación geométrica afecta a todas las frecuencias de la vibración de igual manera, independiente de la frecuencia. En un medio perfectamente elástico, el espectro de frecuencia de la vibración no cambiará con el aumento de la distancia de propagación, pero la amplitud se reducirá continuamente con el aumento de la distancia de propagación.

1.4.2.- PÉRDIDA FRICCIONAL:

Debido a que ningún material es perfectamente elástico, la energía se pierde durante la propagación debido a la fricción de las partículas en movimiento. Esta pérdida de energía por fricción significa que la energía de vibración por unidad de área no se mantiene constante (aunque la energía total debe mantenerse constante de acuerdo a la ley de conservación de energía). La pérdida friccional ocurre debido a que las partículas están sometidas a esfuerzos de compresión y relajación, y una suposición común es que la energía perdida por ciclo de propagación, ΔE , es constante, es decir:

$$-\frac{\Delta E}{E} \frac{1}{2\pi} = \text{Const.}$$

El signo negativo es usado para indicar pérdida de energía, y muchos investigadores se refieren a esta constante como Q^{-1} , donde Q está referido al Factor de Pérdida de Energía. En rocas competentes, Q puede tener un valor de 70 (es decir $1/70$ o $1,4\%$ se

pierde por cada ciclo de propagación). En rocas plásticas altamente fracturadas y blandas, Q puede ser 10, es decir, se pierde un 10% de la energía por ciclo.

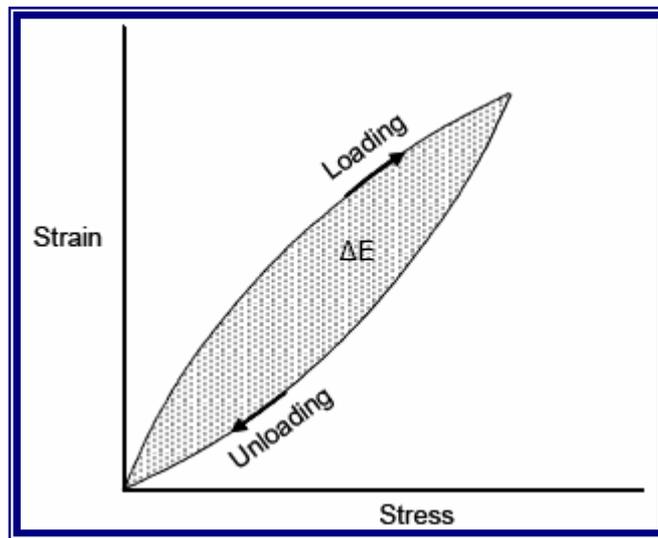
A partir de la definición anterior, la ecuación de pérdida friccional puede ser escrita como:

$$\frac{dA}{A} = \frac{1}{2} \frac{dE}{E} = -\frac{\pi}{Q} \frac{dr}{\lambda}$$

$$\therefore V(r) = V_0 e^{-\frac{\pi r}{Q\lambda}} = V_0 e^{-\frac{\pi f r}{QV_p}}$$

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Donde f es la frecuencia de la onda y Vp es la velocidad de la onda P de dicha onda.



Pérdida de energía friccional durante la propagación de la onda (el área sombreada indica la energía perdida).

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Debido a que el factor de pérdida friccional es constante por ciclo de propagación, es claro que la pérdida friccional es dependiente de la frecuencia. Sobre una distancia de 100 metros, una onda de 10 Hz pasará 0,25 ciclos en una roca con una velocidad de onda P de 4000 m/s, pero a 100 HZ la onda pasará a través de ella 2,5 ciclos. Por lo tanto, las frecuencias de ondas más altas, perderán más energía por unidad de distancia que las ondas de baja frecuencia.

1.4.3.- CONSECUENCIAS COMBINADAS DEL EFECTO DE GEOMETRÍA Y FRICCIÓN:

Los efectos de la disipación geométrica y pérdida por fricción son independientes, y actúan simultáneamente todo el tiempo, de tal manera que la descripción final de la amplitud de la onda en función de la distancia de propagación se describe mejor por la siguiente ecuación:

$$V(t) = V_0 r^{-n} e^{-\alpha r}$$

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Donde el término α se refiere comúnmente como al coeficiente de atenuación dependiente de la frecuencia, y es igual a $\pi/(Q\lambda)$, o $\pi f/(QV_p)$.

Para tener un sentido general del significado de este efecto, es mejor considerar el decaimiento de la amplitud sobre una distancia de propagación de 100 metros, en dos tipos de roca extremas, una dura casi elástica con $Q = 100$ y $V_p = 5000$ m/s, y una fracturada y plástica con $Q = 10$ y $V_p = 2000$ m/s. Ahora consideremos en la roca dura, la pérdida friccional para una onda de 100 Hz; la onda pasará a través de la roca con 2 ciclos completos, y la amplitud de esta onda decrecerá a:

$$e^{\frac{-\pi \times 100 \times 100}{100 \times 5000}} = 0.94$$

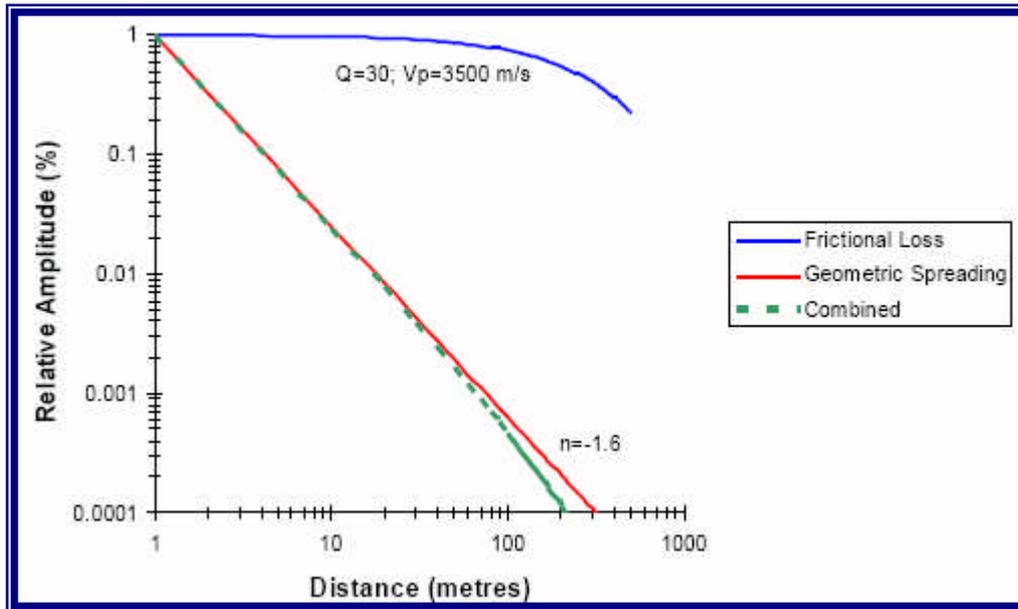
Es decir, perderá aproximadamente el 6% de su amplitud después de 100 metros de propagación. En la roca blanda de material plástico, la onda pasará los 100 metros con 5 ciclos, y la amplitud de la onda decrecerá a

$$e^{\frac{-\pi \times 100 \times 100}{10 \times 2000}} = 0.21$$

Es decir, perderá el 79% de su amplitud después de 100 metros de propagación.

Claramente, en roca competente y sobre una pequeña distancia de propagación, el efecto de pérdida friccional es pequeño, y la mayoría de los usuarios omiten el término exponencial, prefiriendo considerar solamente el efecto de la atenuación o disipación geométrica, es decir, lo que da forma a la conocida ecuación de Devine, escalando el

término de la distancia por la raíz cuadrada del peso del explosivo. Sobre distancias relativamente pequeñas y en rocas moderadamente competentes, la ecuación de Devine aproxima razonablemente bien el decaimiento de la amplitud de la onda con el aumento de la distancia de propagación. Sin embargo, debido a que el término de la pérdida friccional se transforma muy significativo para distancias grandes, es común observar que los parámetros de la ecuación son diferentes para mediciones de campo lejano y cercano si se usa la ecuación de Devine.



Importancia relativa de la pérdida de energía y disipación geométrica en la amplitud de la vibración debido a la distancia.

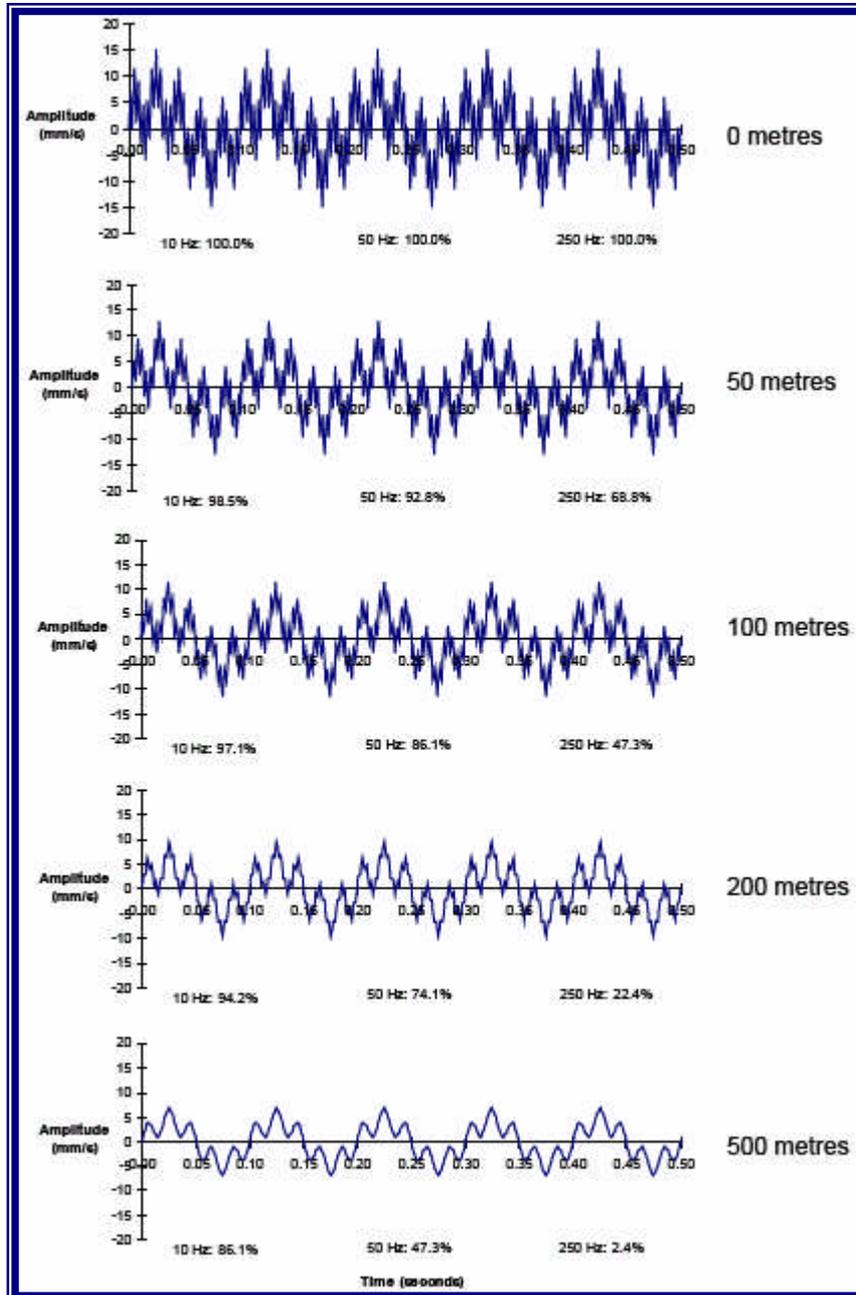
Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Sin embargo, aunque el factor de la pérdida friccional no tiene un gran efecto en la amplitud de la vibración, comparado con el efecto de la disipación geométrica, es ésta la única causa del cambio del espectro de frecuencia, el cual sólo ocurre con un aumento de la distancia de propagación.

1.4.4.- CAMBIO DE LA FRECUENCIA CON LA DISTANCIA:

Es claro que la disipación geométrica no afecta la frecuencia contenida en la onda de vibración; en un material perfectamente elástico, el espectro de frecuencia es constante sobre toda la distancia de propagación, dependiendo solamente de las características de la fuente de vibración y de los módulos del macizo rocoso por el cual se propaga la vibración.

En el ejemplo de la siguiente hoja, tres ondas de 10 Hz, 50 Hz y 250 Hz, con la misma amplitud inicial de 5 mm/s, se han propagado a diferentes distancias, y la forma de onda resultante se ha determinado por medio del principio de superposición.



*Cambios de frecuencia con la distancia de propagación debido a la pérdida friccional
($Q = 30$, $V_p=3500$ m/s)*

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

También se muestra en la figura anterior, debajo de cada forma de onda, el porcentaje remanente de cada componente de frecuencia y la distancia de propagación se muestra al lado de cada onda. El mecanismo de pérdida friccional explica porqué las componentes de vibración de alta frecuencia son atenuadas preferentemente con el

aumento de la distancia de propagación. En la figura anterior, sólo el 2.4% de las ondas con 250 Hz se mantiene después de una propagación de 500 metros, pero se mantiene el 86% de la componente de 10 Hz. La simulación anterior ignora los efectos de la disipación geométrica en la amplitud de la onda.

1.5.- INSTRUMENTACIÓN PARA MONITOREAR LAS VIBRACIONES:

La instrumentación es vital y su propósito es localizar transductores en puntos estratégicos a objeto de obtener una base de información consistente y representativa.

Para ello pasa por manejar algunos conocimientos de las ondas sísmicas generadas por la voladura a su alrededor. Estas son importantes puesto que transportan la energía vibracional, por lo tanto, debemos tener presente sus relevancias que dependen de la geometría, posición de la voladura y sistema estructural, por ejemplo, la onda superficial es de menor amplitud y viaja más distancia, por lo tanto son importantes su medición en un campo lejano, al contrario de las ondas P y S que son más significativas cerca de la voladura. Por esto los registros de las vibraciones producidas por voladuras son almacenados en los sismógrafos, los cuales graban las amplitudes y duración de los movimientos de la tierra, producto de dichas voladuras, usando los siguientes componentes:

- Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalan en forma solidaria a la roca.
- Un sistema de cables que llevan la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo.
- Un equipo de adquisición, el cual recibe la señal y la guarda en memoria.
- Un computador, el cual tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.



1.5.1.- TRANSDUCTORES DE VIBRACIONES:

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

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

Costo - en muchos casos es necesario instalar transductores permanentes en el macizo rocoso, lo que evita efectos superficiales y permite un análisis completo de una voladura. Bajo estas circunstancias los equipos no pueden recuperarse y el costo de cada unidad debe ser minimizado.

Precisión - gran parte del tiempo, esfuerzo y recursos están dedicados a la instalación de los transductores de vibración; es importante entonces que ellos sean confiables en el largo plazo.

Relación señal-ruido - si la salida del transductor es grande en relación a los niveles de ruidos, los problemas detectados en minas subterráneas respecto de campos magnéticos pueden ser minimizados.

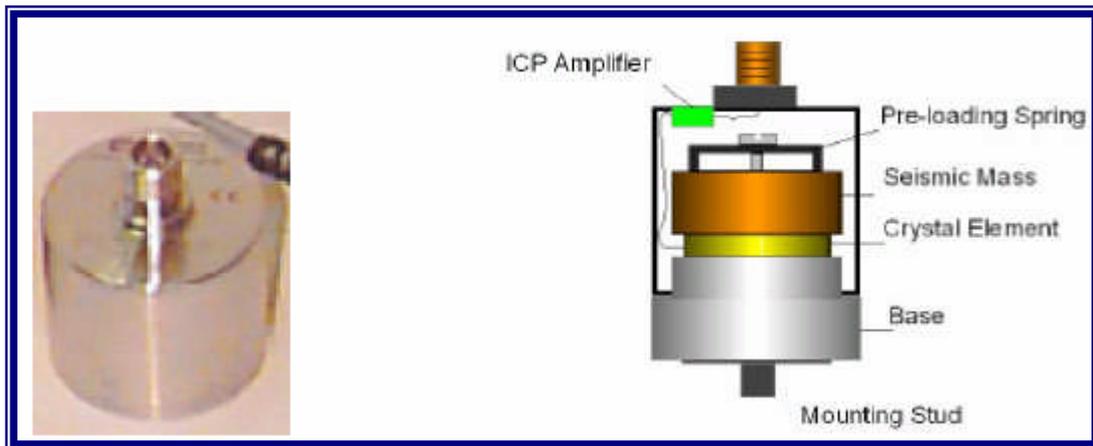
En la práctica, la selección de estos equipos es un compromiso, ya que no existen unidades que reúnan todas las características previamente detalladas. Los que se utilizan en prospecciones geofísicas y sismológicas son baratos, confiables y tienen una alta relación señal – ruido, pero soportan un rango dinámico muy limitado.

Los dos tipos básicos de transductores usados para medir las vibraciones del terreno son el acelerómetro y el geófono.

1.5.1.1.- Acelerómetros:

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

Los acelerómetros pueden ser recomendables cuando los transductores son instalados en superficies, siendo necesario recalcar que se requiere cierta experiencia para la interpretación de los registros de aceleración, en particular a bajas frecuencias.



Acelerómetro

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

Características Generales

- Mejor respuesta en un amplio rango de frecuencias (1Hz a 20.000Hz).
- Su unidad de medida es el g ($1g=9.8 \text{ m/s}^2$), con rangos de 0-250g.
- No poseen partes móviles, lo que resulta en una mayor fiabilidad.
- La deformación del cristal piezoeléctrico genera voltajes muy pequeños que deben amplificarse con elementos externos.
- Son de pequeño tamaño.
- Alto costo (aprox. US\$ 1.000)

1.5.1.2.- Geófonos:

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



Geófono

Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

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

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

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

En primera instancia el equipo de vibraciones debe ser tal que los geófonos asociados a la medición sean los adecuados para medir el nivel de vibraciones esperado, es decir si su sensibilidad es la adecuada. Para tal efecto se debe conocer los niveles máximos esperados en la medición, tanto en frecuencia como velocidad, para determinar si los geófonos son aptos para ello.

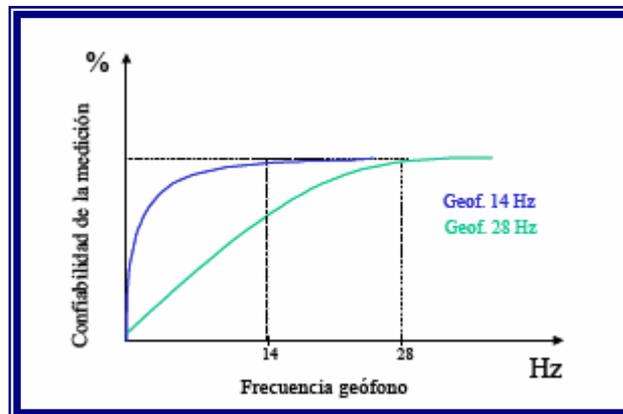
Características Generales

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

1.5.1.2.1.- Frecuencias de registro de los geófonos:

Se distinguen dos tipos de geófonos, los de campo cercano y los de campo lejano, los cuales poseen un rango de aceptabilidad en la medición que depende de frecuencia que es capaz de registrar, diferenciando los geófonos de 14 Hz y 28 Hz. Los geófonos de 14 Hz son capaces de medir vibraciones a partir de esa frecuencia con perfecta precisión, mientras que los geófonos de 28 Hz son capaces de medir vibraciones a partir de frecuencias sobre los 28 HZ.

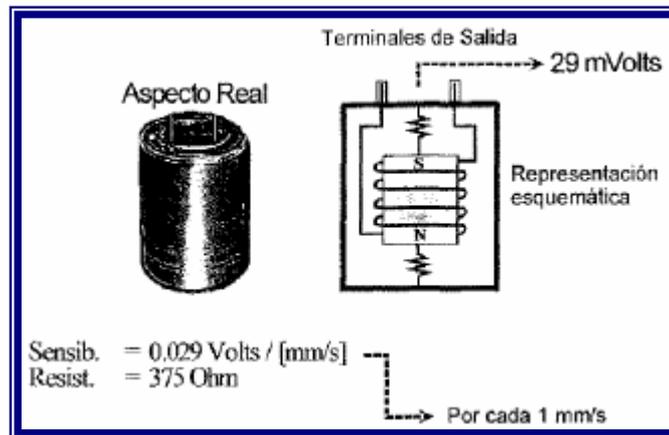
La siguiente figura da cuenta de la precisión de la medición respecto al nivel de frecuencia esperado en el registro.



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

1.5.1.2.2.- Sensibilidad:

Por otra parte existe la sensibilidad del geófono, la cual indica la magnitud máxima de vibraciones que puede recibir un geófono, y ésta se indica en unidades de volt/(mm/s). Para obtener el rango máximo de vibración que permitiría registrar un geófono es necesario ingresar el valor de sensibilidad de éste y el equipo de medición entregará el valor máximo de velocidad en forma automática.



Sensibilidad de un Geófono
Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics

1.5.1.2.3.- Máximo desplazamiento del Geófono:

Los geófonos son bobinas que al moverse producen un voltaje inducido, pero este movimiento no puede ser infinito ni mucho menos, por lo que los geófonos poseen una característica que se refiere a su máximo desplazamiento permitido, por lo tanto los geófonos son capaces de registrar vibraciones reales siempre y cuando el desplazamiento del geófono no exceda cierto valor. Comúnmente los geófonos utilizados tienen un desplazamiento máximo de 2 mm.

1.5.1.2.4.- Número de Transductores:

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

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

Si se desea examinar la contribución de cada carga de la voladura, o si el interés es conocer la forma de la onda por cada componente, debe ser conocida la fuente generadora de cada vibración. Esto requiere una cuidadosa ubicación y número de transductores a utilizar. Para un adecuado análisis de la detonación de diferentes decks

de cargas en coordenadas X, Y, Z, junto a la velocidad de propagación, se necesita un mínimo de 5 transductores.

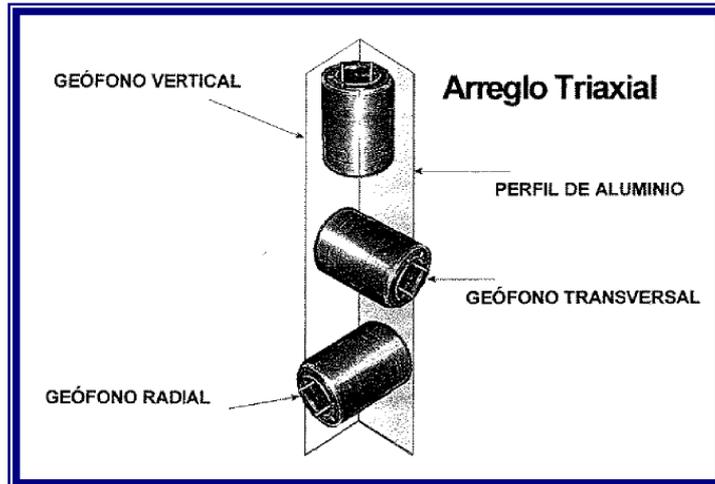
En la práctica, el número de transductores se incrementa según la complejidad del diseño y cantidad de información necesaria. Cuando se utiliza un gran número de decks por cada tiro, en el registro de vibraciones a cada uno de estos decks se le debe asociar una determinada señal de vibraciones, para lo cual se deben instalar geófonos en diferentes profundidades.

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

1.5.1.2.5.- Instalación de transductores:

Gran parte de las capacidades y ventajas de la técnica de monitoreo de vibraciones descansa en la habilidad para recolectar datos de vibración de buena calidad. La característica de estos datos tiene directa relación con la técnica empleada para instalar y orientar los transductores.

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

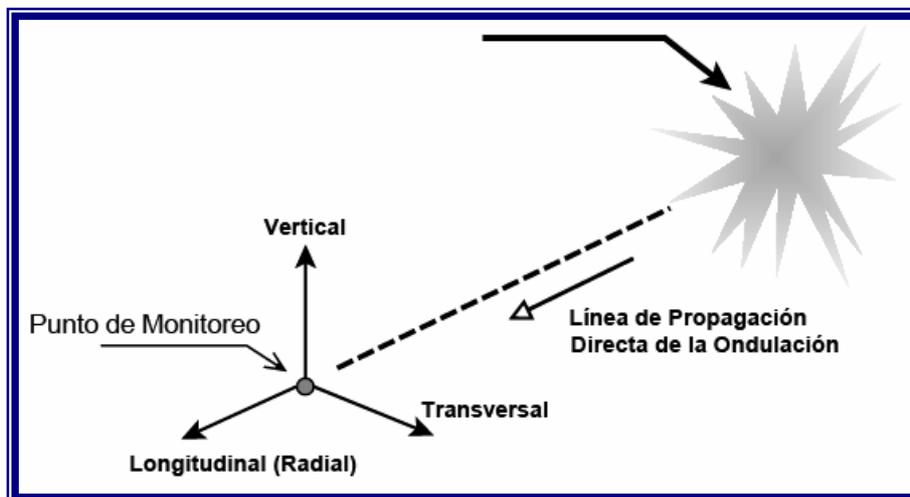


Arreglo Triaxial

Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics

1.5.1.2.6.- Orientación:

Para realizar una adecuada interpretación de los datos de vibración, que permitan analizar la secuencia real de iniciación de un determinado número de cargas, en asociación con la posición relativa entre ésta y el transductor, es necesario tener absoluta certeza de la orientación real del transductor.

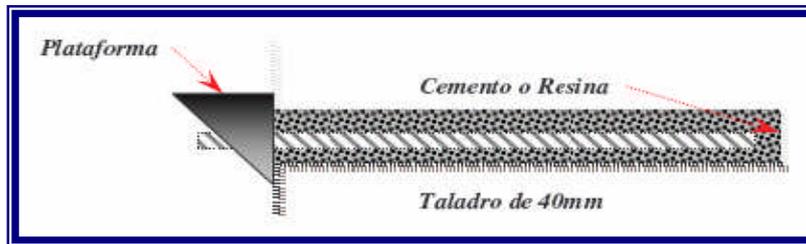


Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics

1.5.1.2.7.- Acoplamiento:

Una vez que el transductor está ubicado en la perforación de monitoreo y correctamente orientado, su posición debe ser asegurada por medio de cemento con características de hormigón, el cual proporciona mejor acoplamiento. Se debe en lo posible realizar esta operación dentro de una perforación que tenga la mínima diferencia entre los diámetros,

pero que facilite la operación. La idea en definitiva es disminuir la zona de interfase entre los dos medios esto es, la roca y el instrumento detector.



Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics



Los sismógrafos contiene tres Geófonos, los cuales montados adecuadamente registran las tres ondas: vertical, radial y transversal. Cada una de estas tres componentes del movimiento de la tierra tendrá una velocidad pico partícula (VPP) o máxima amplitud de la onda. La velocidad pico partícula que se considera es la de mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres ondas, por lo que es importante considerar también que el Vector Resultante no debe ser confundido con la velocidad pico partícula.

1.5.2.- EQUIPO DE ADQUISICIÓN:

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

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

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



Equipo Minimate Plus - Instantel



Equipo Blastronics

1.5.2.1.- Modo de Activación del Sismógrafo:

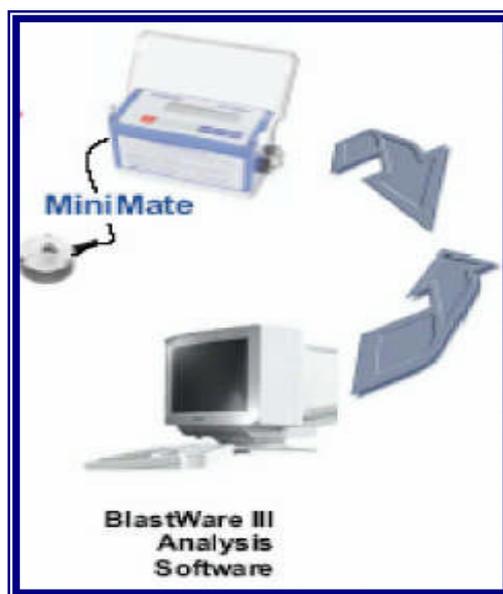
Por Cable Cortado: el equipo se activa con el inicio de la voladura debido a que el equipo se encuentra conectado a la misma por un cable que le da inicio. La ventaja de este método es poder verificar los tiempos de salida de cada taladro y hacer un diagnóstico general de la voladura. Este método es deseable en el campo cercano.

Por Umbral (threshold): el equipo se activa una vez que se supera un determinado nivel de perturbación ajustado previamente por el usuario. Se tiene la ventaja de poder posicionarse a gran distancia de la voladura.

1.5.3.- EQUIPO DE ANÁLISIS:

La información de vibraciones es comúnmente realizada en un computador personal. El análisis de los datos requiere de un conjunto Computador y Software con capacidades para un manejo integral de la forma de onda, y donde las principales tareas que deben realizar, son las siguientes:

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



Arreglo para la descarga de la información del Sismógrafo hacia la PC

El equipo usado para la realización del trabajo fue el **Minimate PlusTM** de Instantel y el Software usado es el Blastware III.

1.5.3.1.- Minimate PlusTM

A.- Enter *:

Que es el botón de encendido. Si el equipo no enciende es posible que la batería este descargada y requiera recargarse inmediatamente. Es importante saber que la batería del equipo debe estar constantemente en recarga ya que por estar conectado se descarga si no se usa. Si no se va a emplear por periodos largos, se recomienda desconectar la batería para que pueda mantenerse por mucho más tiempo.

Cuando se prende el equipo aparecerá la información sobre la carga de batería, capacidad de memoria, fecha, hora, y se pondrá listo para empezar a realizar la grabación.

Batt: E ===== F (nivel de batería, 0.1V/bar, 6.5 Vmax)

Serial 4677 V 4.0 (Nº de serie del equipo y versión del software)

%128K Mem left: 95 (memoria disponible en el equipo)

Fecha

Hora

READY TO MONITOR (mensaje de inicio)

C.- El botón CANCEL:

Se usa cuando se quiere salir de determinado menú sin cambiar las variables. Apretar el botón CANCEL repetidamente nos lleva al mensaje de inicio.

D.- El botón SETUP:

Los setup o datos de ingreso son los que se ingresan en el equipo para que haga una determinada lectura de la medición.

El Setup contiene en el menú los siguientes parámetros: RECORD MODE (modo de grabación), SOURCE (fuente de información), TRIGGER LEVEL (nivel de encendido), RECORD TIME (tiempo de grabación), TEXT NOTES (notas), JOB NUMBER (número de trabajo), TIME (hora) y DATE (Fecha).

D.1.- Record Mode

Permite darle modos de grabación al equipo dependiendo de la fuente que se va a evaluar.

Continuos: Hace un registro de varios disparos, los cuales pueden estar separados en pequeños intervalos. Es recomendable usar más este modo para no perder eventos posteriores que se pueden dar en un disparo.

Single-Shot: Opera de la misma manera del continuo con excepción que graba un solo disparo.

Manual: Donde el equipo funciona del mismo modo que el anterior con excepción que es iniciado por el operador presionando START MONITOR.

D.2.- Source

Nos pide ingresar el equipo a usar durante la medición o es GEOPHONE, MICROPHONE o GEO/MIC. Normalmente se usa el micrófono para hacer mediciones de golpes de aire o airblast.

D.3.- Trigger Level

Este modo indica el nivel de sensibilidad del equipo que requiere para ser encendido. Se coloca a aproximadamente 1 a 5 mm/seg., pero dependiendo de la distancia escalar (SD) se sugiere:

- $SD \geq 30$, 10 mm/seg.
- $SD = 15$, 15mm/seg.
- $SD \leq 7.5$, 20mm/seg.

Es importante considerar algunas circunstancias externas a la voladura que pueden iniciar el equipo como:

- Salir corriendo después de colocar el equipo.
- Ubicarlo en posición inestable
- Encendido por equipo pesado como tractores o camiones operando cerca.

Si se va a usar en el modo manual, no es necesario determinar un nivel de encendido, sino continuar con el botón de inicio (START MONITOR).

En caso de usar solo el Geófono, los rangos de valores que maneja son desde 0.25mm/s hasta 1270mm/s. Si se va a emplear el micrófono los rangos de encendido son de 4Pa a 250 Pa (106dB a 142 dB). Si se va a colocar en el nivel de uso de ambos instrumentos (GEO/MIC) se selecciona un nivel para cada uno, pero el encendido va a ocurrir con el primer equipo que se encienda.

D.4.- Record Stop Mode

El Tiempo de registro, se le dan valores de tiempo de grabación del equipo. Para un mejor manejo del sismógrafo, es recomendable hacer una suma de las secuencias de salida de los retardos para así tener una sumatoria del tiempo total del disparo y poder ingresarlo al equipo, ya que si se le ingresa un tiempo muy prolongado corremos el riesgo de registrar información falsa e innecesaria que nos puede confundir al momento del análisis.

D.5.- Text and Notes

Se ingresan notas o apuntes sobre el registro.

D.6.- Job Number

Se incluye un número de registro, puede ir de 0 a 9999.

D.7.- Time

Se ingresa o cambia la hora de aplicación del evento.

D.8.- Date

Al igual que el anterior pero para ingresar la fecha.

E.- El botón TEST:

Nos da información del estado del equipo.

F.- El botón START MONITOR:

Es el botón que inicia al equipo para el monitoreo de acuerdo a la información ingresada en SETUP.

1.5.3.2.- BlastWare III

Para hacer el análisis, necesitamos recoger la información del sismógrafo a una computadora, la cual debe tener instalado un software específico. Para el caso del Minimate Plus se usa el software Blastware III.

La utilización de un software de interpretación de mediciones de vibraciones provocadas por voladura de rocas, como el BLASTWARE III, presenta muchas ventajas, tales como:

- Definición de los valores pico de la amplitud en cada dirección del espacio (PPV) y tiempos representativos de ocurrencia.
- Definición del valor resultante de la amplitud de vibración.
- Definición de las frecuencias asociadas al evento de vibración.

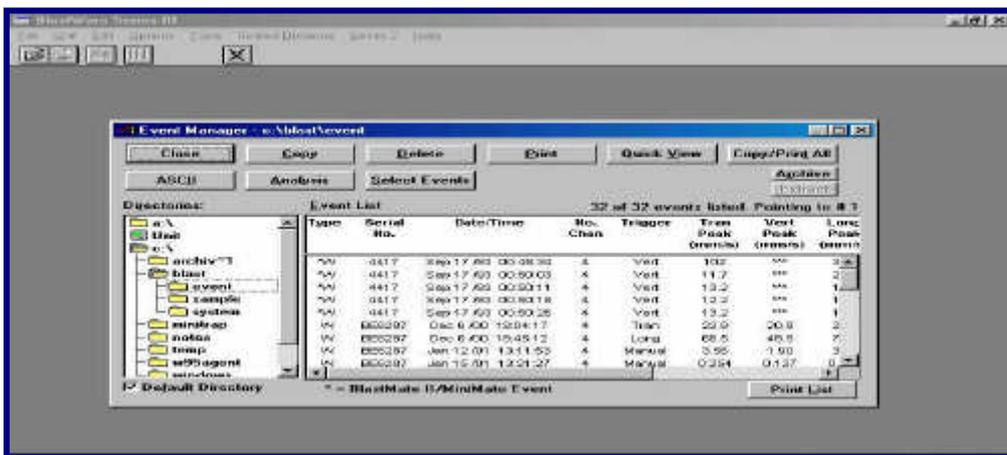
Como fue referido, la definición de los niveles máximos de vibración admisibles depende no solo de la amplitud, sino también de la frecuencia. De hecho, la mayoría de las normas internacionales, por ejemplo USBM - RI 8507 (1981, USA), DIN 4150 (1984, Alemania), Norma UNE 22-381 (1993, España), entre otras, establecen los criterios de daño para estructuras sometidas a vibraciones, a partir de una serie de amplitudes (normalmente velocidades de vibración) que son directamente proporcionales a la frecuencia de la vibración.

Se puede ver que, no todas esas normas trabajan con los valores de PVS, “peak velocity sum”. Algunas consideran la mayor de las componentes (PPV) asociadas a la medición.

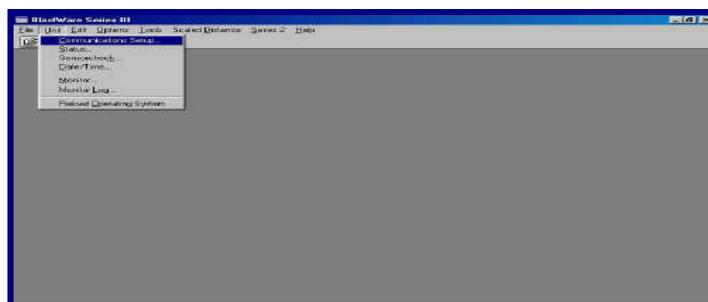
1.5.3.2.1.- Descarga de Datos

Para el Minimate Plus, se requiere del cable de conexión modelo 712A2301, que traen todos los equipos, con una salida al sismógrafo y otra a la computadora.

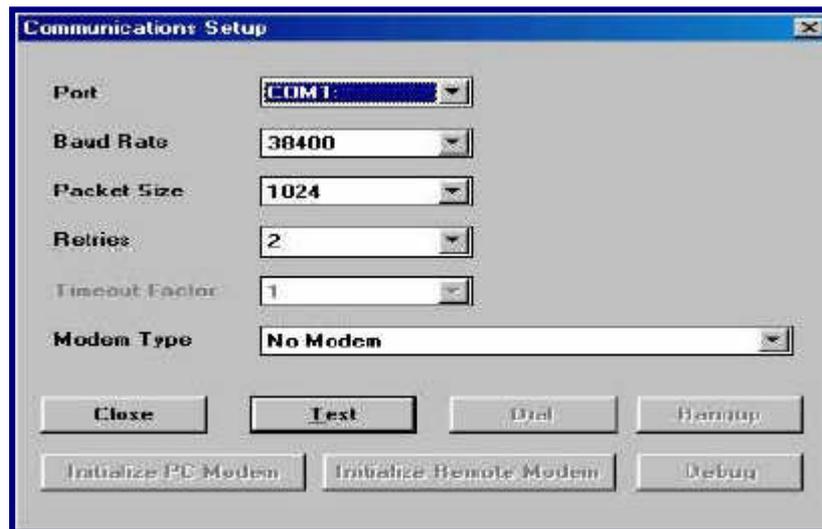
Una vez conectado, se abre el Software Blastware III como se muestra a continuación en la figura:



Una vez abierto el software, se cierra la primera ventana (CLOSE) y luego se inicia en **Unit y Communication Setups:**



Para obtener el siguiente mensaje:



Presione el botón **Test** y la computadora le comunicará que el equipo está recibiendo la información.

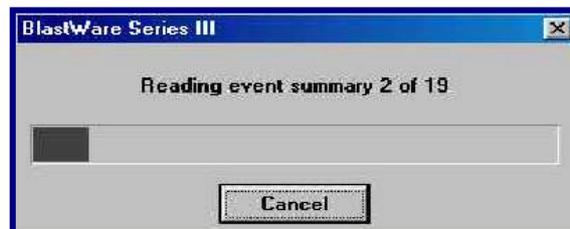


Y posteriormente se confirmará la misma (Communications Ok.). Se cierra la ventana y se puede ver el evento en **File/Event Manager**



El sismógrafo debe estar apagado, el cual se enciende automáticamente apenas este la conexión correctamente hecha, luego mediante **Event Manager** empieza a dar lectura de los eventos que el equipo contenga.

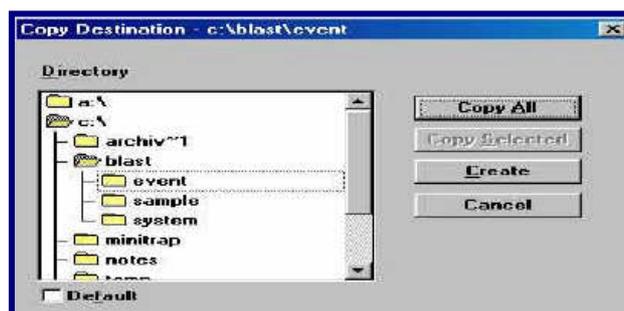
Al empezar a recibir información del sismógrafo, en la computadora deberán aparecer los siguientes mensajes:



El cual se señala “lectura de evento N° 2 de 19” o que en el equipo existen 19 eventos anteriormente tomados. El computador debe recibir como en el gráfico los 19 eventos sin ningún inconveniente, y deberá mostrar en pantalla:

Type	Serial No.	Date/Time	Trigger	Tran Peak (mm/s)	Vert Peak (mm/s)	Long Peak (mm/s)	Mic Peak (pa.)	PVS (mm/s)	Location
NV	4417	Jul 9.01 02:40:00	Tran	17.5	0.5	2.5	2.0L	17.7	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:41:11	Tran	45.7	3.0	10.2	2.0L	45.7	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:41:16	Tran	50.8	37.5	14.2	2.0L	63.2	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:41:22	Tran	58.9	110.7	16.3	2.0L	120.3	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:43:43	Tran	20.8	0.8	8.4	2.0L	22.2	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:46:38	Tran	15.7	1.5	8.1	8.0L	15.0	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:46:44	Tran	11.7	1.3	5.1	6.0L	13.1	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:48:26	Long	65.0	3.0	60.8	4.0L	78.4	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 02:48:36	Vert	8.4	13.2	8.5	2.0L	14.3	JOB# 0010
NV	4417	Jul 9.01 03:08:43	Vert	8.6	13.7	8.5	2.0L	15.9	JOB# 0010
NV	4417	Jul 10.01 12:57:51	Vert	7.9	24.4	8.4	2.0L	25.2	JOB# 0010
NV	4417	Jul 10.01 12:59:47	Vert	8.8	27.7	7.1	2.0L	29.1	JOB# 0010
NV	4417	Sep 17.93 00:45:34	Vert	101.5	128.0	33.5	2.0L	131.3	
NV	4417	Sep 17.93 00:50:03	Vert	11.7	130.0	20.3	2.0L	130.6	
NV	4417	Sep 17.93 00:50:11	Vert	13.2	130.0	15.2	2.0L	130.6	
NV	4417	Sep 17.93 00:50:18	Vert	12.2	130.0	17.3	2.0L	130.6	

Luego se hace **Copy**:



Y se selecciona los eventos que se desean guardar en el computador, pudiendo ser algunos o todos (**Copy Selected** o **Copy All**) y se selecciona un directorio.

Normalmente se graban en la carpeta de eventos (event). Para diferenciar eventos ya sea por trabajo, por ubicación, por equipo, etc., se puede crear un directorio (**Create**).



Para el manejo de información es importante considerar el guardar un original y copia de los eventos tomados, así como borrar de la memoria del sismógrafo dichos eventos para tener el equipo listo y con capacidad suficiente para hacer mas monitoreos, para lo cual en la ventana **Series 2 Event Manager** se selecciona **Delete All** para borrar toda la información en el sismógrafo. Una vez borrados los eventos del equipo estos ya no se pueden recuperar.

1.5.3.2.2.- Reporte y Análisis de Eventos:

Para el análisis se escoge el evento a estudiar en la ventana **Event Manager** y luego se hace clic en la opción **Quick View**, la cual nos emite un reporte general de la medición donde se consignan:

- Datos de Ingreso: todos los incluidos en el Setup del equipo como fecha, hora, nivel de encendido, distancia, cantidad de explosivos y distancia escalar.
- Datos de Salida: Información del micrófono (presión máxima de sonido o PSP, Frecuencia o ZC Freq) e información del Geófono (Velocidad Pico Partícula o PPV en las tres direcciones, Frecuencia o ZQ Freq, Aceleración Máxima y Desplazamiento Máximo, así como Vector de PPV resultante y las ondas obtenidas en las tres direcciones).

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

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

Sin llave:

Date/Time Long at 19:05:14 March 20, 2009
 Trigger Source Geo: 1.00 mm/s
 Range Geo :254 mm/s
 Record Time 12.25 sec (Auto=9Sec) at 1024 sps
 Job Number: 1

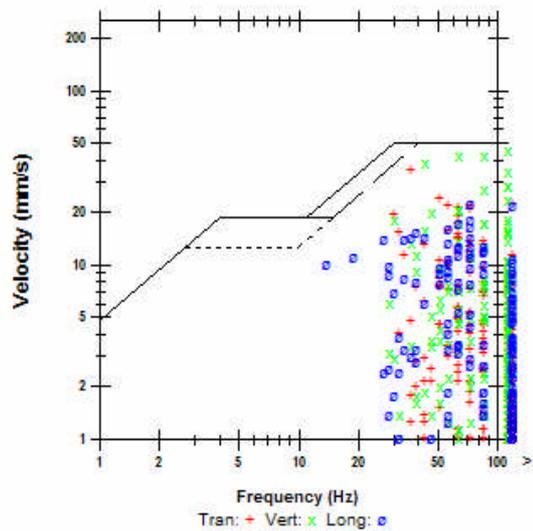
Serial Number BE10580 V 8.12-8.0 MiniMate Plus
 Battery Level 6.1 Volts
 Calibration February 13, 2009 by InstanTel Inc.
 File Name L580CMZ9.0Q0

Notes

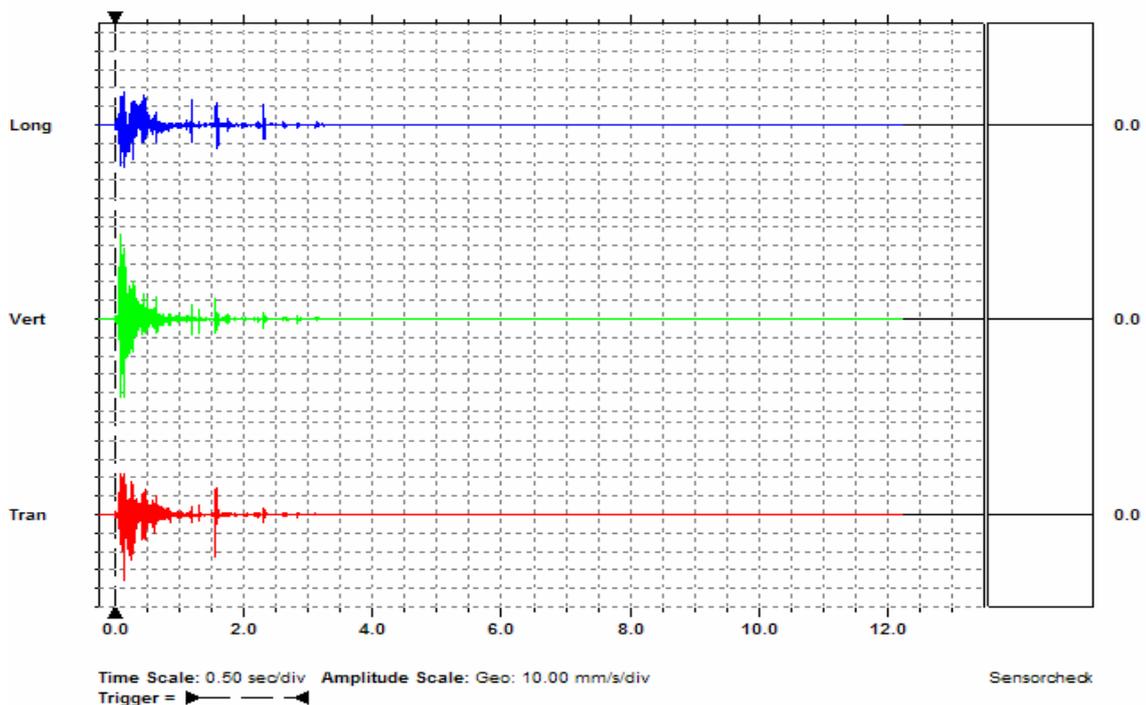
USBM RI8507 And OSMRE

Post Event Notes
 MONITOREO DEL TJ 1054

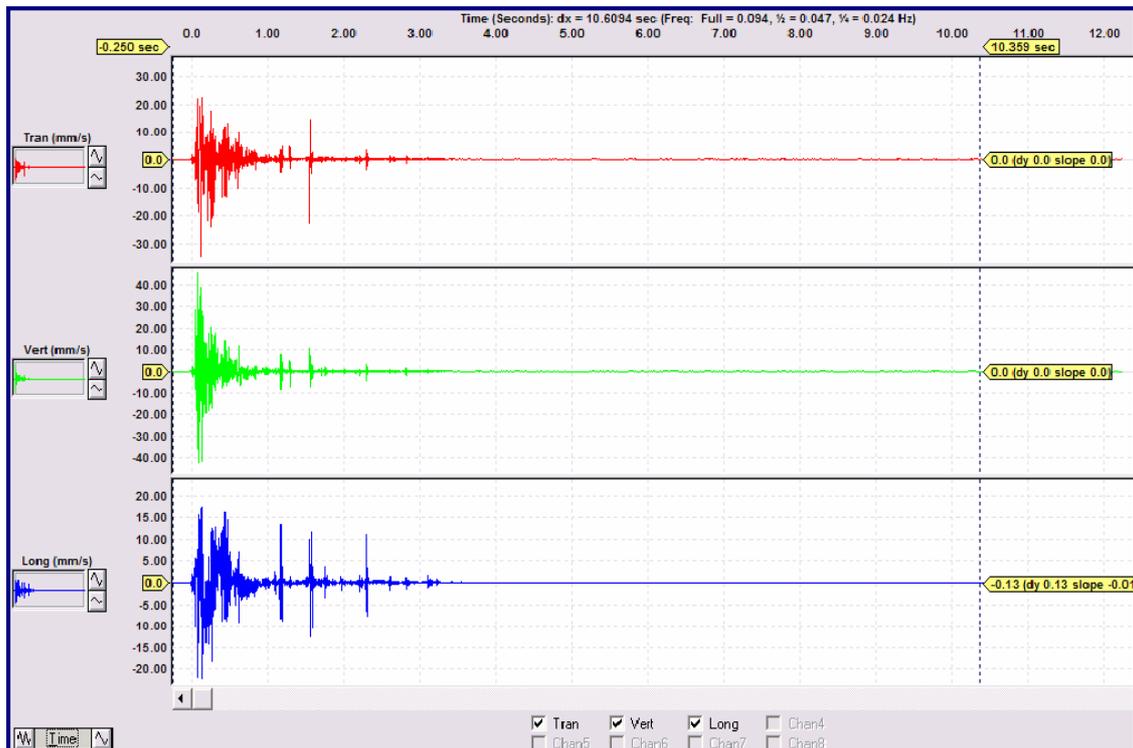
	Tran	Vert	Long	
PPV	35.4	45.5	22.9	mm/s
ZC Freq	37	>100	73	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.131	0.079	0.146	sec
Peak Acceleration	1.54	3.09	1.41	g
Peak Displacement	0.166	0.126	0.0876	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 51.7 mm/s at 0.133 sec



Con llave:



Se puede seleccionar la onda por secciones, simplemente moviendo las barras verticales con el cursor rodeando la zona por donde se desea observar y para tener una visión más detallada se hace doble clic con el botón derecho del mouse, por ejemplo en la onda longitudinal con una nueva ventana Zoom Data Plot. Esta nueva ventana nos permite obtener información de la onda en un Gráfico Velocidad (mm/s) vs. Tiempo (seg.) y notar la diferencia entre tiempos tomando dos picos contiguos (una onda completa) en la información del lado derecho lo que nos es útil en el caso que tengamos que hacer un análisis de dispersión de retardos y poder establecer que inconvenientes podría dañar la voladura, como control de calidad de accesorios, diseño de distribución de retardos y salidas, etc. y que es aplicable tanto en Tajo Abierto como en Subterránea.

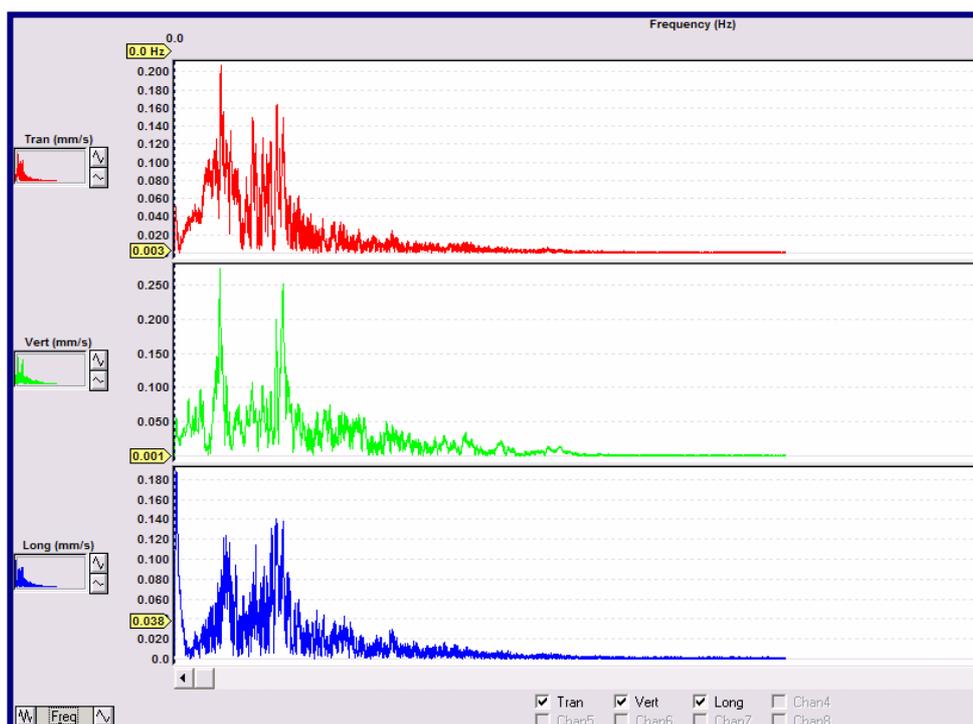
La máxima amplitud de las ondas nos dan las velocidades pico además de ser un índice de la eficiencia relativa del explosivo o del proceso de detonación del mismo.

Una amplitud de ondas muy elevada nos indicaría taladros disparados a la vez, una ausencia intempestiva de onda o amplitud exageradamente mínima un tiro cortado, y ondas casi superpuestas nos indicarían taladros iniciados posiblemente por simpatía.

Análisis de Fourier

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

Para el Análisis de Fourier se procede de la misma forma como se generan las ondas en las funciones de Análisis. Una vez mostrados los juegos de ondas en las tres direcciones, simplemente ir al botón de **FFT** (cuyas siglas son Fast Fourier Transform) y se podrá obtener el análisis de Fourier de cada onda. Pero es importante considerar también algunas limitaciones del mismo, En ondas simples, no compuesta de diferentes frecuencias, la frecuencia dominante será la de la Velocidad Pico Partícula. En formas de onda más complejas, la frecuencia dominante no necesariamente será de la Velocidad Pico Partícula sino de la frecuencia que muestren amplitudes de onda más grande. La frecuencia de la Velocidad Pico Partícula de una onda compleja no es usualmente una simple onda sino una superposición de diferentes tipos de ondas. Dado lo complejo de este análisis, es recomendable que antes de usarlo como una herramienta más de las que nos ofrece el Blastware III, el analista pueda consultar bibliografía referencial a la “Transformada de Fourier”, ver gráfico siguiente:



1.6.- VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA:

1.6.1.- ANÁLISIS DE VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURA:

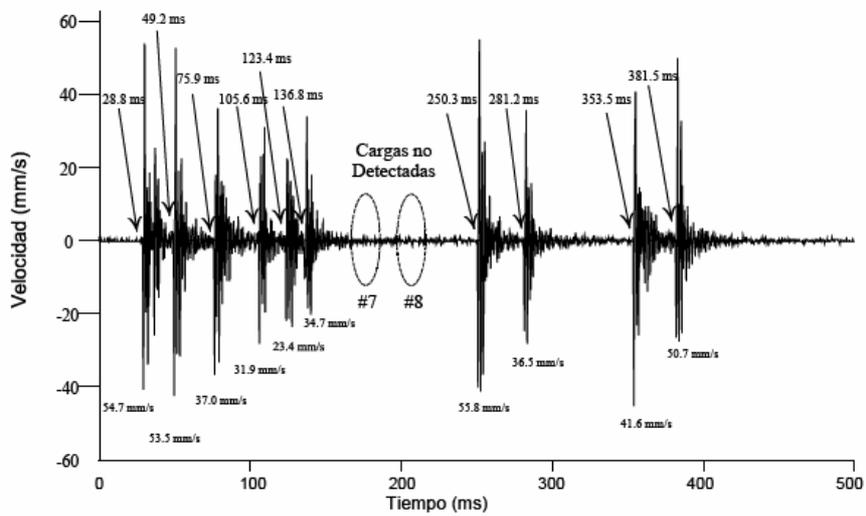
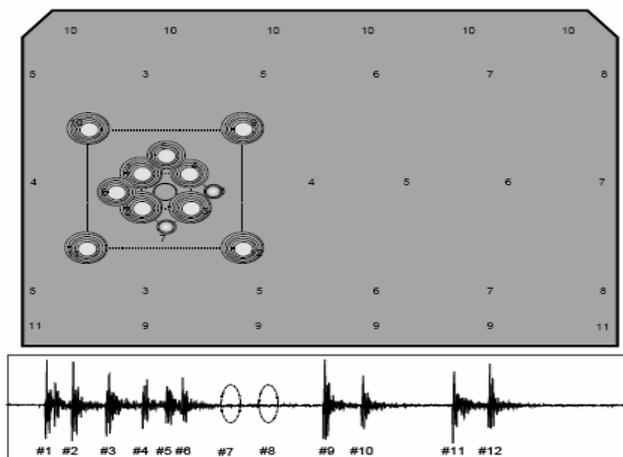
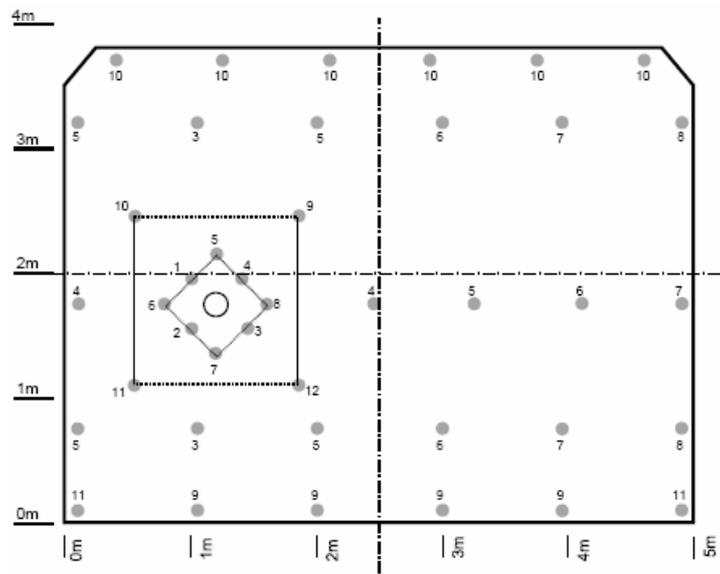
La señal de vibraciones producida por una voladura, consiste en un número discreto de paquetes de ondas, cada uno de estos corresponde a cargas o grupos de cargas detonando en un determinado tiempo. El primer paso en el análisis de la señal, es determinar que carga representa cada paquete de vibración.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

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

Con el Monitoreo y Análisis de las Ondas de Vibraciones es posible determinar y calcular lo siguiente:

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

Diagrama Original de Perforación



Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics

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

1.6.2.- MODELOS DE LA VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA:

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

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

<u><i>Criterio</i></u>	<u><i>Coeficiente Escalar</i></u>
Criterio General Exponencial	$D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right) * e^{\left(\frac{d*\beta}{\alpha} \right)}$
Criterio General	$D = \left(\frac{d}{W^{\beta/\alpha}} \right)$
Langerfors (1963)	$D = \left(\frac{d}{W^{3/2}} \right)$
Hendron (Bulletin 656)	$D = \left(\frac{d}{W^{1/3}} \right)$
Devine (1962)	$D = \left(\frac{d}{W^{1/2}} \right)$

Fuente: Aplicación del Modelamiento de Vibraciones – ASIEX 2008

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

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

1.6.2.1.- Modelo de Campo Lejano:

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

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

Modelo General

$$PPV = K * D^\alpha$$

Donde:

PPV = Velocidad Pico de Partícula (mm/s)

D = Distancia Escalar

K = Factor de Velocidad

α = Factor de Decaimiento.

Con el modelo de Devine, se asume que el término de pérdida friccional ha sido aproximado por una ecuación poderosa e incluida en el término α de una dispersión geométrica.

El término “**D**” o **distancia escalar**, da cuenta de la influencia de la distancia en (m) y la cantidad de explosivo en kg. En relación a ésta formulación matemática existen varios criterios derivados de los cuales se emplea comúnmente el de **DEVINE**.

$$V = K * \left[\frac{d}{W^{1/2}} \right]^{-\alpha}$$

En la expresión de la ecuación de Devine, “**W**” corresponde a la carga detonada en forma instantánea en kilogramos y “**d**” la distancia a la cual se cuantifica la velocidad de partícula. Teóricamente, éste criterio es el que mejor representa el comportamiento de la vibración, para el campo lejano (aproximadamente $d > 3$ largo de la carga), generadas por el tipo de cargas explosivas usadas en voladuras a tajo abierto, esto es, columnas explosivas cilíndricas, donde se tiene por análisis adimensional que las distancias deben ser corregidas por la raíz cuadrada de la carga.

Claramente el parámetro α en la ecuación de Devine está controlado por la geometría del frente de onda en expansión, y el coeficiente de atenuación de la roca. Sin embargo el valor de K está controlado principalmente por el explosivo y la eficiencia con la cual la presión de detonación es transmitida a la roca circundante como un esfuerzo. Los factores que controlan la transferencia de la energía del explosivo desde el taladro a la roca son la densidad y la VOD del explosivo, producto que representa la Característica de Impedancia, Z .

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

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

- El aumento de la densidad del explosivo y/o VOD incrementará el esfuerzo inducido en la roca circundante.

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

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

Factor de Amplitud K	Factor de Atenuación Alfa	Factor de Amplitud K	Factor de Atenuación Alfa
597	-2.34	99	-2.33
500	-2.11	227	-1.60
321	-2.39	499	-2.01
495	-2.12	175	-1.63
262	-2.28	112	-1.94
284	-1.72	428	-2.49
481	-1.74	168	-1.54
299	-2.48	703	-2.21
597	-2.32	177	-2.04
K Máximo =	703	Alfa Máximo =	-2.49
K Mínimo =	99	Alfa Mínimo =	-1.54
K Promedio =	357	Alfa Promedio =	-2.07

Variabilidad en los parámetros del Modelo de Vibración. Devine, para diferentes Minas y Macizos Rocosos.

Fuente: “MONITOREO Y MODELAMIENTO DE VIBRACIONES PARA LA EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS VOLADURAS DE DESARROLLO HORIZONTAL”, APS Blastrocnics

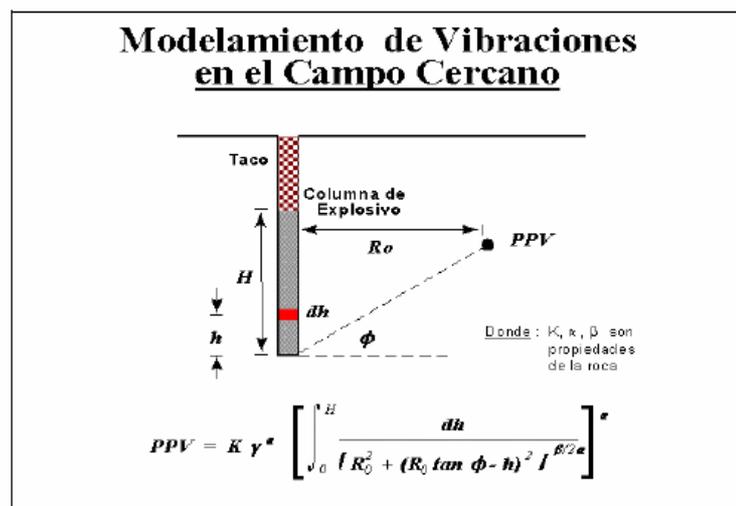
Esta variabilidad en los parámetros del Modelo de Devine, da cuenta de la gran importancia que tiene establecer para cada tipo de macizo rocoso en particular, la ecuación de comportamiento de las vibraciones, la que está directamente relacionada con las propiedades geomecánicas, tipos de explosivos, aspectos geométricos, etc., y por tanto, deben ser estimados como consecuencia de una campaña de monitoreo y

modelamiento, en forma independiente no sólo en cada mina si no en cada dominio geomecánico de la misma.

1.6.2.2.- Modelo de Campo Cercano:

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

$$PPV = K\gamma^\alpha \left[\int_0^H \frac{dh}{\left[R_0^2 + (R_0 \tan \phi - x^2) \right]^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha$$



Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

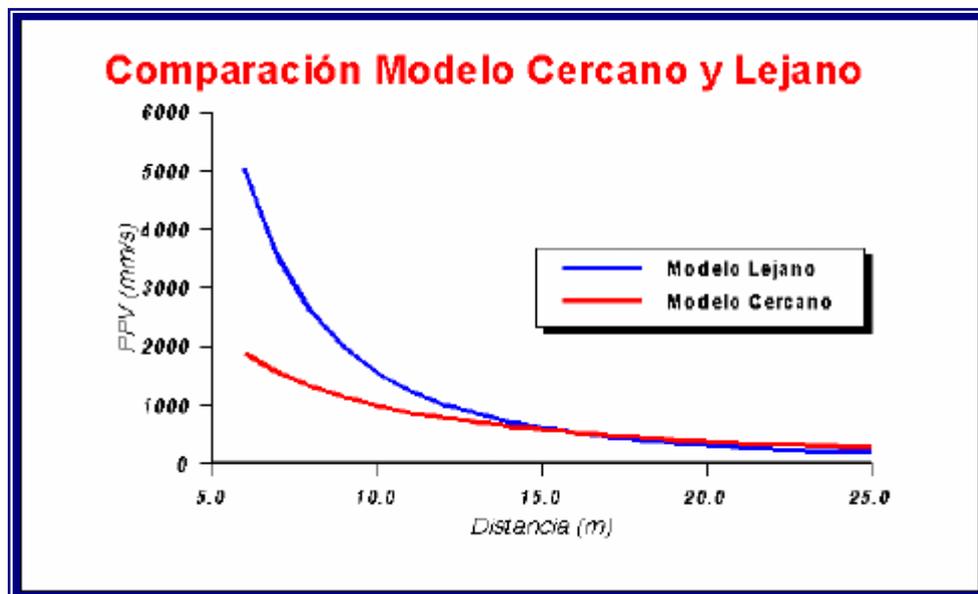
Donde K, α y β son las mismas constantes que se muestran en la ecuación de Devine y γ es la carga lineal cargada en el taladro (kg./m). Holmberg & Persson (1979) dieron valores de K, β y α de 700, 1.5 y 0.7 respectivamente para las condiciones de roca dura en Suecia.

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

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

1.6.2.3.- Comparación entre los Modelos de Devine y Holmberg & Persson:

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



Diferencia en la predicción de Vibraciones según el Modelo Devine y Holmberg & Persson

Fuente: "MONITOREO Y MODELAMIENTO DE VIBRACIONES PARA LA EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS VOLADURAS DE DESARROLLO HORIZONTAL", APS Blastronics

Debido justamente a esa diferencia de considerar la carga explosiva distribuida (Modelo Cercano de Holmberg & Persson) y la carga concentrada en un punto (Modelo Devine),

es que ambos modelos difieren fuertemente en el área más cercana a la carga explosiva, produciéndose por parte del modelo Devine una sobre estimación de las velocidades de partícula, como se puede apreciar en la gráfica anterior.

1.6.3.- ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA CRÍTICA:

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

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

La velocidad vibracional de las partícula, frecuentemente es relacionada con su habilidad para inducir nuevo fracturamiento, a través de la relación entre velocidad de partícula y deformación de partícula, válido esto para una condición de roca confinada en la vecindad inmediata a las cargas explosivas, en donde el impacto de la voladura es más intenso y los niveles de esfuerzos inducidos son similares a los esfuerzos necesarios para la fragmentación de la roca. Dada ésta relación con la deformación, es que el análisis de velocidad de partícula tiene la cualidad de ser un buen método para estimar el grado de fracturamiento inducido por la voladura. De acuerdo a lo indicado:

$$\varepsilon = \text{PPV} / V_p$$

Esta ecuación presenta la relación entre la Velocidad de Partícula; **PPV**, la deformación inducida ε , para una roca con Velocidad de la Onda de Compresión; V_p . Esta ecuación supone una elasticidad lineal de la roca a través de la cual la vibración está propagándose y hace una estimación razonable para la relación entre la roca fracturada y la vibración inducida.

De la ley de Hooke y asumiendo un comportamiento elástico de la roca, la Velocidad de Partícula Máxima (Crítica), **PPVc**, que puede ser soportada por la roca antes de que ocurra el fallamiento por tensión, es estimada conociendo la Resistencia a la Tracción σ_t , el Módulo de Young, **E**, y la Velocidad de propagación de la Onda P, **Vp**, usando la ecuación:

$$PPVc = (\sigma_t * Vp) / E$$

En función de los antecedentes proporcionados a ASP BLASTRONIC por diferentes Minas, se empleó la ecuación anterior para estimar en **primera aproximación** la Velocidad de Partícula Máxima o Crítica para algunos tipos de roca más frecuentes.

En la tabla siguiente, se resume los datos y el valor calculado para los tipos de roca analizados. En la última columna, se muestra el cálculo del PPVc, definido como el nivel sobre el cual se generará un daño produciendo nuevas fracturas a la roca. Una estimación del nivel de Velocidad de Partícula sobre el cual se produce el daño más intenso (trituración), puede ser estimada como el valor aproximado a 4 veces el nivel para el daño incipiente (4 x PPVc).

Tipo de Roca	Resistencia a la Tracción [MPa]	Velocidad de Onda P [m/s]	Módulo Young [GPa]	Velocidad de Partícula Crítica [mm/s]
Cuarzo-1	14.0	5 102	55.5	1 286
Brecha-1	7.3	4 298	30.2	1 037
Milonita	1.9	2 940	14.6	380
Ox-1	6.7	4 373	35.2	836
Ox-2	7.2	4 804	44.4	774
Cuarzo-2	8.4	4 207	42.7	823
Brecha-2	3.9	4 041	39.3	401
Andesita-1	14.9	4 975	67.3	1 100
Diorita	13.2	4 650	48.6	1 260
Brecha-3	11.3	4 650	58.3	900
Pórfido-1	6.7	3 829	31.2	823
Pórfido-2	5.1	3 661	46.6	401

Estimación de la Velocidad de Partícula Crítica Teórica en distintos tipos de roca

Fuente: “MONITOREO Y MODELAMIENTO DE VIBRACIONES PARA LA EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS VOLADURAS DE DESARROLLO HORIZONTAL”, APS Blastronics

Finalmente, se estima que un nivel equivalente a la cuarta parte, es decir el 25% del valor de PPVc, es suficiente para iniciar extensión de fracturas preexistentes. Se sugiere

ocupar este nivel de $\frac{1}{4}$ PPVc, como límite conservador y a partir del cual se deben controlar los diseños de carguío para que las voladuras no ocasionen daño al macizo rocoso.

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

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

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

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

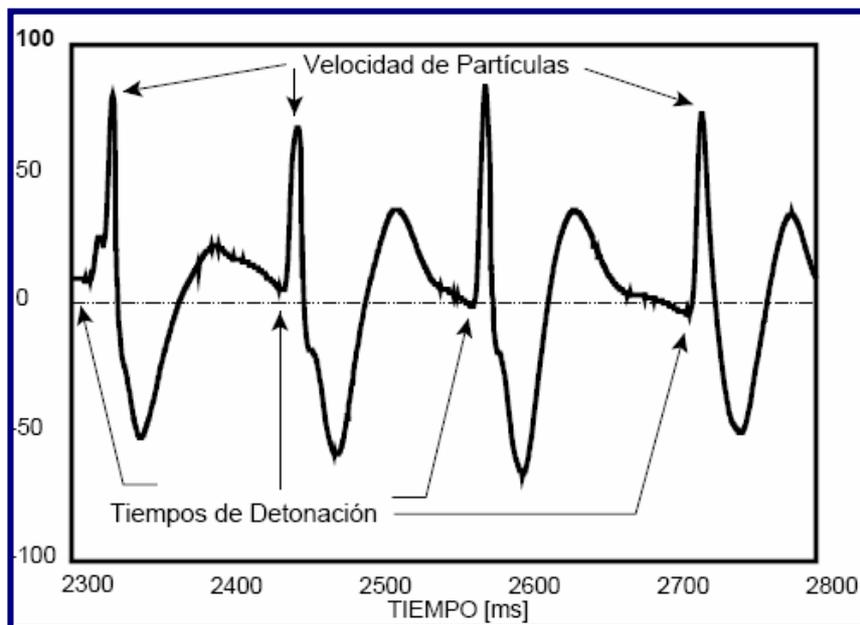
1.7.- MONITOREO DE LAS VIBRACIONES

1.7.1.- OBJETIVO DEL MONITOREO DE LAS VIBRACIONES:

La medición de las vibraciones tiene como objetivo principal detectar y registrar el movimiento vibratorio de la tierra. Estas medidas deben describir de la mejor forma el evento “vibraciones”, para lo cual se requiere medir tres componentes ortogonales que definan: amplitud, velocidad y aceleración de la partícula, en función del tiempo t .

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

El registro obtenido entrega una onda que el eje de las Y representa la magnitud de la vibración y el eje de las X el tiempo, siendo cada uno de estos registros el que corresponde a cada uno de los ejes en que se mide, es decir vertical, transversal o longitudinal. La siguiente figura indica un registro genérico de la velocidad de partículas.



Registro Genérico de la Velocidad de Partículas

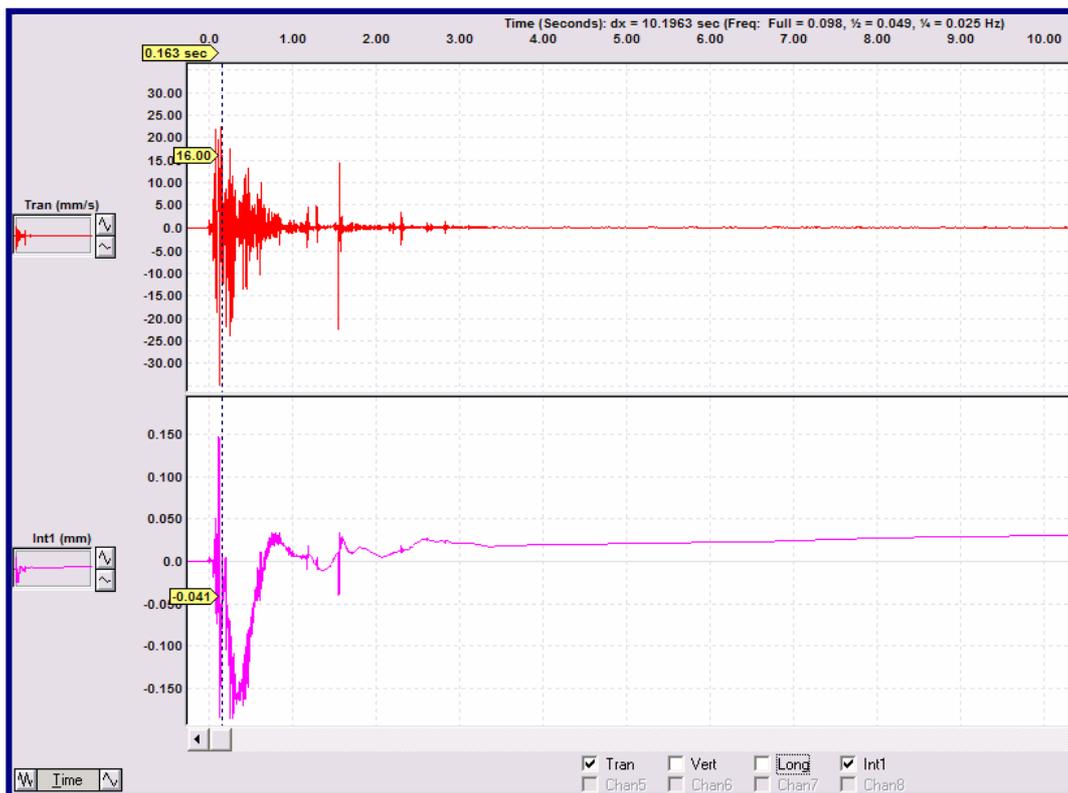
1.7.2.- OBTENCIÓN DE DATOS A PARTIR DEL MONITOREO DE LAS VIBRACIONES:

1.7.2.1.- Verificación del Máximo Desplazamiento:

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

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

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



Desplazamiento Permitido del Geófono (< 2mm)

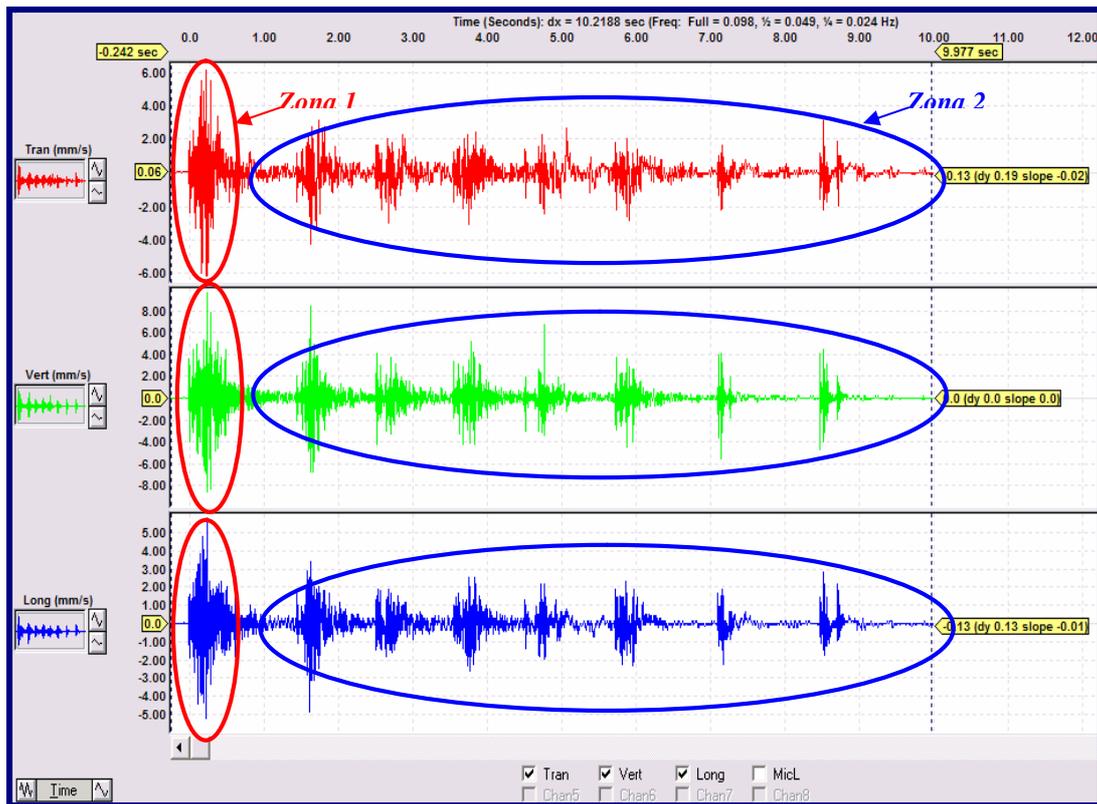


Desplazamiento Excesivo del Geófono (>2mm)

1.7.2.2.- Eficiencia Relativa del Explosivo:

La magnitud de las vibraciones terrestres y aéreas en un punto determinado varía según la carga de explosivo y la distancia de dicho punto al lugar de la voladura.

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



Medición de Vibraciones de una Voladura en Frentes

Zona 1: En el arranque es normal ver una alta concentración de carga explosiva y el uso de tiempos de retardo muy cortos entre si, lo que produce el efecto sumatorio de las ondas. Por lo tanto el nivel de vibraciones es mayor con respecto al total de la voladura.

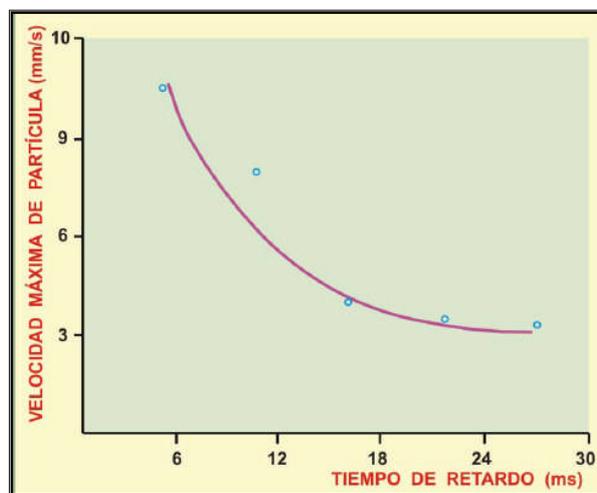
Zona 2: En el resto de taladros la concentración de carga explosiva es menor y los tiempos de retardo mayores entre si, lo que origina que no se produzca el efecto sumatorio de las ondas y por consiguiente el nivel de vibraciones es menor con respecto al resto de la voladura.

1.7.2.3.- Cargas detonando en una secuencia determinada:

El intervalo de retardo entre la detonación de taladros puede referirse al tiempo de retardo nominal o al tiempo de retardo efectivo. El primero es la diferencia entre los tiempos nominales de iniciación, mientras que el tiempo de retardo efectivo es la diferencia de los tiempos de llegada de los pulsos generados por la detonación de los taladros disparados con periodos consecutivos.

En lo relativo al tiempo mínimo de retardo para eliminar las interferencias constructivas o con efectos sumatorios, en los primeros estudios realizados por Dubai (1963) se

proponía intervalos de 8 MS y 9 MS, calculados a partir de los experimentos llevados a cabo en canteras de caliza. Langefors (1963) que con intervalos mayores a 3 veces el periodo de vibración puede suponerse que no existe colaboración entre taladros adyacentes detonados de forma secuenciada, debido a la amortiguación de los señales. Wiss y Linehan (1978) sugiere un tiempo de retardo sucesivo de 17 MS, para eliminar el efecto sumatorio de las vibraciones. En otro estudio de la Nobel's Explosives Co. de Gran Bretaña sobre voladuras secuenciadas, con tiempos de retardo entre cargas operantes inferiores a los 25 MS se confirma la existencia de interferencias constructivas en el nivel máximo de vibración.



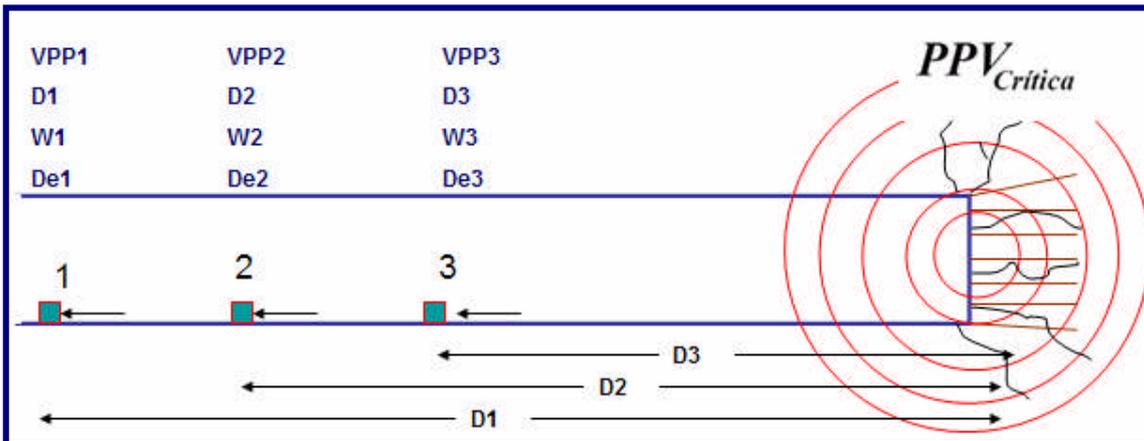
*Influencia del intervalo de retardo en el nivel máximo de vibración.
Fuente: Manual de Perforación de López Jimeno*

1.7.2.4.- Dispersión de los tiempos de encendido de los retardos:

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

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

1.7.2.5.- Resultados de Campo:



Esquema de como se realizó la toma de datos

Tj 052 usando Dinamita:

Datos de Monitoreo			
Distancia (m)	W (Peso max / Retardo) Kg	Distancia Escalar	Vpp
25,30	2,4	16,3	41,23
26,80	3,2	15,0	46,57
28,75	2,4	18,6	33,25
30,25	2,8	18,1	38,62
32,10	2,8	19,2	32,67
35,15	2,4	22,7	29,54
36,85	2,8	22,0	30,06

Tj 052 usando Emulsiones:

Datos de Monitoreo			
Distancia (m)	W (Peso max / Retardo) Kg	Distancia Escalar	Vpp
23,80	3,24	13,22	61,44
24,30	4,32	11,69	73,45
27,20	3,24	15,11	51,74
28,65	3,78	14,74	47,69
32,05	3,78	16,48	42,31
33,47	3,24	18,59	39,31
34,92	3,78	17,96	43,58

Tj 828 usando Dinamitas

<i>Datos de Monitoreo</i>			
Distancia (m)	W (Peso max / Retardo) Kg	Distancia Escalar	Vpp
22.50	2.4	14.52	91.45
24.10	2.8	14.40	95.78
27.20	3.2	15.21	89.23
30.00	2.8	17.93	72.89
31.55	2.4	20.37	68.56
34.70	3.2	19.40	70.08

Tj 828 usando Emulsiones

<i>Datos de Monitoreo</i>			
Distancia (m)	W (Peso max / Retardo) Kg	Distancia Escalar	Vpp
21.55	3.24	12.0	125.08
23.00	4.32	11.1	158.32
26.45	4.32	12.7	123.21
28.10	3.78	14.5	112.35
29.75	3.24	16.5	102.91
31.25	3.78	16.1	101.44
32.80	3.78	16.9	99.23

Tj 748 usando Dinamitas

<i>Datos de Monitoreo</i>			
Distancia (m)	W (Peso max / Retardo) Kg	Distancia Escalar	Vpp
24.8	3.2	13.9	71.77
28.1	3.2	15.7	62.87
29.6	2.4	19.1	53.67
32.5	2.4	21.0	49.79
34.1	3.2	19.1	51.01
37.1	2.8	22.2	41.33
38.7	2.4	25.0	35.65

Tj 748 usando Emulsiones

<i>Datos de Monitoreo</i>			
Distancia (m)	W (Peso max / Retardo) Kg	Distancia Escalar	Vpp
22.50	4.0	11.3	82.66
25.70	3.0	14.8	68.34
27.20	4.0	13.6	65.78
29.80	3.5	15.9	57.66
30.30	4.0	15.2	54.98
32.40	3.0	18.7	43.42

1.8.- MODELAMIENTO DE VIBRACIONES – CAMPO LEJANO:

Una de las grandes problemáticas para la obtención de los modelos de vibraciones, es la calidad de la información que se utiliza para ello, principalmente cuando se obtienen datos a partir de mediciones de vibraciones realizadas en voladuras regulares de la mina, ya sean en voladuras de producción o amortiguadas, la problemática en cuestión es identificar claramente a que taladro o taladros están asociados los diferentes peak de vibraciones que se obtienen en cada registro.

1.8.1.- DATOS DE LABORATORIO:

Estas muestras de bloques rocosos por cada tajeo han sido llevadas para su análisis y evaluación a la Pontificia Universidad Católica del Perú. Estas muestras fueron seleccionadas de los tajeos 052, 828 y 002.

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

1.8.1.1.- Ensayo de Propiedades Físicas:

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2216 – 98

Los resultados son los siguientes:

Muestra	Densidad Seca gr/cm³	Densidad Húmeda gr/cm³	Porosidad Aparente %	Absorción %	Peso Específico Aparente KN/m³
Tj 052	2.07	2.46	39.75	19.25	20.26
Tj 828	2.09	2.42	33.23	15.93	20.47
Tj 748	1.85	2.56	70.88	38.36	18.13
Mineral	2.43	2.46	3.58	1.48	23.80

1.8.1.2.- Ensayo de Compresión Simple

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 2938

Los resultados son los siguientes:

Muestra	Diámetro cm	Altura cm	Carga Kgf	Resistencia a la Compresión Simple kg/cm ²	Resistencia a la Compresión Simple Mpa
Tj 052	2.93	6.21	300	44.81	4.39
Tj 828	3.01	6.1	500	70.38	6.9
Tj 748	3.12	6.12	250	84.66	8.3
Mineral	3.05	6.17	7100	973.16	95.37

Nota: Estandarizado según Protodyakonov ($L/D = 2$)

1.8.1.3.- Ensayos de Compresión Triaxial

Se ha ensayado 3 testigos por cada muestra entregada. Los ensayos se realizaron según la norma ASTM 2664 – 95.

Los resultados son los siguientes:

Código	Muestra	Diámetro cm	Longitud cm	Carga kg	Confin. mi	Angulo de fricción interna	Cohesión Mpa
Tj 052	1	2.61	5.86	740	2	18.8	3.2
	2	2.69	6.00	960	4		
	3	2.69	5.72	1200	6		
Tj 828	1	3.12	5.85	1020	2	19.5	3.2
	2	3.00	6.17	1205	4		
	3	3.14	6.06	1700	6		
Tj 748	1	3.21	6.03	710	2	16.9	1.8
	2	2.92	6.29	830	4		
	3	2.96	6.22	1105	6		
Mineral	1	3.05	6.08	7205	2	54.7	12.2
	2	3.04	5.91	8550	4		
	3	3.04	6.22	10050	6		

1.8.1.4.- Ensayos de Propiedades Elásticas

Los resultados son los siguientes:

Muestra	Diámetro cm	Altura cm	Módulo de Young Gpa	Relación de Poisson
Tj 052	2.67	5.55	1.17	0.22
Tj 828	2.86	6.35	1.51	0.14
Tj 748	3.07	6.07	1.69	0.13
Mineral	3.06	6.09	7.63	0.27

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

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

1.8.1.5.- Cálculo de la Velocidad de Onda P:

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

Cálculo de Índice de calidad del túnel: Q – Bieniawski 1979

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

$$Q = \text{Exp}(RMR - 44) / 9$$

Cálculo de la velocidad de la onda P: Vp (m/s)

$$Vp = (1000 * \text{Log } Q) + 3,500$$

Usualmente cuanto mayor sea la velocidad de la onda P, se requerirá explosivo de mayor velocidad de detonación para romperla.

La velocidad de la Onda P está relacionada directamente con la impedancia, la impedancia es la relación de la velocidad de la onda P y densidad de la roca versus la velocidad de detonación y la densidad del explosivo.

$$Nz = \frac{\delta e \times Vod}{\delta r \times Vs}$$

Donde:

Nz : Relación de la impedancia del explosivo y la de la roca

δe : Densidad del explosivo (gr/cc)

δr : Densidad de la roca (gr/cc)

Vod : Velocidad de detonación del explosivo (m/s)

Vs : Velocidad de la Onda P (m/s)

Esto significa que la onda explosiva se transmite tanto mejor a la roca cuanto más se acerca la impedancia del explosivo a la de la roca, dado que “Nz” tenderá hacia 1.0

De la información anteriormente mencionada calcularemos la velocidad de la Onda P para los tajeos en estudio.

Labor	RMR	Q	Resistencia a la Compresión (Mpa)	Módulo de Young (GPa)	Vp (m/s)
Tj 052	25	0.12	4.39	1.17	2579.18
Tj 828	35	0.37	6.9	1.51	3068.2
Tj 748	40	0.64	8.3	1.69	3306.18

1.8.2.- CÁLCULO DE LA VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA CRÍTICA (V_{PPC}) DE LOS TAJEOS:

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

$$V_{ppc} = \frac{\sigma^t * V_p}{E}$$

Donde:

V_{ppc} = Velocidad Pico Partícula Crítica (mm/s)

σ^t = Resistencia a la Tracción (MPa)

V_p = Velocidad de la Onda P (m/s)

E = Módulo de Young (GPa)

V_{PPC} Tj 052:

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

V_{PPC} Tj 828:

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

V_{PPC} Tj 748:

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

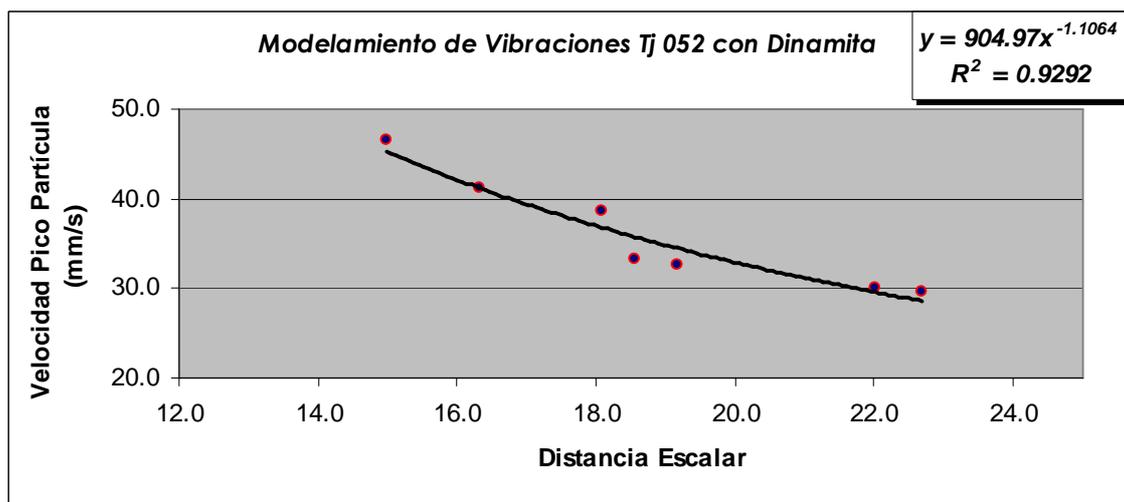
1.8.3.- MODELAMIENTO DE LOS TAJEOS:

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

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

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

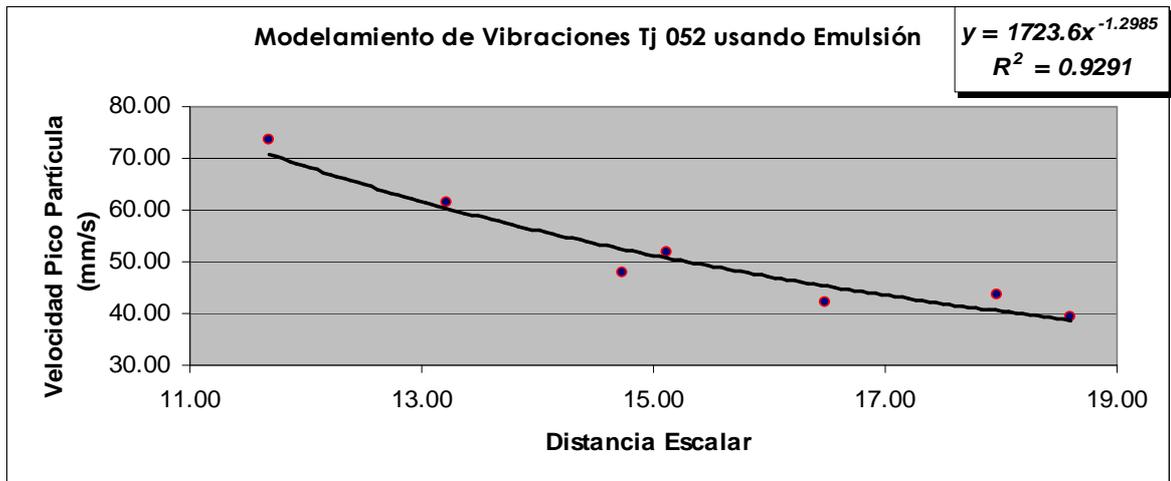
Tj 052 usando dinamita:



Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para el tajeo 052 con el uso de dinamita:

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

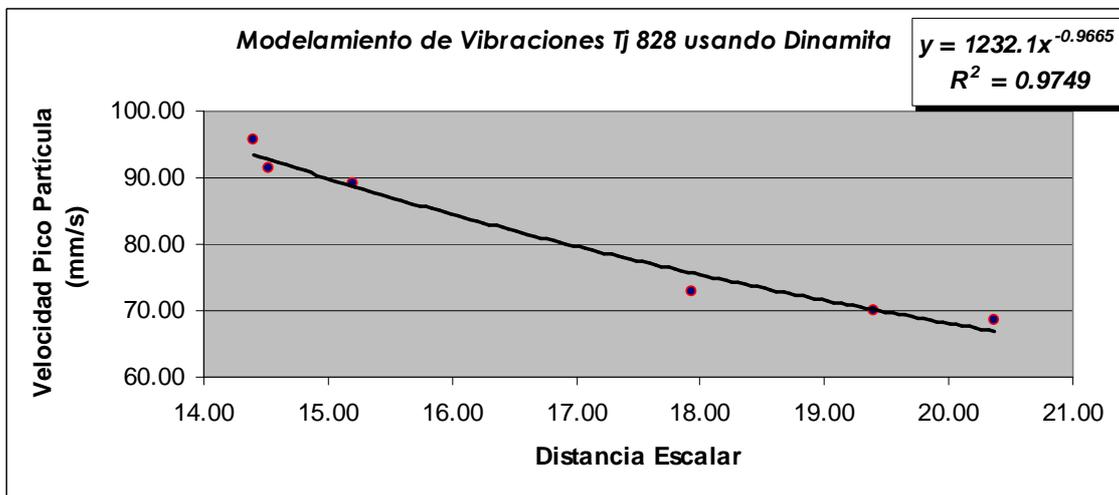
Tj 052 usando emulsión:



Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para el tajeo 052 con el uso de emulsión:

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

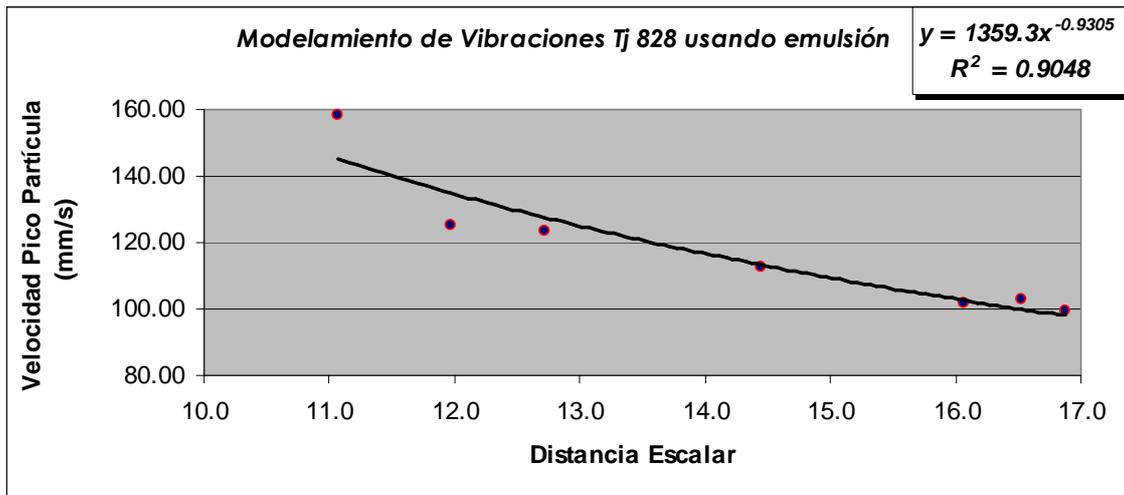
Tj 828 usando dinamita:



Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para el tajeo 828 con el uso de dinamita:

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

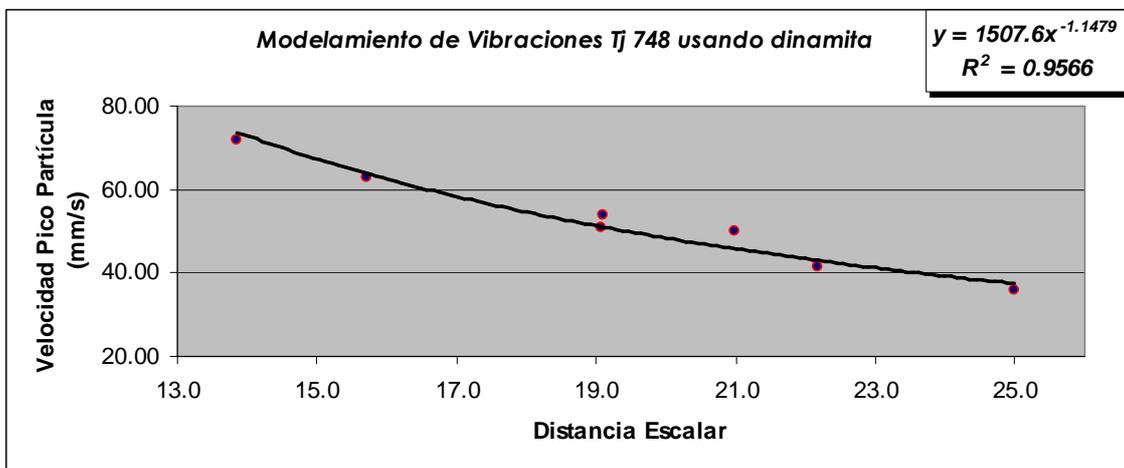
Tj 828 usando emulsión



Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para el tajeo 828 con el uso de emulsión:

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

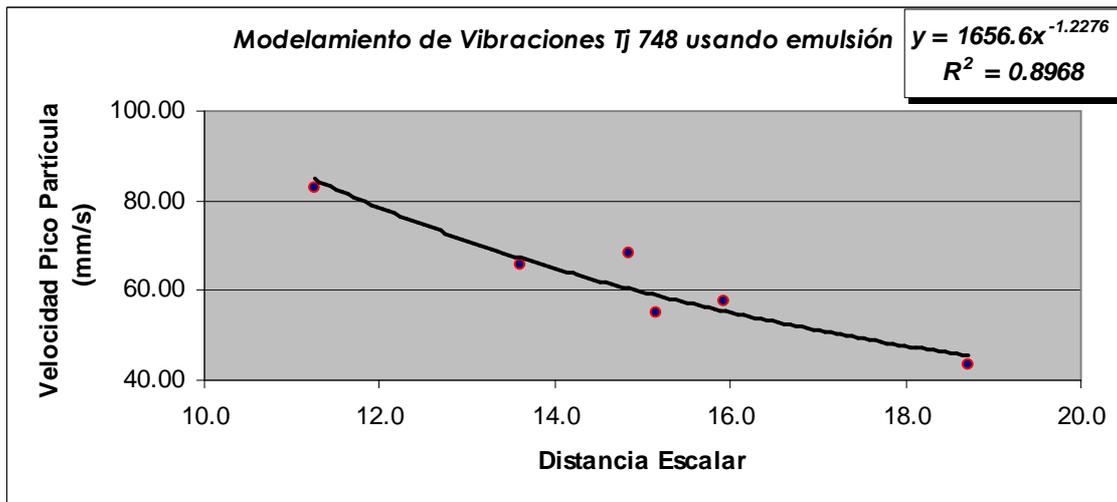
Tj 748 usando dinamita:



Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para el tajeo 748 con el uso de dinamita:

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

Tj 748 usando emulsión:



Del gráfico se obtiene la siguiente fórmula que simula el comportamiento vibracional del macizo rocoso para el tajeo 748 con el uso de dinamita:

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

1.9.- ANÁLISIS DE LOS DAÑOS ORIGINADOS POR LA VOLADURA DE ROCAS:

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

Los valores máximos de velocidades de partícula permitidos o recomendados varían de una norma a otra. Quizás el valor indicativo que más se ha implantado es el de 2 pulg/s

(50.8 mm/s), que se fundamenta en voluminosas observaciones de Langefors y Kihlström (Bollinger, 1980; Persson et al., 1994), quienes en 1963 establecieron, para diversos tipos de suelos, valores de la velocidad de partícula pico y sus efectos asociados.

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

1.9.1.- NORMATIVIDAD INTERNACIONAL EN EL MANEJO DE LAS VOLADURAS:

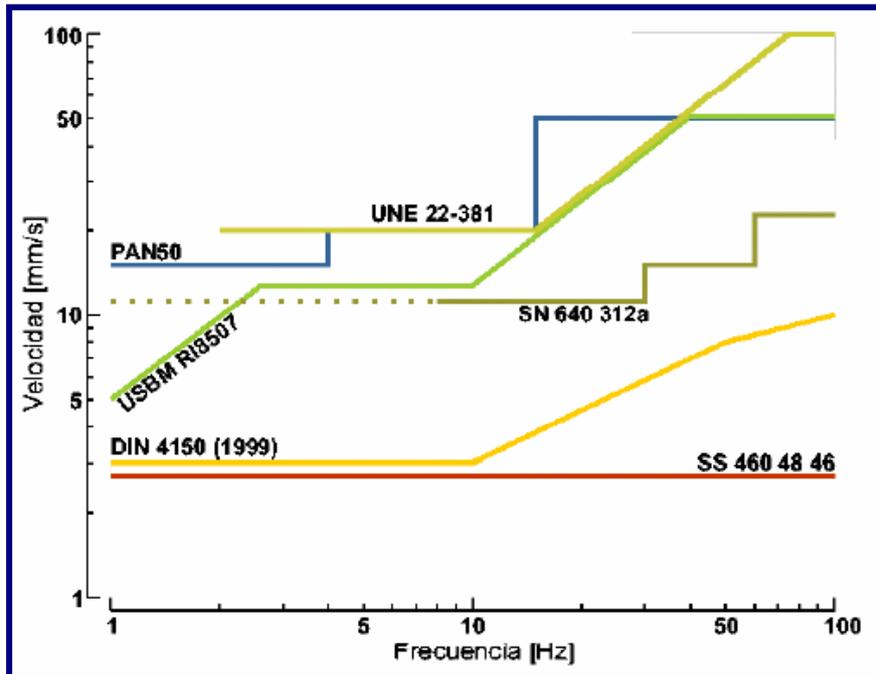
Todas estas normas han sido elaboradas en países con condiciones de suelos y tipos de materiales y estructuras diferentes a las usuales en Perú; su aplicación local requiere entonces, como primer paso, un proceso de análisis de estas normas, al encontrar la factibilidad de uso de las normas se realiza el proceso de adaptación de ellas.

Pais de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania ^a	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
EEUU - Federal	USBM RI8507	1980
EEUU - 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
Sueca	SS 460 48 46	1991
Suiza	SN 640 312a	1992

^a La norma alemana tiene además tres actualizaciones en los años 1999 y 2001.

Resumen de las Normas Internacionales Existentes

Fuente: VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil - Universidad del Valle, Santiago de Cali.



Resumen de velocidades máximas indicativas de las diferentes normas internacionales
Fuente: *VIBRACIONES CAUSADAS POR ACTIVIDAD HUMANA: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil - Universidad del Valle, Santiago de Cali.*

La definición de los niveles máximos de vibración admisibles depende no solo de la amplitud, sino también de la frecuencia. De hecho, la mayoría de las normas internacionales, por ejemplo USBM - RI 8507 (1981, USA), DIN 4150 (1984, Alemania), Norma UNE 22-381 (1993, España), entre otras, establecen los criterios de daño para estructuras sometidas a vibraciones, a partir de una serie de amplitudes (normalmente velocidades de vibración) que son directamente proporcionales a la frecuencia de la vibración.

Se puede ver que, no todas esas normas trabajan con los valores de (PVS, “peak velocity sum”). Algunas consideran la mayor de las componentes (PPV) asociadas a la medición.

1.9.2.- INDICE DE DAÑOS ORIGINADOS POR VOLADURAS (BLAST DAMAGE INDEX)

Para calcular el Índice de daño originado por voladura primero se tiene que calcular el Vector Suma de las Velocidades Pico de Partícula.

$$Vps = (VppL^2 + Vppt^2 + Vppv^2)^{0.5}$$

VppL: Velocidad Pico Partícula Longitudinal (mm/s)

Vppt: Velocidad Pico Partícula Transversal (mm/s)

Vppv: Velocidad Pico Partícula Vertical (mm/s)

Para calcular el BDI:

$$\text{BDI} = (V_{ps} * d * V_p) / (K_v * \sigma_t)$$

Vps: Vector suma de la Velocidad Pico Partícula (m/s)

d: Densidad de la roca (gr/cc)

Vp: Velocidad de la onda P (km/s)

Kv: Constante de calidad del lugar (0.1 - 1)

BDI	TIPO DE DAÑO	OBSERVACIONES
= 0,125	No hay daño	Máximo para trabajos permanentes
0.250	Daños no considerables	Máximo tolerable trabajos grandes
0.500	Menores efectos de excavación	Máx. valor tolerable, trabajos intermedios
0.750	Moderado y discontinuo daño	Máximo tolerable trabajos temporales
1.000	Mayor sobre - excavación	Rehabilitación intensiva
1.500	Severo daño	Rehabilitación difícil o imposible
= 2,00	Excesiva sobre - excavación	Abandono de labor

Con el resultado obtenido se procede a comparar los resultados con la tabla para ver que tipo de daño se esta generando.

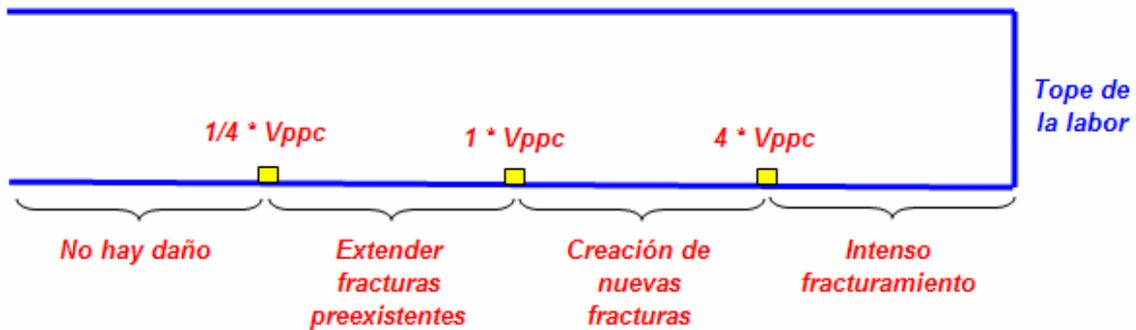
1.9.3.- CRITERIO DE DAÑO:

Intenso fracturamiento $4 * V_{PPC}$

Creación de nuevas fracturas $1 * V_{PPC}$

Extender fracturas preexistentes $\frac{1}{4} * V_{PPC}$

Del modelamiento de los tajeos podemos elaborar los siguientes cuadros para determinar a que distancia comenzó a haber daño debido a la voladura. Para ello se realizará una interpolación de datos.



Para la elaboración se consideró las mayores y menores cargas de explosivos detonando en simultáneo (carga operante).

Hay que tener en consideración que los cuadros de madera están separados cada **1.5m**.

- Tj 052 – Dinamita:

Carga Operante: 3.2kg

<i>Tajo 052 - Dinamita</i>	
RMR	25
Q	0.12
Vs	2579.18
σ_t	0.439
E	1.17
Vppc	967.74
K	904.97
α	1.10
Kg explosivo	3.2

Distancia	Vpp
0.5	3677.9
1.5	1098.4
1.68	969.7
5	292.1
5.95	241.3
10	136.3
15	87.3
20	63.6
25	49.7
30	40.7

4*Vppc	3870.96
Vppc	967.74
1/4*Vppc	241.94

La voladura no genera daño desde los 5.95m del tope de la labor. Entre 1.68m y 5.95m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 1.68m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

Carga Operante: 2.4kg

<i>Tajo 052 - Dinamita</i>	
<i>RMR</i>	25
<i>Q</i>	0.12
<i>Vs</i>	2579.18
σ_t	0.439
<i>E</i>	1.17
<i>Vppc</i>	967.74
<i>K</i>	904.97
α	1.1
<i>Kg explosivo</i>	2.4

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	3139.7
1.46	966
1.5	937.7
5	249.4
5.15	241.4
10	116.3
15	74.5
20	54.3
25	42.5
30	34.7

$4 \cdot V_{ppc}$	3870.96
<i>Vppc</i>	967.74
$1/4 \cdot V_{ppc}$	241.94

La voladura no genera daño desde los 5.15m del tope de la labor. Entre 1.46m y 5.15m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 1.46m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

- *Tajo 052 – Emulsión:*

Carga Operante: 4.32kg

<i>Tajo 052 - Emulsión</i>	
<i>RMR</i>	25
<i>Q</i>	0.12
<i>Vs</i>	2579.18
σ_t	0.439
<i>E</i>	1.17
<i>Vppc</i>	967.74
<i>K</i>	1723.6
α	1.29
<i>Kg explosivo</i>	4.32

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	10830.6
1.11	3871.3
1.5	2625.2
3.25	968.3
5	555.5
9.55	241.1
10	227.2
15	134.6
20	92.9
25	69.7
30	55.1

$4 \cdot V_{ppc}$	3870.96
<i>Vppc</i>	967.74
$1/4 \cdot V_{ppc}$	241.94

La voladura no genera daño desde los 9.55m del tope de la labor. Entre 3.25m y 9.55m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 3.25m y 1.11m hay creación de nuevas fracturas y entre 1.11 y el tope hay intenso fracturamiento.

Carga Operante: 3.24kg

<i>Tajo 052 - Emulsión</i>	
<i>RMR</i>	25
<i>Q</i>	0.12
<i>Vs</i>	2579.18
<i>σt</i>	0.439
<i>E</i>	1.17
<i>Vppc</i>	967.74
<i>K</i>	1723.6
<i>α</i>	1.29
<i>Kg explosivo</i>	3.24

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	8996.4
0.96	3878
1.5	2180.6
2.82	965.9
5	461.4
8.25	241.8
10	188.7
15	111.8
20	77.2
25	57.9
30	45.7

4*Vppc	3870.96
Vppc	967.74
1/4*Vppc	241.94

La voladura no genera daño desde los 8.25m del tope de la labor. Entre 2.82m y 8.25m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 2.82m y 0.96m hay creación de nuevas fracturas y entre 0.96 y el tope hay intenso fracturamiento.

- *Tj 828 – Dinamita:*

Carga Operante: 3.2kg

<i>Tajo 828 - Dinamita</i>	
<i>RMR</i>	35
<i>Q</i>	0.37
<i>Vs</i>	3068.2
<i>σt</i>	0.69
<i>E</i>	1.51
<i>Vppc</i>	1402.03
<i>K</i>	1232.1
<i>α</i>	0.97
<i>Kg explosivo</i>	3.2

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	4223.8
1.5	1460.7
1.56	1406.4
5	456.3
6.59	349.4
10	233.5
15	157.8
20	119.5
25	96.3
30	80.7

4*Vppc	5608.12
Vppc	1402.03
1/4*Vppc	350.51

La voladura no genera daño desde los 6.59m del tope de la labor. Entre 1.56m y 6.59m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 1.56m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

Carga Operante: 2.4kg

<i>Tajo 828 - Dinamita</i>	
<i>RMR</i>	35
<i>Q</i>	0.37
<i>Vs</i>	3068.2
σ_t	0.69
<i>E</i>	1.51
<i>Vppc</i>	1402.03
<i>K</i>	1232.1
α	0.97
<i>Kg explosivo</i>	2.4

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	3690.2
1.36	1398
1.5	1271.3
5	395.4
5.67	350
10	201.9
15	136.2
20	103.1
25	83
30	69.5

4*Vppc	5608.12
Vppc	1402.03
1/4*Vppc	350.51

La voladura no genera daño desde los 5.67m del tope de la labor. Entre 1.36m y 5.67m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 1.36m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

- *Tj 828 – Emulsión:*

Carga Operante: 4.32kg

<i>Tajo 828 - Emulsión</i>	
<i>RMR</i>	35
<i>Q</i>	0.37
<i>Vs</i>	3068.2
σ_t	0.69
<i>E</i>	1.51
<i>Vppc</i>	1402.03
<i>K</i>	1359.3
α	0.93
<i>Kg explosivo</i>	4.32

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	5114.1
1.5	1841
2.01	1402.3
5	600.9
8.93	350.4
10	315.4
15	216.3
20	165.5
25	134.5
30	113.5

4*Vppc	5608.12
Vppc	1402.03
1/4*Vppc	350.51

La voladura no genera daño desde los 8.93m del tope de la labor. Entre 2.01m y 8.93m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 2.01m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

Carga Operante: 3.24kg

<i>Tajo 828 - Emulsión</i>	
<i>RMR</i>	35
<i>Q</i>	0.37
<i>Vs</i>	3068.2
<i>σt</i>	0.69
<i>E</i>	1.51
<i>Vppc</i>	1402.03
<i>K</i>	1359.3
<i>α</i>	0.93
<i>Kg explosivo</i>	3.24

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	4473.8
1.5	1610.5
1.74	1402.8
5	525.6
7.73	350.5
10	275.9
15	189.2
20	144.8
25	117.7
30	99.3

<i>4*Vppc</i>	5608.12
<i>Vppc</i>	1402.03
<i>1/4*Vppc</i>	350.51

La voladura no genera daño desde los 7.73m del tope de la labor. Entre 1.74m y 7.73m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 1.74m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

- *Tj 748 – Dinamita:*

Carga Operante: 3.2kg

<i>Tajo 748 - Dinamita</i>	
<i>RMR</i>	40
<i>Q</i>	0.64
<i>Vs</i>	3306.18
<i>σt</i>	0.83
<i>E</i>	1.69
<i>Vppc</i>	1623.75
<i>K</i>	1507.6
<i>α</i>	1.15
<i>Kg explosivo</i>	3.2

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	6530.2
1.5	1846
1.68	1620.5
5	462.3
5.6	405.8
10	208.3
15	130.7
20	93.9
25	72.6
30	58.9

<i>4*Vppc</i>	6495
<i>Vppc</i>	1623.75
<i>1/4*Vppc</i>	405.94

La voladura no genera daño desde los 5.6m del tope de la labor. Entre 1.68m y 5.6m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 1.68m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

Carga Operante: 2.4kg

<i>Tajo 748 - Dinamita</i>	
<i>RMR</i>	40
<i>Q</i>	0.64
<i>Vs</i>	3306.18
<i>σt</i>	0.83
<i>E</i>	1.69
<i>Vppc</i>	1623.75
<i>K</i>	1507.6
<i>α</i>	1.15
<i>Kg explosivo</i>	2.4

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	5534.7
1.5	1564.6
1.45	1626.8
4.85	405.8
5	391.8
10	176.6
15	110.8
20	79.6
25	61.6
30	49.9

4*Vppc	6495
Vppc	1623.75
1/4*Vppc	405.94

La voladura no genera daño desde los 4.85m del tope de la labor. Entre 1.45m y 4.85m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 1.45m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

- **Tj 748 – Emulsión:**

Carga Operante: 4.0kg

<i>Tajo 748 - Emulsión</i>	
<i>RMR</i>	40
<i>Q</i>	0.64
<i>Vs</i>	3306.18
<i>σt</i>	0.83
<i>E</i>	1.69
<i>Vppc</i>	1623.75
<i>K</i>	663.2
<i>α</i>	1.09
<i>Kg explosivo</i>	4

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	3005.3
0.88	1622.9
1.5	907.5
3.14	405.6
5	244.3
10	114.8
15	73.8
20	53.9
25	42.3
30	34.7

4*Vppc	6495
Vppc	1623.75
1/4*Vppc	405.94

La voladura no genera daño desde los 3.14m del tope de la labor. Entre 0.88m y 3.14m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 0.88m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

Carga Operante: 3.0kg

<i>Tajo 748 - Emulsión</i>	
<i>RMR</i>	40
<i>Q</i>	0.64
<i>Vs</i>	3306.18
σ	0.83
<i>E</i>	1.69
<i>Vppc</i>	1623.75
<i>K</i>	663.2
α	1.09
<i>Kg explosivo</i>	3

<i>Distancia</i>	<i>Vpp</i>
0.5	2569.2
0.76	1627.8
1.5	775.8
2.72	405.5
5	208.8
10	98.1
15	63.1
20	46.1
25	36.1
30	29.6

<i>4*Vppc</i>	6495
<i>Vppc</i>	1623.75
<i>1/4*Vppc</i>	405.94

La voladura no genera daño desde los 2.72m del tope de la labor. Entre 0.76m y 2.72m hay extensión de fracturas pre-existentes. Entre 0.76m y el tope hay creación de nuevas fracturas.

1.10.- TÉCNICAS USADAS PARA REDUCIR LAS VIBRACIONES:

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

Estas pautas son:

- ❖ En primer lugar, reducción de la carga operante de las voladuras, a través de las siguientes opciones:
 - La reducción del diámetro de perforación de los taladros.
 - La reducción de la altura de banco en la excavación (taladros largos).

- Cuando ni lo uno ni lo otro sea posible, por causas operativas (altura de banco definida de antemano en una explotación o diámetro de perforación fijado por la maquinaria disponible o por los niveles de producción requeridos), es posible llevar a cabo el seccionado de cargas dentro de un taladro, haciéndolas detonar en tiempos distintos.
 - Una herramienta imprescindible para lograr la reducción de la carga operante es el empleo de detonadores secuenciadores, que permiten la detonación de todas y cada una de las cargas que componen una voladura en un tiempo distinto.
 - Es importante no confundir la reducción de la carga operante con la carga máxima de la voladura, ya que es posible realizar una voladura de gran tamaño con cargas operantes reducidas.
 - También es importante no confundir la carga operante con la carga específica; si ésta se reduce mucho, puede ocurrir que no se produzca arranque de material y la mayor parte de la energía se emplee en generar vibraciones, produciéndose el resultado inverso al buscado, cuanto más confinada esté una voladura, más vibraciones generará ésta.
- ❖ A continuación, ajustar la secuenciación a las frecuencias predominantes del terreno. Los detonadores secuenciadores ofrecen una versatilidad suficiente (mejorada con los detonadores electrónicos) como para adaptar la secuencia de detonación de las cargas de las voladuras a la frecuencia predominante del terreno en el punto de medida. Una variante de esta medida correctora es focalizar el tren de ondas en el sentido inverso a la posición de la estructura.
- ❖ Otra medida preventiva es crear o aprovechar pantallas o discontinuidades entre el macizo rocoso donde se lleva a cabo la voladura y la estructura a proteger. En este sentido, se está extendiendo la técnica del precorte para crear ese tipo de discontinuidad (si bien tiene otros inconvenientes de confinamiento de cargas que hay que tener en cuenta al diseñarlo, para no provocar males mayores con el precorte que con la voladura principal). También se pueden aprovechar las caras libres de los bancos, orientando la salida de la voladura de tal manera que las vibraciones viajen preferentemente en sentido contrario a la posición de la estructura a preservar.

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

1.11.- CÁLCULO DE LA CARGA MÁXIMA POR RETARDO:

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

Las ecuaciones empíricas usan metodologías basadas en criterios de retroanálisis, para determinar los valores de las constantes empíricas en función de la mejor correlación estadística posible.

Para el cálculo de la Carga Máxima por Retardo partamos de la ecuación básica:

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

La creación de nuevas fracturas se originará cuando se sobrepase la V_{ppc} en los alrededores del lugar donde se realice la voladura. Como K y α son constantes, tenemos:

$$W_{m\acute{a}x} = \left(\frac{V_{ppc} * d^{\alpha}}{K} \right)^{\frac{2}{\alpha}}$$

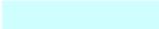
De ésta forma, se genera una herramienta útil de trabajo, ya que es posible establecer con rigor curvas de isovalores de velocidades de vibración previsible en las inmediaciones de los disparos, definiendo áreas que, en cualquier instante, pueden ser comparadas con las estructuras que ocupan la superficie, acorde al avance de los trabajos de voladura, sea alejándose o aproximándose a las estructuras.

Para el cálculo de la Carga Máxima por retardo se considera $d = 1.5\text{m}$ debido a que es la separación entre los cuadros de madera.

<i>Tajeos</i>	<i>W máx calculado</i>
Tajeo 052 - Dinamita	2.54 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.25 kg
Tajeo 052 - Dinamita	2.94 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.40 kg
Tajeo 052 - Dinamita	2.56 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.18 kg

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

<i>Tajeos</i>	<i>Wmáx calculado</i>	<i>Wmáx usado</i>	<i>Wmín usado</i>
Tajeo 052 - Dinamita	2.54 kg	3.20 kg	2.40 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.25 kg	4.32 kg	3.24 kg
Tajeo 052 - Dinamita	2.94 kg	3.20 kg	2.40 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.40 kg	4.32 kg	3.24 kg
Tajeo 052 - Dinamita	2.56 kg	3.20 kg	2.40 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.18 kg	4.00 kg	3.00 kg

 Debajo de la carga máxima calculada

 Encima de la carga máxima calculada

1.12.- APLICACIÓN EN OTRAS UNIDADES MINERAS EN OPERACIONES DE TALADROS LARGOS:

MINA ARCATA – Tj 676

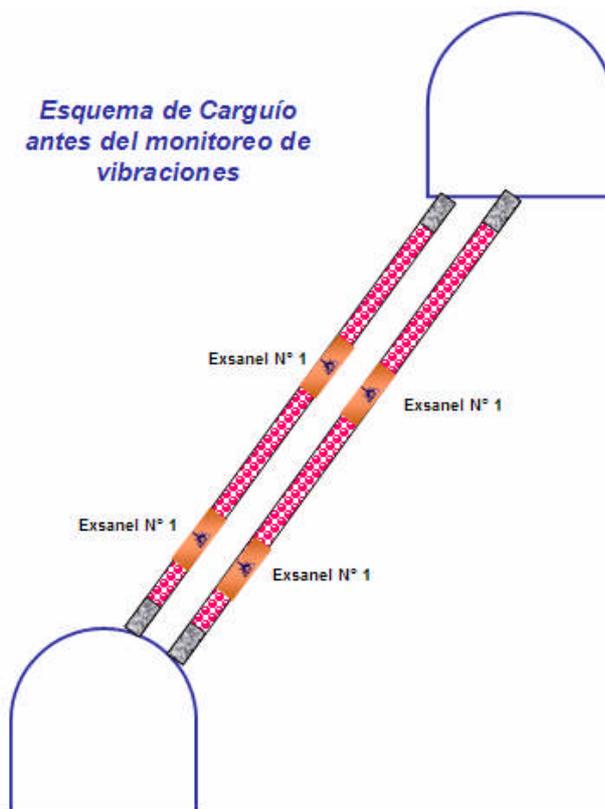
En esta unidad minera tenemos taladros largos en vetas angostas cuyo ancho promedio de veta es 0.8 m.

La malla de perforación es cuadrada de 0.8m x 0.8m.

Diámetro de Perforación: 2”

Longitud de los taladros: 10m

Antes de los monitoreos:



Carga total x taladro = 10 Kg
Distancia = 1.5 metros
VPP = 1503.38 mm/s

Como se observa en la figura, antes de la realización de los monitoreos se disparaba los taladros de una misma fila con un mismo número de retardo en la parte final y central del taladro, lo que originaba una carga operante de 20 kg.

Esto trae como consecuencia que haya mucha carga explosiva detonando en simultáneo, lo que origina la inestabilidad de la zona en donde se realizan los trabajos de taladros largos, alterando la estabilidad de las cajas principalmente.

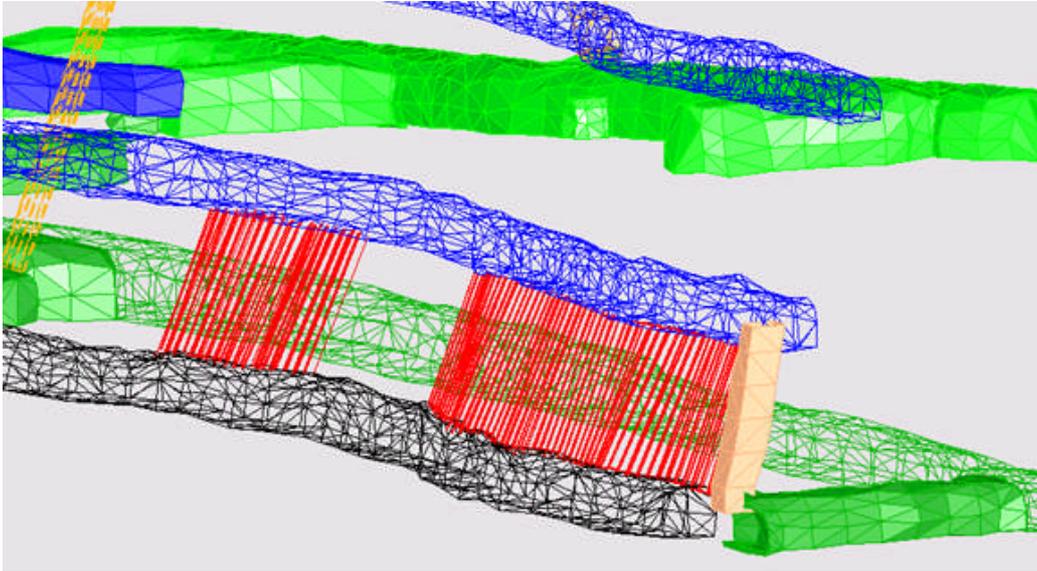
Resultados:



Debido a la excesiva carga explosiva detonando en simultáneo, se debilitaron las cajas del tajeo originando un accidente al equipo de limpieza con telemando.

INICIO DE LOS TRABAJOS DE MONITOREO:

Ubicación del equipo con respecto a la voladura:



Cabe mencionar que la ubicación del punto de monitoreo es fundamental para la toma de datos, que en nuestro caso y por la accesibilidad se ubicó en un punto estratégico dándonos una buena confiabilidad en la toma de datos.

Pintado de la veta:



Instalación del geófono:

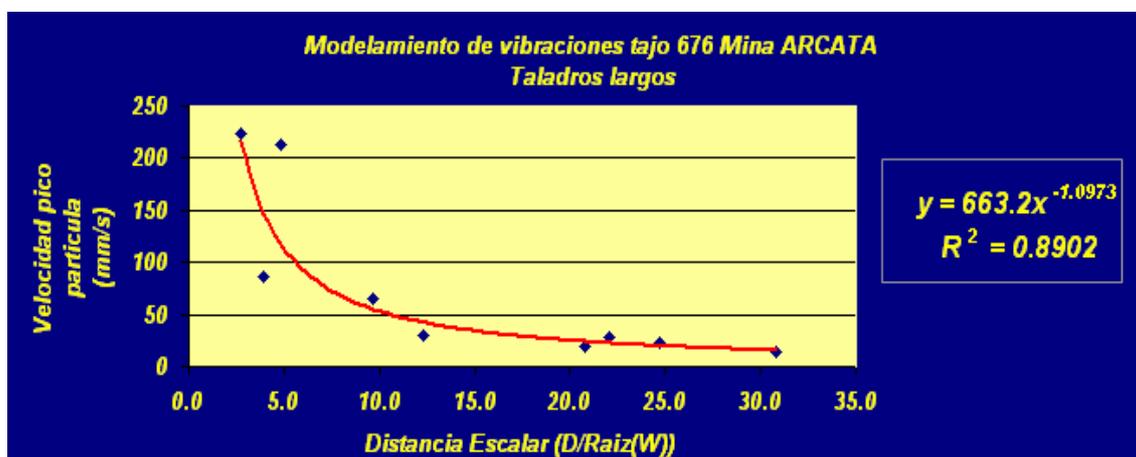


En la foto observamos la ubicación del geófono para lo cual se tomó en consideración la técnica de plancha empernada a la roca a través de un split set y cuyo objetivo principal es mantener fijo el geófono simulando el comportamiento vibracional del macizo rocoso.

Toma de datos:

Datos de monitoreo				Eje (X)	Eje (y)
Disparo (Fecha)	Velocidad Pico Particula	Distancia (m)	W(Peso max/retardo) Kg	De(D/Raiz(W))	VPP
23-dic	23.5	61.05	6.1	24.7184	23.5
23-dic	27.7	54.49	6.1	22.0624	27.7
24-dic	19.6	47.93	5.3	20.8195	19.6
04-feb	13.7	41.37	1.8	30.8354	13.7
25-feb	29.2	34.81	8	12.3072	29.2
26-feb	65.3	28.25	8.5	9.6897	65.3
03-abr	213	21.69	20	4.8500	213
05-abr	224	15.16	30	2.7678	224
06-abr	87	20.48	27	3.9414	87

Modelamiento del comportamiento del macizo rocoso:



Donde la ecuación que se aproxima al modelamiento y comportamiento de las vibraciones en cualquier punto sobre el macizo rocoso es igual a:

$VPP = 663.2 (De)^{-1.0973}$	Entonces	$VPP = 663.2 \left(\frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-1.0973}$
------------------------------	----------	---

Como podemos observar el coeficiente de correlación nos da cierta certeza de la exactitud en la precisión de la ecuación, la cual debe ir mejorando en función a la mayor cantidad de toma de datos, ya que la evaluación realizada esta hecha desde el punto de vista de campo lejano.

Cálculo de la Vppc

Para estimar la carga máxima por retardo y minimizar el daño al macizo rocoso debemos de estimar la Velocidad pico partícula Crítica.

Para la obtención de la resistencia a la tracción se recogieron muestras del tajo 676 y se hicieron pruebas de carga puntual obteniendo los siguientes resultados:



- σt: 6.7 MPa
- Vp: 3829 m/s
- E: 31.2 GPa

Reemplazando en la ecuación que estima la velocidad pico partícula obtenemos:

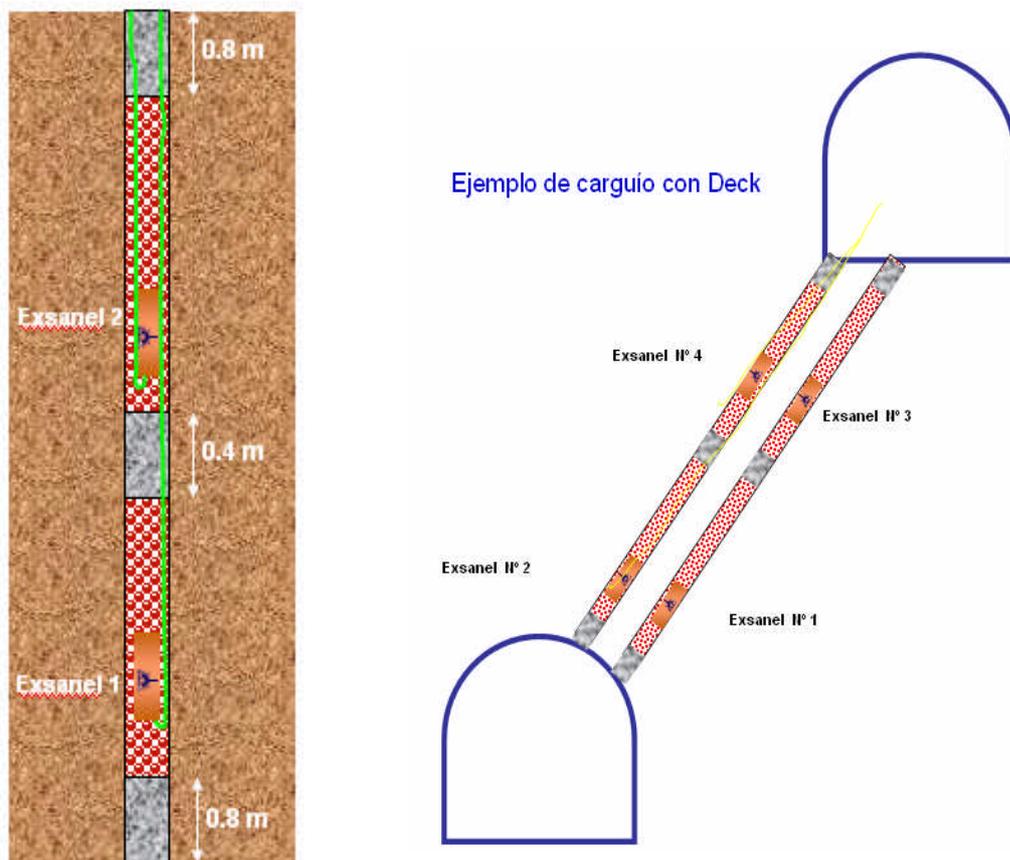
$$VPP_{Crítica} = 823.00 \text{ mm/s}$$

Cálculo de la Carga Máxima por Retardo:

A una distancia de radio de influencia de 1.5 metros del centro de la voladura y no sobrepasando una VPP que este en el rango mínimo de 823 (roca tipo andesita) y máximo 1100 mm/s (roca tipo pórfido), obtenemos el siguiente resultado.

$4.0 \text{ kilos (pórfido)} < \text{carga máxima por retardo} < 5.5 \text{ kilos (andesita)}$
--

Carguío con 2 tacos de 80 cm, 1 deck intermedio de 40cm para disminuir la cantidad de explosivo en la columna y salida con 2 EXSANELES con tiempos de retardo diferente asegurando que primero salga la parte baja del taladro para poder disminuir la cantidad de explosivo que está detonando en simultáneo.



Carga total x retardo = 4.5 Kg
Distancia = 1.5 metros
VPP = 907.07 mm/s

Observamos que con una mejor distribución en tiempos de retardo y distribución de carga, podemos disminuir el nivel de vibraciones tal y como podemos observar en el taladro simulado.

Resultados:



Como se puede observar en las imágenes, la dilución es mínima, una fragmentación adecuada y además se tienen unas cajas muy estables, que son los principales problemas en los trabajos de taladros largos.

CAPITULO II

CONCLUSIONES

- El empleo adecuado del Monitoreo de Vibraciones producidas por las voladuras, es una técnica que provee múltiples ventajas en términos de poder examinar en detalle el proceso de la voladura, constituyéndose en una muy buena herramienta para el diagnóstico, ya que la adecuada interpretación del registro de vibraciones permite determinar el grado de interacción entre las variables de una voladura, pudiéndose evaluar por ejemplo: cargas detonando en una secuencia de encendido incorrecta; dispersión en los tiempos de encendido de los retardos; detonación deficiente de cargas; detonaciones instantáneas; detonación de cargas adyacentes por simpatía; además de la cuantificación de los niveles de velocidad, frecuencia, aceleración y desplazamiento de las partículas de roca. En definitiva el rendimiento general del diseño.
- Los parámetros de ajuste de estos modelos son directamente dependientes del comportamiento de las vibraciones en cada tipo de roca, los que presentan un amplio rango de variabilidad, y lo que influye fuertemente en los niveles de vibración predichos por cada uno de ellos, restringiéndose su aplicación al sector donde fueron obtenidos.
- Las vibraciones producidas por las voladuras y el conocimiento de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso, permiten estimar la probabilidad de ocasionar daño en dicho macizo. Los altos niveles de vibración pueden dañar la roca, produciendo fracturas nuevas o extendiendo y dilatando fracturas existentes. La vibración en este contexto, puede ser considerada como un esfuerzo o deformación del macizo rocoso. Se muestra también en este trabajo un conjunto de datos representativos de diferentes tipo de rocas y los valores calculados para la Velocidad de Partícula Crítica (PPVc), valor que se puede usar inicialmente como referencia a partir del cual la vibración produce daño a nivel de la matriz de roca, los valores presentados, también dan cuenta de una importante variación en las magnitudes de vibración que es capaz de resistir

cada tipo de roca, debiendo en consecuencia tomarse mucha precaución respecto de los valores promedios manejados tradicionalmente.

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

Tj 052

Dinamita:

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

Emulsión:

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

Tj 828

Dinamita:

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

Emulsión:

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

Tj 748

Dinamita:

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

Emulsión:

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

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

V_{PPc} Tj 052:
$$V_{ppc} = \frac{0.439 * 2579.18}{1.17} = 967.74 \text{ mm / s}$$

V_{PPc} Tj 828:
$$V_{ppc} = \frac{0.69 * 3068.20}{1.51} = 1402.03 \text{ mm / s}$$

V_{PPc} Tj 748:
$$V_{ppc} = \frac{0.83 * 3306.18}{1.69} = 1623.75 \text{ mm / s}$$

- De todas las pruebas realizadas en los tajeos en estudio, las únicas que no sobrepasaron las cargas máximas por retardos y por consiguiente no hubo creación de nuevas fracturas fueron las que se detonaron con dinamita (usando la carga mínima), como máximo 6 taladros por retardo (2.40kg). Las otras demás alternativas sobrepasaron la carga máxima por retardo.

Tajeos	Wmáx calculado	Wmáx usado	Wmín usado
Tajeo 052 - Dinamita	2.54 kg	3.20 kg	2.40 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.25 kg	4.32 kg	3.24 kg
Tajeo 052 - Dinamita	2.94 kg	3.20 kg	2.40 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.40 kg	4.32 kg	3.24 kg
Tajeo 052 - Dinamita	2.56 kg	3.20 kg	2.40 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.18 kg	4.00 kg	3.00 kg

 Debajo de la carga máxima calculada

 Encima de la carga máxima calculada

- A pesar del menor costo por caja de las Emulsiones (\$52.34) en comparación con las Dinamitas (\$56.75), al obtener el costo de cada cartucho, encontramos que la dinamita es más barata (0.18 \$/cart en comparación con la emulsión que es de 0.23 \$/cart), esto es debido al número de cartuchos que viene por caja. Además en ambos casos se carga con la misma cantidad de cartuchos por taladro lo que hace que el costo por tajeo sea mayor con emulsión a pesar de haber

reducido taladros. Siendo el costo en explosivos del tajeo con dinamita mas barato (31.50 \$/Tj) que con emulsiones (35.65 \$/Tj).

- En las pruebas realizadas se encontró que los factores de carga son menores con el empleo de dinamitas que con el uso de emulsiones a pesar de haber reducido el número de taladros cargados, esto se da debido a la diferencia de densidades que hay entre uno y otro explosivo.
- Debido a los resultados obtenidos con las emulsiones (caída de cuadros y sobreexcavación, lo que origina un costo adicional) se desechó el uso de emulsiones al 100% en los frentes.
- En la aplicación de taladros largos, en base a estos estudios y parámetros geomecánicos, se propuso el diseño de carguío en el que se menciona el uso de decks intermedios el cual reduce el factor de carga, minimizando la vibración y por ende el daño a la roca creando un ambiente de trabajo seguro para los equipos. Asimismo buscamos minimizar la dilución presente en este tipo de explotación.
- Los resultados obtenidos serán confiables sólo si la técnica es empleada correctamente, mereciendo especial atención los aspectos de: ubicación, orientación y acoplamiento de los geófonos utilizados como sensores, según y como el instrumento empleado como capturador y analizador de la onda ha sido configurado para la medición, particularmente en relación a la resolución de tiempo de muestreo, rangos de velocidad y procedimientos de análisis.

CAPITULO III

RECOMENDACIONES

- Los monitoreos de vibraciones deben ser realizados por personal entrenado y experimentado para poder recabar información confiable y poder tomar decisiones correctamente.
- Así también recordar que a medida que se incremente el número de monitoreos en cada zona la ecuación de vibraciones debe estar variando y ajustándose más al comportamiento real del movimiento o vibraciones del macizo rocoso. (Para llegar a un modelo confiable).
- Buscar no siempre el explosivo más barato, sino el cual pueda realizar un determinado trabajo eficientemente con el menor costo y que además no incurra en costos adicionales. Hay que tener en cuenta el costo global y no solo el costo del explosivo.
- Establecer puntos de monitoreo fijos cuando se desee realizar el control de vibraciones para estructuras importantes en la operación (el caso de piques, compresoras, estaciones de bombeo, etc.)

CAPITULO IV

BIBLIOGRAFÍA

SOCIEDAD INTERNACIONAL DE INGENIEROS DE EXPLOSIVOS, “Manual del Especialista en Voladura”, 17ª Edición – 2008.

(**CINTEX**), “Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento”, Mayo 2006.

CARLOS SCHERPENISSE O., “Monitoreo y modelamiento de vibraciones para el control y evaluación del daño por voladuras”, ASP Blastronics Octubre 2006.

SOCIEDAD INTERNACIONAL DE INGENIEROS DE EXPLOSIVOS, “Fundamentos Prácticos de Voladura”, ISEE –2006.

VIDAL NAVARRO TORRES, PH.D. - PEDRO MARQUES BERNARDO, M.SC. “El BLASTWARE III como herramientas para la prevención y control ambiental de vibraciones en voladuras”, Universidad Técnica de Lisboa 2004.

JESÚS A. PASCUAL DE BLAS – Jefe de Servicio al Cliente Unión Española de Explosivos, S.A., “Problemática de las vibraciones en las voladuras, medición, control y regulación legal”, Marzo 2002.

CARLOS R. SCHERPENISSE, ING, WILLIAM R. ADAMSON, PHD, “Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras de desarrollo horizontal”, ASP BLASTRONICS S.A. Febrero 2000.

LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ, “Control De Vibraciones”, Departamento de Engenharia de Minas Escola Politécnica da Universidad de São Paulo, 1995.

NERIO ROBLES, “Excavación y sostenimiento de túneles en roca”, 1994

HOEK E. / ET BROWN, “Excavaciones subterráneas en roca”, Marzo 1985.

ENAEX S.A., Manual de Tronadura

KONYA, Manual Konya

LOPEZ JIMENO, “Manual de Perforación”, 2da Edición.

CAPITULO V

APÉNDICES

Los costos de los explosivos por frente usados en las pruebas fueron los siguientes:

Tj 052

Explosivo Usado	#cart/caja	W cart	Costo x caja	Costo x cart	Cart / Taladro	Prom # Tal / frente	\$ Explosivo / Frente
Semexsa 65 de 7/8" x 7"	308	0.081 kg	\$ 56.75	\$ 0.18	5	35	31.50
Emulnor 1000 de 1" x 8"	230	0.108 kg	\$ 52.34	\$ 0.23	5	31	35.65

Tj 828

Explosivo Usado	#cart/caja	W cart	Costo x caja	Costo x cart	Cart / Taladro	Prom # Tal / frente	\$ Explosivo / Frente
Semexsa 65 de 7/8" x 7"	308	0.081 kg	\$ 56.75	\$ 0.18	5	25	22.50
Emulnor 1000 de 1" x 8"	230	0.108 kg	\$ 52.34	\$ 0.23	5	22	25.30

Tj 748

Explosivo Usado	#cart/caja	W cart	Costo x caja	Costo x cart	Cart / Taladro	Prom # Tal / frente	\$ Explosivo / Frente
Semexsa 65 de 7/8" x 7"	308	0.081 kg	\$ 56.75	\$ 0.18	5	21	18.90
Emulnor 1000 de 1" x 8"	230	0.108 kg	\$ 52.34	\$ 0.23	5	19	21.85

Los factores hallados durante las pruebas fueron los siguientes:

Tj 052

Explosivo Usado	W cart	Cart / tal	Prom # Tal / frente	Avance	Sección	m3	ρ	kg explosivo	kg / m3	Kg / ton
Semexsa 65 de 7/8" x 7"	0.081	5	35	1.60	3 x 3	14.4	2.17	14.18	0.98	0.45
Emulnor 1000 de 1" x 8"	0.108	5	31	1.60	3 x 3	14.4	2.17	16.74	1.16	0.54

Tj 828

Explosivo Usado	W cart	Cart / tal	Prom # Tal / frente	Avance	Sección	m3	ρ	kg explosivo	kg / m3	Kg / ton
Semexsa 65 de 7/8" x 7"	0.081	5	25	1.60	2.5 x 2.5	10.0	2.17	10.13	1.01	0.47
Emulnor 1000 de 1" x 8"	0.108	5	22	1.60	2.5 x 2.5	10.0	2.17	11.88	1.19	0.55

Tj 748

Explosivo Usado	W cart	Cart / tal	Prom # Tal / frente	Avance	Sección	m3	ρ	kg explosivo	kg / m3	Kg / ton
Semexsa 65 de 7/8" x 7"	0.081	5	21	1.60	2.5 x 2.5	10.0	2.17	8.51	0.85	0.39
Emulnor 1000 de 1" x 8"	0.108	5	19	1.60	2.5 x 2.5	10.0	2.17	10.26	1.03	0.47

Resultados de las Voladuras con Emulsiones:



Registros tomados con el sismógrafo:



Tajeo 828 – Ramal Sur

Date/Time Vert at 02:48:36 July 21, 2008
 Trigger Source Geo: 0.610 mm/s
 Range Geo :254 mm/s
 Record Time 10.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps
 Job Number: 828

Serial Number BE10861 V 8.01-8.0 MiniMate Plus
 Battery Level 6.0 Volts
 Calibration February 6, 2006 by Instantel Inc.
 File Name L861CAHU.H00
 Scaled Distance 34.8 (22.0 m, 0.4 kg)

Notes

Location: ARES
 Client: Ing. Marco Benites
 User Name: Geotecnia
 General:

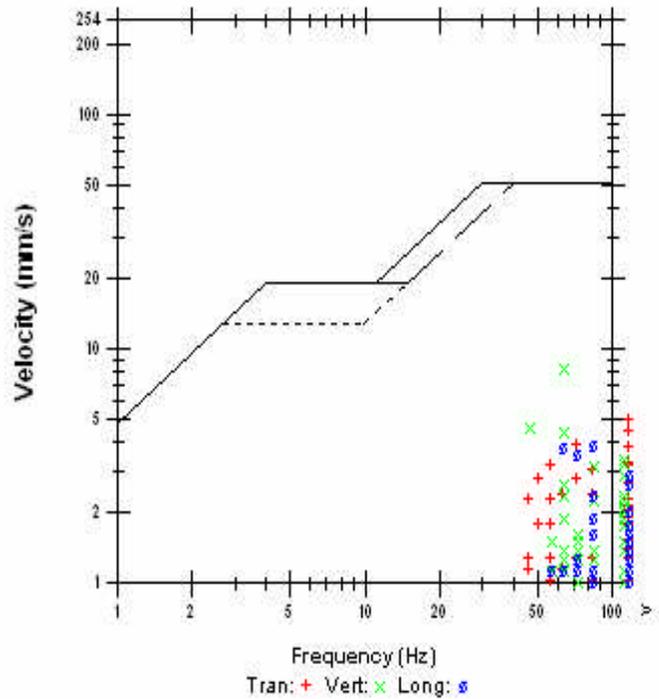
Extended Notes

Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.250 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	4.95	8.25	3.94	mm/s
ZC Freq	>100	64	85	Hz
Time (Rel. to Trig)	7.734	5.478	5.480	sec
Peak Acceleration	0.345	0.358	0.292	g
Peak Displacement	0.00862	0.0191	0.00794	mm
Sensorcheck	Check	Passed	Passed	
Frequency	8.6	7.5	7.5	Hz
Overswing Ratio	3.7	3.8	4.0	

USBM R18507 And OSMRE





Tajeo 748 SW

Date/Time Tran at 12:01:58 February 15, 2008
 Trigger Source Geo: 0.610 mm/s
 Range Geo :254 mm/s
 Record Time 16.25 sec (Auto=35sec) at 1024 sps
 Job Number: 748

Serial Number BE10861 V 8.01-8.0 MiniMate Plus
 Battery Level 6.3 Volts
 Calibration February 6, 2006 by Instantel Inc.
 File Name L861C2FT.FA0
 Scaled Distance 41.1 (26.0 m, 0.4 kg)

Notes

Location: ARES
 Client: ADRIAN CORIHUAMAN
 User Name:
 General:

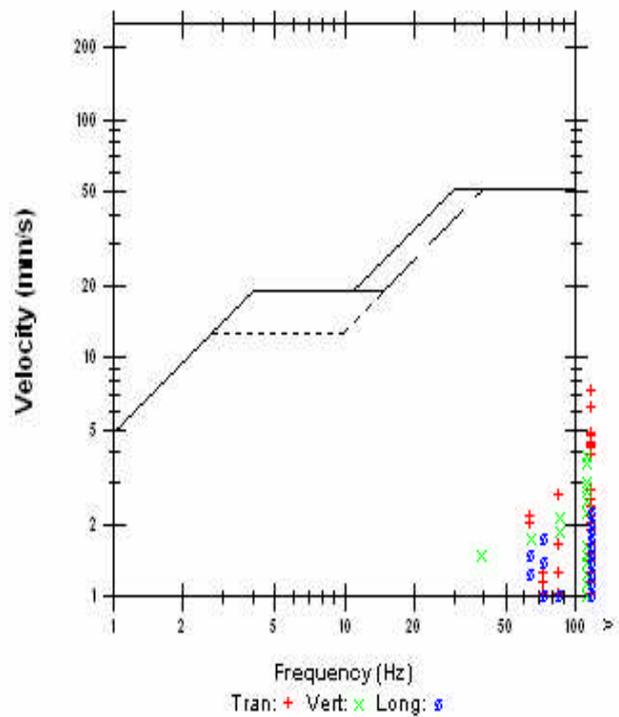
Extended Notes

Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 11.781 sec
 ZC Freq >100 Hz
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	7.37	3.94	2.29	mm/s
ZC Freq	>100	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	7.213	7.209	7.212	sec
Peak Acceleration	0.530	0.371	0.292	g
Peak Displacement	0.00862	0.00471	0.00291	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.5	7.5	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.9	3.8	4.1	

USBM RI8507 And OSMRE





Tajeo 052

Date/Time Long at 02:50:55 February 2, 2008
 Trigger Source Geo: 0.610 mm/s
 Range Geo: 254 mm/s
 Record Time 7.25 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps
 Job Number: 52

Serial Number BE10861 V 8.01-8.0 MiniMate Plus
 Battery Level 6.3 Volts
 Calibration February 6, 2006 by Instantel Inc.
 File Name L861C1R1.8V0
 Scaled Distance 15.5 (13.0 m, 0.7 kg)

Notes

Location: ARES
 Client: ADRIAN CORIHUAMAN
 User Name:
 General:

Extended Notes

Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 2.708 sec
 ZC Freq >100 Hz
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	9.02	7.11	13.6	mm/s
ZC Freq	73	>100	>100	Hz
Time (Rel. to Trig)	4.138	2.712	4.138	sec
Peak Acceleration	0.716	0.915	1.76	g
Peak Displacement	0.0146	0.00639	0.0393	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.5	7.6	Hz
Overswing Ratio	3.9	3.7	4.0	

Peak Vector Sum 17.5 mm/s at 4.138 sec

USBM RI8507 And OSMRE

