

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE
APURIMAC**

ESCUELA ACADEMICO PROFECIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO Y CARGA MÁXIMA
CON RETARDO SEGÚN EL MACIZO ROCOSO EN EL
ANÁLISIS DE VIBRACIONES POR MODELAMIENTO
U.P. TITAN 2013”**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

WALTER CRUZ MEDRANO

Abancay, Noviembre del 2013.

PERÚ

1
1791
C
2013

UNIVERSIDAD NACIONAL MICHAELA BASTIDAS DE APURIMAC	
CÓDIGO	MFN
	BIBLIOTECA CENTRAL
FECHA DE INGRESO:	02 SET. 2014
Nº DE INGRESO:	0383

WALTER CRUZ MEDRANO



**“SELECCIÓN DEL EXPLOSIVO Y CARGA MÁXIMA
CON RETARDO SEGÚN EL MACIZO ROCOSO EN EL
ANÁLISIS DE VIBRACIONES POR MODELAMIENTO
U.P. TITAN”**

**Tesis Presentada a la Escuela Académico Profesional
de INGENIERIA DE MINAS DE LA UNAMBA para
obtener el Título de Ingeniero de Minas.**

FACULTAD DE INGENIERIA

ASESOR: Prof. Dr. Leoncio T. Carnero Carnero.

Abancay, Noviembre del 2013

PERU.

DEDICATORIA

Con mucho amor y cariño para mis padres
Rosa y Miguel mis hermanos y Yanet.

AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera colaboraron para la realización del presente trabajo, en especial a los ingenieros de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la UNAMBA, por su aporte con pautas para el desarrollo del mismo.

A mi asesor Dr. Leoncio Teófilo Carnero Carnero; quien con sus sabias enseñanzas, consejos y observaciones ha contribuido a la realización del presente trabajo.

Al personal ejecutivo de la empresa TITAN y profesionales quienes permitieron el acceso a la base de datos necesarios para la ejecución de la presente investigación.

INDICE

	Nº Pág.
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE CUADROS	XII
LISTA DE SIMBOLOS	XIV
RESUMENXVIABSTRACT	XVIII
INTRODUCCION	1

CAPITULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.	3
1.2 JUSTIFICACIÓN.	4
1.3 OBJETIVO.	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5

1.4	HIPÓTESIS Y VARIABLES.	6
1.4.1	Hipótesis general.	6
1.4.1	Hipótesis específicos.	6
1.4.3	Definición operacional de variables	6
1.4.4	Indicadores de las variables	7
1.5	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.	8
1.5.1	Tipo y Nivel de Investigación	8
1.5.2	Método y diseño de investigación	8
1.5.3	Población y Muestra	9
1.5.4	Técnicas de investigación	9
CAPITULO II		
	GENERALIDADES	10
2.1	ANTECEDENTES	10
2.2	UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD AL DERECHO MINERO	10
2.3	CLIMA Y VEGETACIÓN.	13
2.4	GEOLOGÍA REGIONAL.	22
2.4.1	Estratigrafía regional	22
2.4.2	Paleozoico inferior:	23
2.4.4	Paleozoico superior	24
2.4.5	Pensilvaniano	25
2.4.6	Pérmico	25
2.4.7	Mesozoico	25
2.4.8	Cretaceosuperior.	26
2.4.9	Formación muñanicretaceo superior	27
2.4.10	Arcillas Azángaro, Plioceno – Pleistoceno	27

2.4.11 Rocas ígneas intrusivas	27
2.4.12 Marco geomorfológico regional	28
2.4.13 Depresión de ananea	28
2.4.14 Cordillera de carabaya	38
2.4.15 Depresión de la cordillera oriental.	29
2.4.16 Zona de cordillera:	29
2.5 GEOLOGÍA LOCAL	29
2.5.1 Formación ananea.	29
2.5.2 Rocas intrusivas del paleozoico inferior.	30
2.5.3 Material cuaternario no consolidado.	30
2.5.4 Geomorfología local.	31
2.5.5 Geología estructural	31
2.5.6 Geología económica.	33
2.5.7 Características de la mineralización.	36
2.5.8 Controles de la mineralización	36
2.5.9 Afloramientos.	38
2.5.10 Mineralogía	39
2.5.11 Mineralización.	40
2.5.12 Fracturamiento.	40
2.5.13 Control estructural	40
2.6 OPERACIÓN MINA	41
2.7 MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN	61

CAPITULO III

EXPLOSIVOS Y VOLADURA DE ROCAS	64
3.1 EXPLOSIVO	64

3.1.1 Explosión	64
3.1.2 Eficiencia de los explosivos	65
3.2 PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS	66
3.2.1 Potencia y energía desarrollada	67
3.2.2 Velocidad de detonación	67
3.2.3 Densidad	67
3.2.4 Presión de detonación	68
3.2.5 Resistencia al agua y bajas temperaturas	68
3.2.6 Sensibilidad	68
3.2.7 Energía liberada en la voladura	69
3.2.8 Ondas explosivas	70
3.2.9 Accesorios de voladura	71
3.2.10 Sistema no Eléctrico	73

CAPITULO IV

VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURA	78
4.1 FUNDAMENTOS DE VIBRACIONES	78
4.2 NATURALEZA CÍCLICA DE LAS VIBRACIONES	78
4.3 PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS VIBRACIONES	81
4.3.1 Frecuencia de las vibraciones	81
4.3.2 Amplitud de las vibraciones	82
4.3.3 Duración de las vibraciones	83
4.3.4 Longitud de onda de las vibraciones	85
4.3.5 Velocidad de propagación	85
4.3.6 Arribo de ondas	87
4.4 VIBRACIONES Y ESFUERZOS	88

4.5	VIBRACIONES ORIGINADAS POR LA VOLADURA	90
4.6	ECUACIÓN DE PROPAGACIÓN DE LAS VIBRACIONES	97

CAPITULO V

	INSTRUMENTACION Y MONITOREO DE VIBRACIONES	106
5.1	TRANSDUCTORES DE VIBRACIONES	107
5.1.1	Acelerómetros	108
5.1.2	Geófonos	108
5.1.3	Frecuencia de registro de geófonos	110
5.1.4	Sensibilidad	111
5.1.5	Desplazamientos máximos	112
5.1.6	Numero de trasductores	112
5.1.7	Instalaciones	113
5.1.8	Orientación	114
5.1.9	Acoplamiento	115
5.2	EQUIPOS DE ANÁLISIS	116
5.3	ANÁLISIS DE FOURIER	130
5.4	MODELOS DE VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA	132
5.5	MONITOREO DE VIBRACIONES	140

CAPITULO VI

	MODELAMIENTO DE VIBRACIONES	146
6.1	VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO	146
6.2	DATOS DE LABORATORIO	146
6.2.1	Ensayos de propiedades físicas	147
6.2.2	Ensayos de compresión simple	147
6.2.3	Ensayos de compresión triaxial	148

6.2.4 Ensayos de propiedades elásticas	148
6.2.5 Calculo de velocidad de onda P	149
6.3 CALCULO DE LA VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA	151
6.4 MODELAMIENTO DE TAJEOS	152
6.4.1 Análisis de daños	156
6.4.2 Criterio de daños	170
6.4.3 Técnicas planteadas de análisis para reducción de daños	168
6.5 CALCULO DE CARGA MÁXIMA CON RETARDO	170
 CONCLUSIONES	 173
RECOMENDACIONES	175
BIBLIOGRAFIA	177
ANEXOS	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2: Muestra la ubicación de la Concesión Minera Ana María	5
Figura 3.1: Muestra el proceso de detonación de una mezcla explosiva	65
Figura 3.2: Ensamblado final del conector	76
Figura 4.1: Ciclo de Esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión	79
Figura 4.3: Frecuencia de ondas de vibraciones	82
Figura 4.4: Velocidad de partícula versus Tiempo	84
Figura 4.5: Medición de ondas de vibración	86
Figura 4.6: Arribo de ondas de vibración, que muestran amplitud y arribo de ondas.	87
Figura 4.7: Momento de arribo de la onda	88
Figura 4.8: Registro de onda de la velocidad de vibración de una voladura de producción (en tajo), mostrando variación de amplitud y frecuencia respecto al tiempo.	91
Figura 4.9: Onda generada por la detonación de un taladro	92
Figura 4.10: Pérdida de energía friccional durante la propagación de la	100

onda (el área sombreada indica la energía perdida).

Figura 4.11: Importancia relativa de la pérdida de energía y disipación geométrica en la amplitud de la vibración debido a la distancia.	102
Figura 4.12: Cambios de frecuencia con la distancia de propagación debido a la pérdida friccional	104
Figura 5.1 Se muestra un acelerómetro con sus partes.	108
Figura 5.2: Geófono utilizado para medición directa de señal.	109
Figura 5.3: Precisión de medición vs nivel de frecuencia.	111
Figura 5.4: Muestra la Sensibilidad de un Geófono	111
Figura 5.5: Se presenta un Arreglo Triaxial	114
Figura 5.6: Orientación real de un transductor.	115
Figura 5.7: Instalación de un transductor.	115
Figura 5.8: Arreglo para la descarga de la información del Sismógrafo hacia la PC	117
Figura 5.8: Se muestra el software Blastware III	123
Figura 5.10: Unit Communication Setups	124
Figura 5.11: Communications Setups	124
Figura 5.12 Muestra la comunicación con la unidad	125
Figura 5.13: Mensaje recibido y en proceso.	125
Figura 5.14: Se muestra en la pantalla los eventos	126
Figura 5.15: Se muestra el directorio para copiar eventos.	126
Figura 5.16: Se muestra el directorio para copiar eventos.	127
Figura 5.17: Grafico de frecuencia versus velocidad	128
Figura 5.18: Se muestra las amplitudes de escala.	129

Figura 5.20: Frecuencia de onda.	132
Figura 5.21: Modelamiento de vibraciones en el campo cercano.	138
Figura 5.22: Diferencia en la predicción de Vibraciones según el Modelo Devine y Holmberg&Persson	140
Figura 5.23: Registro Genérico de la Velocidad de Partículas	141
Figura 5.24: Medición de Vibraciones de una Voladura en Frentes	143
Figura 5.25: Influencia del intervalo de retardo en el nivel máximo de vibración.	144
Figura 6.1: Modelamiento en Tj 052 usando dinamita.	153
Figura 6.2 Modelamiento en el Tj 052 usando emulsión	154
Figura 6.3: Modelamiento en el Tj 828 usando dinamita.	154
Figura 6.4: Modelamiento en el Tj 828, usando emulsión	155
Figura 6.5 Modelamiento en el Tj 748, usando dinamita	155
Figura 6.6: Modelamiento en el Tj 748, usando emulsión.	156
Figura 6.7 Resumen de velocidades máximas indicativas de la diferentes normas internacionales	158
Figura 6.8: Criterios de daño excesivo a distancia diferentes del tope de la labor.	161

LISTA DE CUADROS

	N° Pág.
Cuadro N° 2.1 Coordenadas UTM de la concesión ANA MARIA 5.	12
Cuadro N° 2.2 Acceso a la concesión minera ANA MARIA 5	12
Cuadro N° 2.3 Centros educativos, Profesores y alumnos – 2011	
(Distrito de Ananea)	18
Cuadro N° 2.4 Servicio de salud y personal – 2010(Distrito de Ananea)	20
Cuadro N° 2.5 Ley y potencia de la zona mineralizada	43
Cuadro N° 2.6 Resumen de cronogramas de labores subterráneas.	48
Cuadro N° 2.7 Equipos mineros para la construcción de labores subterráneas.	49
Cuadro N° 2.8 Herramientas y materiales.	50
Cuadro N° 2.9 Material explosivo estimado.	51
Cuadro N°2.10 Principales insumos requeridos.	52
Cuadro N° 2.11 Implementos de seguridad.	53
Cuadro N° 2. 12 Distribución del personal para la etapa de explotación.	54
Cuadro N° 2.13 Costos de producción.	57

Cuadro N° 2.14 Costo de producción en el subnivel.	58
Cuadro N° 2.15 Costos de producción en el subnivel.	58
Cuadro N° 2.16 Costos de producción en tajeo.	59
Cuadro N° 2.17 Descripción de las labores mineras subterráneas.	62
Cuadro N° 2.18 Descripción de labores para preparar la galería 5013	63
Cuadro N° 2.19 Descripción de labores subterráneas para explotación.	63
Cuadro N° 6.1: Resumen de las Normas Internacionales Existentes.	158
Cuadro N° 6.2: Carga operante de 3.2 kg en el Tj 052, con dinamita.	162
Cuadro N° 6.3: Carga operante de 2.4 kg en el Tj 052, con dinamita.	162
Cuadro N° 6.4: Carga operante de 4.32 kg en el Tj 052, usando emulsión.	163
Cuadro N° 6.5: Carga operante de 3.24 kg en el Tj 052, usando emulsión.	163
Cuadro N° 6.6: Carga operante de 3.2 kg en el Tj 828, usando dinamita.	164
Cuadro N° 6.7: Carga operante de 2.4 kg de dinamita, usado en el Tj 828.	164
Cuadro N° 6.8: Carga operante de 4.32 kg de emulsión, utilizado en el Tj 828.	165
Cuadro N° 6.9: Carga operante de 3.24 kg de emulsión, utilizado en el Tj 828.	165
Cuadro N° 6.10: Carga operante de 3.2 kg de dinamita, utilizado en el Tj 748.	166
Cuadro N° 6.11: Carga operante de 2.4 kg de dinamita, utilizado en el Tj 748.	166
Cuadro N° 6.12: Carga operante de 4.0 kg de emulsión, utilizado en el Tj 748.	167
Cuadro N° 6.13: Carga operante de 3.0 kg de emulsión, utilizado en el Tj 748.	167

LISTA DE SIMBOLOS

- A(t)** : Representa la amplitud de la onda en un tiempo t.
- A** : Es el "peak" (Pico alto) de amplitud sobre la onda completa.
- f** : Es la frecuencia de la onda.
- ε** : Deformación
- PPV** : Velocidad d partícula
- V_p** : Onda
- σ** : Tensión en la roca
- E** : Módulo de Yung
- A** : Coeficiente de atenuación dependiente de la frecuencia, y es igual a $\pi/(Q\lambda)$, o $\pi f/(QV_p)$.
- D** : Distancia a escalar (m) y la cantidad de explosivo en kg.
- W** : Corresponde a la carga detonada en forma instantánea en kilogramos
- D** : La distancia a la cual se cuantifica la velocidad de partícula
- 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.
- 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) versus Velocidad de la Onda P (m/s).

Vppc : Velocidad Pico Partícula Crítica (mm/s)

σt : Resistencia a la Tracción (MPa)

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

E : Módulo de Young (GPa)

VppL : Velocidad Pico, Partícula Longitudinal (mm/s)

Vppt : Velocidad Pico, Partícula Transversal (mm/s) **Vppv**: Velocidad Pico Partícula Vertical (mm/s)

K y α : Son constantes

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.

ABSTRACT

The blasting is one of the most important unit operations in all mineral extraction operation. Your ultimate goal is to achieve an adequate degree of fragmentation of the rock, so that at least make the combined cost of drilling, blasting, transportation and primary crushing of rock, while producing the least possible damage in the vicinity thereof.

The high degree of influence on the results of the bombing, in the remaining operational cycle processes, makes clear the need for the expertise and technology to assess and then optimize this unit mining operation.

The proper use of the product Vibration Monitoring blasting, is a technique that provides multiple benefits in terms of being able to examine in detail the process of blasting. Indeed, the measurement of particle velocity levels causing the detonation of each warhead, is a medium through which it is possible to know their relative efficiency, its interaction with adjacent loads and ultimately the overall performance of the design.

Thus, monitoring the vibrations in the rock caused by blasting has been used as a diagnostic tool for this, because the proper vibration log interpretation to determine the degree of interaction between the variables of a blasting can judge eg charges detonating in sequence wrong power; dispersion ignition time delays, poor detonation charge; instantaneous detonation, detonation of adjacent loads sympathy, besides quantifying the levels of speed, frequency, acceleration and displacement of rock particles.

Another important contribution of the use of this technology, is to obtain the levels of absolute particle velocity, for each of the explosive charges, which related to the distances in which there is that knock up a database which adjust behavior models and assesses the potential damage that vibration can produce.

The vibrations produced by blasting and knowledge of the geomechanical properties of the rock mass, allows estimating the probability of causing damage to the massif. The high levels of vibration can damage the rock mass, fractures producing new or expanding existing fractures and dilating. The vibration in this context, can be considered as a stress or strain of the rock mass.

We describe in this paper some cases of application of vibration monitoring technique particularly in underground mining and its importance in the diagnosis, monitoring, modeling and optimization of blasting. We analyze its potential in terms of achieving substantive technical and economic improvements, increase yields and minimize operational costs at this stage of mining.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la tesis contienen seis capítulos los cuales abarcan información importante. El Capítulo I Descripción y formulación del problema se detallara la justificación, objetivos, hipótesis, los cuales se deberán cumplir al momento de finalizar la tesis. El Capítulo II, Generalidades en dicho capítulo se da a conocer de manera detallada los antecedentes, ubicación y toda la parte geológica y estructural del yacimiento minero en la cual se realizó la investigación.

En el Capítulo III, se va describir las características, eficiencia y propiedades de los explosivos para entender mejor el funcionamiento y dar mejor solución a la problemática que conlleva el análisis de vibraciones. El Capítulo IV, en este se realizara el análisis de las vibraciones velocidad de propagación y el análisis de la ecuación de propagación de las vibraciones. Una vez descrito la parte conceptual del problema de investigación se abordara la tesis en el capítulo V, en la cual se realizará la instalación, configuración e implementación de los equipos de monitoreo,

debiendo verificar el correcto funcionamiento de la red. Y continuación se procederá a realizar las pruebas oportunas que permitan realizar las mediciones de las frecuencias y desplazamientos de las ondas en los distintos frentes seleccionados. Finalmente, en el Capítulo VI, se procederá a realizar el modelamiento de las vibraciones a partir de la información recopilada y proceder a resumir los principales resultados alcanzados en la tesis, en función a las gráficas obtenidas en los distintos fretes de prueba.

CAPITULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

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

Las técnicas modernas de voladura de rocas, sugieren una serie de requisitos para una correcta elección de un explosivo a utilizar en cada taladro con la finalidad de causar el menor daño posible al macizo rocoso y el entorno de las excavaciones que se requiere realizar.

Mediante el monitoreo de vibraciones se puede obtener diversos datos, entre los cuales se tiene las velocidades pico de partícula en las tres direcciones para poder

tener una base de datos, modelar, analizar y evaluar el daño potencial que una voladura puede producir.

En tal sentido, identificamos aspectos importantes que deben considerarse en las voladuras con explosivos, que describimos a continuación.

Problema General:

- ¿Cómo Lograr la selección del explosivo adecuado y carga máxima de taladros con retardos según las condiciones del macizo rocoso para realizar el modelado y análisis de vibraciones para un adecuado grado de fragmentación de la roca en la U.P. Tita.

Problema Específico:

- ¿Por qué la densidad de carga de cada taladro con retardo es eficiente en la voladura sin causar daño al macizo rocoso y las paredes de la superficies de excavación abiertas y es adecuado para realizar un trabajo de minado eficiente en la U.P. Tita.
- ¿Cómo verificar el monitoreo de vibraciones producidas por la voladura en la abertura de las excavaciones de minado para obtener una base de datos en la unidad de producción Titan.
- ¿Cómo evaluar la información obtenida que proporcione datos necesarios para el análisis de vibraciones producidas para ejecutar el programa de modelamiento.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

La investigación es viable porque permite aportar al desarrollo de los conocimientos tecnológicos actuales, en la metodología de excavaciones superficiales o subterráneas, cuando se aplica voladura con explosivos, los que deben ser bien

dimensionados a fin de no causar daño al macizo rocoso para minimizar los accidentes, que en muchos de los casos son fatales, con pérdida de vidas humanas y equipos de trabajo.

Por lo que la investigación se orienta básicamente a aspectos muy importantes: el primero, la elección del explosivo adecuado para la realización de un trabajo determinado; segundo, determinar la densidad de carga máxima de explosivo permitido, hacer uso de retardos y realizar un monitoreo modelando las vibraciones producidas durante la detonación, aspecto importante y poco estudiado, siendo este un aporte al desarrollo de las ciencias.

Además la investigación contribuye a mejorar las políticas de seguridad de la empresa y de esta forma procurar el equilibrio de objetivos ambientales, sociales y económicos. Asimismo, será un aporte de consulta a las nuevas promociones de ingeniería de minas de la UNAMBA.

1.3 OBJETIVO.

1.3.1 Objetivo general

Realizar la selección del explosivo adecuado y carga máxima de taladros con retardos según las condiciones del macizo rocoso un monitoreo y modelado de vibraciones como medida de control de riesgos en las operaciones de minado, en la Unidad de Producción Titán

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Comprobar si la densidad de carga de cada taladro con retardo es eficiente en la voladura sin causar daño al macizo rocoso y las

paredes de las superficies de excavaciones abiertas y es adecuado para realizar un trabajo de minado eficiente en la U.P. Titán.

- b) Verificar el monitoreo de vibraciones producidas por la voladura en la abertura de las excavaciones de minado para obtener una buena base de datos en la Unidad de Producción Titán.
- c) Evaluar la información suficiente que proporcione datos necesarios del análisis de vibraciones producidas para aplicarlos en el programa de modelamiento.

1.4 HIPÓTESIS Y VARIABLES.

1.4.1 Hipótesis general.

Como la selección del explosivo y carga máxima con retardo según el macizo rocoso permite el análisis de vibraciones para tomar las medidas de control en las operaciones de minado en la U.P. Titan.

1.4.2 Hipótesis específicos.

- a) Si la selección del explosivo es adecuado y la densidad de carga con retardo es eficiente para no causar daño al macizo rocoso y el entorno de las superficies de excavación, entonces será capaz de realizar un trabajo de minado eficiente, en la U.P. Titán.
- b) Si el monitoreo de vibraciones producidas por la voladura es adecuado, por lo tanto se tendrá una base de datos necesaria y un buen minado en la Unidad de Producción Titán.
- c) Con la información requerida del análisis de vibraciones se ejecutara un programa de modelamiento.

1.4.3 Definición operacional de variables

a) Variable independiente (X)

Selección del explosivo y carga máxima con retardo según el macizo rocoso.

b) Variable dependiente (Y)

Análisis de vibraciones por modelamiento.

1.4.4 Indicadores de las variables

a) Indicadores de la variable independiente

- Potencia y energía.
- Velocidad de detonación.
- Sensibilidad.
- Densidad de carga.
- Resistencia al agua.
- Eficiencia explosiva.
- Retardos.
- Grado de fragmentación.

b) Indicadores de la variable dependiente

- Tipos de ondas de vibraciones.
- Frecuencia de vibraciones.
- Amplitud de vibraciones.
- Tiempo de vibración.
- Longitud de onda.
- Velocidad de propagación.
- Vibraciones por voladura.

➤ Modelaje.

1.5 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

1.5.1 Tipo y Nivel de Investigación

La investigación es del tipo aplicada y de nivel experimental, se usó técnicas de pesquisas bibliográficas y de campo para recolección de datos mediante la observación directa auxiliándonos con equipos e instrumentos de medición. Posteriormente el procesamiento de datos y análisis se hizo en gabinete.

1.5.2 Método y diseño de investigación

La metodología que se aplicó fue realizada con una serie de actividades y operaciones racionales necesarias y convenientes para la solución del problema de investigación que son:

- a) Formulación del problema.
- b) Plantear soluciones.
- c) Selección de áreas de trabajo para una mejor obtención de resultados.
- d) Deducciones lógicas y tratamiento de la información.
- e) Selección de técnicas y procedimientos para contrastar las hipótesis.
- f) Análisis de la confiabilidad de las técnicas y procesamientos a emplear.
- g) Ordenar, resumir y presentar los datos recopilados de la fase experimental.
- h) Interpretar resultados.
- i) Obtener conclusiones.
- j) Presentación del informe final.

1.5.3 Población y Muestra

La población la constituye la Unidad Operativa Titán SAC, que se encuentra ubicada a una altitud de 5400 msnm, en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno.

La muestra es representada por el conjunto de labores existentes, especialmente los frentes de galerías y tajeos, donde se realizaron las mediciones respectivas que la investigación requirió.

Por razones de factibilidad, costos y tiempo, el muestreo fue realizado en puntos específicos y aleatorio adaptado a las facilidades que se tuvo en la investigación.

1.5.4 Técnicas de investigación

Para obtener la información, especialmente los datos necesarios, se circunscribió a una base empírica con el uso de un instrumental que conto con quipos de medida llamados transductores ubicados en puntos estratégicos con el objetivo de obtener una base de información consistente y representativa. Se hizo uso de.

- Transductores (geófonos o acelerómetros) que se instalaron en forma solidaria en la roca.
- Un sistema de cables que llevaron la señal captada por los transductores al equipo de monitoreo.
- Un equipo de adquisición, que recibió la señal y la guardo en su memoria.
- Un computador, que tuvo incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.

CAPITULO II

GENERALIDADES

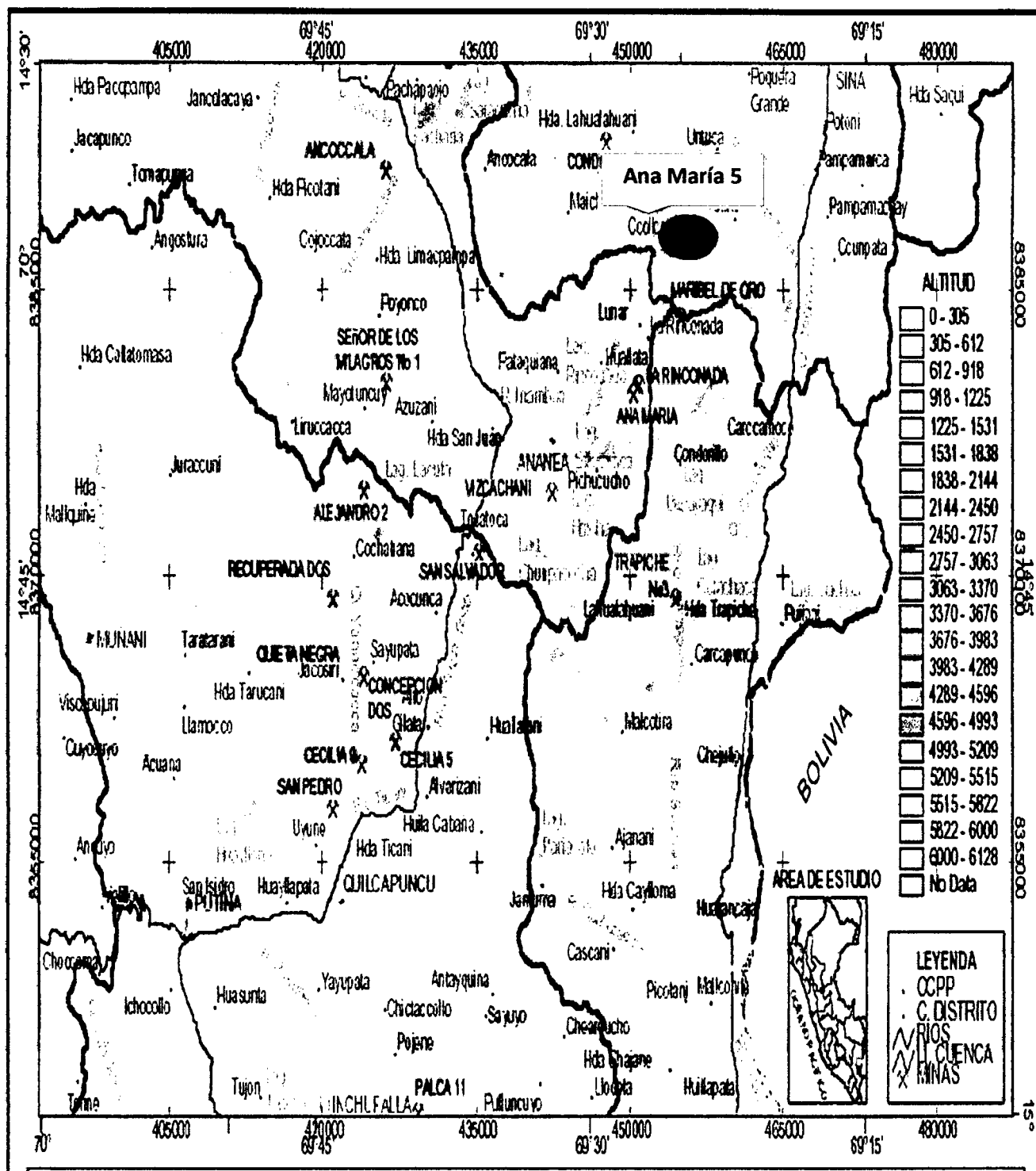
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

Se realizó una amplia revisión bibliográfica en diferentes bibliotecas de la UNAMBA y otros especializadas así como, en el internet y se encontró escasas referencias de trabajos específicos sobre la temática de investigación. Asimismo, se indago sobre el título del tema de investigación y no existe un tema igual al propuesto.

2.2 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD DEL DERECHO MINERO.

El área de la concesión minera “Ana María 5” se encuentra ubicado al NE de las localidades la Rinconada y Cerro Lunar en el paraje Cumuni de la comunidad campesina de Santa Rosa de Phoquera del Distrito de Ananea, Provincia de Putina de

la Región Puno, a una altitud de 5400 m.s.n.m. la posición en coordenadas UTM, según la Carta Nacional de la zona 19 – RINCONADA, es la siguiente:



CUADRO N° 2.1 Coordenadas UTM de la concesión ANA MARIA 5.

VERTICES	NORTE	ESTE
1	8'385,262.630	454421.22
2	8'384,014.518	454931.456
3	8'383,698.296	454822.872
4	8'383,037.973	453207.638
5	8'384,515.603	452662.013
6	8'384,520.950	453809.31
7	8'385,011.541	453807.024

El acceso al proyecto desde Puno dura aproximadamente 4 horas y 40 minutos. Por carretera asfaltada Puno – Juliaca, y de Juliaca, hasta el tramo de desvío de Pampilla (Ananea), para continuar por carretera afirmada hasta llegar al Centro Poblado de Rinconada, tal como se presenta en el cuadro 2.2.

CUADRO N° 2.2 Acceso a la concesión minera ANA MARIA 5

TRAMOS (Puno - Mina)	DISTANCIA (Km)	VIA (Terrestre)	TIEMPO (Horas)
Puno - Juliaca	50	Asfaltada	00h 45 min.
Juliaca - Ananea	160	Asfaltada	2h 30 min.
Ananea - Mina Titán	27	Trocha	00h 25 min.
TOTAL			3h 40 min.

FUENTE: Elaboración Propia.

2.3 CLIMA Y VEGETACIÓN.

Según el diagrama bioclimático de Holdridge, el área de la concesión minera “Ana María N° 5” pertenece a las zonas de vida siguientes: TUNDRA PLUVIAL ALPINO SUBTROPICAL (tp-AS) y NIVAL SUBTROPICAL (NS), es decir las diferentes actividades se desarrollarán sobre 4609 m.s.n.m. a más.

a. Temperatura

La temperatura media en el día es de 8 °C, manteniendo durante la noche la media un grado centígrado con congelación estable. Según los registros meteorológicos de la estación de Ananea, la temperatura máxima 11°C, en los mes de Marzo a Abril y la temperatura mínima llega a -4°C, en los meses de Junio a Julio; se manifiestan heladas con capas de hielo en todas las superficies y llegan a congelar las aguas superficiales.

b. Vientos

La velocidad de los vientos varía entre 0.1m/seg a 6.1m/seg, obteniéndose un promedio de 4.6m/seg. la dirección y sentido de los vientos es variable (O-E, E-O, S-N y EN-SO), según las horas del día, predomina de S-NE.

c. Precipitación

La precipitación en la zona del derecho minero “Ana María N° 5” presenta una variación estacional registrada en la estación PLU. 157419; las precipitaciones mensuales son expresados en (mm), datos obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI-PUNO; datan desde 1993 – 2004; la más alta es 184.8 mm a 236.3 mm; en el mes de enero del 2003 y 2004; las precipitaciones mensuales más bajas registradas se dan en los meses de mayo a agosto (0.5mm).

d. Humedad Relativa

La humedad relativa depende de la temperatura y del contenido de vapor de agua existente en el aire. Los registros obtenidos en la estación PLU. 157419, ubicada en el distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina y Región Puno; muestran que la humedad relativa tiene una distribución mensual poco variable. Los meses más húmedos se presentan de Noviembre a Marzo de 90%, datos obtenidos de los años 2002 a 2005, coincidiendo con el período de precipitaciones.

e. Evaporación Promedio Mensual (mm)

En la estación PLU. 157419, se ha obtenido registros de la evaporación promedio mensual de 2.27 mm, datos de referencia del año 2004.

2.3.1 Calidad del aire

Las características naturales del área ofrecen condiciones: morfológicas, climáticas y atmosféricas de buena calidad. El aire en el área del proyecto minero no presenta deterioro, aún con la intervención de ciertas fuentes de emisión (equipos mineros), entre ellos se tendrán los: gases y partículas en suspensión sin mayores riesgos; es decir, a escalas mínimas, las cuales son diluidas por las corrientes de aire en direcciones variadas, predominando S-NE; pero es necesario tener en cuenta acciones de prevención para cuidar la calidad de aire; dentro de los rangos mínimos permisibles.

2.3.2 Flora

La flora natural evaluada durante las investigaciones de campo realizadas en el área de influencia directa y zonas adyacentes, está representada principalmente por las

gramíneas denominadas “ichu”: *Stipa ichu*, *Calandrina acaulis* (Thurpa); forrajero para alpacas, llamas y azorellas.

En el área del derecho minero, la vegetación es escasa y distribuida de manera discontinua sobre suelos de topografía accidentada y rocosa.

2.3.3 Fauna

Según la Dirección Regional de Agricultura – Puno, entre las especies que habitan se encuentran las siguientes:

a) Fauna silvestre

Mamíferos: Vicuña (*vicugna* sp.), vizcacha (*Lagidium peruanum*).

Aves: Huayata (*Cloephaga melanoptera*), águilas y cernícalo (falconiformes).

Peces en las Lagunas Trapiche: Suches y Trucha (*Salmon gairdneri*).

b) Fauna domestica

Llama, población promedio de 2960 animales, Alpaca (*Lama pacus*); con una población promedio 46070, Vacuno; población promedio 450, Ovino; población promedio 13650.

2.3.4 Componente socio económico

Se trata sobre la realidad socioeconómica actual del área del derecho minero, evaluándose las características sociales del entorno, determinándose los siguientes aspectos:

2.3.4.1 Población

El Distrito de Ananea de la Provincia de San Antonio de Putina tiene una población de 19,132 habitantes; según el censo de 2005; 10,903 son varones esto representa el

56.98% y 8,229 son mujeres esto representa el 43.02%. El idioma que habla la población es castellano, quechua y aymara; Los pobladores del sector rural viven dispersos y no tienen servicios básicos de agua, desagüe y luz; se dedican principalmente a las actividades: pecuaria, minera y comercialización de fibras de camélidos.

2.3.4.2 Vivienda

Las viviendas del pueblo de Ananea están construidas según plano catastral debidamente distribuidas con calles, jirones, parques, complejos recreacionales; sus construcciones son de diversos materiales (concreto, piedra pizarra, techo de calamina y otros); según datos obtenidos de la Municipalidad de Ananea, existe un aproximado de 400 viviendas particulares, todas ocupadas; en la zona rural se observan construcciones rústicas (techos de paja, paredes de piedra pizarra, terrones y cimientos de piedra), su diseño y distribución es precaria y carecen de servicios higiénicos.

2.3.4.3 Servicio Básicos (agua y desagüe)

El abastecimiento de agua para consumo humano es del manantial Kuñiuro, ubicado a 1.5 Km. NE de Ananea. Cuenta con desagüe cuyas aguas servidas recolectadas se conducen a una pequeña laguna de oxidación precaria. El Centro Poblado de Trapiche cuenta con piletas públicas y utilizan letrinas sanitarias construidas por Foncodes; sin embargo las viviendas distantes no cuentan con los servicios básicos referidos; el Centro Poblado La Rinconada no cuenta con el servicio de agua potable y desagüe, precariamente se tiene agua conducida por mangueras de tipo HDEP de 1.5” D. y distribuidas en piletas públicas por la empresa ESAP. Referente al servicio

de desagüe existen baños públicos ubicados estratégicamente; cuyos servicios lo administran personas particulares en pésimas condiciones de higiene.

2.3.4.4 Servicio de electricidad.

El pueblo de Ananea y los centros poblados de Rinconada, Lunar de oro y Trapiche esta interconectado a la transmisión de la central hidroeléctrica San Gabán; lo que facilita el alumbrado doméstico durante las 24 horas. La concesión minera tiene proyectado la interconexión desde Rinconada al campamento para usos diversos; en el sector rural cuentan con el servicio de energía eléctrica.

2.3.4.5 Educación

Aún existe el analfabetismo en el medio rural por la distancia entre el centro educativo y comunidades. En la actualidad el Distrito de Ananea cuenta con: Educación Inicial, Primaria y Secundaria, todos ellos pertenecen a UGEL Putina de la provincia del mismo nombre, que está localizado a 52.5Km del distrito de Ananea, a continuación se detalla en el cuadro N° 3: Centros Educativos.

CUADRO N° 2.3

CENTROS EDUCATIVOS, PROFESORES Y ALUMNOS – 2011(Distrito de Ananea)

Nombre del centro educativo	Nivel / Modalidad	Gestión / Dependencia	Área	Dirección	Centro Poblado	Genero	Servicios recibidos	Turno	Alumnos	Docentes	Secciones
464	Inicial - Jardín	Publica - sector educación	Rural	Rinconada	Rinconada	Mixto	Ninguno	Continuo solo en la mañana	105	3	3
70653	Primaria	Publica - sector educación	Rural	Trapiche	Trapiche	Mixto	Ninguno	Continuo solo en la mañana	40	3	6
72132	Primaria	Publica - sector educación	Urbana	Jr. Dos de mayo	Santiago	Mixto	Ninguno	Continuo solo en la mañana	324	11	11
72145	Primaria	Publica - sector educación	Rural	Chuquine	Chuquine	Mixto	Ninguno	Discontinuo mañana - tarde	21	1	6
72146	Primaria	Publica - sector educación	Rural	Peña Azul	Peña Azul	Mixto	Ninguno	Discontinuo mañana - tarde	17	1	6
72147	Primaria	Publica - sector educación	Rural	Calle principal S/N	Rinconada	Mixto	Ambos servicios	Continuo solo en la mañana	740	19	18
73030	Primaria	Publica - sector educación	Rural	Lunar de Oro	Lunar de Oro	Mixto	Ninguno	Continuo solo en la mañana	193	6	6

821	Inicial - Jardín	Publica - sector educación	Urbana	Calle San Martín 275	Ananea	Mixto	Ninguno	Continuo solo en la mañana	56	2	3
San Francisco	Secundaria	Publica - sector educación	Rural	Rinconada	Rinconada	Mixto	Ambos servicios	Continuo solo en la mañana	472	21	10
Técnico industrial de Ananea	Secundaria	Publica - sector educación	Urbana	Jr. Dos de mayo 102	San Santiago	Mixto	Ambos servicios	Continuo solo en la mañana	195	11	7

FUENTE: Dirección Regional de Educación Puno, Septiembre 2011.

2.3.4.5 Salud

El Ministerio de Salud (MINSA) ha implementado Centros de Salud y Puestos de Salud con personal profesional y técnicos que podemos observar en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 2.4 Servicio de salud y personal – 2010 (Distrito de Ananea)

Poblado	Categoría	Personal
Ananea(Capital de distrito)	Centro de salud	01 Médico Cirujano 01 Cirujano Dentista 02 enfermeras 01 Obstetris 02 Tec. En enfermería
Rinconada	Centro de salud	03 Médico Cirujano 02 enfermeras 01 Obstetris 02 Tec. En enfermería
Cerro Lunar	Puesto de salud	01 Médico Cirujano 01 Enfermera 01 Obstetris 02 Tec. En enfermería
Trápiche	Puesto de salud	01 Médico Cirujano 01 Enfermera 01 Tec. En enfermería
Untuca	Puesto de salud	01 Obstetris 03 Tec. En enfermería 01 Tec. En Sanitario

FUENTE: REDES HUANCANÉ. Área de planificación Septiembre 2010

Las causas de morbilidad y mortalidad de las personas adultas se deben a diferentes factores:

- | | |
|---|-----|
| ➤ Enfermedades del sistema respiratorio. | 26% |
| ➤ Enfermedades del sistema digestivo. | 15% |
| ➤ Causas externas de morbilidad y mortalidad. | 15% |
| ➤ Enfermedades del sistema circulatorio. | 11% |
| ➤ Enfermedades del sistema genito urinario. | 11% |

Las causas de morbilidad infantil se presentan por las siguientes causas:

- Enfermedades infecciosas intestinales.
- Neumonía e influenza.
- Deficiencia nutricional.
- Infecciones inflamables de la piel, tejido celular subcutáneo.
- Infecciones respiratorias agudas.

En cuanto a la salud materna las primeras causas de morbilidad son los siguientes:

- Enfermedades del sistema respiratorio.
- Enfermedades infecciosas.
- Enfermedades del sistema digestivo.
- Problemas de embarazo y parto.
- Enfermedades Genito urinarios.

2.3.4.6 Recursos Arqueológicos

Para identificar el potencial arqueológico del área del derecho minero, se realizó un reconocimiento preliminar que comprende la revisión de la información relativa a los recursos arqueológicos y trabajo de campo en el entorno al área de la concesión y de

acuerdo a la información del Inventario General de Monumentos Arqueológicos del Perú – Puno y del Instituto Nacional de Cultura (I.N.C -2005), además de verificaciones in situ; **no existen restos arqueológicos dentro del área de la concesión minera “Ana María 5”.**

2.4 GEOLOGÍA REGIONAL.

Las rocas del Paleozoico ocupan toda la cordillera de Carabaya extendiéndose al este de la cuenca del río Inambari y al norte cubriendo las estribaciones del Altiplano y las rocas Mesozoicas, aparecen hacia la cuenca del Titicaca con interrupciones cubiertas por formaciones del Cenozoico y Recientes.

Las rocas más antiguas en el extremo NE de la provincia de San Antonio de Putina y la mayor parte de la provincia de Sandia, están formadas por una secuencia de pizarras, lutitas, areniscas y cuarcitas del Paleozoico, sobre las que se han depositado areniscas y calizas del Cretáceo y cubriendo las formaciones anteriores por una extensa formación de ignimbritas del Terciario y depósitos aluviales y glaciares del Cuaternario.

2.4.1 Estratigrafía Regional

De acuerdo a los estudios realizados por el INGEMMET, afloran rocas que van desde el Cámbrico hasta el Cuaternario.

Los primeros sedimentos depositados son pizarras, esquistos y filitas negras correspondientes a la formación San José del sistema Ordoviciano Medio del Paleozoico Inferior.

La secuencia superior del Ordoviciano, está constituido por estratos de pizarras, cuarcitas grises con intercalaciones de lutitas correspondientes al Paleozoico Inferior

de la formación Sandia. El Paleozoico Superior yace sobre los estratos plegados y truncados en el Paleozoico Inferior, diferenciados por una discordancia angular.

2.4.2 Paleozoico Inferior:

2.4.2.1 Ordovícico.

Existen dos secuencias litológicas que dieron origen al Ordovícico medio de la formación San José y al Ordovícico Superior o formación Sandia, según G. Laubacher 1973 – 1974.

2.4.2.2 Formación San José

Conformada por una potente secuencia de lutitas negras pelíticas, con niveles rítmicos alternantes con pequeñas capas de areniscas de colores claros con lutitas negras cada 5 – 10 cm. que dan a la secuencia un aspecto flischoide (G. Laubacher 1974 – 1978). En casi toda la secuencia se puede observar pirita en abundancia, la cual particulariza a esta formación. Su edad varía desde Areginiano superior hasta Covadociano Inferior (Dávila y Ponce de león 1971). Su potencia es alrededor de 3500 mts. y pertenecen al Ordovícico Superior.

Aflora ampliamente en la cordillera Oriental y en el altiplano al NO del lago Titicaca, de esta secuencia, se encuentran algunos afloramientos reducidos en la costa sur, cerca de Toran y Cocachacra (Arequipa).

Los sedimentos más antiguos datados del Paleozoico Inferior corresponden a las lutitas del Aregiliano Superior, los que no afloran en la base.

2.4.2.3 Ordovícico - Silúrico.

Según Laubacher (1978)¹ el paso del ordovícico al Silúrico corresponde a una secuencia lutácea, con capas verticales. Litológicamente se trata de un “Flyschoide” de 600 mt. de espesor con alteraciones de capas delgadas y lutitas grises que contienen lentes dolomíticos denominados Formación Calapuja Superior que corresponde al intervalo “Aregiliano -Llandoveryano Inferior”.

Edad asignada por posición estratigráfica.

2.4.3 Paleozoico Medio.

En general se encuentra formada por potente secuencia de sedimentos marinos del Silúrico Devónico que constituyen la formación Ananea.

2.4.3.1 Formación Ananea

Conformado por una potente secuencia de pizarra negra, esquistos de estratificación fina con algunos bancos de cuarcita hacia el techo, su espesor varía desde 2.500m – 50.00m de potencia.

Se encuentran areniscas finas de color amarillento verdusco con fósiles. Areniscas finas micáceas y lutitas amarillento verduscas. Areniscas finas micáceas bien estratificadas en capas de 10 a 15 c

2.4.4 Paleozoico Superior.

2.4.4.1 Grupo Ambo.

Serie sedimentaria conformado esencialmente por areniscas cuarcíticas con intercalaciones de lutitas negras y tufos volcánicos, unidades con estratificación cruzada.

1. LABACHER G. (1978) “Estudio Geológico de la Región Norte del Lago Titicaca”

Este nombre fue aplicado originalmente por Newell et al. (1953), para agrupar una secuencia de capas continentales de edad Misisipiana. Es la sección tipo, proveniente del pueblo de Ambo en el Perú Central.

2.4.5 Pensilvaniano

2.4.5.1 Grupo Tarma.

En la Cordillera Oriental, el Pensilvaniano está constituido por una secuencia Inferior de sedimento detrítico-volcánico de coloración verdosa y una Superior de materiales detríticos y calcáreos de colores marrones y verdes, fosilíferos con un espesor aproximado de 500 mt.

2.4.6 Pérmico

2.4.6.1 Grupo Copacabana Pérmico Inferior

El grupo Copacabana constituido esencialmente por rocas carbonatadas fue definido por Cabrera la Rosa y Petersen en 1936, Newell y otros en 1953; aflora cerca de la localidad Boliviana de Copacabana en la península del mismo nombre situada al S.E. del borde del Lago Titicaca.

La sección tipo está ubicada en el estrecho de Tiquina, la sección litológica consiste de la base hacia el tope de areniscas verdosas con lentes conglomeráticos, calizas fosilíferas con intercalaciones de lutitas grises, en el tope hay calizas grisáceas con pedernal y fusulinas de edad Permico.

2.4.7 Mesozoico

2.4.7.1 Grupo Moho. Albiano SUP. Turoniano.

Esta unidad de sucesión se encuentra en la Cuenca de Putina fue designada como Grupo Moho, por Newell (1945), señalando áreas tipo, cerca al pueblo de Moho. Sus

afloramientos se encuentran únicamente en la sub-cuenca Putina, mayormente en la zona implicada al N - E del Lago Titicaca. Esta formación descansa en conformidad sobre las areniscas Huancané, con un cambio marcado en la litología en unos 4 a 5 metros.

Predomina las limonitas y fangolitas abigarradas con estratificación delgada y estructuras laminadas; teniendo varios rasgos persistentes formados por areniscas cuarzosas con estratificación cruzada, usualmente entre 20 a 50 metros de espesor. La potencia total es aprox. de 1 100 metros, no habiéndose encontrado secciones completas, tampoco es posible hacer una estimación de la variación regional de su potencial.

2.4.8 Cretáceo Superior.

2.4.8.1 Formación Cotacucho

La Formación Cotacucho aflora en la parte central y Oriental del Norte de Puno, no parece haberse depositado en la parte Occidental de la región de Puno, algunas capas de estas Areniscas arcólicas marrones han sido consideradas como formación Capachica equivalente a Cotacucho por PORTUGAL (1963), a esta formación algunos Geólogos la consideran en la parte Oriental de la cuenca equivalente por posición Estratigráfica a la Formación Huancané y el Grupo Moho, además la Dolomita Huatasani fue correlacionado con el grupo Moho (Calizas Ayabacas).

Se caracteriza entre sí por cambios en las areniscas y lutitas, pasando de arcosas a ortocuarcita. Una importante característica es que la base de la Formación es persistente y muy conspicua, presentando horizontes de yeso y sal, aflorantes en las vecindades de Ñapa y Lirima donde se explota comercialmente. La parte media de la

Formación incluye la Dolomita Huatasani con un espesor que varía de 38 mt. a 6 mt. en Vilquechico y Moho respectivamente.

2.4.9 Formación Muñani Cretáceo superior

Según el estudio Newell, aflora al norte de Puno, su mejor desarrollo está al NW y N de esta zona.

Consta generalmente de areniscas rojo ladrillo feldespáticas con intercalaciones menores de lutitas marrones verdosas y violáceos en la parte superior de la sección de Muñani hay una capa de 170 mt. de conglomerado, de color amarillo verdosa, con matriz feldespática y rodados de cuarzo, cuarcita y lutita marrón.

2.4.10 Arcillas Azángaro, Plioceno – Pleistoceno

Denominado por Newell (1946), para las capas de origen lacustrino bien laminadas, casi horizontales que afloran especialmente a orillas del río Azángaro, estas capas son muy conspicuas y afloran principalmente en la parte Central y Occidente del norte de Puno y parte Sur, a lo largo de los ríos Cabanillas, Putina e Ilave.

2.4.11 Rocas Ígneas Intrusivas

Regionalmente se observa una secuencia de pequeños stocks intrusivos que consisten en granitos y dioritas a lo largo del eje de la cordillera de Carabaya desde los alrededores de Ananea y San Antonio de Putina siguiendo al NW, hasta Crucero y San Gabán.

2.4.12 Marco Geomorfológico Regional

2.4.12.1 Geomorfología Regional

El relieve regional presenta una superficie accidentada debido a la presencia de la cordillera de los andes.

Este sistema montañoso tiene relación en diversas configuraciones morfoestructurales de características peculiares en diversas localidades.

Según la clasificación de características geomorfológicas del territorio Peruano, el área en estudio se encuentra circunscrito dentro de las unidades morfoestructurales denominados Altiplano - Cordillera Occidental (INGEMMET), comprendida entre las cordilleras Occidental y Oriental de los Andes del sur del Perú, este a su vez se divide de Este a Oeste en tres unidades caracterizadas por sus geoformas particulares.

2.4.13 Depresión de Ananea

Comprende un área estrecha, paralela a la unidad anterior; se encuentra rellena por depósitos lacustres, conos glaciares y fluvioglaciares, provenientes de los nevados de Ananea; alcanza altitudes de 4200 a 4800 msnm, cuya red hidrográfica drena al lago Titicaca.

2.4.14 Cordillera de Carabaya

Comprende el gran nevado de Ananea que sobrepasa los 6000 msnm; como consecuencia del retroceso glaciar, la nieve ha llegado hasta los 4200 msnm. Este fenómeno ha dado lugar a la concentración de gran parte del oro existente en la depresión de Ananea y en los valles de la vertiente amazónica.

Los caracteres geomorfológicos se deben a procesos internos y externos, estos últimos como el de degradación (meteorización, erosión) y acumulación cuya secuencia de formación está dada a partir de la presencia de afloramientos sedimentarios de deposición.

2.4.15 Depresión de la Cordillera Oriental.

En el flanco occidental o altiplánica, entre Macusani y la frontera con Bolivia se extiende una depresión ocupada por pequeñas cuencas entre montañas (Crucero, Ananea, Cojata) con un relleno complejo empezando por depósitos aluviales, intercalados volcánicos y terminando con acumulaciones glaciares y fluvioglaciares.

2.4.16 Zona de Cordillera.

Constituye en una amplia franja con orientación NO - SE, se caracteriza por un relieve abrupto, en el que los numerosos nevados han dado origen a numerosos ríos y quebradas que bisectan apretadamente el terreno, formando valles profundos y encañonados entre cuyos cauces y cumbres nevadas se dan diferencias de altura de 1,000 mts a 1,400 mts.

2.5 GEOLOGÍA LOCAL

2.5.1 Formación Ananea.

Corresponde al área que abarca el yacimiento aurífero. Se observa afloramientos consistentes en lutitas negras y pizarras que conforman la parte superior de la formación San José, generalmente tienen un rumbo promedio NW- SE, con buzamiento de 10° a 20° SW.

Estratos de lutitas negras y pizarras con alternancias menores de areniscas metamorizadas y esquistos, afloran en el sector de la mina. Estos horizontes de

lutitas y pizarras silíceas son de grano fino a medio de color gris oscuro a negro, su textura varía de una sección a otra, tal vez se debe al hecho de que se han depositado en cuencas intercontinentales separadas, parcialmente conectadas y bajo diferentes condiciones de sedimentación.

2.5.2 Rocas Intrusivas del Paleozoico Inferior.

En el sector este del cerro San Francisco, se tiene la ubicación del stock con afloramiento inconspicuo del cuerpo intrusivo. Litológicamente consiste en intrusivos de naturaleza granítica diorítica.

Los diques que afloran en el área presentan una superficie meteorizada de color gris oscuro a rojizo y en superficie fresca, es de color blanco lechoso siendo su composición cuarzo.

Tanto en el SE – NW, está la veta Carmen junto al dique de cuarzo San Pedro de 4.00 m de potencia y del dique Tentadora de 0.40 m, en ambos sectores la veta Carmen se presenta en forma ramificada o cola de caballo que consiste en venillas de cuarzo con alto contenido de oro libre, con un ancho promedio de 1.00 m tanto en el sector SE y NW, el yacimiento de Ana María es de mucha importancia por su contenido y forma con mantos, tipificando al yacimiento como un deposito mineralógico capa filón-capa.

2.5.3 Material Cuaternario no Consolidado.

Formado por los depósitos fluvioglaciares o morrenas provenientes de la descomposición de las rocas debido al intemperismo acentuado. Este material se encuentra tanto en las partes bajas del valle glaciar, en Pampa blanca, Ananea etc.

2.5.4 Geomorfología Local.

2.5.4.1 Morrenas.

Los depósitos glaciares, tal como han sido descritos por Kihien (1990)², consisten en morrenas originadas a partir de la Cordillera Oriental, corresponden a depósitos de morrenas, resultantes de la acción glacial típica y de complejos fluvio – glaciares del Paleógeno y Neógeno que sobreyacen a las rocas metamórficas mineralizadas de edad del Paleozoico, predominante pizarras y esquistos, con mineralización aurífera en forma de granos de oro nativo libre, en arenas pesadas resultantes de la concentración gravimétrica, se ha determinado la presencia de magnetita, hematita y casiterita y como accesorios cuarzo, pirita, arsenopirita.

2.5.4.2 Valles Glaciares

Es originado por procesos geológicos de miles de años, formando el Valle Glaciar de Pampa Blanca, que está cubierto en la Zona de Ritty Pata por el glaciar con una dirección de SW – NE. Este valle tiene la Forma de U

2.5.5 Geología Estructural

El yacimiento aurífero de Cumuni ha sido afectado por el tectonismo Eohercinico.

La zona en estudio estructuralmente corresponde a la superposición de las cadenas Eohercinica (Paleozoico inferior) y Cadena Tardihercínica (Paleozoico Superior).

Cada uno de estos sistemas estructurales diaclasamientos y plegamientos al tener diferente composición litológica y al estar afectados por una o más fases tectónicas, presenta diferentes respuestas a la deformación. Con diferencias estructurales en pliegues y fallas.

2.5.5.1 Diaclasamiento.

Tanto los mantos cuarcíferos, así como los estratos de Lutitas y Pizarras han sido afectados por este fenómeno tectónico, observándose en interior mina y en superficie a manera de bloques de forma irregular, este fenómeno está relacionado a los inicios de la etapa de sedimentación que posteriormente originaron los estratos como se observa en la actualidad.

2.5.5.2 Plegamiento.

Es otro de los fenómenos importantes que ocurre en el yacimiento, el plegamiento se presenta a manera de flexuras-anticlinales y sinclinales que son producto de fuertes movimientos horizontales que han afectado a los estratos de lutitas y pizarras, en el sector de Cumuni, se observa claramente el eje del anticlinal asimétrico con rumbo NW-SE, consecuente del plegamiento andino pero el sector de Cerro San Francisco se puede observar un anticlinal asimétrico con un eje NE-SW anómalo en comparación con el plegamiento andino.

2.5.5.3 Fallamiento.

El fallamiento en el yacimiento está relacionado a un periodo anterior al Permo-Triasico, consecuentemente con fallas pre-minerales. Las fallas san Andrés, Esperanza, Carmen y Lunar se orientan hacia el NW-SE de bajo ángulo con desplazamiento vertical en el orden de centímetros, otro sistema de fallas importantes son las fallas San Francisco, Norma y Virginia, que completan un cuadro tectónico de fallamiento transversal de rumbo NE-SW, estas fallas son casi verticales y de alto ángulo con desplazamiento vertical inferior a 20 m.

2.5.6 Geología Económica.

2.5.6.1 Mineralización Aurífera.

La zona mineralizada de Cumuni se define como un ensamble de Cuarzo-Pirita-Arsenopirita-Oro. La mineralización está emplazada en estructuras de vetas – mantos mineralizados de cuarzo ahumado masivo con arsenopirita, pirita y oro en vetillas y mantos, así como disseminación de oro nativo enclavadas en pizarras concordantes con la estratificación de las pizarras metamórficas, cuarcitas intercaladas con areniscas de la formación Ananea.

Así mismo, se encuentran en las cuarcitas correspondientes a la formación. Sandia siendo estas formaciones los metalotectos más importantes. Los minerales típicos están constituidos por oro nativo, cuarzo, pirita, arsenopirita, calcopirita y otros minerales de menor importancia.

La potencia estimada es de 30 cm. Con leyes promedio de 20 gr/TM. La mineralización es discontinua y errática por lo que no es posible determinar el potencial económico con precisión.

Los mantos y vetas mineralizadas son de origen hidrotermal, siendo guía las cuarcitas durante el ascenso de los flujos mineralizantes. Para formar los mantos y vetas se considera contemporáneos con la sedimentación del Paleozoico Inferior, que se les encuentra afectados por la Orogenia Eohercinica.

- a) **El Cuarzo;** Se presenta como hialino, Vítreo y lechoso, tanto el hialino y el vítreo se encuentran relacionados a la ocurrencia de oro, es característico

describir muestras de cuarzo vítreo microfracturado con fractura ligeramente concoidea y que se encuentra asociado al Oro.

El cuarzo Lechoso se presenta en estructuras (vetas, mantos y principalmente diques de mayor consistencia. Presentándose algunas de ellas fuertemente oxidadas y lixiviadas con ocurrencia de limolitas, su asociación al Oro no es importante.

- b) **El Oro;** Se encuentra nativo a manera de “charpas” y fino asociado mayormente al cuarzo, pirita y arsenopirita, es importante mencionar la ocurrencia de valores de oro llegando en promedio a 40 gr/TM.
- c) **La Pirita;** Se encuentra mayormente diseminada y cristalizada principalmente en fracturas, fallas, vetas, mantos asociado al oro y arsenopirita, es importante indicar la ocurrencia de pirita cataclástica en zonas de mayor concentración de oro en el fracturamiento de la roca, mayormente dentro de la Pizarra.
- d) **La Arsenopirita;** Está asociada al oro y pirita, también se presenta a manera de monocristales euhedrales de tamaños de 3 a 5 mm desarrollados dentro de la Pizarra principalmente, los que al lixiviarse dejan cavidades de disolución o “Boxwor” que sirve de guía para localizar mayores concentraciones de oro. La mayor ocurrencia de estas cavidades de disolución se encuentra cerca de la intersección de la veta Carmen.
- e) **La Pirrotita** Ocurre en forma muy esporádica y se encuentra como granos diseminados y en forma masiva, presentando una fuerte alteración en la roca caja, no estando comprobada su relación con altas concentraciones de oro.

2.5.6.2 Textura.

Las texturas de mineralización son características de relleno de cavidades, donde la solución mineralizante aprovecha las zonas de debilidad, como los planos de estratificación dando lugar a una mineralización tipo manto granular y semicompacta.

2.5.6.3 Alteración Hipógena de cajas

Es el proceso de modificación de minerales y rocas, por acción de las soluciones mineralizantes, se han desarrollado diferentes tipos de alteración y en diferente grado como Sericitización, Cloritización y Silicificación.

a) La Sericitización

Producto del Metamorfismo ocurre como películas y rellenando cavidades cerca de las zonas mineralizadas, con intensidades débiles a moderadas, presentándose este tipo de alteración tanto en mantos como en vetas.

b) La Cloritización

En forma moderada y uniforme en las cajas de las estructuras mineralizadas, así mismo es evidente en pequeñas concentraciones a manera de ojos, siendo este el producto de alteración de minerales ferromagnesianos los que constituyen la roca caja.

c) La Silicificación

Es importante presentándose en forma moderada a fuerte, sobre todo en las zonas muy cercanas a las estructuras mineralizadas, tanto mantos vetas y vetillas.

2.5.6.4 Alteración Supérgena de Minerales.

Para una modificación de las propiedades físicas y químicas de los minerales, se necesitan condiciones especiales del yacimiento. Pero observando la ubicación geográfica del depósito así como por la continua erosión a la que es sometida, no ha permitido la concentración de minerales oxidados por lo que sólo es notorio la ocurrencia en pequeñas pátinas superficiales.

2.5.7 Características de la Mineralización.

a) Tipo de Mineralización.

La mineralización de toda el área de estudio es inminentemente aurífera, el Oro se encuentra en estado nativo a manera de charpas, diseminados y en concentraciones.

b) Asociaciones Mineralógicas

El Oro se encuentra en estado nativo y fino asociado mayormente al Cuarzo, Pirita y Arsenopirita.

La presencia de la Arsenopirita está asociada al oro y pirita en forma de monocristales principalmente formados dentro de las pizarras, los cuales al lixiviarse dejan cavidades de disolución las cuales sirven de guía para determinar zonas de mayor concentración de oro.

2.5.8 Controles de la Mineralización

2.5.8.1 Mineralización y el Control Fisiográfico.

Es muy importante tener en consideración el control fisiográfico para la determinación y ubicación de estructuras mineralizadas, las cuales pueden ser reconocidas por presentarse a manera de crestos producto de la erosión diferencial

debido a que las estructuras al encontrarse silicificadas estas oponen una mayor resistencia a los agentes erosivos, a diferencia de las rocas que encajonan estas estructuras como son las pizarras, cuarcitas, areniscas las cuales son más fáciles de erosionar quedando al descubierto las estructuras mineralizadas, se puede encontrar dentro de estas estructuras vetas, mantos, diques etc.

Así mismo, dentro del control fisiográfico encontramos zonas de depresión identificadas por la presencia de lagunas, tales como Lunar y Rinconada las cuales indican intersección de sistemas estructurales locales o regionales. Que han provocado u ocasionado el debilitamiento de la roca pre-existente.

2.5.8.2 Mineralización y Control Estructural

Estructuralmente las intersecciones de los mantos con vetas muestran zonas favorables para la formación y concentración de áreas mineralizadas.

Así mismo, es notoria una mayor concentración de mineralización en zonas donde existe mayor ocurrencia de venillas con espesores que van de 0.05 a 0.10 m las cuales interceptan a los mantos.

Otro control estructural importante que evidencia y que pone al descubierto la presencia de buena mineralización son zonas que han sido afectadas por una mayor perturbación tectónica, ésta fuerte perturbación es evidenciada por la presencia de micropliegues.

La Ocurrencia de cuarzo vítreo con fractura ligeramente concoidea y textura granular está directamente asociada a la mineralización del Oro.

2.5.8.3 Mineralización y el Control Litológico.

Las estructuras mineralizadas (mantos) que se encuentran encajonadas en pizarras presentan mejores posibilidades de ocurrencia de mineralización económica que las estructuras que se encuentran ubicadas en otro tipo de litología o como en zonas de contacto Pizarra – Cuarcita, ya que las pizarras propician un ambiente reductor.

Por tal motivo, la ocurrencia de mantos en estas pizarras resultaría más interesante económicamente.

2.5.9 Afloramientos.

Tanto en la sección San Francisco, principalmente en Ana María V y en sección de Cerro Lunar y Ana María III afloran en diferentes mantos en cuarzo aurífero con espesores que varían de 0.05 cm hasta 40 cm. Interestratificado entre los paquetes de pizarra de la formación Ananea, el rumbo general de los mantos es E-W y el Buzamiento varía de 10^0 - 20^0 al SW.

Los mantos reconocidos están separados unos de otros desde los 2 m. hasta los 70 m. El aspecto de los mantos es sensiblemente lenticular la roca encajonante está débilmente alterada, generalmente una decoloración de las pizarras a veces la pizarra está finamente piritizada. En la sección de San Francisco ocurre hasta 23 mantos reconocidos, mientras que en la sección de Lunar se observan 5 mantos.

Merece destacar la presencia de una veta denominada Carmen ubicada en el extremo SE de las concesiones con rumbo N35W y buzamiento de 65° - 85° SE que es contrastante con la posición de los mantos y también de naturaleza filoneana con más de 200 metros continuos de afloramiento y 3 metros de potencia con relleno de cuarzo ahumado, pirita, arsenopirita en venillas manchas y disseminaciones.

2.5.10 Mineralogía

Elemento Nativo : Oro.

Sulfuro : Blenda Rubia, Galena, Pirrotita, Pirita, Calcopirita,
Molibdenita, Marcasita

Sulfosales : Arsenopirita, Tetrahedrita

Óxidos : Limonita, Hematita

Silicatos : Titanita

No Metálicos : Cuarzo.

El oro ocurre en partículas libres desde ppm a charpas y como inclusiones principalmente dentro del cuarzo. También ocurren esporádicas inclusiones de oro en la arsenopirita.

Los sulfuros blenda y galena ocurren en granos muy finos y muy erráticamente asociados a calcopirita, arsenopirita y pirita, la molibdenita ocurre en granos libres, la pirita ocurre en finas disseminaciones en el cuarzo, la arsenopirita también se presenta en disseminaciones y venillas llevando algo de oro asociado la tetrahedrita es mineral portador de oro. Otros elementos menores son la limonita, hematita y titanita.

El cuarzo se presenta como el elemento más abundante constituye el 90%, la arsenopirita 5%, la pirita – pirrotita constituye el 2-4% y el resto son sulfuros, y otros elementos menores.

2.5.11 Mineralización.

La mineralización en Ana María V se encuentra en mantos y relleno de fracturas y micro fracturas los que se conoce como filón –capa, siendo los primeros de mayor ocurrencia con orientación NW y SE (Cerro Lunar - San Francisco).

Estas fracturas y micro fracturas con contenido de cuarzo y oro libre se entrecruzan y forman un enrejado.

2.5.12 Fracturamiento.

El esquema de fracturamiento está íntimamente vinculado con la historia geológica del local. El 80% de la mineralización está en la intersección de los mantos con las fracturas y microfracturas conteniendo cuarzo y oro libre. Generalizando se puede decir que hay dos etapas de fracturamiento:

Un fracturamiento central o principal presentado por fracturas y micro fracturas con rumbos promedios NE-SW y NW y SE, Otra etapa de fracturamiento es compleja y se presenta como ramificaciones o estructura de caballo, constituido por micro fracturas con cambio de rumbos y buzamiento ya sea en la vista vertical y horizontal.

2.5.13 Control Estructural

2.5.13.1 Plegamiento.

El plegamiento se presenta en forma de micro sinclinales y micro anticlinales formándose antes de la mineralización con oro libre.

2.5.13.2 Fallamiento.

Las dislocaciones se presentan como controles pre-minerales a la deposición de oro libre, en todo el distrito minero; localmente se manifiesta como fallas normales e invertidas de poco ángulo y arrastre.

Estas dislocaciones originan el enriquecimiento de oro en los mantos, generalmente en el estrato manto que a bajado o hundido por la dislocación.

Este control junto con las intersecciones, conforman en el yacimiento minero, los controles importantes y consecuentemente ayudan para la búsqueda y explotación subterránea.

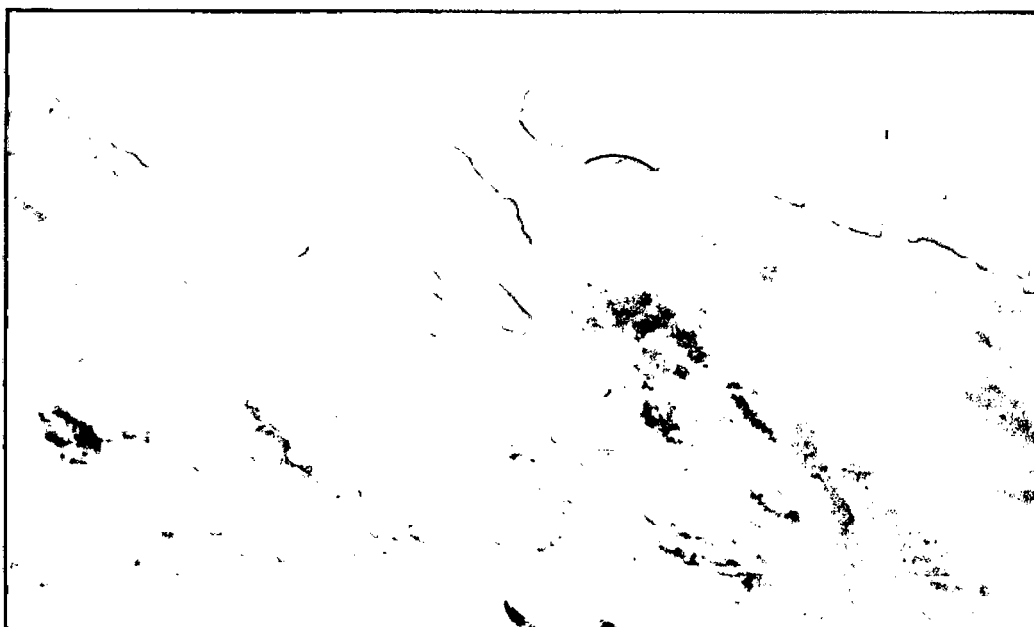
2.5.13.3 Estructura de los Mantos.

Las flexuras del orden de micro sinclinales y mini anticlinales forman parte importante de un control para buscar bolsonadas de mineral de oro libre, así como la presencia de mineral de alta ley depositada en los microsinclinales con rumbo definido (clavos mineralizados).

2.6 OPERACIÓN MINA

2.6.1 Reservas de Mineralización

La mineralogía típica del yacimiento define un ensamblaje cuarzo-oro emplazada en mantos concordantes con la estratificación de las pizarras y cuarcitas, cuyos espesores varían entre 5 a 20 cm. Así como en vetas sub. Verticales y venillas que cortan dichas estratificaciones. Los minerales típicos están constituidos por cuarzo, oro nativo, pirita, arsenopirita, galena, escalerita, marmitita, calcopirita y otros minerales de menor importancia; según el reporte de laboratorio PLENGE CIA S.A. N° 940; de tipo de ensayo ICP- Multi elementos de muestra de mineral; en resumen nos muestran los siguientes elementos: Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sc, Sn, Sr, Ti, V, W, Y, Zn, Zr, Au, y SO₄; el mineral con más concentración es el oro: 0.429 ozz/TC Au como mineral de cabeza, 0.014oz/Tc presencia de oro en el desmonte junto a algunos sulfuros.



FOTOGRAFÍA N° 01.-Se muestra la geología local del derecho minero.

2.6.2 Estimación de Valor Metálico

El titular minero del derecho, previó explotar principalmente el manto 4 cuyos valores varían desde 13 g. de oro hasta valores de 25 g-Au/TM tonelada con potencia de veta/manto 10 cm de espesor; así mismo fueron reportados datos de la zona mineralizada esperanza con 20 g-Au/TM con potencias que varían desde 12 cm; las especificaciones del plan de minado se observan en los planos que se adjuntó en anexos.

CUADRO N° 2.5 Ley y potencia de la zona mineralizada

ZONA MINERALIZADA	LEY g- Au/TM	POTENCIA (cm)
ESPERANZA	20	12
MANTO 4	25	10

2.6.3 Mina

Durante la etapa de explotación en la unidad minera Ana María 5; se realizan diferentes actividades relacionadas a la minería y se describen cada una de ellas como sigue:

2.6.4 Ciclo de Minado

Para la preparación y posterior explotación de sub. niveles y tajeos se emplea el sistema de minado convencional, utilizando las perforadoras manuales JACK LEG, rastrillos eléctricos y el acarreo se hace con carros mineros sobre rieles o por línea de couville; en las galerías, se realiza el cargueo con palas neumáticas EIMCO. 12 B

La bocamina principal de la mina Ana María N° 5, se encuentra ubicado en las coordenadas UTM (433241 E y 8383049 N). La explotación es por el sistema corte, relleno ascendente mediante labores horizontales (galerías y cortadas) y labores verticales (chimeneas). Se programa 02 disparos por día con un avance de 2 m/día con una producción de 24 TN de mineral. El minado es convencional sobre roca estéril, las medidas de seguridad son controladas bajo la supervisión del jefe de mina para evitar incidentes/accidentes fatales.

a) Perforación

- **Equipos de Perforación**

La perforación se realiza con perforadoras convencionales como las “Jack Leg” Atlas Coopco, con barrenos de brocas descartables de botones; en galerías y subniveles se emplea una malla de perforación que es el corte quemado con taladros perforados de 4 pies y 5 pies; y para el caso de tajeos

se emplea una malla de 2.00 x 1.00 m, con taladros perforados de 4 pies a 6 pies.

- **Rendimientos de Perforación**

El rendimiento de los equipos de perforación es muy baja debido a que el tipo de roca es muy dura y abrasiva, por lo tanto lo que más se desgasta son las brocas, reduciendo su duración hasta un máximo de 320 pies perforados; en cuanto a barrenos también se ve afectado por lo abrasivo de la roca, pero en menor proporción comparado con las brocas, en cuanto a las máquinas perforadoras los repuestos tienen una duración mínima, incrementando los costos de producción.

b) Voladura

La voladura se realiza en dos etapas o circado primeramente se perfora y dispara el material estéril o desmonte, dejando el manto para que en una segunda etapa se dispare solamente el manto, esto se realiza tanto en tajeos y subniveles.

- **Explosivo Empleado**

Los explosivos empleados para los trabajos de explotación son la dinamita Semigelatina al 80%, fulminante N° 8 y mecha seguridad todos ellos de la fábrica EXSA.

- **factor de Potencia**

El factor de potencia en Titan SAC es alto debido al tipo de roca en la que se trabaja y de acuerdo a las pruebas realizadas se determinó en un promedio de

1.0 Kg/Tm en frentes de galerías y subniveles en tanto los tajeos tienden a disminuir.

c) Ventilación y Limpieza

De acuerdo con el ciclo de minado, la ventilación es muy importante para la evacuación de gases producto de la voladura y trabajos en una zona, por lo que se requiere aire fresco y suficiente oxígeno.

En cuanto a la limpieza de desmonte es necesario realizar para completar el ciclo, y nuevamente iniciar con la perforación, este trabajo se realiza con equipos y también en forma manual.

- **Equipos de Ventilación**

La ventilación en Titan SAC se utilizará equipos de ventilación como son los ventiladores eléctricos de 5,000 CFM de capacidad, con mangas de 70 cm de diámetro, que han sido instalados en las galerías principales, llegando hasta los frentes de trabajo.

- **Equipos de Limpieza**

Para la limpieza se utilizan equipos y herramientas como son desde una lampa hasta un rastrillo eléctrico que tiene una potencia de 12 HP y una capacidad de 0.5 m³, con una tambora que cobija cable para 30 mts de distancia, operados desde un lugar fijo hasta los frentes mediante rondanas o poleas.

d) Carguío y transporte

El carguío y transporte se realiza mediante el sistema convencional, es decir para esto se construirán tolvas de compuerta en los tajeos y para el caso de frentes de galerías principales, tenemos palas neumáticas sobre rieles, que

cargan directamente a los carros mineros que tienen una capacidad de 5 a 9 m³ y en algunos casos se realizan con carretillas manuales.

- **Equipos de Carguío y Transporte**

Dentro de los equipos de carguío y transporte, tenemos para carguío los shuts o tolvas, desde donde se carga directamente a los carros mineros, para luego transportarlos hasta la cancha de desmontes, para el caso de frentes de galerías principales que tienen una dimensión de 5.4 m de dimensión se tiene línea de couville, por lo tanto el carguío se realiza con una pala neumática a los carros mineros, que transportan el material hasta la cancha de desmontes.

- **Rendimientos**

El rendimiento de los carros mineros son relativamente aceptables, debido a que su capacidad es de 25 pies cúbicos y de acuerdo a la cantidad de desmontes se van incrementando los carros que son traccionados mediante una locomotora, evacuándose el desmonte en convoys, por lo tanto en este caso no se tiene mayores dificultades, por otro lado los mantos están cercanos a la superficie y no se tiene mucha demora en el tiempo de transporte.

En cuanto a las palas neumáticas son eficientes en los frentes ya que el tiempo de limpieza es aproximadamente 2 horas, de acuerdo a la habilidad del operador y la existencia de una línea bien puesta puede disminuir este tiempo.

e) Sostenimiento

Después del acarreo y transporte, se vuelve a verificar las condiciones de trabajo y la estabilidad de la galería, si fuese necesario se procederá a reforzar con sostenimiento en las zonas de fracturamiento o fuerte alteración de las cajas, para dar mayor seguridad al personal que traba en el frente. Se realiza el apuntalamiento con tres puntales, dos puntales verticales y un horizontal cuando es necesario. En nuestro caso, es mínimo porque la roca es pizarra silificada.

f) Preparación de Cuneta

Para evacuación de las aguas subterráneas existen cunetas para evitar el deterioro de los equipos, maquinarias y molestia a los trabajadores.

CUADRO N° 2.6 Resumen de cronogramas de labores subterráneas.

LABORES MINERAS		EXPLORACION Y DESARROLLO			PREPARACION			EXPLOTACION DE MINERAL (TM)	DATOS GENERALES		
		SECCION (M X M)	AVANCE (M)	DESMONTE (TM)	MINERAL (TM)	AVANCE (M)	DESMONTE (TM) **		NUMERO PROMEDIO (TALADROS /DISP.)	AVANCE/DISP. (PROMEDIO)	DIAMETRO TALADRO (MM)
NIVEL 5040	TRINCHERAS										
	CORTADAS										
	INCLINADOS	2,50 X 1,50	2650	25839	1790				28	1	38
	RAMPAS										
	VENTANAS										
	PIQUES										
NIVEL 5013	GALERIAS	5.00 X 4.00				1500	78000	0	45	1,2	38
	SUBNIVELES	2.5 0X 2,20	2500	35750	1688				28	1,1	38
	CHIMENEAS										
	OTROS										
	TAJEOS	25.00 X 25.00						15358	26	1,2	38
	TOTAL		5150	61589	3478	1500	78000	0	15358		

(*)Peso específico mineral (TM/m³) = 2.7

(**)Peso específico desmonte (TM/m³) = 2.6

FUENTE: Departamento de Geología Minera Titán Noviembre - 2012

Equipos mineros para construcción de labores subterráneas

En la construcción de las labores subterráneas tales como: galerías, chimeneas, sub niveles y cruceros se utilizan, los equipos y maquinarias listados en el cuadro N° 2,7

CUADRO N° 2.7 Equipos mineros para la construcción de labores subterráneas.

N°	DESCRIPCIÓN	CONDICIÓN	CANTIDAD
EQUIPOS Y MAQUINARIAS	Vehículo para transporte personal	En uso	1
	Camioneta M – Toyota 4 x 4	En uso	1
	Scoop tram Atlas Coopco Wagner (Cap. 25yardas)	En uso	1
	Volquete de perfil bajo (Cap. 15 TM)	En uso	1
	Compresora de aire XAMD3-55 Atlas Coopco	En uso	1
	Perforadora BBC-16-PUMA (3) Atlas Coopco	En uso	3
	Barrenos de 3 y 5 pies (juegos)	Nuevo	3
	Ventilador eléctrico (22,000 FM)	Nuevo	1
	Electro bomba de 15 Hp.	En uso	1
	Bincha eléctrica	En uso	1
	Generador eléctrico de 5,000 W	Nuevo	1
	Carros mineros con llanta neumática	En uso	4
	Carros mineros con ruedas metálicas(sobre riel)	En uso	4
ACCESORIOS	Manga de ventilación de lona-polietileno de 300m de Longitud. 80cm.Φ	En uso	1
	Manguera HDEP; 400m 3''Φ	En uso	1
	Manguera HDEP; 200m 2''Φ	En uso	1
	Botellón de agua (02)	En uso	1
	Pulmón de aire (1)	En uso	1

FUENTE; Elaboración Propia.

2.6.5 Herramientas y Materiales.

Las herramientas y materiales necesarios para el desarrollo en forma adecuada de las labores de desarrollo y preparación de minado; se muestran en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 2.8 Herramientas y materiales.

N°	DETALLE	CANTIDAD
1	Carretillas con capacidad de 80 kilos	10
2	Lampas	15
3	Picos	15
4	Barretas de diferentes tamaños	8
5	Combos de 8,16, 24 (Lb.)	6
6	Puntas diamante	8
7	Manguera de 1"D (m)	100
8	Lámparas de batería	20
9	Saquillos de polietileno	100

FUENTE: Elaboración Propia.

2.6.5.1 Materiales para Construcción de Labores Subterráneas

En la construcción de las labores subterráneas se usan los siguientes materiales:

- Rieles de 30 lb/yd
- Eclisas
- Pernos
- Clavos
- Durmientes de 4" x 6" x 4'
- Tubos de polietileno de 2" de diámetro de 25 m de longitud cada una
- Tubos de polietileno 4" de diámetro de 25 m de longitud cada una
- Madera de 4"x6"x4"
- Tablas de eucalipto de 2"x8"x10"
- Puntales de eucalipto de 7" a 8" x 8' y 5" a 6" x 10'

- Tablas de 1" x 6" x 10'
- Escaleras de 10'
- Cables de acero de 5/8"

2.6.5.2 Materiales Explosivos en las Labores Subterráneas

La cantidad estimada de material explosivo a emplear en las operaciones, se describe en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 2.9 Material explosivo estimado.

MATERIAL	CANTIDAD TOTAL
Dinamita 80% (0.08 kg/unidad)	32542.45
Fulminante N° 8 (unidades)	808135.62
Mecha de seguridad F – 0.79 kg/TM (m)	1721328.86

FUENTE: Departamento de geología TITAN – Octubre 2012

Estos materiales son almacenados en el polvorín ubicado en las coordenadas UTM (E: 453248; N: 8383129); en el proyecto Ana María 5.

2.6.5.3 Requerimiento de Insumos.

Se considera el siguiente requerimiento de insumos necesarios para desarrollar las diversas actividades mineras, los cuales se indican en el cuadro N° 2,10

CUADRO N°2.10 Principales insumos requeridos.

N°	DETALLE	CANTIDAD/día	CANTIDAD (Mes)
1	Petróleo (3 turnos de 4horas)=12H	72 galones	11728 galones
2	Aceite N° 30		20 galones
3	Grasa		10 kg.
4	Cal (Kg)	6	144 kg.
5	Anticongelante		1lt
6	Dinamita (unidades)	162	--
7	Mecha (metros)	50	--
8	Fulminante (unidades)	54	--

FUENTE: Elaboración Propia.

2.6.5.4 Implementos de Seguridad.

En cumplimiento de RSHM. D.S. 055 – 2010 E.M³ en sus Art. 63°, 64° y 65°. El titular minero proporcionará los implementos de seguridad para velar por la salud y el bienestar del personal así como la conservación del medio ambiente donde desarrollará sus diferentes actividades y la capacitación será constante para los trabajadores. Para el cumplimiento se deberá implementar un Reglamento Interno de Seguridad; con una previa identificación y evaluación de riesgos de acuerdo a la realidad del centro minero. Además se ha previsto el uso obligatorio del siguiente implemento de seguridad y renovándose en forma periódica; con mayores detalles se observan en el cuadro N° 2,11.

CUADRO N° 2.11 Implementos de seguridad.

N°	DETALLE	CANTIDAD
1	Guantes de jebe (pares)	30
2	Guantes de cuero (pares)	30
2	Mamelucos (unid.)	30
3	Casco minero (unid.)	30
4	Botas de jebe (pares)	30
5	Lentes de seguridad (unid.)	30
6	Protector de oído (pares)	30
7	Correa de seguridad (unid.)	30
8	Respirador antipolvos (unid.)	30
9	Ropa de Agua (juegos)	30

FUENTE: Elaboración Propia.

a) Requerimiento de Trabajadores

Para el desarrollo y preparación de minado se requerirá personal calificado y no calificado; para lo cual se ha previsto el siguiente personal, como se muestra en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 2. 12 Distribución del personal para la etapa de explotación.

N°	PERSONAL	CONDICION	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO MENSUAL (\$)	PROCEDENCIA
1	GERENTE GENERAL	Planilla	1	1500	1500	Regional
2	PERSONAL ADMINISTRATIVO:					
	Administrador	Planilla	1	500	500	Regional / Local
	Secretaria; tiempo completo	Planilla	1	300	300	Regional / Local
3	PERSONAL OPERATIVO:					
	Ing. de Minas	Planilla	1	900	900	Regional / Local
	Ing. Geólogo	Planilla	1	900	900	Regional / Local
	Técnico en topografía	Planilla	2	350	700	Regional / Local
	Capataz	Planilla	3	350	1 050.00	Regional / Local
	Técnico perforista	Contratado	3	300	900	Regional/Local
	Obreros mineros	Contratado	30	250	7 500.00	Local
	Técnico en mantenimiento	Contratado	1	200	200	Local
	Chofer	Contratado	1	200	200	Local
	Cocinero(a)	Contratado	2	200	400	Local
	Vigilante	Contratado	2	200	400	Local
3	TOTAL		50		15 450.00	

FUENTE: Elaboración Propia.

b) Seguridad durante las labores

En los frentes de las labores, luego de la voladura se procede a la ventilación, forzada utilizando ventiladores neumáticos Ventilador eléctrico (22,000 FM), luego se procede a regado con agua de la carga, cajas y corona con el objetivo de descubrir las rajaduras, eliminar rocas sueltas, polvo y gases producto de la voladura.

Luego de efectuar el desatado de rocas sueltas, para mantener la seguridad en la construcción de las labores subterráneas y evitar posibles caídas de material, en los lugares críticos, se instalan cuadros u otro tipo de sostenimiento. Los cuadros se construyen utilizando madera de eucalipto de 0,203 m (8") de diámetro y entre cuadro y cuadro se tiene una separación de 1,0 a 1,2 m, aproximadamente y cuando el macizo rocoso lo requiere.

c) Señalización y Avisos.

Se va implementando con la señalización básica respectiva dentro de la concesión minera y en la zonas de operación; tales como; ingreso principal, campamentos, puntos de monitoreo y Letrinas Sanitarias entre otros; de acuerdo a lo estipulado en el D.S. N° 055-2010-EM⁴, en sus anexos 11 de código de colores del Art. 118 y 119 del dicho reglamento. Para mayor referencia resaltamos su contenido legal, código de colores que permite un rápido reconocimiento y de peligro; por tanto el titular deberá adoptar las siguientes medidas de prevención:

- Asegurar que todos los trabajadores sepan el significado de los colores usados en sus respectivas áreas de trabajo. Los trabajadores nuevos reciben capacitación adecuada al respecto antes de empezar a trabajar en su área respectiva. Se lleva a cabo inspecciones básicas regulares para verificar el conocimiento del personal acerca del código de señales y colores.
- Se coloca letreros con el código de señales y colores en lugares visibles dentro del lugar de trabajo. Detalles completos del código de señales y colores. Deberá representarse en las cartillas de seguridad.

2.6.6 Planeamiento de producción

2.6.6.1 Planeamiento a corto y mediano plazo

El planeamiento a corto plazo llamado también planeamiento operacional, tiene como objetivo fundamental el de resolver el problema de extracción de una determinada cantidad de mineral, ya sea por día, semanal o mensualmente de tal manera que se asegure la continuidad en la producción.

El planeamiento a mediano plazo, consiste en una serie de planes simulados, este planeamiento se realiza por años; para cada año se definen los tajeos y se calculan los tonelajes y leyes de mineral a extraerse, así como también la cantidad de desmonte a removerse y el equipo necesario para cumplir con los objetivos.

2.6.6.1.1 Factores que influyen

Los factores que influyen en el planeamiento ya sea a corto plazo o mediano plazo que se deben considerar son:

- El tamaño y número de equipos
- Disponibilidad y utilización de equipos a emplearse
- Producción por guardia
- Asegurar la existencia de bloques o tajeos mineralizados
- Las rutas y distancias de acarreo
- La disponibilidad de zonas mineralizadas.

2.6.7 Cálculos tonelaje – ley

Para este fin tenemos los subniveles de guía o cabeza, que nos indican las leyes y potencia del manto, de este modo se calcula aritméticamente el volumen de desmonte y mineral a extraerse en un determinado tiempo de una determinada área, como se puede apreciar en el plano, las leyes son erráticas varían constantemente por lo cual no se puede estimar una ley ponderada y la potencia es variable de acuerdo a la formación geológica.

2.6.7.1 Evaluación de costos de producción

CUADRO N° 2.13 Costos de producción.

Galería: 5 x 4 m	
Area:	4.4 m ²
No. Taladros	45
Avance	1.2 m
Barrenos	6' - 4'
Efeciencia de avance	85%
Costo de Explosivo	62.25
Costo de Perforacion	40.02
Costo de Ventilacion	60.03
Costo de Aire Comprimido	19.95
Costo de Tuberia	2.1
Costo de Winche	2.97
Costo de Supervision	60
Costo de Personal	120
	360.118 S/m

Las dimensiones de la sección de la galería se puede observar en el plano 6A adjuntado en anexos.

CUADRO N° 2.14 Costo de producción en el subnivel.

SUBNIVEL (2.50 x 2.20) m	
Area:	2.8 m ²
No. Taladros:	28
Avance:	1.1 m
Barrenos:	4'
Eficiencia de avance:	85%
Costo de Explosivo	73.89
Costo de Perforacion	65.7
Costo de Ventilacion	9.84
Costo de Aire Comprimido	30
Costo de Tubería	0.12
Costo de Winche	0.18
Costo de Supervision	60
Costo de Personal	156
	359.755 S/m

Las dimensiones de la sección del subnivel se puede observar en el plano 6C adjuntado en anexos.

CUADRO N° 2.15 Costos de producción en el subnivel.

Inclinado: 2.5x1.5 m	
Area:	2.4 m ²
No. Taladros:	28
Avance:	1.0 m
Barrenos:	4'
Eficiencia de avance:	85%
Costo de Explosivo	85.59
Costo de Perforacion	65.7
Costo de Ventilacion	9.84

Costo de Aire Comprimido	30
Costo de Tubería	0.12
Costo de Winche	0.18
Costo de Supervisión	60
Costo de Personal	135
	386.43 S/m

Las dimensiones de la sección del inclinado se puede observar en el plano 6B adjuntado en anexos.

CUADRO N° 2.16 Costos de producción en tajeo.

TAJEIO	
Area:	4.5 m ²
No. Taladros:	26
Avance:	1.2 m
Barrenos:	4'
Eficiencia de avance:	90%
Costo de Explosivo	62.25
Costo de Perforación	40.02
Costo de Ventilación	60
Costo de Aire Comprimido	19.95
Costo de Tubería	2.1
Costo de Winche	2.97
Costo de Supervisión	45
Costo de Personal	150
	318.575 S/m

Las dimensiones de la sección del tajeo se puede observar en el plano 6D adjuntado en anexos.

2.6.8 Instalaciones auxiliares

2.6.8.1 Almacén de explosivos (Polvorín) eficiencia

Se tiene la autorización ante DISCAMEC del polvorín tipo A en una galería subterránea con barricadas, para almacenar explosivos, las características de

construcción, transporte, almacenamiento y manipuleo se realizaron bajo los lineamientos del D.S. N°19-71/IN.

La ubicación en coordenadas UTM son E: 453248; N: 8383129, dentro del área de la concesión minera “Ana María N° 5”; El almacén tiene las siguientes características: dos puertas de seguridad, un ambiente de 30 m² (4.20 m de largo x 4 m de ancho) con una compuerta de 0.8 m para depositar mecha de seguridad, un ambiente de 12 m² (4 m de largo x 3 m de ancho) para depositar fulminante, Un ambiente 46.40 m² (8 m de largo x 5.8 m de ancho) para depositar dinamita, el acceso de ingreso es 2.50 m de ancho x 3 m de alto; cuya longitud hasta la primera compuerta de seguridad es de 20 m.

2.6.8.2 Depósito de desmorte

Los desmontes generados por la actividad minera en la etapa de desarrollo y preparación son evacuados y depositados en la parte baja de la bocamina principal a una distancia de más de 60 m; en el anillo final se abrió una zanja de 0.6 m de profundidad; con un ancho de 1.5 m y con una altura de 1 m; la construcción es de material rústico (piedras); cuyo propósito del muro es para adquirir la estabilidad física del desmorte; manteniendo su ángulo de reposo; adaptándose a la topografía del terreno original; el muro fue construido progresivamente en su longitud a medida que los desmontes se van acumulando; la cancha de desmorte se ubica en las coordenadas UTM E:453251; N: 8382998; el lugar tiene un ángulo de inclinación de 30 grados de roca, para el desmorte se tiene un ángulo de 45 incluido el ángulo de la roca con un factor de seguridad de 1.5, en un área 5333.54 m².

El depósito además tiene los siguientes objetivos:

- Garantizar una adecuada disposición de los desmontes y evitar que este material no cree contaminación y no afecte la salud de los trabajadores, de la población y de los ecosistemas.
- Garantizar que el manejo de los materiales de desmonte no generen riesgos inaceptables a la comunidad y los ecosistemas. Para lo que se considera fundamentalmente la estabilidad física y química del depósito. En el plano N°1 se muestra el muro para la contención de desmonte.

2.7 MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

2.7.1 Labores mineras subterráneas

En el derecho minero Ana María 5, se programó realizar labores mineras subterráneas principalmente en el manto 4, del nivel 5040, desde esta labor se evacua el desmonte por el nivel de acceso 5013; también se han realizado, chimeneas, sub. Niveles, inclinados; conjuntamente a las actividades de explotación (tajeos); se tiene previsto también desarrollar actividades de exploración desde el nivel de acceso con secciones de 5 m de ancho x 4 m de altura con una longitud proyectada hasta 1500m lineales en negativo, así como se observan en los planos N° 04 y 05; adjunto en anexos opcionalmente se ha construido una chimenea de ventilación en el nivel 5040 a unos 100 m lineales desde el inicio del socavón; con sección de 1.5 m x 1.5 m; a continuación se describen sus características:

- a) **Chimeneas.-** En el nivel 5040 se tiene construido una chimenea de ventilación en el socavón principal a unos 100 m lineales; cuya sección es de 1.5 m x 1.5 m; mayor referencia ver planos N° 04 y 05; adjunto en anexos.

b) **Sub. Niveles.-** De las actividades de explotación dentro del manto 4; se construyó un sub nivel con una sección de 2.5 m x 2.20 m cuyo diseño se observan en el plano N° 06; en planta y en sección transversal mirando al norte.

c) **Tajeo.-** El trabajo principal del tajeo es en el manto 4; zona mineralizada de oro; en la etapa de exploración se ha desarrollado y preparado blok de 25 m x 25 m x 1.5 m de altura. En el tajo se ha diseñado una malla de perforación para 24 taladros en una sección de 2 m x 1.20 m.

CUADRO N° 2.17 Descripción de las labores mineras subterráneas.

Nivel	Coordenadas UTM		Tipo de labor	Sección (m ²)	Longitud (m)	Total (m)
	Norte	Este				
Explotación n 5040			Tajo (manto 4)	25*25(block)	1500	1500
	8383061	453243	Chimenea	1.5*1.5	80	80
Exploración n 5013	838294	453176.8	Galería	5*4	1500	1500
TOTAL						3080

FUENTE: Departamento de geología TITÁN – Octubre 2012

En la etapa de preparación se preparó una galería en el nivel 5013, con una sección de 5 m x 4 m por 1.2 metros de avance, se utilizó 45 taladros de 38 milímetros de diámetro, por lo que se generó 78000 TM de desmonte, en el avance se resume en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 2.18 Descripción de labores subterráneas para preparar la galería

5013

Nivel	Labor	Metraje (m)	Sección (m)	Desmonte (TM) densidad 2.7 (g/cm ³)	Datos generales		
					N° taladros	Avance/ disparo (m)	Diámetro de taladro(mm)
5013	Galería	1500	5.00*4.00		45	1.2	38

FUENTE: Elaboración propia Noviembre – 2012.

En la etapa de explotación se realizaron inclinados con una sección de 2.5 m x 1.5 m de 2650 metros lineales, lo que producirá un desmorte de 25839 Tm, mineral de 1790 TM, de los subniveles de sección de 2.5 m x 2.2 m con 2500 m lineales se obtiene 35750 TM de desmorte y 1688 TM de mineral y de los tajeos se tendrá 15358 TM de mineral, se detalla en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 2.19 Descripción de labores subterráneas para explotación.

Nivel	Labor	Metraje (m)	Sección (m)	Desmorte (TM) densidad 2.7 (g/cm ³)	Mineral (TM) densidad 2.6 (g/cm ³)	Datos generales		
						N° taladros	Avance/ disparo (m)	Diámetro de taladro(mm)
5040	Inclinados	2650	2.50*1.5	25839	1790	28	1	38
	Sub niveles	2500	2.50*2.20	35750	1688	45	1.2	38
	Tajeo	25*25			15358	26	1.2	38
TOTAL				61589	18836			

FUENTE: Elaboración propia Noviembre – 2012.

CAPITULO III

EXPLOSIVOS Y VOLADURA DE ROCAS

3.1 EXPLOSIVOS

Se denominan explosivos, a todas aquellas sustancias o compuestos estables que por efecto de una excitación sufren una descomposición muy rápida y una reacción exotérmica, que se propaga por sí misma, con formación de productos más estables (generalmente gases). Las sustancias explosivas pueden definirse por su propiedad y características, de liberar energía mediante una reacción química y en un tiempo reducido.

3.1.1 Explosión

Es un fenómeno que ocurre como consecuencia de una liberación violenta de energía (alta temperatura y elevada presión).

La explosión de una sustancia explosiva es una rápida expansión de la misma en un volumen más grande que su volumen original. Tal como se observa en la figura N°

3.1

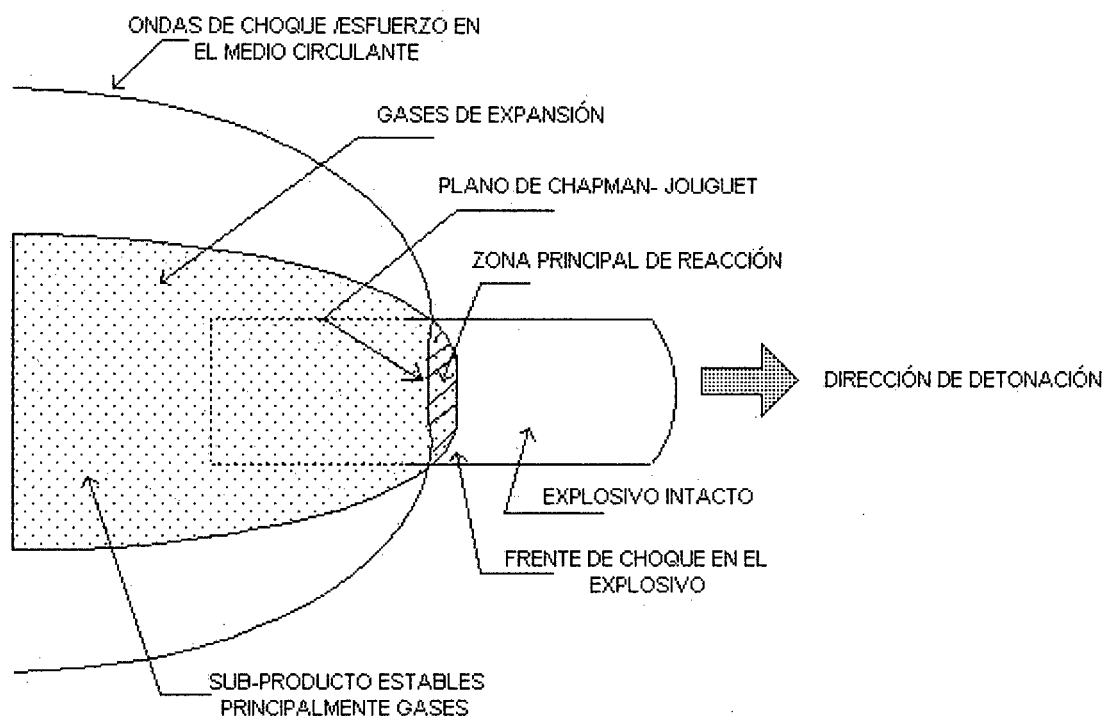


Figura 3.1: Muestra el proceso de detonación de una mezcla explosiva

Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder. 1987

3.1.2 Eficiencia de los Explosivos

Este factor es un índice del grado de aprovechamiento práctico de la energía liberada por una mezcla explosiva, en relación a los parámetros termodinámicos calculados en forma teórica.

La eficiencia total es una función de muchas variables, algunas de las cuales son internas e inherentes dentro del explosivo por la virtud de su formulación química y algunas de las cuales son externas y parte del diseño de la voladura o condiciones

encontradas en el lugar. Las variables externas que pueden afectar la eficiencia total de un explosivo incluyen a la eficiencia de la iniciación, condiciones de agua, diámetro de carga, longitud de carga, grado de confinamiento, temperatura, efectos de la detonación de cargas explosivas adyacentes, etc.

Tabla de eficiencia de explosivos:

MEZCLA EXPLOSIVA	EFICIENCIA (%)
Explosivos moleculares	95-100
Emulsiones	90-95
Anfos pesados bombeables	75-90
Anfos pesados comunes	65-85
Acuageles	55-70
AN/FO	60-80
SANFO	50-70

Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder. 1987.

3.2 PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS

Los explosivos convencionales y los agentes explosivos poseen propiedades diferentes que las caracterizan y que se aprovechan para la correcta selección, atendiendo al tipo de voladura que se desea realizar y las condiciones en que se debe llevar a cabo. Las propiedades de cada grupo de explosivos permiten además predecir cuáles serán los resultados de fragmentación, desplazamientos y vibraciones más probables.

Las propiedades más importantes son:

3.2.1 Potencia y energía desarrollada

Es una de las más importantes propiedades, ya que define la energía disponible para producir efectos mecánicos. Puede definirse como, “La capacidad de un explosivo para fragmentar y proyectar la roca a volar”, por ejemplo en la voladura de rocas blandas un explosivo con baja potencia y velocidad de detonación, fragmenta y proyecta mejor la roca que un explosivo más potente.

3.2.2 Velocidad de detonación

Es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. Los factores que afectan a la velocidad de detonación son:

- Densidad de la carga explosiva
- Diámetro de carga explosiva
- Confinamiento
- Iniciación
- Envejecimiento

3.2.3 Densidad

La densidad de la mayoría de los explosivos varía entre 0.8 y 1.6 [gr/cm³] y al igual que con la velocidad de detonación cuanto mayor es, más intenso es el efecto rompedor que proporciona; la densidad de un explosivo es un factor importante para el cálculo de la cantidad de carga necesaria para una voladura.

3.2.4 Presión de detonación

La presión de detonación de un explosivo es función de la densidad y del cuadrado de la velocidad de detonación, los explosivos comerciales tienen una presión de detonación que varía entre 500 y 1500 MPa. Generalmente en rocas duras y competentes la fragmentación se efectúa más fácilmente con explosivos de alta presión de detonación, debido a la directa relación que existe entre esta variable y los mecanismos de rotura de la roca.

3.2.5 Resistencia al agua y bajas temperaturas

Es la capacidad para resistir una prolongada exposición al agua sin perder sus propiedades, ésta varía de acuerdo con la composición del explosivos y generalmente está vinculada a la proporción de nitroglicerina o aditivos especiales que contengan, por ejemplo, las dinamitas, los hidrogeles y las emulsiones son muy resistentes al agua; en cambio las sales oxidantes, como el nitrato amónico en el ANFO, no son resistentes al agua son muy higroscópicos.

Cuando la temperatura ambiente se encuentra por debajo de los 8° C, los explosivos que tienen nitroglicerina tienden a congelarse, por lo que se suele añadir una cierta cantidad de Nitroglicol que hace bajar el punto de congelación a – 20° C.

3.2.6 Sensibilidad

Esta característica engloba varios significados dependiendo del tipo de acción exterior que se produzca sobre el explosivo como: Acción controlada, la sensibilidad aquí es equivalente a la aptitud, a la detonación por un iniciador, ejemplo un

detonador. Acción incontrolada, la sensibilidad es una medida de la facilidad con la que un explosivo puede ser detonado por calor, fricción, impacto o choque.

3.2.7 Energía liberada en la voladura

3.2.7.1 Fuentes de la energía de los explosivos

Cuando los explosivos reaccionan químicamente se generan dos formas de energía:

1ro. Energía de choque o presión de detonación

Es una presión transitoria que viaja a través del explosivo a la velocidad de reacción y es seguida por la presión de gas.

Esta energía de choque llamada también presión de detonación está en función directa con la densidad y la velocidad de detonación del explosivo.

2do. Energía de gas

a) presión de explosión 1

- Es la presión que los gases en expansión ejercen contra las paredes del taladro después de que la reacción química ha terminado.
- Esta presión resulta de la cantidad de gases que se liberan por unidad de peso de explosivo y de la cantidad de calor liberada durante la reacción.

a) Presión de explosión 2

- La energía de gas liberada durante el proceso de detonación, es la causante de la mayor parte de la fragmentación de la roca durante la voladura con cargas confinadas en los taladros.

- Su valor aproximado viene a ser la mitad de la presión de detonación, sin embargo existe condiciones donde la presión de explosión sobrepasa a la presión de detonación por ejemplo el ANFO.

3.2.8 Ondas explosivas

Etapas de una onda explosiva

- Una vez producida la detonación de la carga iniciadora contenida en la cápsula detonante, después de unos 2 o 3 msg. se produce la onda explosiva que se propaga a partir del taladro en todas direcciones.
- Estas ondas explosivas actúan sobre la roca circundante en forma de innumerables y potentes golpes de cincel, la roca junto al taladro es triturada y, en la roca ubicada a continuación se forman grietas en todas direcciones.
- Este proceso se produce en 4 etapas, en un lapso aproximado de 30 msg.

1ra etapa. Se crea una vibración que somete a la roca a esfuerzos de tracción y compresión.

2da etapa. En ésta etapa, la roca se encuentra en tensión.

3ra etapa. En ésta etapa, se produce un fracturamiento de la roca circundante al taladro.

4ta etapa. Durante ésta etapa se ponen en movimiento los pedazos de roca en dirección del espacio libre del taladro, es decir de afuera hacia adentro.

- Inmediatamente después entran en acción los gases formados a gran presión y temperatura que penetran en las grietas abiertas en la roca, favoreciendo su total aflojamiento y cuyo efecto final es que la roca desprendida en una zona que tiene forma cónica denominada “cono de voladura” es arrojada hacia una “superficie libre”, que puede ser el frente de una galería.

- Esta última acción dura unos 40 msg. de modo que todo el conjunto se realiza en un tiempo aproximado de 70 msg.

3.2.9 Accesorios de voladura

3.2.9.1 Mecha de seguridad

La mecha de seguridad, conocida en el ambiente minero como “guía”, es un accesorio que tiene la finalidad de transmitir el fuego a una velocidad uniforme, hasta llegar al explosivo que se desea iniciar.

- El núcleo es compacto, garantizando de este modo: tiempo de combustión uniforme, inexistencia de vacíos, resistencia a la torsión, ausencia de derrame en los cortes.
- La triple cubierta de hilos de algodón garantiza: buena resistencia a la tensión, compactación y configuración del núcleo, menor emanación de humos.
- El alquitrán le otorga: impermeabilidad, buena adherencia de PVC al producto, mayor resistencia a la torsión.
- El PVC de alta calidad garantiza la total impermeabilidad del producto.

Cuadro N° 2 Especificaciones Técnicas

Tiempo de combustión	165 [s/m] $\pm$ 10.0%
Peso	22 [g/m] $\pm$ 5.0%
Peso de carga	6 [g/m] $\pm$ 0.2%
Alcance de chispa en canaleta libre	5 [cm]
Alcance de chispa en tubo de vidrio	3 [cm]
Diámetro externo	5 [mm] $\pm$ 0.2%
Espesor de PVC	0.27 [mm] $\pm$ 2.0%

3.2.9.2 Cápsulas detonantes

- Cápsulas detonantes más conocidas como fulminantes, son accesorios que se emplean para provocar la detonación de explosivos secundarios que requieren la energía de una onda de choque para su iniciación.
- Existen dos tipos de cápsulas detonantes: comunes (fulminantes) y eléctricos (estopines).
- La cápsula detonante común, es un explosivo iniciador que detona como consecuencia de la excitación provocada por la flama, fruto de la combustión de la pólvora negra contenida en la mecha de seguridad, que es alojada y engargolada en el espacio libre.
- Esta detonación proporciona a su vez la energía de activación suficiente para romper el equilibrio molecular de la PENTRITA y originar su descomposición violenta.
- El explosivo iniciador se encuentra confinado entre el 1er. y 2do. opérculo, a objeto de obtener una mayor potencia en su detonación, asegurar la inexistencia de derrame y proporcionar un alto grado de seguridad en su manejo por constituir dos paredes transversales a la cápsula que ofrece una gran resistencia al aplastamiento o deformación, especialmente en el sector más sensible.
- La presencia de opérculos en la cápsula detonante, permite asegurar que las mismas satisfacen las más exigentes normas de seguridad en su manejo y eficiencia en su operación, se tiene cápsulas N° 6 y N° 8.
- Las cápsulas N° 6 tienen la potencia suficiente como para activar prácticamente todos los tipos de dinamitas, slurries y emulsiones que se utilizan.

Cuadro N° 3 Especificaciones Técnicas

Especificaciones	Cápsula N° 6	Aluminio
Material	Aluminio	Aluminio
Dimensiones:		
Longitud [mm]	40 ± 0.2	45 ± 0.2
Diámetro externo [mm]	6.3 ± 0.1	6.3 ± 0.1
Resistencia a la humedad	24 Hrs. En 100%	24 Hrs. En 100%
Sensibilidad a la chispa	Humedad	Humedad
[mm]	3	3
Resistencia al impacto [m]	2 kg de 1.80 (no detona)	2 kg de 1.80 (no detona)
Espacio libre [mm]	19 ± 2	19 ± 2
Espesor de la cápsula [mm]	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1
Altura de carga [mm]	21 ± 2	26 ± 2
Carga base [gr]	0.4	0.6
Carga iniciador [gr]	0.2	0.2

3.2.10 Sistema no Eléctrico

3.2.10.1 Detonador no eléctrico

Es un accesorio diseñado para iniciar, en forma segura y precisa, distintos tipos de cargas explosivas, mediante un sistema simple constituido por elementos transmisores, retardadores y explosivos ubicados secuencialmente, con algunos dispositivos complementarios destinados a conectar, sellar y proporcionar las especificaciones del producto.

3.2.10.2 Tubo transmisor

Consiste en un tubo de resina recubierto con polietileno de color fluorescente, y una película interior de explosivo, que al iniciarse transmite una señal en forma de onda de choque deflagrante destinada a iniciar el mixto de retardo y carga explosiva del detonador.

Cuadro N° 4 Especificaciones Técnicas

Diámetro externo [mm]	3.5 ± 0.2
Carga explosiva [mg/m]	19 ± 4
Resistencia a la tracción[Kgf]	18 ± 3
Promedio velocidad onda de choque [m/s]	1900
Longitud [m]	A pedido del usuario
Color del revestimiento	Naranja fluorescente MS
	Amarillo Fluorescente LP

3.2.10.3 Elemento de retardo

Es un cilindro metálico cargado con un mixto pirotécnico de longitud variable de acuerdo al tiempo que se desea obtener.

3.2.10.4 Carga explosiva

Está constituida por dos cargas ubicadas secuencialmente, un explosivo primario sensible a la llama y un explosivo secundario con potencia suficiente para iniciar los explosivos comerciales utilizados actualmente.

3.2.10.5 Cápsula detonante

De aluminio con una longitud entre 50 y 95 [mm], en cuyo interior están contenidos los elementos de retardo y cargas explosivas.

Cuadro N° 5 Especificaciones Técnicas

Longitud cápsula [mm]	50, 60, 70,80, 85, 95
Diámetro externo [mm]	7.5
Carga secundaria (PETN) [mg]	750
Carga primaria (PRIMTEC) [mg]	220
Insensibilidad al impacto	2 kg a 90 cm (no detona)

3.2.10.6 Conector plástico “J”

Dispositivo de plástico fosforescente, es pieza plástica utilizada para ensamblar sobre el tubo transmisor del Tecnel; Para trabajos subterráneos se recomienda dejar el conector “J”, lo más cerca posible de la perforación, enrollando el tubo sobrante, hecho que permite realizar un control visual al final del amarre y evitar que tubos queden sin conectar, tal como se muestra en la figura 3.2.

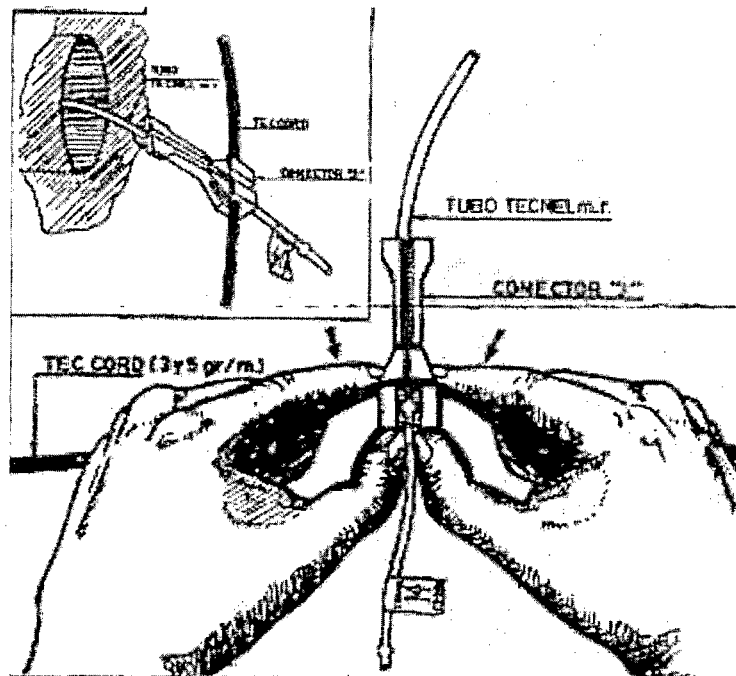


Figura 3.2: Ensamblado final del conector

Fuente: Fundación Universidad de Atacama

3.2.10.7 Manguera de cierre

Dispositivo de goma destinado a sellar la unión del tubo no eléctrico con la cápsula, y proporcionar una resistencia a la tracción entre el tubo transmisor y el detonador.

3.2.10.8 Etiqueta de metraje

Cinta adhesiva que tiene impresa la longitud del tubo transmisor

3.2.10.9 Etiqueta de retardo

Cinta adhesiva de plástico o papel que lleva impreso el número de retardo correspondiente al detonador, de acuerdo al tiempo de retardo se clasifica en dos series:

a) Serie periodo corto milisegundo MS

b) Serie periodo largo LP

Cuadro N° 6 Especificaciones Técnicas

SERIE MILLISEGUNDO (MS)		SERIE PERIODO LARGO (LP)	
N° de Retardo	Tiempo milisegundo	N° de Retardo	Tiempo milisegundo
0	5	0	5
1	25	1	200
2	50	2	400
3	75	3	600
4	100	4	1,000
5	125	5	1,400
6	150	6	1,900
7	175	7	2,450
8	200	8	3,100
9	250	9	3,850
10	300	10	4,650
11	350	11	5,500
12	400	12	6,450
13	450	13	7,450
14	500	14	8,500
15	600	15	9,600
16	700	16	10,700
17	800		
18	900		
19	1,000		
20	1,100		
21	1,200		

CAPITULO IV

VIBRACIONES PRODUCIDAS POR VOLADURA

4.1 FUNDAMENTOS DE VIBRACIONES

4.2 NATURALEZA CICLICA DE LAS BIBRACIONES

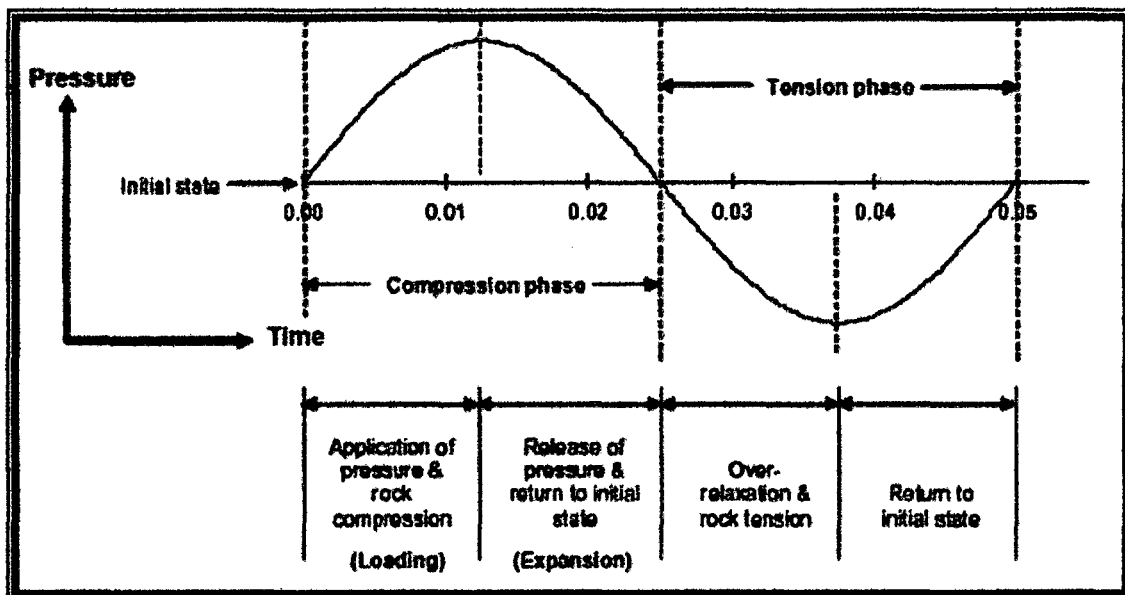
Las vibraciones son un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio, debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión. Con respecto a las vibraciones por voladuras inducidas en la roca, generalmente se considera que las vibraciones son producidas por la detonación del explosivo.

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 4.1

Figura 4.1: Ciclo de Esfuerzo sobre la roca, compresión seguida por tensión

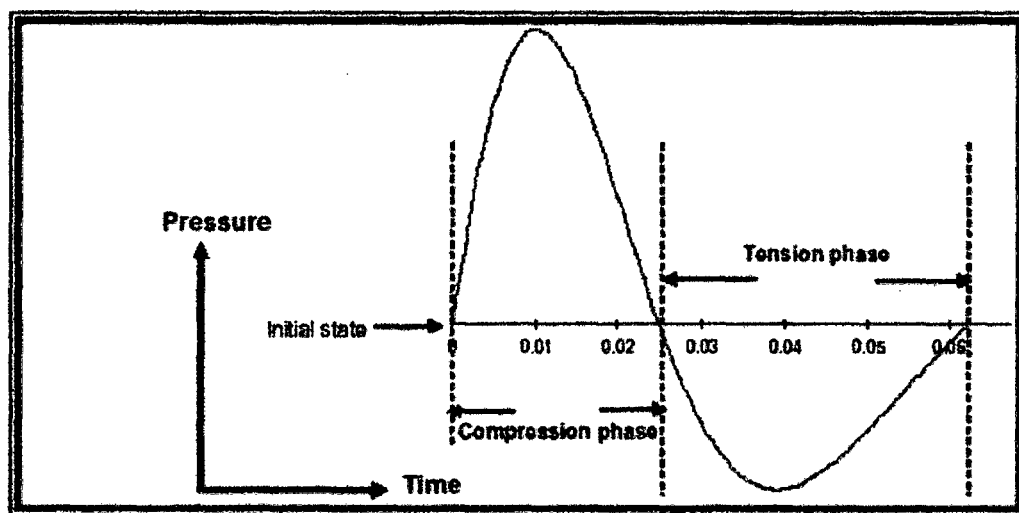


Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

La roca responde como un resorte al paso de las ondas de vibraciones, (el módulo de Young representa la rigidez del resorte), el ritmo al cual la roca se relaja puede ser diferente al ritmo a la cual es sometida la roca por un pulso de

corta duración, que genera la detonación de una carga explosiva. En este caso, no es inusual ver, en rocas débiles con módulo de Young relativamente bajos, que las fases de compresión y tensión tienen diferentes amplitudes y diferentes duraciones.

Figura 4.2: 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:

$$A(t) = A_0 (\sin(\pi ft)) \dots \dots \dots 1$$

Donde A(t) representa la amplitud de la onda en un tiempo t, A es el “peak” (Pico alto) de amplitud sobre la onda completa y f es la frecuencia de la onda.

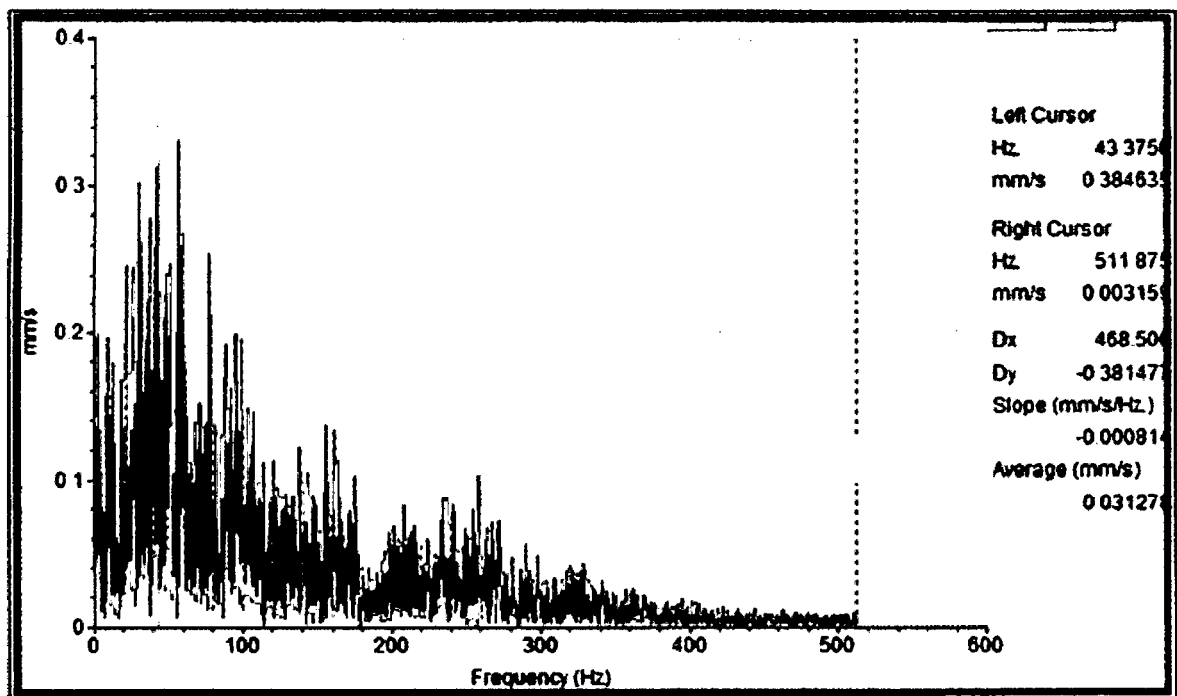
4.3 PROPIEDADES BÁSICAS DE LAS VIBRACIONES

Las propiedades básicas de propagación de ondas de vibraciones son:

4.3.1 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 trasmite las vibraciones ver figura 4.3

Figura 4.3: Frecuencia de ondas de vibraciones



Fuente: Blastware III, Instantel – Operador Manual

4.3.2 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).

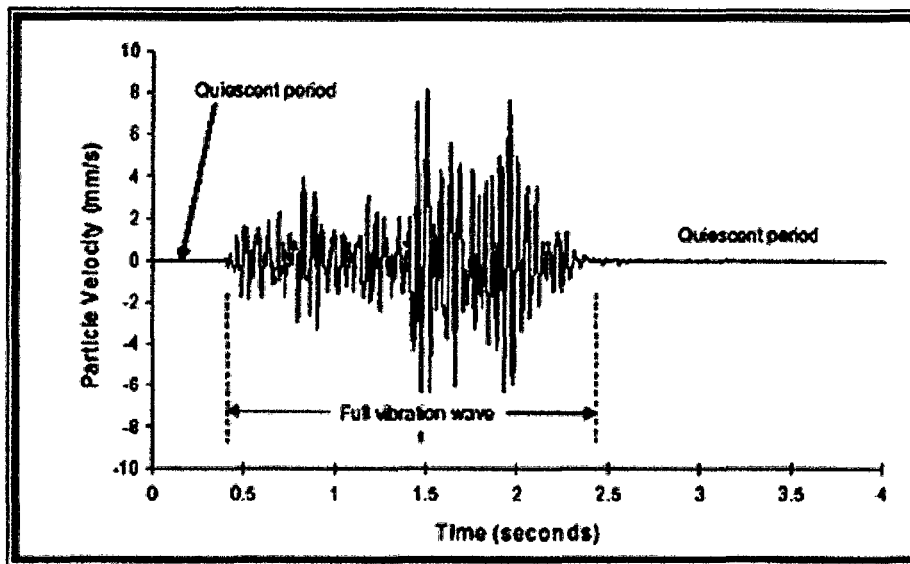
La amplitud de la vibración, medida como velocidad de partícula, es universalmente considerada como el mejor indicador del esfuerzo inducido en el macizo rocoso, y por lo tanto considerado como el mejor indicador del potencial daño y el potencial efecto de fragmentación en la roca.

4.3.3 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 ver figura 4.4

Figura 4.4: Velocidad de partícula versus Tiempo



Fuente: Blastware III, Instantel – Operador Manual

La onda total de vibración, que es medida a partir de una voladura, 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.

4.3.4 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.

4.3.5 Velocidad de propagación

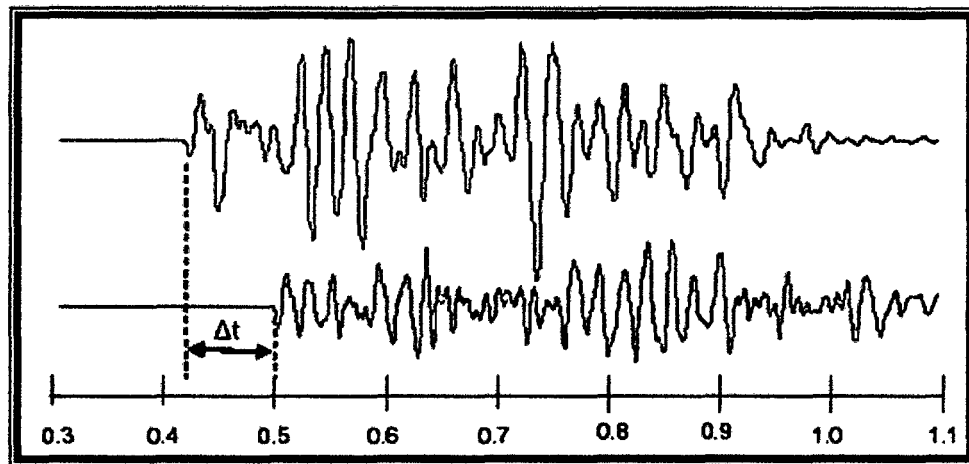
La velocidad de propagación describe la velocidad con la cual la onda se desplaza a través de la roca. Esta velocidad puede ser medida utilizando dos geófonos ubicados a diferentes distancias de la voladura, y mediante la medición de la diferencia de tiempo de arribo de cada señal.

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 4.5 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.

Figura 4.5: Medición de ondas de vibración



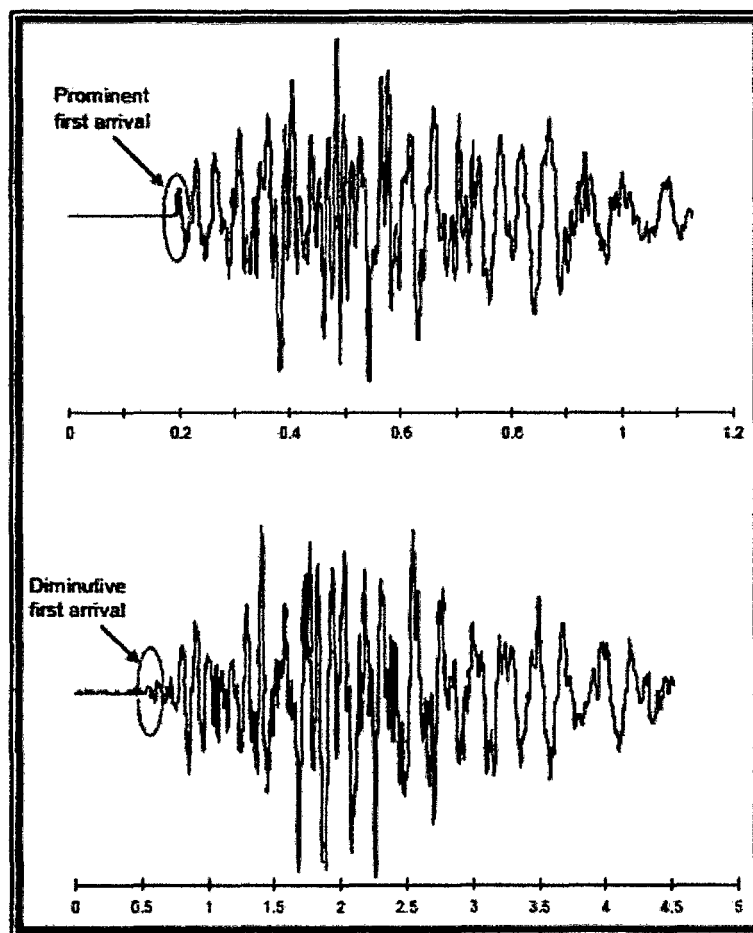
Fuente: Blastware III, InstanTel – Operador Manual

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.

4.3.6 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 4.6 presenta dos ondas de vibraciones, donde la primera indica un arribo destacado de la onda siendo su tiempo de llegada y amplitud fácil de determinar. El segundo diagrama muestra una diminuta llegada de la primera onda, donde se dificulta determinar el tiempo de arribo y su amplitud.

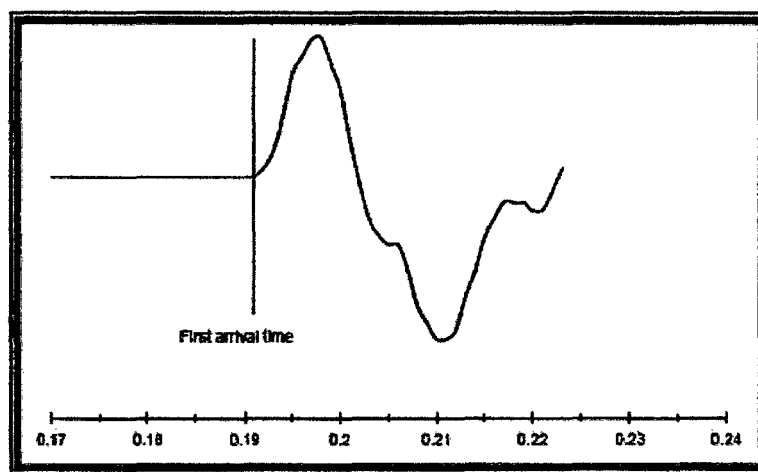
Figura 4.6: Arribo de ondas de vibración, que muestran amplitud y arribo de ondas.



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 4.7

Figura 4.7: Momento de arribo de la onda



Fuente: Blastware III, Instantel – Operador Manual

4.4 VIBRACIONES Y ESFUERZOS

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.

Ecuación que determina la deformación.

$$\boxed{\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma}{E}} \dots\dots\dots 2$$

ε : Deformación

PPV : Velocidad de partícula

V_p : Velocidad de onda P

σ : Tensión en la roca

E : Módulo de Yung

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 la relación:

$$\boxed{PPV_{max} = \varepsilon_{max} V_p = \frac{\sigma_{max} V_p}{E}} \dots\dots\dots 3$$

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:

$$PPV_{max} = \varepsilon_{max} V_p = \frac{\sigma_t V_p}{E} \approx \frac{UCS \times V_p}{12 \times E} \dots\dots\dots 4$$

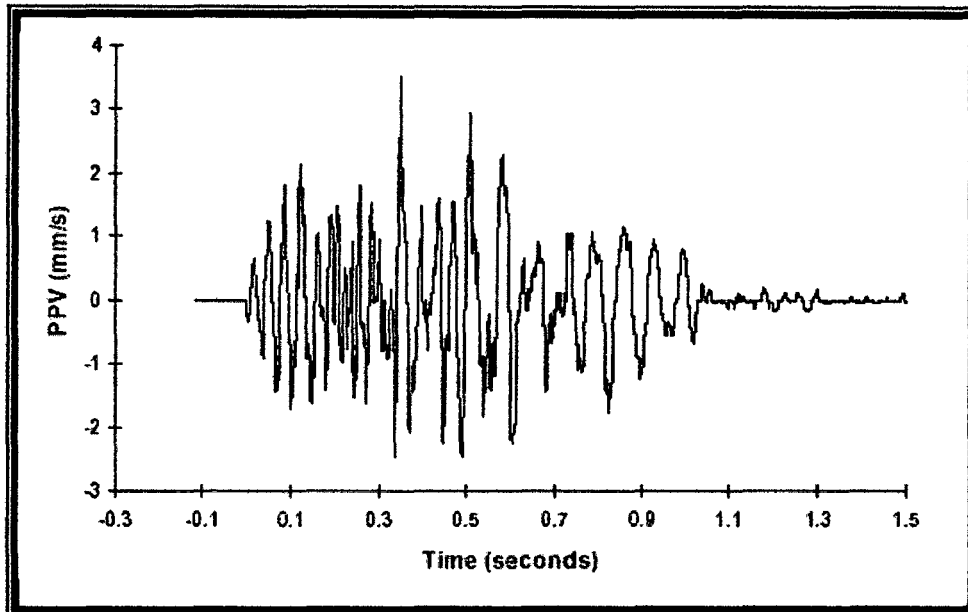
En la ecuación anterior, el factor de 12 se ha usado como la razón entre la resistencia a la compresión y la tensión. Altos valores generan estimaciones de PPV críticos más conservadores (es decir, bajos valores de PPV (Velocidad de partícula)) y pueden ser más apropiados en zonas donde la estabilidad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

Fórmula

4.5 VIBRACIONES ORIGINADAS POR LA VOLADURA

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 4.8, obtenida a partir de un registro de voladura de 120 taladros.

Figura 4.8: Registro de onda de la velocidad de vibración de una voladura de producción (en tajo), 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.

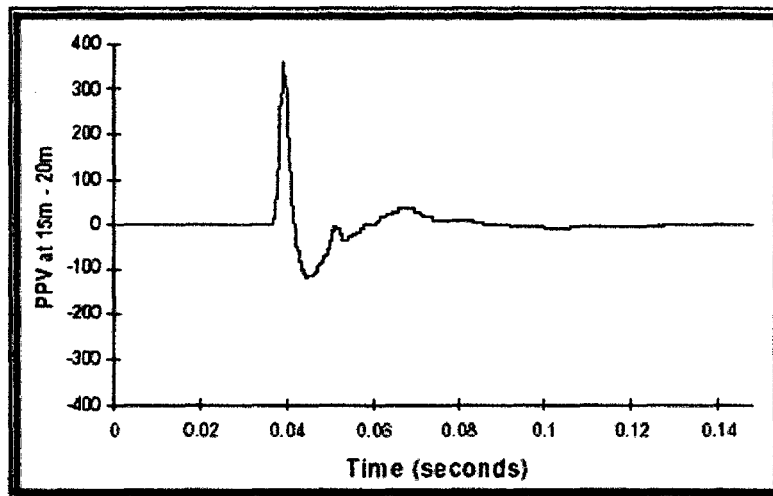
4.5.1 Vibraciones de un solo taladro

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

Figura 4.9: Onda generada por la detonación de un taladro



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).

a) Frecuencia

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.

b) Amplitud

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).

c) Duración

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.

4.5.2 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.

a) Frecuencia

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

b) Amplitud y Duración

De 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.

4.6 ECUACIÓN 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).

4.6.1 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:

$$\frac{E}{A} \propto \frac{1}{A} = -\frac{1}{4\pi r^2} \dots\dots\dots 5$$

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:

$$V(r) = V_0(r)^{-n} \dots\dots\dots 6$$

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.

4.6.2 Perdida 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:

$$\boxed{-\frac{\Delta E}{E} \frac{1}{2\pi} = \text{Const.}} \dots\dots\dots 7$$

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:

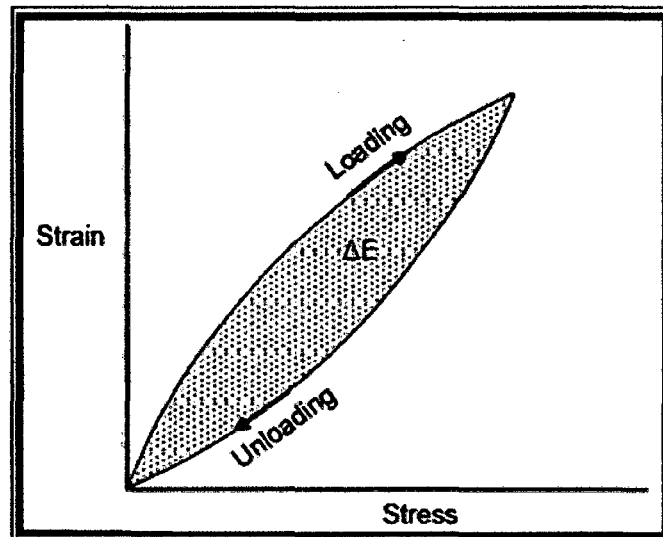
$$\boxed{\begin{aligned} \frac{dA}{A} &= \frac{1}{2} \frac{dE}{E} = -\frac{\pi}{Q} \frac{dr}{\lambda} \\ \therefore V(r) &= V_0 e^{-\frac{\pi r}{Q\lambda}} = V_0 e^{-\frac{\pi f r}{QV_p}} \end{aligned}} \dots\dots\dots 8$$

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.

Figura 4.10: 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.

4.6.3 Efectos combinados

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:

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

.....9

Donde el termino 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:

$$e^{\frac{-\pi \cdot 100 \cdot 100}{100 \cdot 500}} = 0.533$$

.....10

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

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

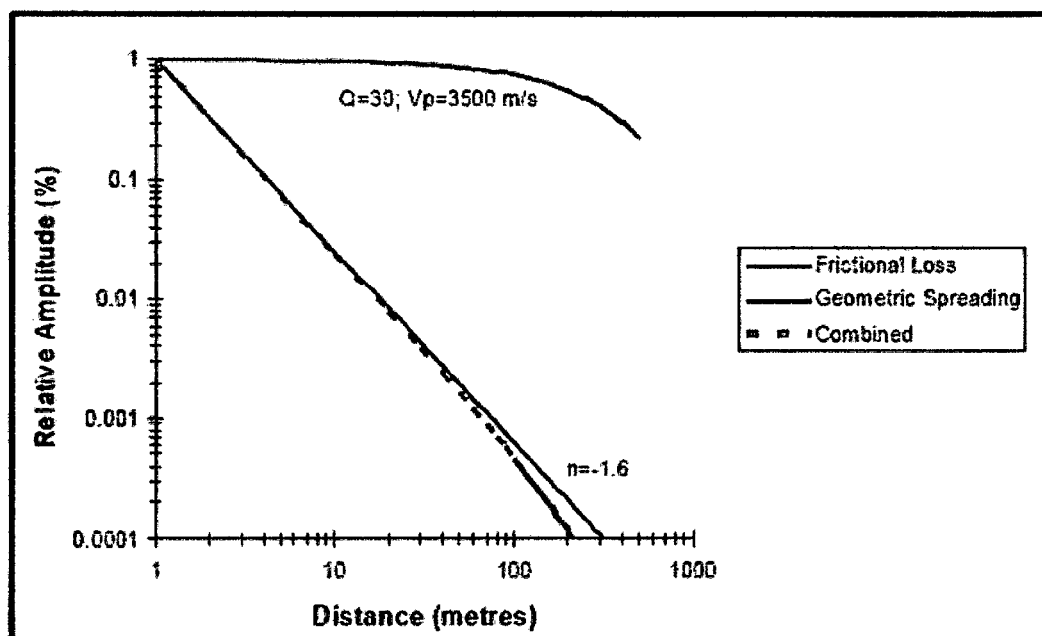
.....11

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 se 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.

En la figura 4.11, se muestra la pérdida de energía y disipación geométrica en la amplitud debido a la distancia.

Figura 4.11: 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

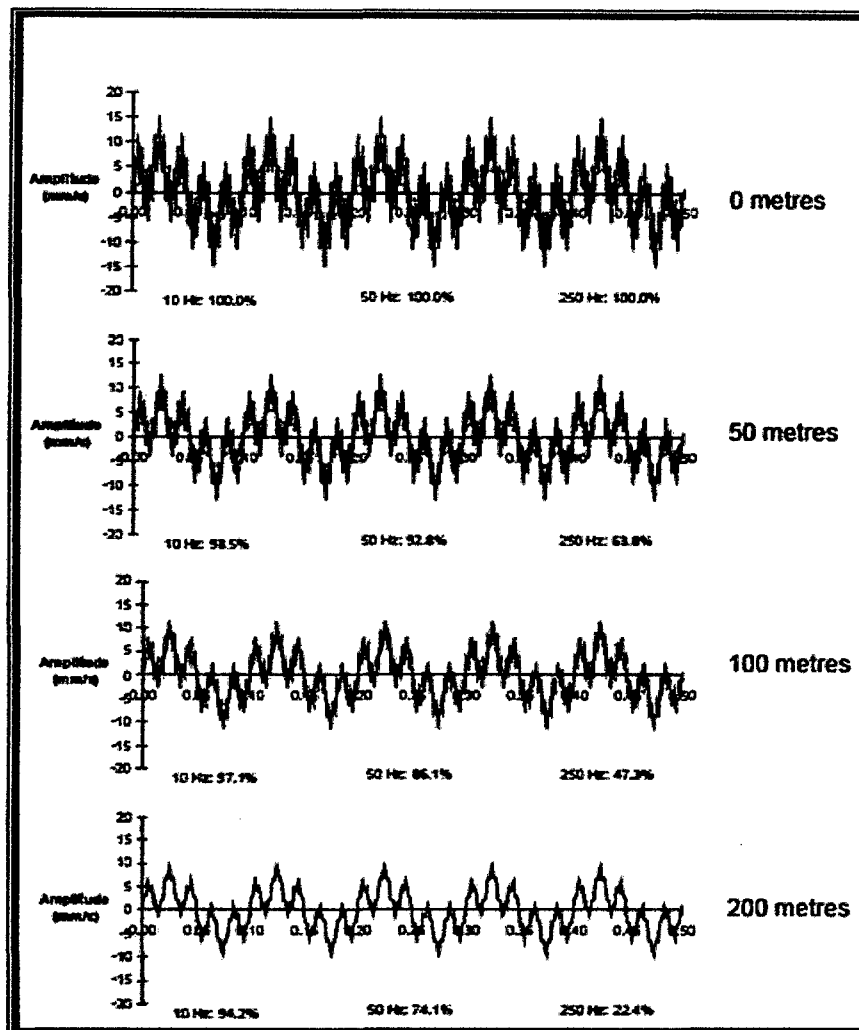
en la amplitud de la vibración, comparado con el efecto de la disipación geométrica, es ésta la única causa del cambio del espectro de frecuencia, el cual sólo ocurre con un aumento de la distancia de propagación.

4.6.4 Cambio de frecuencias 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.

Figura 4.12: Cambios de frecuencia con la distancia de propagación debido a la pérdida friccional.



$(Q = 30, V_p = 3500 \text{ m/s})$

.....12

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 por qué 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.

CAPITULO V

INSTRUMENTACION Y MONITOREO DE 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.

Por lo tanto, es necesario manejar algunos conocimientos sobre el comportamiento de las ondas sísmicas generadas por la voladura en torno a las superficies de las excavaciones subterráneas según la calidad del macizo rocoso. Todo esto es importante puesto que el macizo rocoso transporta la energía vibracional, por lo que, debemos tener presente sus relevancias que dependen de la geometría, posición de la voladura y sistema estructural presente, por ejemplo, la onda superficial es de menor amplitud y viaja más distancia, por lo tanto es importante 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 roca, producto de las 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 la memoria.
- Un computador, que tiene incorporado el software requerido para el traspaso de la información desde el equipo monitor, y su posterior análisis.

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.

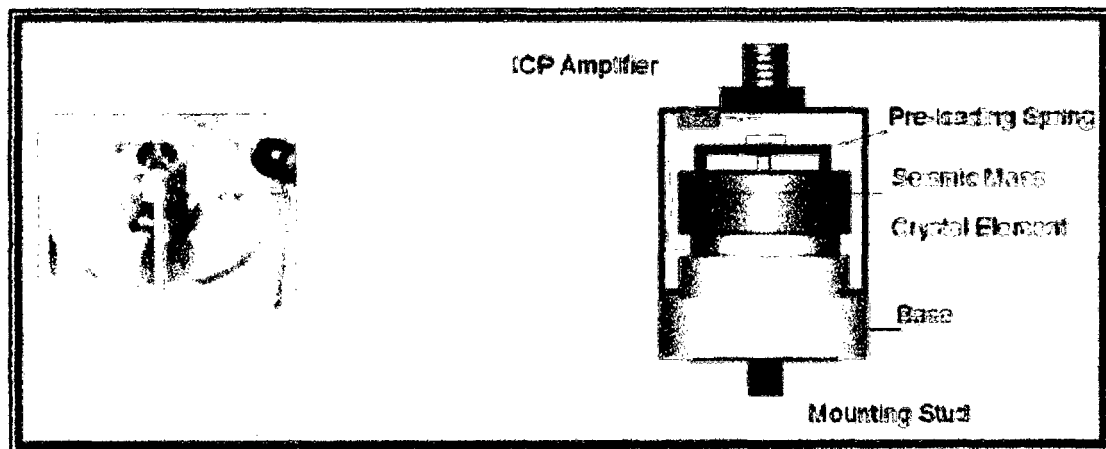
Existe una gran variedad de equipos disponibles en el mercado, que tienen la capacidad de medir velocidad o aceleración de partículas. Su función es convertir el movimiento físico generado durante el paso de la vibración, en una señal de voltaje equivalente, según sea su sensibilidad. Los transductores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

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, y pueden ser livianos y robustos, pero son 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. Ver figura 5.1.

Figura: 5.1 se muestra un acelerómetro con sus partes.



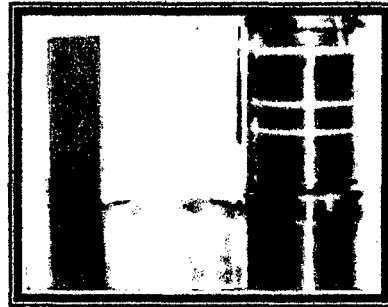
Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

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. La figura 5.2 muestra un geófono.

Figura 5.2: Geófono utilizado para medición directa de señal.



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.

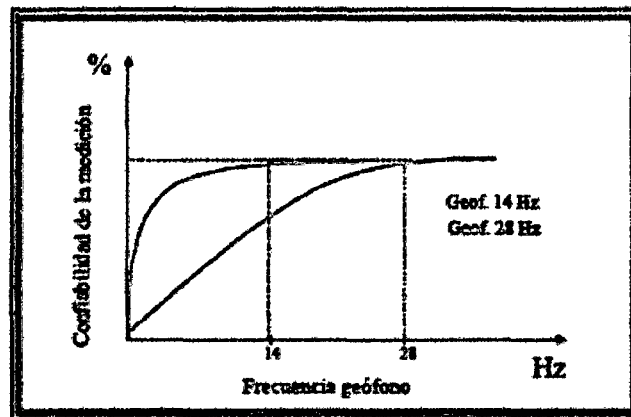
En primera instancia el equipo de vibraciones debe ser tal que los geófonos asociados a la medición sean los adecuados para medir el nivel de vibraciones esperado, es decir, si su sensibilidad es la adecuada. Para tal efecto se debe conocer los niveles máximos esperados en la medición, tanto en frecuencia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

5.1.3 Frecuencia de registro de 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 la 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 5.3 da cuenta de la precisión de la medición respecto al nivel de frecuencia esperado en el registro.

Figura 5.3: Precisión de medición vs nivel de frecuencia.



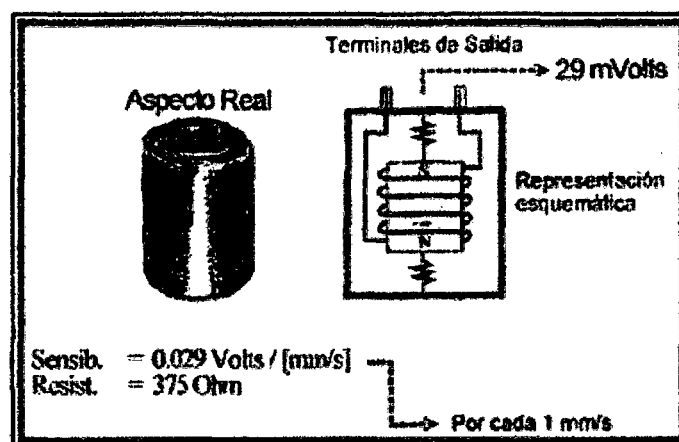
Fuente: Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos de ENAEX (CINTEX)

5.1.4 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.

Ver figura 5.4.

Figura 5.4: Muestra la Sensibilidad de un Geófono



Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics

5.1.5 Desplazamientos máximos

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.

5.1.6 Numero 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 modulo del vector de velocidad de partículas.

Si el interés principal es confirmar la detonación de cada carga (o grupo de cargas en cada retardo), o la medición de la dispersión de los retardos, entonces se requerirá 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.

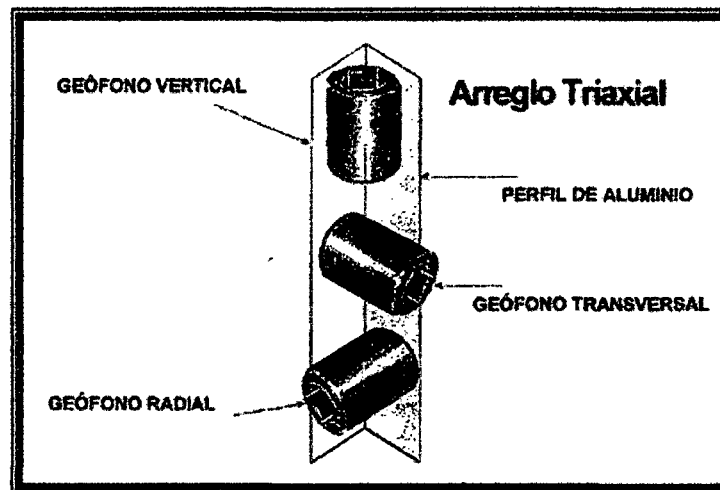
5.1.7 Instalaciones

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 (ver figura 5.5), se logra ubicando cada una de las tres componentes sobre las caras opuestas de un pequeño trozo de barra en ángulo rígido no conductor. Es necesario

mantener una disposición coherente de las tres componentes que asegure, al momento de la instalación, que los primeros arribos de las señales sean de signo positivo o negativo, y esto se mantenga constante.

Figura 5.5: Se presenta un Arreglo Triaxial

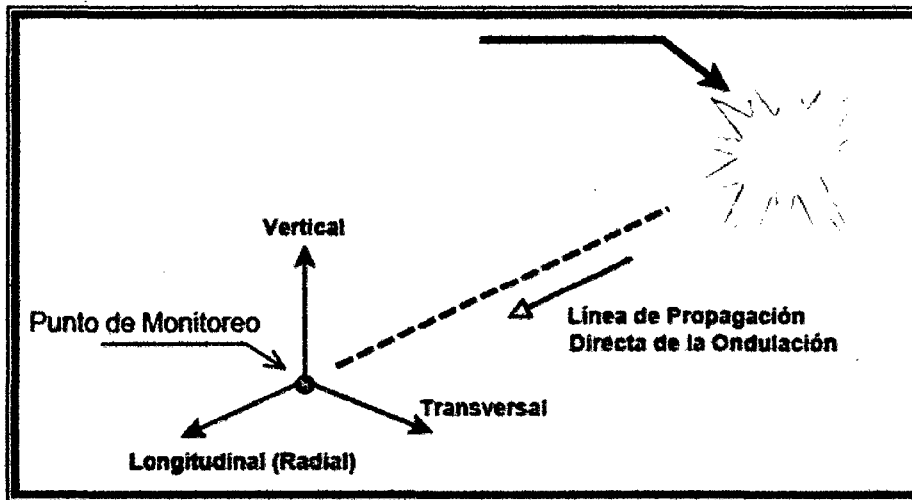


Fuente: Curso de Voladura, ASP Blastronics

5.1.8 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. Tal como muestra la figura 5.6.

Figura 5.6: Orientación real de un transductor.

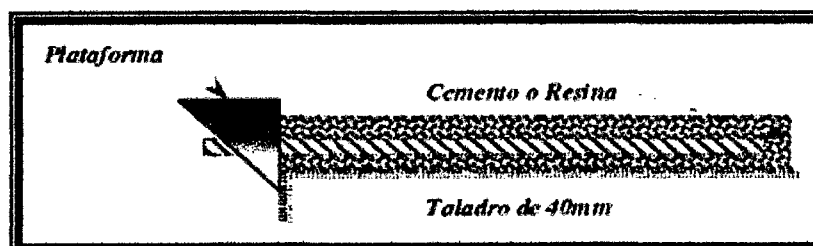


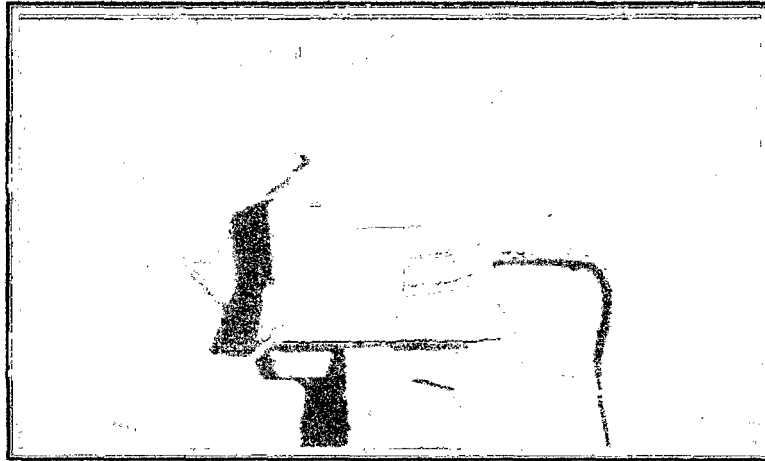
Fuente: Curso de Voladura, ASP Blaestronics

5.1.9 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 interface entre los dos medios esto es, la roca y el instrumento detector. Ver figura 5.7

Figura 5.7: Instalación de un transductor.





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 roca tendrá una velocidad pico de partícula (VPP) o máxima amplitud de la onda. La velocidad pico de 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.

5.2 EQUIPOS 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: ver figura 5.8.

- 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

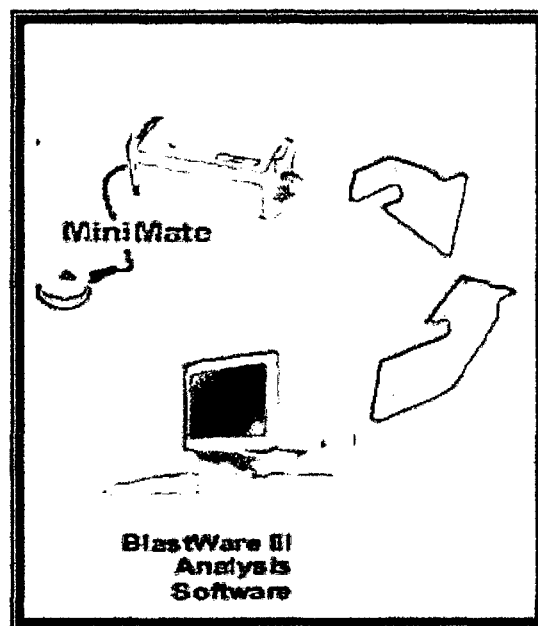


Figura 5.8: Arreglo para la descarga de la información del Sismógrafo hacia la PC

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

5.2.1 Características del 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 (N° de serie del equipo y versión del software) **%128K Mem left: 95** (memoria disponible en el equipo)

B. 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 >= 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

Al 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.

5.2.2 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 velocidad 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.

a) 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:

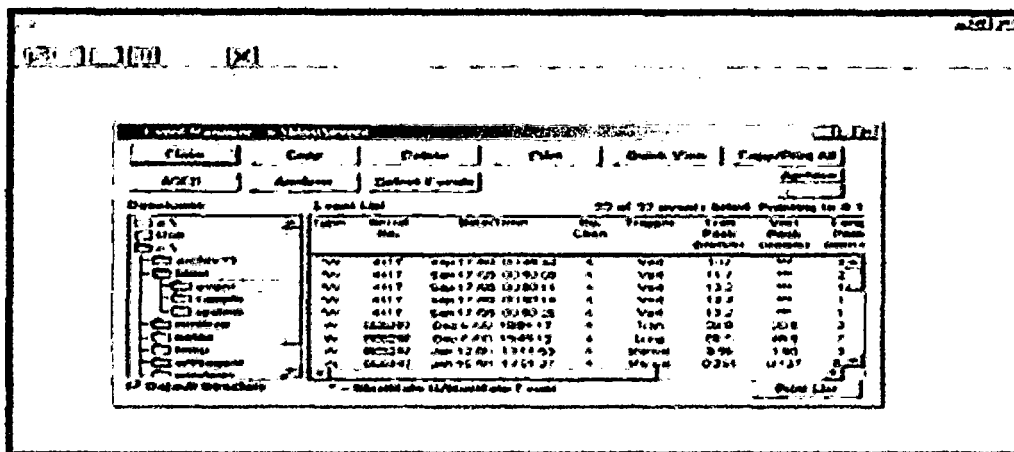


Figura 5.8: Se muestra el software Blastware III

Una vez abierto el software, se cierra la primera ventana (CLOSE) y luego se inicia en. **Unit y Communication Setups**: Ver figura 5.9

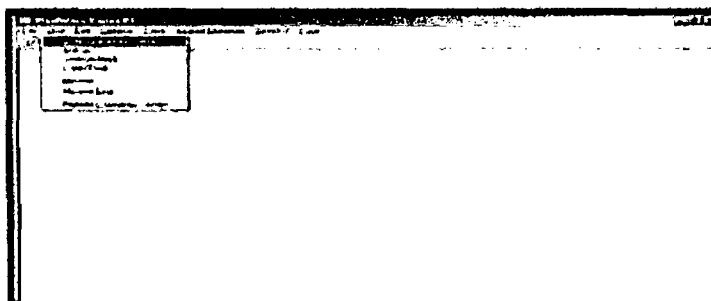


Figura 5.9: Unit Communication Setups

Para obtener el siguiente mensaje; tal como se muestra la figura 5.10

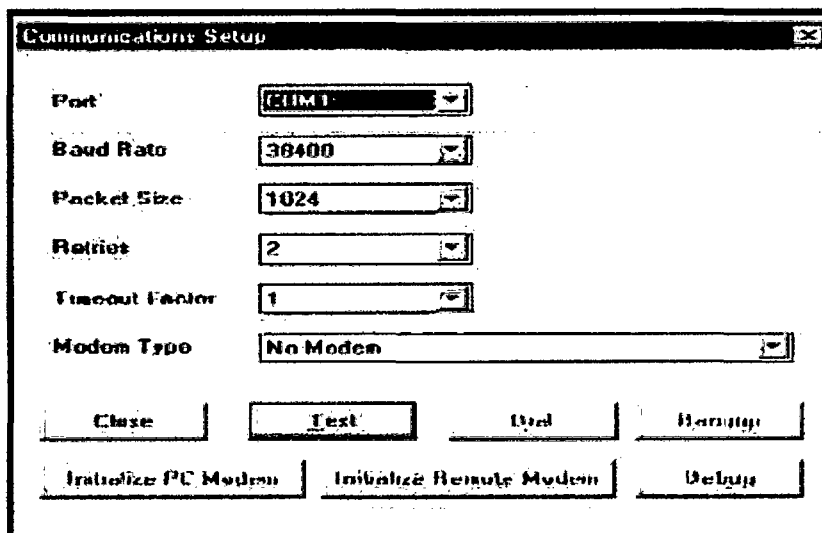


Figura 5.10: Cmunications Setups

Presione el botón **Test** y la computadora le comunicará que el equipo está recibiendo la información. Ver figura 5.11

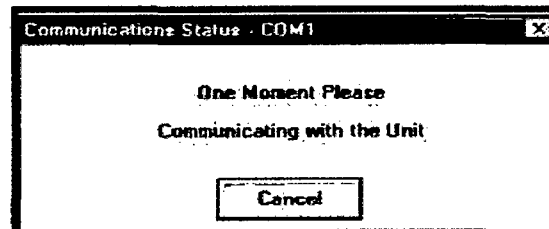


Figura 5.11 muestra la comunicación con la unidad

Y posteriormente se confirmará la misma (Communications Ok.). Se cierra la ventana y se puede ver el evento en **File/Event Manager**. Ver figura 5.12

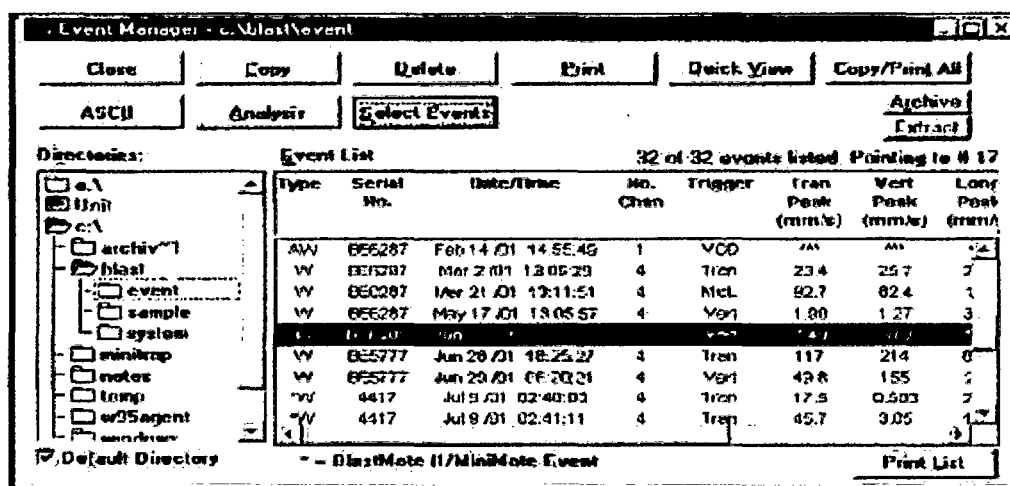


Figura 5.12: Se muestra el evento en el archivo

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; ver figura 5.13

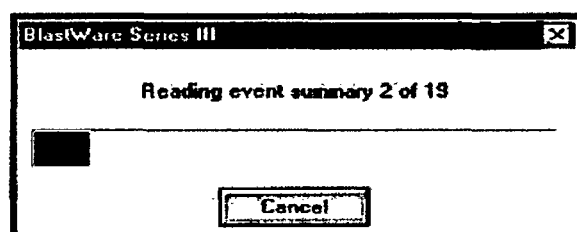


Figura 5.13: Mensaje recibido y en proceso.

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; tal como

muestra la figura 5.14.

Screen 2 Event Manager MiniMole B 4417

Event List

Type	Serial No.	Date/Time	Trigger	Tran Peak (mm/s)	Vert Peak (mm/s)	Long Peak (mm/s)	She Peak (ps)	PVS (mm/s)	Location
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:40:00	Tran	17.5	0.5	2.5	2.0L	17.7	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:41:15	Tran	45.7	3.0	10.2	2.0L	45.7	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:41:10	Tran	65.0	27.0	14.2	2.0L	63.2	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:41:22	Tran	58.9	110.7	16.2	2.0L	120.3	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:43:48	Tran	208	0.5	8.4	2.0L	22.2	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:40:38	Tran	13.7	1.5	8.1	8.0L	15.0	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:42:44	Tran	11.7	1.2	6.1	5.0L	13.1	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:40:26	Long	65.0	3.0	59.8	4.0L	78.4	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 02:40:36	Vert	6.4	10.2	0.6	2.0L	14.3	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 9, 01 03:05:03	Vert	6.0	19.7	0.5	2.0L	15.0	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 10, 01 12:57:51	Vert	7.9	24.4	6.4	2.0L	25.2	JOB # 0010
✓✓	4417	Jul 10, 01 12:59:47	Vert	8.0	27.7	7.1	2.0L	22.1	JOB # 0010
✓✓	4417	Sep 17, 03 00:45:34	Vert	101.5	120.0	33.5	2.0L	131.3	
✓✓	4417	Sep 17, 03 00:50:03	Vert	11.7	130.0	20.3	2.0L	130.6	
✓✓	4417	Sep 17, 03 00:50:11	Vert	12.2	120.0	15.2	2.0L	130.6	
✓✓	4417	Sep 17, 03 00:50:18	Vert	12.2	120.0	17.3	2.0L	130.6	

Refresh Copy Delete All Cancel

Figura 5.14: Se muestra en la pantalla los eventos.

Luego se hace Copy: Ver figura 5.15

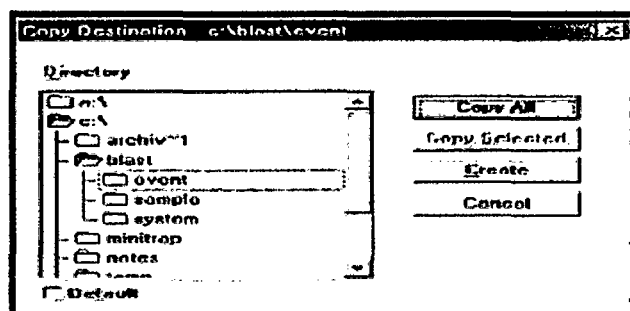


Figura 5.15: Se muestra el directorio para copiar eventos.

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). Figura 5.16.

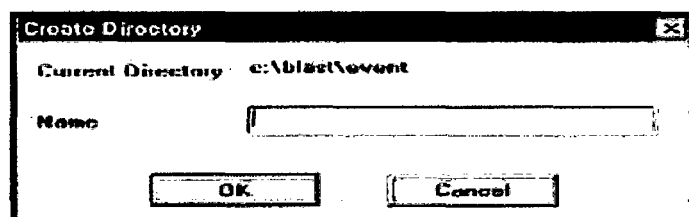


Figura 5.16: Se muestra la creación de directorio.

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 más 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.

b) Reporte y análisis

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; de las figuras 5.17, 5.18, 5.19.

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 Instante! Inc.
 File Name LF80CMZ9.0Q0

Notes

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

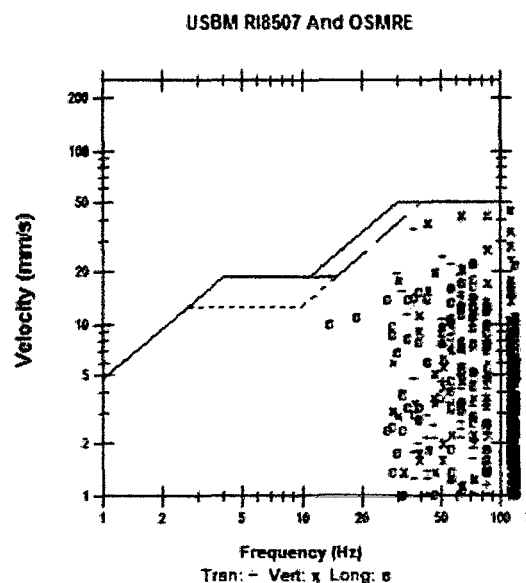


Figura 5.17: Grafico de frecuencia versus velocidad

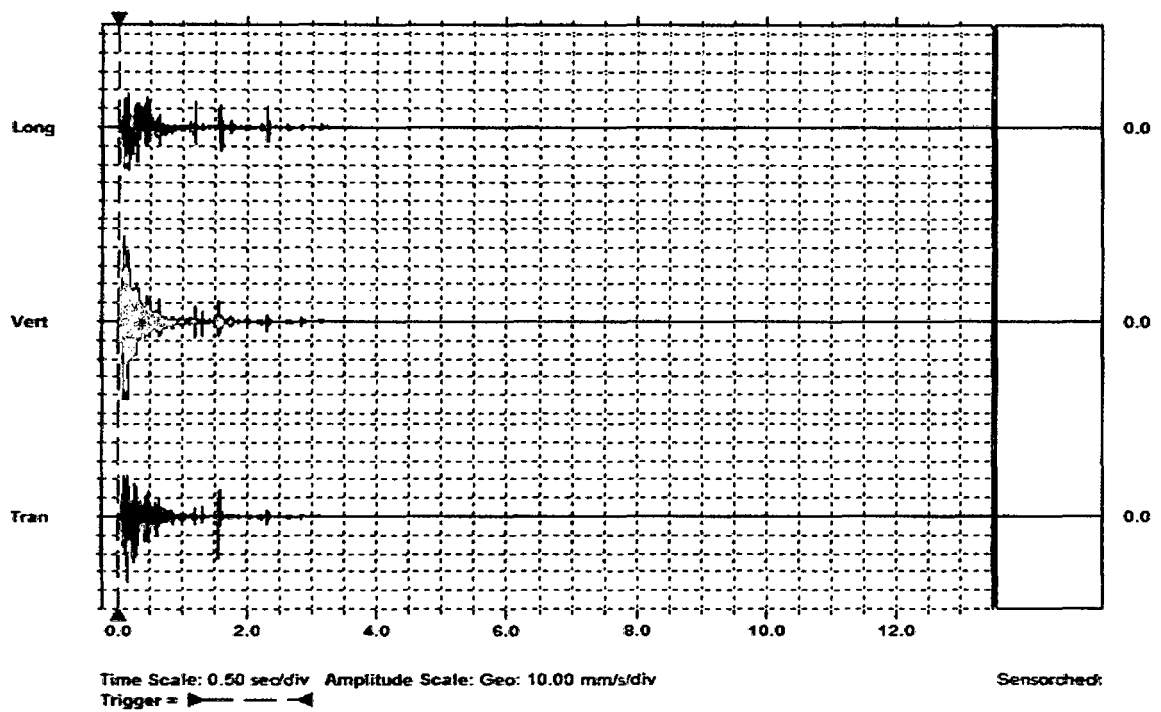


Figura 5.18: Se muestra las amplitudes de escala.

Con llave:

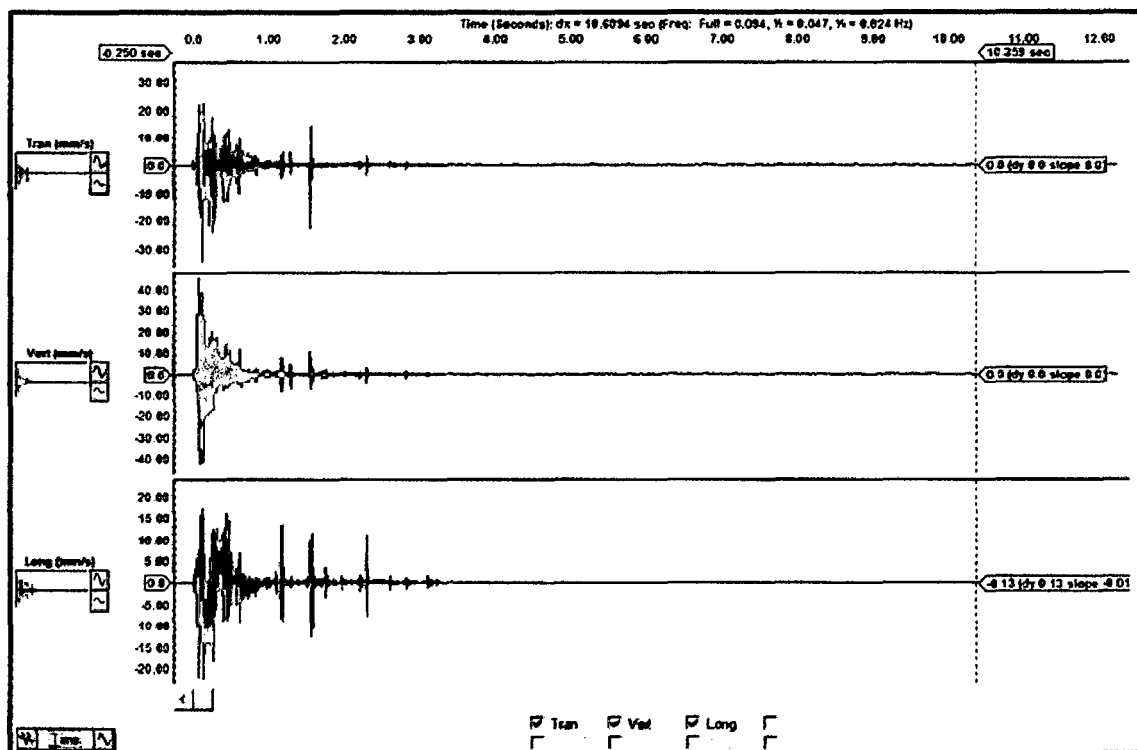


Figura 5.19: Tiempo de frecuencia completos.

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.

5.3 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 figura 5.20

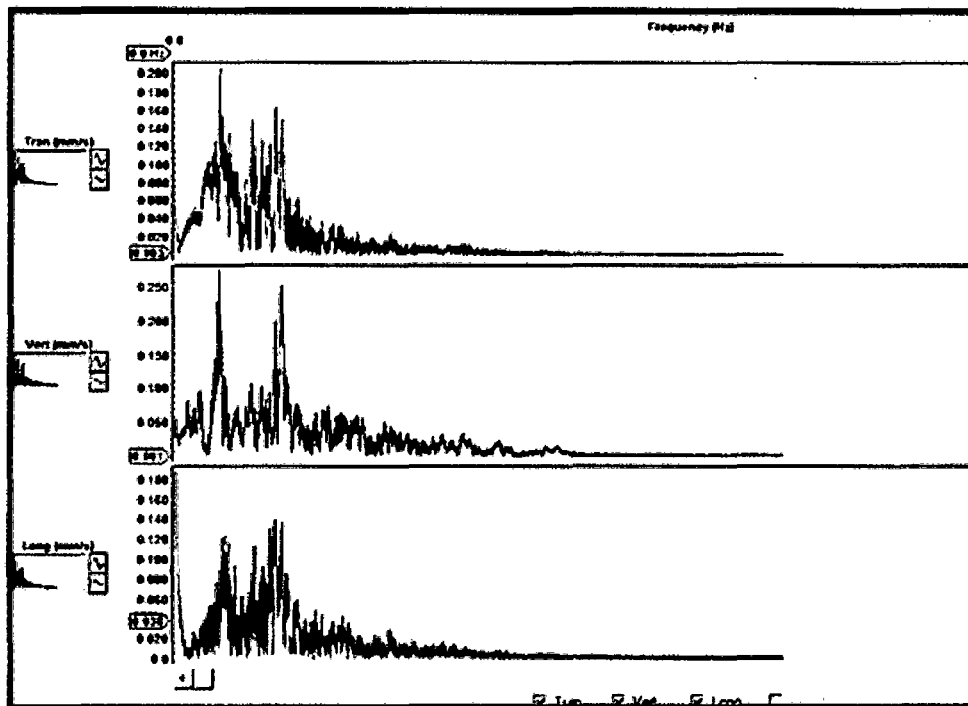


Figura 5.20: Frecuencia de onda.

5.4 MODELOS DE VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA

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

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

Criterio

Coeficiente Escalar

Criterio General Exponencial

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

Criterio General

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

Langerfors (1963)

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

Hendron (Bulletin 656)

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

Devine (1962)

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

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

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

5.4.1 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

$$PPV = K * D^{\alpha} \dots\dots\dots 13$$

Dónde:

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 **DEVINE** plantea la relación.

$$V = K * \left[\frac{d}{W^{1/2}} \right]^{-\alpha} \dots\dots\dots 14$$

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 roca es menor que la presión en el taladro.

- La onda transmitida es siempre compresiva (el término 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 se tendrá restricciones a las voladuras y los criterios de daño. Ver gráfico 5.1

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

Grafico 5.1: se muestra el factor de amplitud K y factor de atenuación Alfa de Variabilidad en los parámetros del Modelo de Vibración. Devine, para diferentes Minas y Macizos.

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.

5.4.2 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). Que muestra la relación para el modelamiento. Ver figura 5.21

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

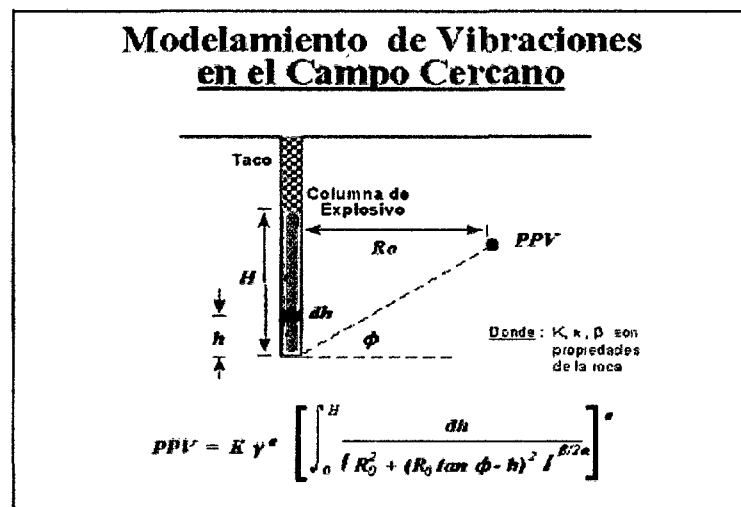


Figura 5.21: Modelamiento de vibraciones en el campo cercano.

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

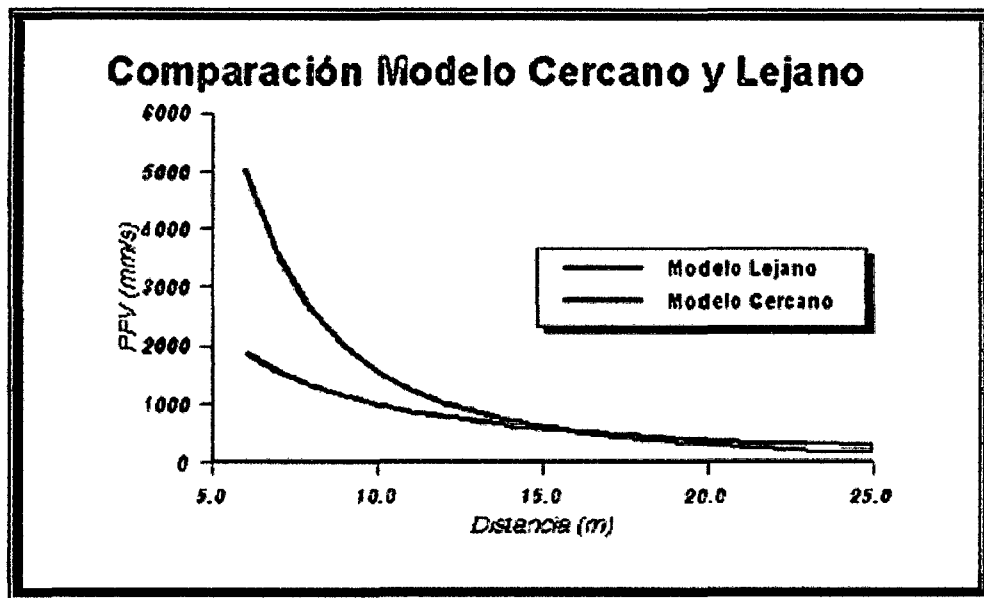
en la ecuación de Devine, sino que más bien la carga lineal, que se controla por una combinación de diámetro del hoyo y densidad de carga.

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).

5.4.3 Comparación de modelos (Deviney, Holmberg y 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. Ver figura 5.22

Figura 5.22: 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 Blastrocnics

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.

5.5 MONITOREO DE VIBRACIONES

5.5.1 Objetivo de monitoreo

La medición de las vibraciones tiene como objetivo principal detectar y

registrar el movimiento vibratorio de roca. 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 5.23 indica un registro genérico de la velocidad de partículas.

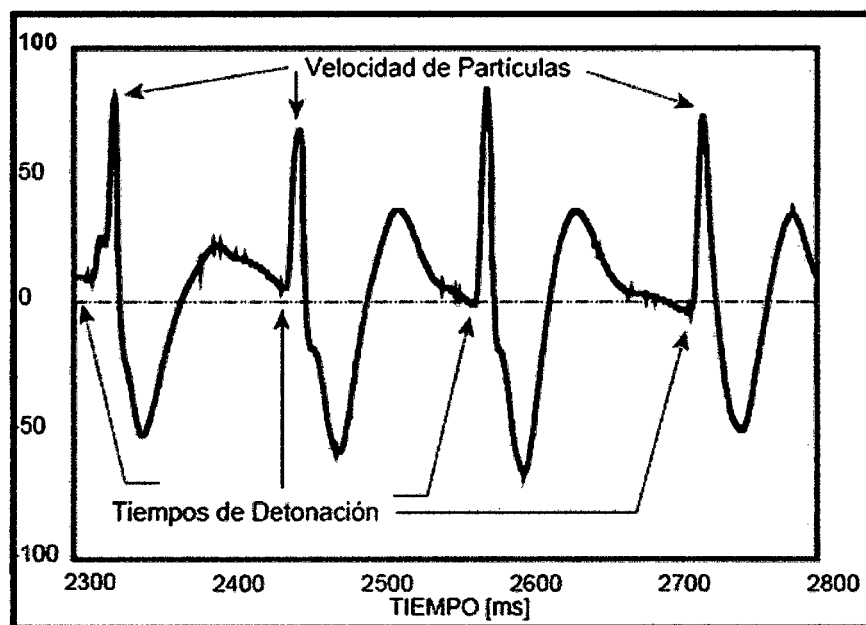


Figura 5.23: Registro Genérico de la Velocidad de Partículas

5.5.2 Obtención de datos

a) Verificación de 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.

b) 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. Ver figura 5.24

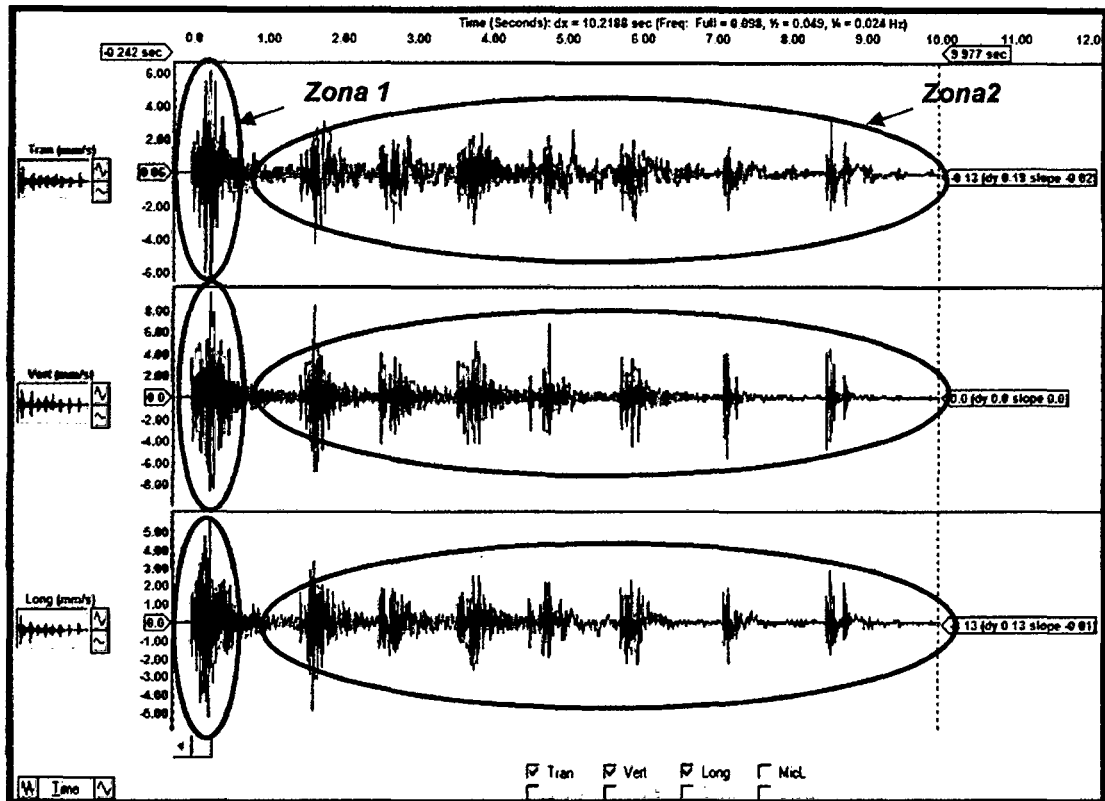


Figura 5.24: *Medición de Vibraciones de una Voladura en Frentes*

Zona 1: En el arranque es normal ver una alta concentración de carga explosiva y el uso de tiempos de retardo muy cortos entre sí, 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 sí, 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.

c) Detonación de cargas en 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. Ver figura 5.25

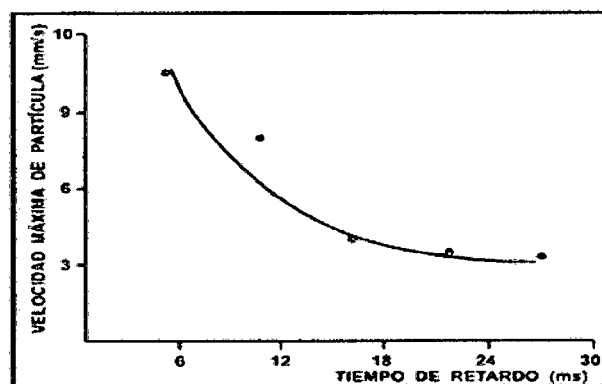


Figura 5.25: Influencia del intervalo de retardo en el nivel máximo de vibración.

d) Dispersión de tiempos con 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.

Considerando 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.

CAPITULO VI

MODELAMIENTO DE VIBRACIONES

6.1 VIBRACIONES DE CAMPO LEJANO

6.2 DATOS DE LABORATORIO

Estas muestras de bloques rocosos por cada tajeo han sido llevadas para su análisis y evaluación a la universidad nacional del altiplano. 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

6.2.1 Ensayos de propiedades físicas

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

Los resultados son los siguientes:

Muestra	Densidad seca g/ cm³	Densidad Húmeda g/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	23.8

Tabla N° 6.1: Ensayos de propiedades físicas en muestras de roca y mineral.

6.2.2 Ensayos de compresión simple

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D 293

Los resultados son los siguientes:

Muestra	Diámetro cm	Altura cm	Carga Kgf	Resistencia a la compresión simple kg/cm²	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

Tabla N° 6.2: Resultados de ensayos de la resistencia a la compresión en muestra de roca y mineral.

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

6.2.3 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:

Tabla 6.4: Resultados de ensayos de prueba bajo compresión triaxial

Codigo	Muestra	Diametro cm	Longitud cm	Carga Kg	Confin.	Mi	Angulo de fricción interna	Cohesión Mpa
Tj 052	1	2.61	5.86	740	2	2.5	18.8	3.2
	2	2.69	6	960	4			
	3	2.69	5.72	1200	6			
Tj828	1	3.12	5.85	1020	2	3.2	19.5	3.2
	2	3	6.17	1205	4			
	3	3.14	6.06	1700	6			
Tj 748	1	3.2	6.03	710	2	3.5	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	28.8	54.7	12.2
	2	3.04	5.91	8550	4			
	3	3.04	6.22	10050	6			

Fuente: Laboratorio de mecánica de Rocas de Compañía Titán SAC.

6.2.4 Ensayos de propiedades elásticas

Los resultados son los siguientes:

Tabla 6.4: Resultados de ensayos de propiedades elásticas.

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

Fuente: Laboratorio de mecánica de Rocas de la UNA

Coefficiente o Relación de Poisson: Es el ratio 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 ratio 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.

6.2.5 Calculo de 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)

$$\begin{aligned} RMR &= 9 \ln Q + 44 \\ Q &= \text{Exp}(RMR - 44)/9 \end{aligned} \dots\dots\dots 15$$

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

$$Vp = (1000 * \text{Log } Q) + 3,500 \dots\dots\dots 16$$

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.

$$Nz = \frac{\delta e \times Vod}{\delta r \times Vs} \dots\dots\dots 17$$

Dónde:

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

δe : Densidad del explosivo (g/cm³)

δr : Densidad de la roca ((g/cm³)

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

Tabla 6.5: Resultados de la velocidad de onda P en macizo rocoso.

6.3 CALCULO DE LA VELOCIDAD PICO DE PARTÍCULA

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

$$V_{ppc} = (\sigma_t \times V_p) / E \dots\dots\dots 18$$

Dónde:

Vppc : Velocidad Pico Partícula Crítica (mm/s)

σ_t : Resistencia a la Tracción (MPa)

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

E : Módulo de Young (GPa)

1. VPPC Tj 052:

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

2. VPPC Tj 828:

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

3. VPPC Tj 748:

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

De todas pruebas realizadas en los tajeos para el estudio, las únicas que no sobrepasaron las cargas máximas por retardo y por consiguiente no ocasionó creación de nuevas fracturas, fueron las que detonaron con dinamita, las otras alternativas sobrepasaron las cargas máximas por retardo, razón por la cual se consideran estos valores.

6.4 MODELAMIENTO DE 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. Presentado en la figura 6.1.

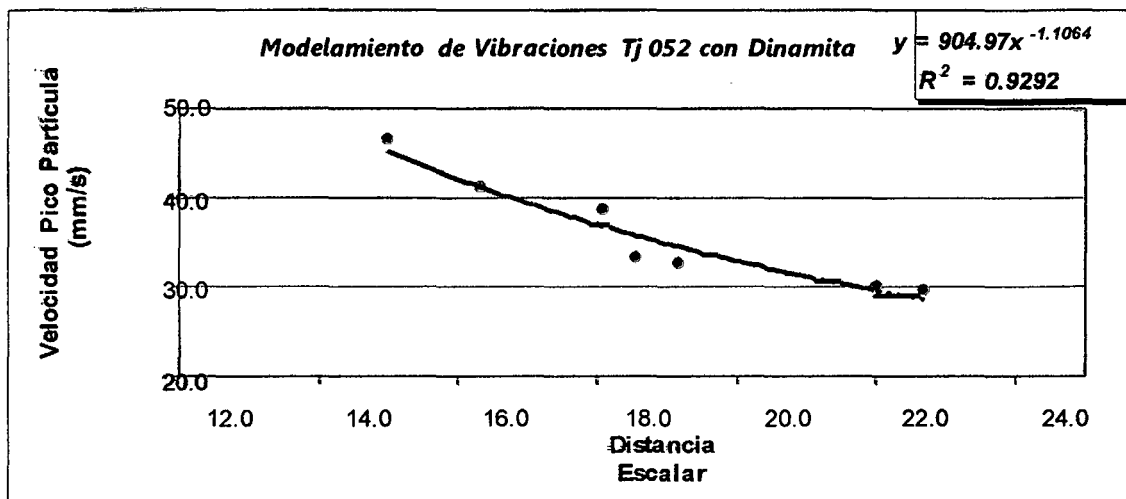


Figura 6.1: Modelamiento en Tj 052 usando dinamita.

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

$$y = 904.97X^{-1.106} \approx V_{pp} = 904.97 \left(\frac{d^{-1.1064}}{\sqrt{W}^{-1.1064}} \right) \dots\dots\dots 19$$

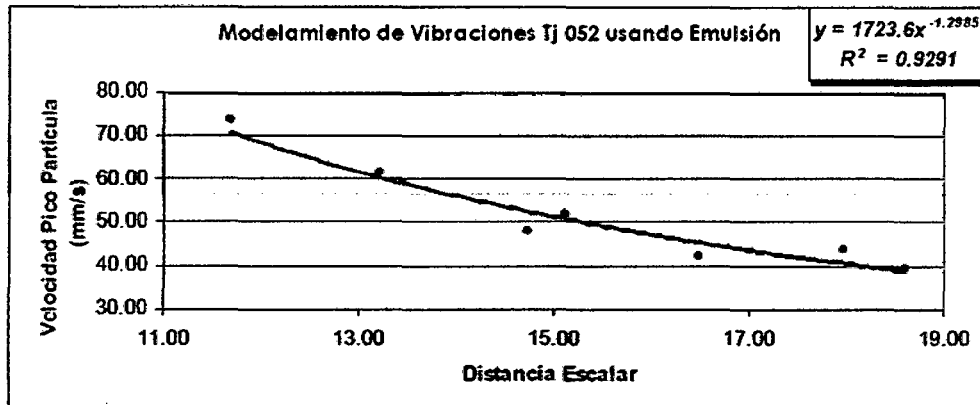


Figura 6.2 Modelamiento en el Tj 052 usando emulsión

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

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

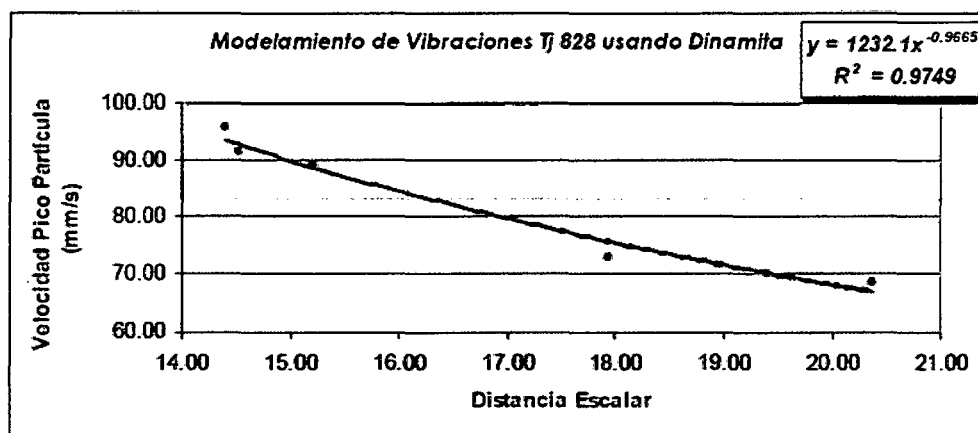


Figura 6.3: Modelamiento en el Tj 828 usando dinamita:

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

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

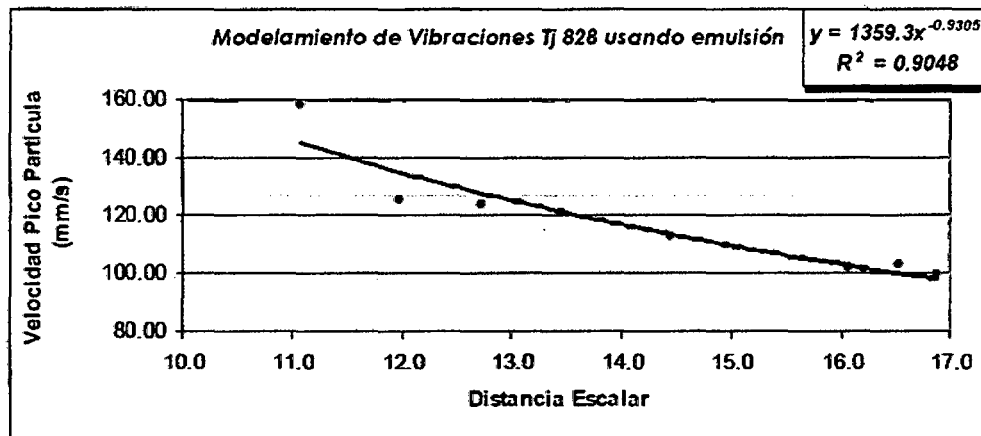


Figura 6.4: Modelamiento en el Tj 828, usando emulsión

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

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

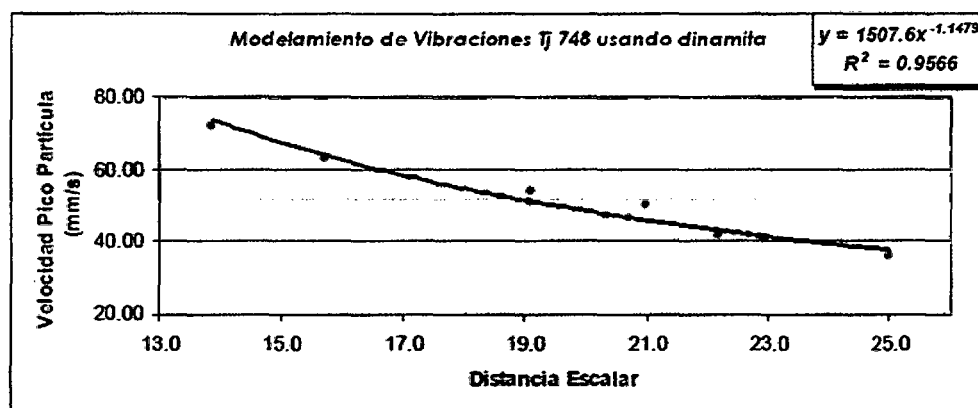


Figura 6.5 Modelamiento en el Tj 748, usando dinamita

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

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

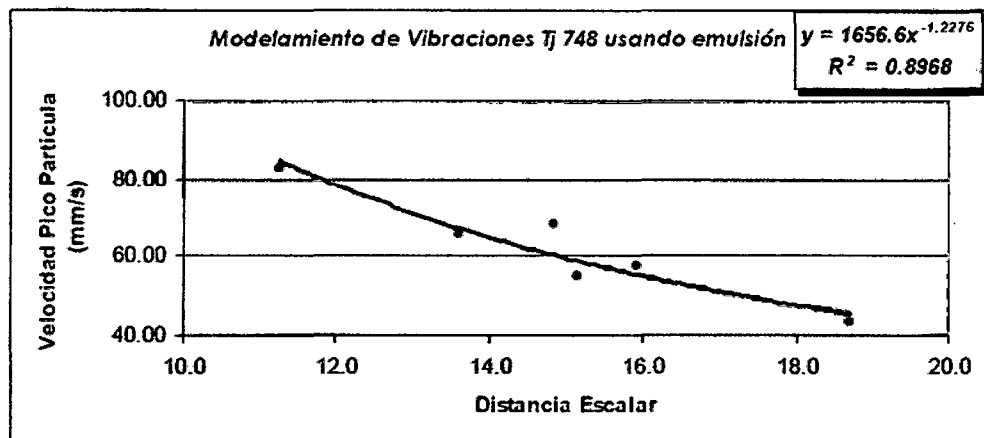


Figura 6.6: Modelamiento en el Tj 748, usando emulsión.

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

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

6.4.1 Análisis de daños

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 a la roca 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. 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 Kimlström (Bollinger, 1980; Persson et al, 1994)⁵, 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 (tal como lo exigen algunas normas), 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 las rocas.

6.4.1.1 Normatividad internacional en el manejo de las voladuras.

Todas estas normas han sido elaboradas en países con condiciones de rocas, 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, para el proceso de adaptación de ellas. El siguiente cuadro 4.1, presenta distintas normas, y en la figura 4.7 presenta un resumen de velocidades de onda.

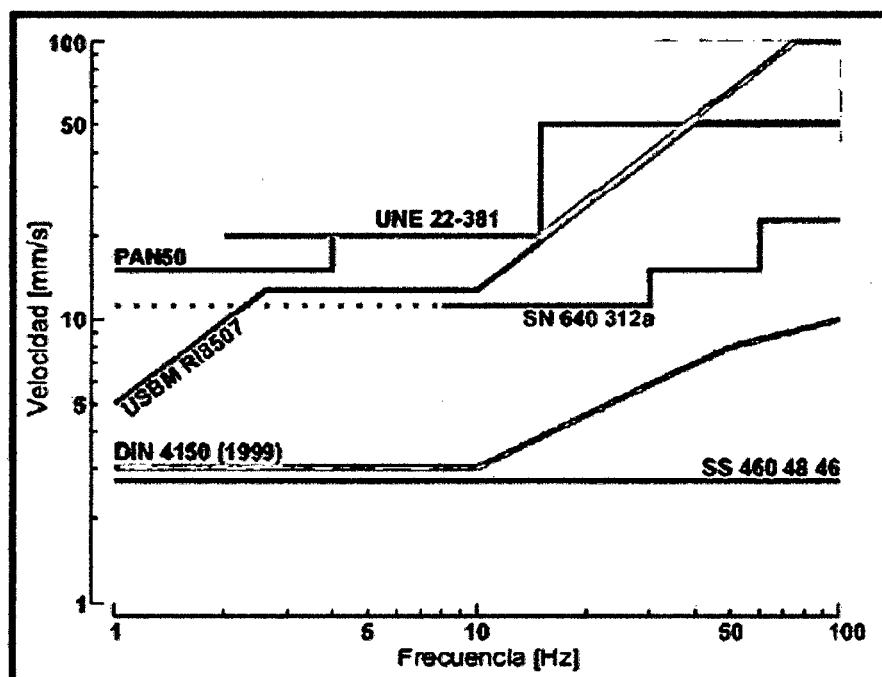
Pais de procedencia	Nombre de reglamentación	Fecha de expedición
Alemania ^a	DIN 4150	1975
Brasil	CETESB D7.013	1998
Escocia	PAN50	2000
EEUU - Federal	USBM R18507	1980
EEUU - Federal	OSM 817.67	1983
España	UNE 22-381-93	1993
Francia	Recomendaciones GFEE	2001
Internacional	ISO 4866	1990
Italia	UNI 9916	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.

Cuadro 6.1: 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.

Figura 6.7 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.

6.4.1.2 Indicé 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.

$$V_{ps} = (V_{ppL}^2 + V_{ppt}^2 + V_{ppv}^2)^{0.5} \dots\dots\dots 20$$

V_{ppL}: Velocidad Pico Partícula Longitudinal (mm/s)

V_{ppt}: Velocidad Pico Partícula Transversal (mm/s) V_{ppv}: Velocidad Pico Partícula Vertical (mm/s)

Para calcular el BDI:

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

.....21

V_{ps} : Vector suma de la Velocidad Pico Partícula (m/s)

d : Densidad de la roca (gr/cc)

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

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

BDI	TIPO DE DAÑO	OBSERVACIONES
0.125	No hay daño	Máximo para trabajos permanentes
0.250	Daño no considerable	Máximo tolerable trabajos grandes
0.500	Menores efectos de excavación	Máximo 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
2.000	Excesiva sobre excavación	Abandono de labor

Tabla: 6.6: Tipos de daño causados por voladura.

Con el resultado obtenido se procede a comparar los resultados con la tabla 6.6, para ver qué tipo de daño se está generando.

6.4.2 Criterio de daños

$$Vps = (VppL^2 + Vppt^2 + Vppv^2)^{0.5} \dots\dots\dots 22$$

Intenso fracturamiento	4 *
VPPC Creación de nuevas fracturas	1 *
VPPC Extender fracturas preexistentes	¼ *

VPPC

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

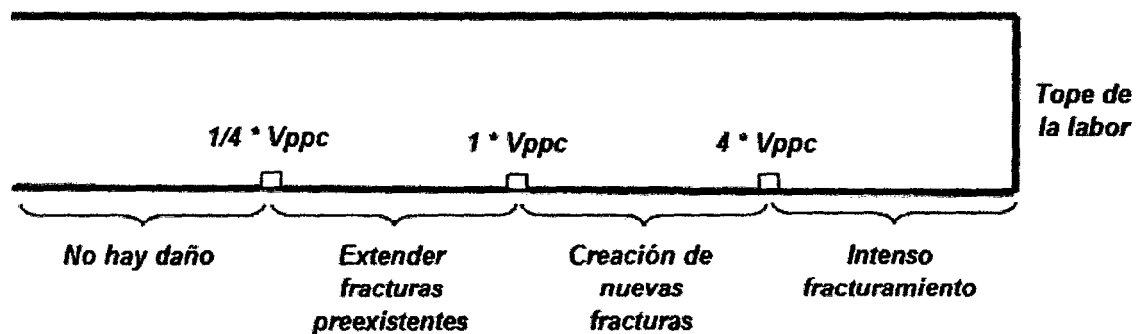


Figura 6.8: Criterios de daño excesivo a distancia diferentes del tope de la labor.

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

Tj 052 – Dinamita:

Carga Operante: 3.2 kg

Tajo 052 - Dinamita		Distancia	Vpp
RMR	25	0.5	3677.9
Q	0.12	1.5	1098.4
Vs	2579.18	1.68	969.7
σ_t	0.439	5	292.1
E	1.17	5.95	241.3
Vppc	967.74	10	136.3
K	904.97	15	87.3
α	1.10	20	63.6
Kg explosivo	3.2	25	49.7
		30	40.7

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

Cuadro 6.2: Carga operante de 3.2 kg en el Tj 052, con dinamita.

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

Carga Operante: 2.4 kg

Tajo 052 - Dinamita		Distancia	Vpp
RMR	25	0.5	3139.7
Q	0.12	1.46	966
Vs	2579.18	1.5	937.7
σ_t	0.439	5	249.4
E	1.17	5.15	241.4
Vppc	967.74	10	116.3
K	904.97	15	74.5
α	1.1	20	54.3
Kg explosivo	2.4	25	42.5
		30	34.7

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

Cuadro 6.3: Carga operante de 2.4 kg en el Tj 052, con dinamita.

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

Tajo 052 – Emulsión:

Carga Operante: 4.32 kg

Tajo 052 - Emulsión		Distancia	Vpp
RMR	25	0.5	10830.6
Q	0.12	1.11	3871.3
Vs	2579.18	1.5	2625.2
σ_t	0.439	3.25	968.3
E	1.17	5	555.5
Vppc	967.74	9.55	241.1
K	1723.6	10	227.2
α	1.29	15	134.6
Kg explosivo	4.32	20	92.9
		25	69.7
		30	55.1

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

Cuadro 6.4: Carga operante de 4.32 kg en el Tj 052, usando emulsión.

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

Carga Operante: 3.24 kg

Tajo 052 - Emulsión		Distancia	Vpp
RMR	25	0.5	8996.4
Q	0.12	0.96	3878
Vs	2579.18	1.5	2180.6
σ_t	0.439	2.82	965.9
E	1.17	5	461.4
Vppc	967.74	8.25	241.8
K	1723.6	10	188.7
α	1.29	15	111.8
Kg explosivo	3.24	20	77.2
		25	57.9
		30	45.7

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

Cuadro 6.5: Carga operante de 3.24 kg en el Tj 052, usando emulsión.

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

Tj 828 – Dinamita:

Carga Operante: 3.2 kg

Tajo 828 - Dinamita		Distancia	Vpp
RMR	35	0.5	4223.8
Q	0.37	1.5	1460.7
Vs	3068.2	1.56	1406.4
σ	0.69	5	456.3
E	1.51	6.59	349.4
Vppc	1402.03	10	233.5
K	1232.1	15	157.8
α	0.97	20	119.5
Kg explosivo	3.2	25	96.3
		30	80.7

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

Cuadro 6.6: Carga operante de 3.2 kg en el Tj 828, usando dinamita.

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

Carga Operante: 2.4 kg

Tajo 828 - Dinamita		Distancia	Vpp
RMR	35	0.5	3690.2
Q	0.37	1.36	1398
Vs	3068.2	1.5	1271.3
σ	0.69	5	395.4
E	1.51	5.67	350
Vppc	1402.03	10	201.9
K	1232.1	15	136.2
α	0.97	20	103.1
Kg explosivo	2.4	25	83
		30	69.5

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

Cuadro 6.7: Carga operante de 2.4 kg de dinamita, usado en el Tj 828.

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

Tj 828 – Emulsión:

Carga Operante: 4.32 kg

Tajo 828 - Emulsión		Distancia	Vpp
RMR	35	0.5	5114.1
Q	0.37	1.5	1841
Vs	3068.2	2.01	1402.3
σ_t	0.69	5	600.9
E	1.51	8.93	350.4
Vppc	1402.03	10	315.4
K	1359.3	15	216.3
α	0.93	20	165.5
Kg explosivo	4.32	25	134.5
		30	113.5

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

Cuadro 6.8: Carga operante de 4.32 kg de emulsión, utilizado en el Tj 828.

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

Carga Operante: 3.24 kg

Tajo 828 - Emulsión		Distancia	Vpp
RMR	35	0.5	4473.8
Q	0.37	1.5	1610.5
Vs	3068.2	1.74	1402.8
σ_t	0.69	5	525.6
E	1.51	7.73	350.5
Vppc	1402.03	10	275.9
K	1359.3	15	189.2
α	0.93	20	144.8
Kg explosivo	3.24	25	117.7
		30	99.3

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

Cuadro 6.9: Carga operante de 3.24 kg de emulsión, utilizado en el Tj 828.

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

Tj 748 – Dinamita:

Carga Operante: 3.2 kg

Tajo 748 - Dinamita	
RMR	40
Q	0.64
Vs	3306.18
σ_t	0.83
E	1.69
Vppc	1623.75
K	1507.6
α	1.15
Kg explosivo	3.2

Distancia	Vpp
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

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

Cuadro 6.10: Carga operante de 3.2 kg de dinamita, utilizado en el Tj 748.

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

Carga Operante: 2.4 kg

Tajo 748 - Dinamita	
RMR	40
Q	0.64
Vs	3306.18
σ_t	0.83
E	1.69
Vppc	1623.75
K	1507.6
α	1.15
Kg explosivo	2.4

Distancia	Vpp
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

Cuadro 6.11: Carga operante de 2.4 kg de dinamita, utilizado en el Tj 748.

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

Tj 748 – Emulsión:

Carga Operante: 4.0 kg

Tajo 748 - Emulsión	
RMR	40
Q	0.64
Vs	3306.18
σ_t	0.83
E	1.69
Vppc	1623.75
K	663.2
α	1.09
Kg explosivo	4

Distancia	Vpp
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

Cuadro 6.12: Carga operante de 4.0 kg de emulsión, utilizado en el Tj 748.

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

Carga Operante: 3.0 kg

Tajo 748 - Emulsión	
RMR	40
Q	0.64
Vs	3306.18
σ_t	0.83
E	1.69
Vppc	1623.75
K	663.2
α	1.09
Kg explosivo	3

Distancia	Vpp
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

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

Cuadro 6.13: Carga operante de 3.0 kg de emulsión, utilizado en el Tj 748.

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

6.4.3 Técnicas planteadas de análisis para reducción de daños

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)⁶, 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 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 de los macizos rocosos.

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, debo 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.

6.5 CALCULO DE CARGA MÁXIMA CON 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:

$$V_{pp} = K \left(\frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-\alpha} \dots\dots\dots 23$$

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:

$$W_{max} = \left(\frac{V_{ppc} \times d^{\alpha}}{K} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \dots\dots\dots 24$$

De ésta forma, se genera una herramienta útil de trabajo, ya que es posible establecer con rigor curvas de isovalores de velocidades de vibración previsibles 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 $d = 1.5m$ debido a que es la separación entre los cuadros de madera. Que se utiliza, ver tabla 6.7.

Tajeos	W Max calculado
Tajeo 052 – Dinamita	2.54 kg
Tajeo 052 – Emulsión	2.54 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

Tabla 6.7: Carga máxima de dinamita por tajeo.

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} .

Tajeos	W_{max} calculado	W_{max} usado	W_{min} usado
Tajeo 052 - Dinamita	2.54 kg	3.20 kg	2.40 kg
Tajeo 052 - Emulsión	2.54 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

Tabla 6.8: Calculo por debajo y por encima de la carga máxima.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- Las vibraciones producidas por la voladura y el conocimiento de las propiedades geo mecánicas del macizo rocoso, permiten estimar la probabilidad de ocasionar daño en el macizo macizo para de esta forma llevar el mejor control en las operaciones de minado.
- 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,
- 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. Además 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.

- 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, al macizo rocoso en el entorno de la excavación. También en las pruebas realizadas se encontró que los factores de carga son menores con el empleo de dinamitas que con el uso de emulsiones a pesar de haber reducido el número de taladros cargados, esto se da debido a la diferencia de densidades que hay entre uno y otro explosivo.

RECOMENDACIONES

- Realizar y aplicar otro tipo de pruebas para mejorar y hacer la comparación del nivel de daño ocasionado en el macizo rocoso y así llevar un control más eficiente en las operaciones de minado.
- 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 incrementa el número de monitoreos en cada zona la ecuación de vibraciones debe estar variando y ajustándose más al comportamiento real del movimiento o vibraciones en el macizo rocoso, con la finalidad de llegar a un modelo confiable.
- Buscar no siempre el explosivo más barato, sino el que pueda realizar un determinado trabajo eficiente con el menor costo y que además no incurra en costos adicionales. Razón importante para tener en cuenta el costo global y no

solo el costo del explosivo. También establecer puntos de monitoreo fijos, cuando se desee realizar el control de vibraciones para estructuras importantes en la operación como es el caso de piques, cámaras, estaciones de bombeo, etc.

- Debido a los resultados obtenidos con las emulsiones (caída de cuadros y sobre excavación), se recomienda desechar el uso de emulsiones al 100% en los frentes.

BIBLIOGRAFÍA

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

ENAEX S.A., Manual de Tronadura. España, ENAEX S.A.

HOEK E. / BROWN E.T, (1985) “Excavaciones subterráneas en roca”, Traducción. México. U.N.A.M

INGEMMET (2003) Reconocimiento de las actividades Mineras Metalúrgicas en la Cordillera Sur oriental, San Antonio de Putina. Lima, INGEMMET.

INGEMMET (2000) Estudio de los recursos minerales del Perú, Franja N° 02. Lima, INGEMMET.

INGEMMET, (1968), Boletín, Serie B: Geología Económica. Boletín Serie B. Lima, INGEMMET.

JIMENO L, (1994) “Manual de Perforación”, 2da Edición. Madrid, E.P.M

- KIHIEM A.**, (1990) “Geología y Génesis del yacimiento aurífero San Antonio de Poto”. Centro de estudios y promoción de Ciencias de la Tierra, el Oro. Lima, CEPET.
- LAUBACHER G.**, (1978) “Estudio geológico de la Región Norte del lago Titicaca”. Lima, INGEMMET.
- MINERO PERU**, (1982) “Planeamiento para el desarrollo del proyecto aurífero San Antonio de Poto, operación experimental con monitores”. Lima, INGEMMET.
- NAVARRO T.V, MARQUES B.P**, (2004) “El BLASTWARE III como herramientas para la prevención y control ambiental de vibraciones en voladuras”. Lisboa, Universidad Técnica de Lisboa.
- ORSTOM INGEMMET** (1983) “Oro primario y Detrítico de las cordillera Sur oriental del Perú, el papel en la geomorfías de la formación de placeres”. Convenio 1980-1983. Lima, INGEMMET.
- PASCUAL DE BLAS, J.A.** (2002), “Problemática de las vibraciones en las voladuras, medición, control y regulación legal”. España, Unión Española de Explosivos S.A.
- SÁNCHEZ L.E**, (1995) “Control De Vibraciones”. Sao Paulo, Departamento de Engenharia de Minas Escola Politécnica da Universidad de São Paulo.
- SCHERPENISSE O.C**, (2006), “Monitoreo y modelamiento de vibraciones para el control y evaluación del daño por voladuras”. Cuba.ASP Blastronics.
- SCHERPENISSE, R.C., ADAMSON, R.W**, (2000), “Monitoreo y modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las voladuras de desarrollo horizontal”. COLOMBIA, ASP BLASTRONICS S.A.

SOCIEDAD INTERNACIONAL DE INGENIEROS DE EXPLOSIVOS, (2008)

“Manual del Especialista en Voladura”. 17ª Edición. España. ITGE.

SOCIEDAD INTERNACIONAL DE INGENIEROS DE EXPLOSIVOS, (2006)

“Fundamentos Prácticos de Voladura”. Perú. ISEE.

ZORRILLA F., (1970) “Minera aurífera Aluvial Zona de Puno, yacimientos auríferos departamento de Puno”. Lima-UNI. TESIS.

ANEXOS

- 1. Plano número uno:** Disposición final de desmonte.
- 2. Plano número dos:** Diseño de desmonte - Ana María 5.
- 3. Plano número tres:** Localización Ana María 5
- 4. Plano número cuatro:** Perfil longitudinal (Galería de exploración)
- 5. Plano número cinco:** Perfil planta (Galería de exploración)
- 6. Planos número seis A,B,C,D:** Mallas de perforación y voladura