

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA, MINERA Y METALURGICA



**“CONTROL DE DAÑOS INDUCIDOS POR LA VOLADURA DE
ROCAS”**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

**ELABORADO POR:
ARNOLD DITHER PUENTE HUARIPATA**

**ASESOR
ING. ADOLFO JESÚS CHAVEZ VALDIVIA**

**LIMA – PERU
2014**

DEDICATORIA

A la luz del señor, nuestro guía y maestro.

A Micaela y Ángel con mucho amor y cariño, mis abuelos.

A mis padres, esposa e hijos por motivarme, por tenerme paciencia y
ser la inspiración de mi trabajo.

AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a todas las personas que de una u otra manera colaboraron para la realización del presente trabajo, en especial al Dr. Carlos Agreda Turriate; quien con sus sabias enseñanzas, consejos y observaciones han contribuido a la realización del mismo.

RESUMEN

Para la fragmentación de las rocas se hace necesario la utilización de explosivos los cuales pueden generar alteraciones como vibraciones, ondas aéreas y proyecciones de fragmentos de roca que en algunas circunstancias pueden originar daños en las estructuras próximas a los sitios de explotación y accidentes fatales, etc.

El presente informe de suficiencia tiene por objetivo describir y explicar los últimos avances para el control eficiente de los daños inducidos por la voladura de rocas, para lo cual se ha recopilado la información más actualizada y las últimas tecnologías con las que se trabaja en la práctica de hoy en día.

Se comenzará un primer capítulo donde se analiza la teoría de generación y propagación de las vibraciones y ondas aéreas producidas por la voladura, la metodología de estudio, los criterios de daños aplicables y los parámetros de diseño que debe considerar el ingeniero para controlar dichos impactos ambientales. En un segundo capítulo se analizará el desarrollo y la ejecución eficiente de técnicas de voladura controlada para minimizar los daños en las paredes finales. En el tercer y último capítulo se describe los métodos para el control de proyecciones y/o lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura de roca "Flyrock".

En cada capítulo se podrán encontrar aplicaciones reales realizadas en campo, principalmente de mi experiencia en la empresa Pevoex Contratistas SAC, empresa peruana que presta servicios a los sectores de la minería y construcción, con una experiencia calificada en la tecnología de explosivos, perforación y voladura de rocas.

ABSTRACT

For the rock fragmentation the use of explosives is necessary, which can generate environmental impacts like vibrations, air wave and rock projections that can originate damages in the structures next to the operation sites, and also fatal accidents, etc.

The present report describes and explain the latest developments for the efficient control of the damage induced by blasting. For which was compiled the most up to date information and the latest technologies that is being used today.

First chapter describes the theory of generation and propagation of vibrations and air blast produced by blasting, the study methodology, criteria applicable to damages and design parameters that should be considered to control these environmental impacts. In the second chapter the development and execution of controlled blasting techniques to minimize damage in the end walls will be analyzed. In the third and final chapter the methods for controlling the projections of fragments of rock induced by blasting is described.

In each chapter you will find real applications made in the field, mainly my personal experience in the business Pevoex Contractors SAC, a Peruvian company that provides services to the sectors of mining and construction, with a qualified technology of explosives, drilling experience and blasting rocks.

CAPITULO II.- DESARROLLO Y EJECUCIÓN EFICIENTE DEL DISEÑO DE	
VOLADURA CONTROLADA.....	61
2.1 Factores que influyen en la estabilidad del macizo rocoso	62
2.2 Mecanismos de daños inducidos por la voladura	63
2.3 Diseño de la voladura controlada	64
2.4 Los métodos usados para la voladura controlada	64
2.5 Implementación del diseño.....	72
2.6 Aplicación: Evaluación de voladuras de corte de talud en roca (Proyecto Toromocho).....	73
2.6.1 Caracterización geomecánica del macizo rocoso.....	73
2.6.2 Voladura con aplicación del metodo de Precorte.....	75
2.6.2.1 Determinación de los parámetros del Precorte	75
 CAPITULO III.- CONTROL DE PROYECCIONES DE FRAGMENTOS DE ROCA	
INDUCIDAS POR LA VOLADURA	78
3.1 Cálculo de parámetros de perforación y voladura.....	78
3.2 Cómo se originan las proyecciones de fragmentos de roca.....	78
3.2.1 Modelos matemáticos mas usados para predecir el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura.....	79
3.2.2 Modelo Matemático de la SDEREFO.....	80
3.3 Uso de protecciones.....	81
3.4 Recomendaciones para el control de proyecciones de fragmentos de roca inducidos por la voladura	82
 CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA	88

INDICE DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1.1 Variabilidad de los parámetros del Modelo de Vibraciones de Devine, para diferentes minas y macizos rocosos.....	27
TABLA 1.2 Estimación de la Velocidad Pico de Partícula Crítica Teórica en distintos tipos de roca.....	33
TABLA 1.3 Dimensiones del espesador.....	50
TABLA 1.4 Velocidades máximas de partículas.....	51
TABLA 1.5 Valores de velocidad de propagación de la onda V_p	55
TABLA 1.6 Frecuencia para distancias críticas entre espesador y zanja.....	55
TABLA 1.7 Resumen de valores de vibraciones simuladas.....	58
TABLA 1.8 Valores entregados por los geófonos.....	60
TABLA 2.1 Parámetros de diseño de la fila del ajuste inicial.....	68
TABLA 2.2 Evaluación RMR del corte en talud típico.....	74
TABLA 2.3 Parámetros de cálculo del precorte.....	74

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1.1 Diagrama Modelos Estocástico y Determinístico.....	13
FIGURA 1.2 Flujo ingreso de parámetros y productos de la herramienta de Simulación de Montecarlo.....	14
FIGURA 1.3 Tipos de ondas.....	20
FIGURA 1.4 Modelamiento de Vibraciones en Campo Cercano.....	28
FIGURA 1.5 Diferencia en la predicción de vibraciones según el Modelo Devine y Holmberg&Persson.....	30
FIGURA 1.6 Modelos de acelerómetros.....	39
FIGURA 1.7 Geófono Triaxial.....	40
FIGURA 1.8 Confiabilidad de la medición por tipo de Geófono.....	42
FIGURA 1.9 Sensibilidad de un Geófono.....	43
FIGURA 1.10 Equipo Minimate Plus – Instantel.....	48
FIGURA 1.11 Arreglo para la descarga de la información del sismógrafo hacia la pc.....	49
FIGURA 1.12 Actual espesador – diseño de zanja para nuevo espesador.....	50
FIGURA 1.13 Sector de prueba – configuración de las cargas explosivas para realizar las pruebas.....	51
FIGURA 1.14 Distribución de geófonos para pruebas.....	52
FIGURA 1.15 Muestra de los datos obtenidos en escala logarítmica con los respectivos modelos (50% y 80%).....	53
FIGURA 1.16 Ábaco de diseño según carga explosiva.....	53

FIGURA 1.17	Ábaco de diseño según nivel de vibraciones.....	54
FIGURA 1.18	Onda elemental cálculo V_p	54
FIGURA 1.19	Frecuencia – tiempos de acoplamiento de ondas en función de la distancia.....	56
FIGURA 1.20	Retardo coincidente 33 ms.....	56
FIGURA 1.21	Tiempos de retardo adecuados.....	57
FIGURA 1.22	Diseños y puntos de control – variables de entrada.....	59
FIGURA 1.23	Distribución – contornos isovibraciones.....	59
FIGURA 1.24	Zanja construida.....	60
FIGURA 2.1	Parámetros de diseño de talud.....	62
FIGURA 2.2	Daño en la cara del banco por la voladura.....	64
FIGURA 2.3	Diseño modificado de voladura en condiciones favorables.....	65
FIGURA 2.4	Ajuste del diseño de voladura en condiciones favorables.....	66
FIGURA 2.5	Ajustes de diseño de voladura para condiciones desfavorables.....	67
FIGURA 2.6	Típico diseño de precorte.....	68
FIGURA 2.7	Diseño de precorte en condiciones desfavorables.....	70
FIGURA 2.8	Opciones de carga del precorte.....	70
FIGURA 2.9	Directrices de precorte.....	71
FIGURA 2.10	Requisitos para la voladura controlada.....	72
FIGURA 2.11	Superficie de corte en talud típico.....	74
FIGURA 2.12	Vista general de la excavación donde se observa los cortes del talud.....	77
FIGURA 3.1	Típica proyección de fragmentos de roca.....	79

INTRODUCCION

La voladura de rocas es la operación unitaria fundamental en la industria, la razón es que esta ciencia continúa siendo la más barata y la que permite obtener mayor producción de material fragmentado comparado con otros métodos como por ejemplo, los métodos mecánicos como lo son: martillos demolidores, rozadoras, excavadoras hidráulicas o tractores. Uno de los principales inconvenientes de su utilización es que, como consecuencia directa, se produce la generación de vibraciones en el medio circundante además de otros problemas medioambientales como ruido, ondas aéreas, polvo y/o proyecciones; y esto se complica por la existencia de vida animal o humana en los alrededores.

La mejora constante en la ciencia de la voladura de rocas, hace que sea posible el aprovechamiento de yacimientos de baja ley en explotaciones a cielo abierto y de interior. Asimismo la obra pública y la construcción se han beneficiado del uso de los explosivos, lo que ha contribuido a la apertura de nuevas y mejores vías de comunicación y a poder construir en lugares donde hasta hace poco no era posible.

Sin embargo, el empleo de explosivos conlleva necesariamente a la generación de movimientos sísmicos en el terreno, ya que, en promedio, un 40% de la energía del explosivo se emplea en generar ondas sísmicas que se transmiten al entorno disipándose con la distancia. Otros factores, tales como el acercamiento paulatino entre los lugares de voladuras y centros poblados, y la utilización de mayores diámetros de taladros, junto con el aumento del nivel de vida, han

contribuido a la sensibilización de la gente ante este problema. Por estas razones y otras, a veces insólitas, como la influencia de las vibraciones en la flora y fauna, el control de las vibraciones se ha hecho hoy día indispensable a la hora de diseñar las voladuras, tal y como venía sucediendo en varios países desarrollados desde hace varias décadas.

Esta situación provoca que hoy en día, este problema, presente una incidencia muy directa sobre los costos de cualquier labor de perforación y voladura. Los diámetros de perforación, altura de banco, secuencia de encendido y, en general, todo el conjunto de parámetros que van a definir la voladura, van a venir condicionados por este fenómeno, y consecuentemente cualquier proyecto de voladuras realista, en zonas con proximidad de núcleos y/o estructuras, ha de basarse en una operación que minimice y/o evite este problema.

Hasta el momento se han realizado varias investigaciones con el fin de poder predecir los niveles de las vibraciones inducidas por la voladura; desde el año 1930, el U.S.B.M ha realizado grandes esfuerzos para investigar varios aspectos que se encuentren involucrados directa o indirectamente con el tema.

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

El objetivo principal del uso de los métodos de voladura controlada, es de controlar los efectos de una voladura y minimizar los daños en las paredes finales, conservando la calidad de la estructura rocosa circundante al disparo.

CAPITULO I

CONTROL DE VIBRACIONES INDUCIDAS POR LA VOLADURA DE ROCAS

Los constantes desarrollos de nuevas expansiones en minas a open pit o la necesidad de la construcción de nuevas instalaciones para soportar aumentos de producción, llevan a la necesidad de realizar voladuras cercanas a instalaciones (plantas de chancado, subestaciones eléctricas, laboratorios, oficinas, etc.) que al comienzo del proyecto se encontraban alejadas de los puntos productivos. Este nuevo escenario obliga a tomar decisiones como trasladar las instalaciones, asumiendo su costo, o realizar voladuras con un alto nivel de control que permita minimizar los efectos negativos (niveles de vibraciones, flyrock, etc).

Realizar voladuras cercanas a instalaciones requiere de un diseño, en términos de configuración de carga, secuenciamiento y orientación de salida, que minimice los niveles de vibraciones inducidas por la detonación de una mezcla explosiva comercial. El desarrollo de nuevos métodos y herramientas de análisis permiten evaluar el potencial impacto de las diferentes variables de diseño que intervienen en el proceso. La aplicación de estos métodos están basados en el siguiente algoritmo:

- a) Instrumentación
- b) Obtención de datos (registros)

- c) Análisis de datos
- d) Construcción de modelos predictivos de vibraciones
- e) Obtención de parámetros roca (V_p), parámetros roca / explosivo, etc.
- f) Aplicación de herramientas computacionales

La aplicación de lo mencionado anteriormente requiere alimentar el sistema de buena información y representativa del sector a controlar y/o modelar. Este punto es relevante para garantizar que los productos entregables generados por las simulaciones y/o modelos estén dentro de la "realidad del proceso". Para conseguir este objetivo el tipo de instrumentación seleccionada, su instalación y calidad de equipos de registro (capacidad de muestreo) son relevantes; asegurados estos aspectos, los datos para la construcción de los modelos predictivos serán absolutamente representativos de la "realidad". Hoy en día, con la introducción de herramientas basadas en modelos estocásticos es posible obtener una distribución de resultados probables, condición muy diferente a los resultados obtenidos usando modelos determinísticos.

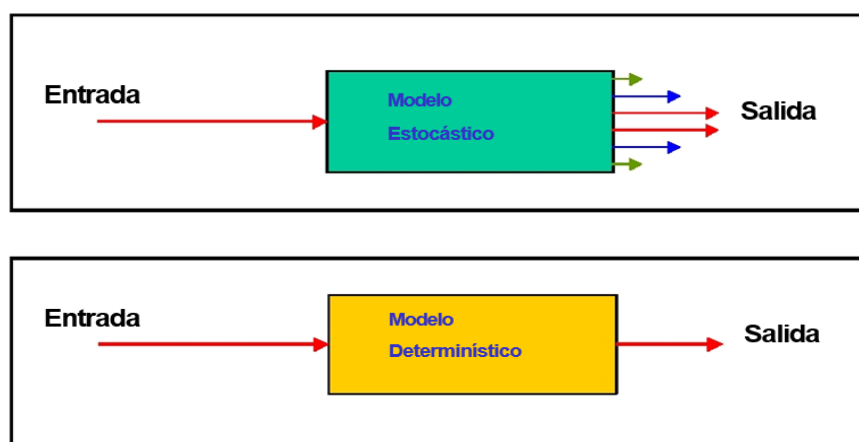


Figura 1.1 Diagrama Modelos Estocástico y Determinístico

La herramienta de simulación de niveles de vibraciones utiliza el método de simulación de Montecarlo, que analiza distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios. Los productos obtenibles del proceso de simulación son:

- Distribución (predicción basada en la probabilidad)
- Onda probable
- Predicción de frecuencias
- Contornos isovibratoriales

La Figura 1.2 muestra el flujo de entrada de las variables y los productos entregables del proceso de simulación.

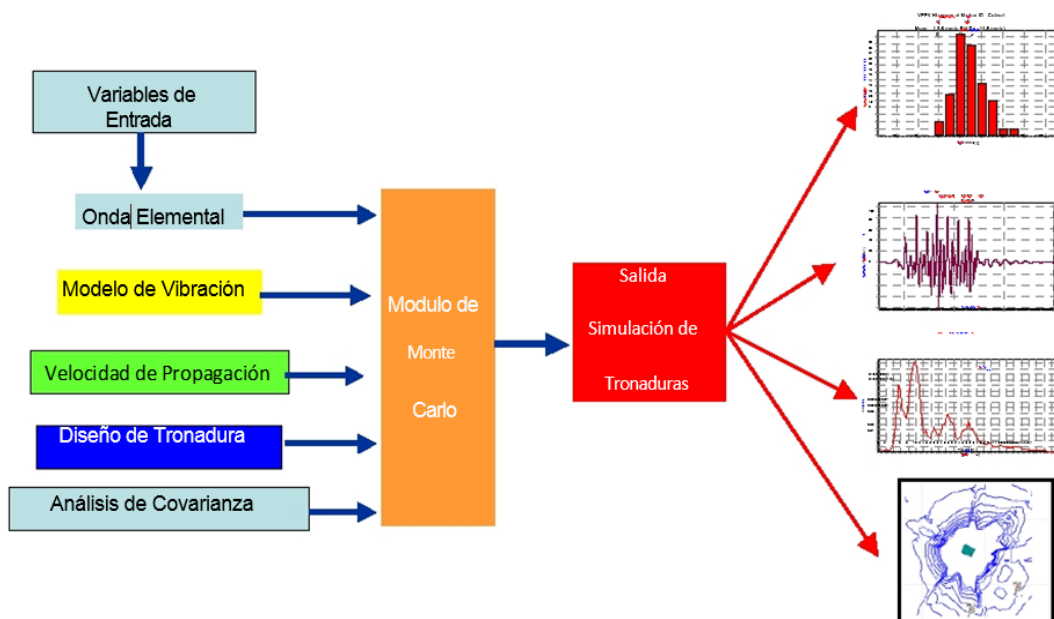


Figura 1.2 Flujo ingreso parámetros y productos de la herramienta de simulación de Montecarlo

Es importante mencionar que el potencial de daño en instalaciones o construcciones, está muy influenciada por la construcción en sí, tipo de fundación, tipo de suelo, grado de alteración de roca, características (amplitud, frecuencia) y

duración del efecto vibratorio como la velocidad de la propagación en la roca, además del tipo de material utilizado en la construcción.

1.1 Definición de vibraciones

Las vibraciones vienen a ser un fenómeno de transmisión de energía que se refleja en la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio.

La detonación de un explosivo cargado en un taladro localizado en un macizo rocoso genera de una forma casi instantánea un gran volumen de gases a altas temperaturas y elevadas presiones. La aplicación brusca de estas presiones tan elevadas sobre las paredes del taladro produce un choque o impacto brusco, provocando en cada punto del macizo deformaciones axiales y tangenciales en diferentes direcciones, produciendo de esta manera la fragmentación del macizo en sus proximidades.

Como es de esperarse el explosivo trabaja con una determinada eficiencia, lo que muestra que no toda la energía es utilizada para causar rotura sino un porcentaje de esta es liberada al ambiente propagándose a través del macizo rocoso, napa freática y aire; desplazándose a diferentes velocidades. La amplitud de este movimiento ondulatorio disminuye a medida que se aleja del punto principal de detonación. Estas vibraciones que se transmiten a través del macizo rocoso como ondas sísmicas, cuyo frente se desplaza en forma radial a partir del punto de detonación, se clasifican en dos grupos:

- Ondas Internas
- Ondas Superficiales

Dentro de las Ondas Internas las más importantes son las Ondas Longitudinales o Primarias "P" y las Transversales o Secundarias "S", y dentro de las superficiales las que se generan más comúnmente son las Ondas Love y las Ondas Rayleigh. Como las ondas viajan con diferentes velocidades y los tiempos

de retardo utilizados en voladuras varían ampliamente, las ondas generadas se superponen unas con otras en el tiempo y en el espacio (por condiciones geométricas y secuencia de iniciación), por lo que resultan movimientos complejos. Para analizarlas se requiere la utilización de sensores dispuestos según tres direcciones ortogonales: radial, transversal y vertical. El paso de una onda sísmica por un medio rocoso produce en cada punto de éste un movimiento que se conoce por vibración.

El daño en voladura se traduce en una pérdida de las propiedades resistivas del macizo rocoso producto de la creación del nuevo fracturamiento y extensión de estas por la penetración de gases, en el caso de algunas minas a cielo abierto, este daño se puede extender hasta cientos de metros detrás de la última línea de diseño. En contraste con la pérdida de propiedades resistivas debido a la relajación de tensión o la dilatación, es posible llegar a una cuantificación aproximada de ésta pérdida relacionando el peak de vibración generado con las propiedades del macizo rocoso.

1.2 Generación de las ondas sísmicas por voladura

Cuando un explosivo confinado en el interior de un taladro localizado en un macizo rocoso, detona, genera en forma casi instantánea un volumen de gases a una presión y temperatura elevada, esta aparición brusca de una presión elevada sobre las paredes del taladro, actúa como un choque o impacto brusco que se manifiesta en forma de onda de deformación a través del macizo rocoso entorno al taladro. Esa onda de deformación/tensión transmitida es cilíndrica en el caso de carga cilíndrica, distribuida en el taladro o esférica, en caso de carga puntual, aunque a considerable distancia del taladro con relación a su longitud puede considerarse la detonación reducida a un punto y en consecuencia la onda de

propagación como esférica, luego la tensión que soporta un elemento material será función inversa de la distancia.

La energía vibracional es proporcional a la cantidad de explosivo.

$$E = p * Q$$

Donde:

E = Energía vibracional

Q = Energía producida por la detonación de la mezcla explosiva comercial. Función de la resistencia de la roca.

p = Es la proporción de energía total del explosivo empleada en generar vibraciones en voladuras convencionales, en las que no existe gran confinamiento, este valor es 0.4 aprox.

1.3 Tipos de Ondas Elásticas

En un espectro de ondas, viajan superpuestas un conjunto de ondas que se podrían considerar individuales. Cada una de estas ondas, tiene una serie de características propias que la diferencian de las demás. Estas características son: forma de vibración, velocidad de transmisión, amortiguamiento y medio en el que se transmiten.

Según el medio en el que se transmiten las ondas, se pueden clasificar en ondas internas y ondas superficiales.

1.3.1 Ondas Internas

Las ondas internas viajan dentro del macizo rocoso y se transmiten de forma esférica en el mismo. La velocidad de transmisión depende de la roca, siendo tanto más alta cuanto más dura y frágil sea la misma.

Estas ondas internas, no producen cambios de volumen en el macizo rocoso a gran escala. Se puede decir que lo que estiran de una parte lo contraen de otra de manera que la vibración total es nula. Las ondas internas se clasifican en:

1.3.1.1 Ondas P

Llamadas también ondas primarias u ondas de presión. Hacen vibrar a la roca en la misma dirección en que se propagan, creando esfuerzos de tracción-compresión. La roca se deforma estirándose y comprimiéndose como si fuera un muelle o el fuelle de un acordeón. Su velocidad de propagación es alta y su frecuencia también.

1.3.1.2 Ondas S

También llamada secundaria o de cizalladura, que hace vibrar a la roca en forma perpendicular a la dirección de propagación, creando esfuerzos cortantes. La roca toma una forma análoga a la de las ondas en el agua.

La velocidad de propagación es algo menor que la onda P, por eso si la distancia es grande se puede presentar algo retrasada con respecto a la P. Su frecuencia suele ser alta también.

Ambas ondas P y S se presentan casi siempre superpuestas, salvo cuando la distancia del punto de voladura al de medición es grande en cuyo caso la S será algo retrasada se puede distinguir de la P.

La amortiguación de las vibraciones depende de la frecuencia, de manera que una frecuencia alta se amortigua más que una baja frecuencia, por esto las ondas internas P y S desaparecen a una distancia relativamente pequeña.

1.3.2 Ondas Superficiales

Estas ondas se transmiten en una superficie, generalmente la del terreno, si bien puede transmitirse en cualquier superficie donde entren en contacto dos materiales distintos: roca-aire, roca-agua, rocas de diferentes características, etc.

La velocidad con que se transmiten estas ondas, es menor que la de las internas y las frecuencias que presentan, también son menores, por lo que cuando se presentan crean un peligro potencial para las estructuras a las que afectan. Las ondas superficiales se clasifican en:

1.3.2.1 Ondas Rayleigh

También llamadas ondas R o Ray que se propagan por superficies de separación de materiales distintos.

Si se supone que se transmite en el plano xy, el movimiento que induce esta onda es una superposición de un movimiento vertical y otro longitudinal, creando esfuerzos complejos de flexión. El terreno adquiere la forma de las ondas en el agua.

La velocidad de esta onda es aproximadamente el 90% de la de las ondas S y su frecuencia baja.

1.3.2.2 Ondas Love

Originan oscilaciones longitudinales y radiales en el plano xy y suelen generarse en la superficie del terreno cuando la velocidad de la onda S aumenta con la profundidad. Origina esfuerzos de flexión y se transmiten a una velocidad similar a la onda R.

Las ondas de superficie al tener una velocidad de transmisión menor, se pueden ver en las colas de los espectros de ondas que se forman en una voladura. Por otra parte, al amortiguarse menos que las ondas internas, son las que al cabo de cierta distancia llevan la mayor parte de la energía del espectro de ondas.

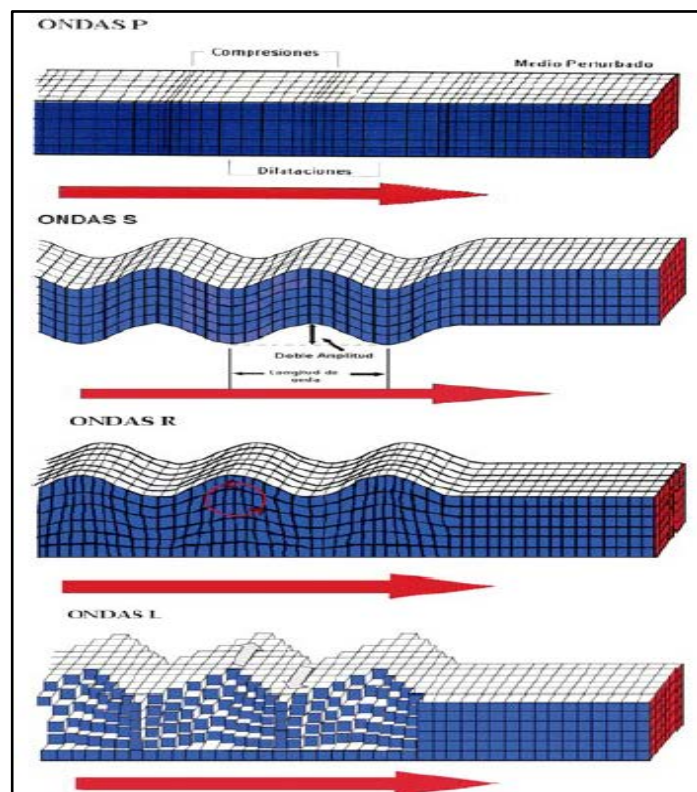


Figura 1.3 Tipos de ondas

Diversos autores indican que hay una relación directa entre la velocidad máxima de vibración y los daños de estructuras, en función de altas tensiones dinámicas que pueden alcanzar. También se dice que las estructuras formadas por materiales de mayor impedancia sufren más daños que otros de baja impedancia (madera, por ejemplo), cuando están sujetas a las mismas velocidades de vibración.

El análisis de las vibraciones también pueden ser cuantificados en función a la velocidad vibracional a pesar de haber algunos criterios establecidos en función de la aceleración.

En términos de reacción humana admítase un límite de precaución en la velocidad vibracional a 0.3 mm/seg, bien inferior a los valores que provocan daños en los edificios.

Las componentes del movimiento vibratorio a lo largo de todas las direcciones en el espacio son importantes, en la medida que los problemas reales se tienen que procesar a escala tridimensional.

1.4 Velocidad Pico de Partícula (PPV)

1.4.1 Análisis de vibraciones inducidas por voladura

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

La forma y amplitud de un paquete de vibraciones, da la efectividad relativa de la detonación de las cargas en una voladura. La amplitud de las

vibraciones es una medición de la energía transferida por el explosivo al macizo rocoso por lo que para un determinado tipo de carga y geometría de monitoreo, la amplitud relativa puede ser usada como una medición de la eficiencia de cada carga.

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

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

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

1.4.2 Modelos de la Velocidad Pico de Partícula (PPV)

Experimentalmente se ha llegado a establecer modelos que describen la velocidad pico de partícula (PPV), 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 Escalada (SD), describe la influencia de la distancia en metros y el peso de la carga de explosivo detonado en kilogramos. Con relación a esta formulación matemática existen varios criterios de los cuales se pueden señalar los siguientes:

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

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 las vibraciones 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 explosiva.

1.4.2.1 Modelo de Campo Lejano

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

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

Modelo General

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

Donde:

PPV = Velocidad Pico de Partícula (mm/s)

D = Distancia Escalada (SD)

K = Constante del macizo rocoso

α = Factor de Atenuación

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

El término "D" o distancia escalada, describe la influencia de la distancia en metros y el peso de la carga de explosivo detonado en

kilogramos por retardo. En relación a ésta formulación matemática existen varios criterios derivados de los cuales se emplea comúnmente el de DEVINE.

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

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 las vibraciones, 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 la 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 la 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 dentro del taladro cuando $z = 0$.
- Cuando la Característica de la Impedancia de la roca es menor que la del explosivo ($z > 1$), el esfuerzo reflejado a las paredes del taladro es de tensión ($\sigma_{\text{reflected}}$ es negativo), y el esfuerzo inducido en la masa rocosa es menor que la presión dentro del taladro.
- La onda transmitida es siempre compresiva (el termino σ_{rock} es siempre positivo).

Las implicancias 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 operaciones mineras. Esta gran variabilidad para el factor K desde un mínimo de 99 hasta un máximo de 703 (7 veces mayor) y para el Factor de Atenuación Alfa desde -1.54 hasta -2.49, determinan que el uso indiscriminado de estos modelos y la transferencia de estos desde una mina a otra o desde un sector a otro en la misma mina puede significar estimar un gran margen de error las vibraciones y como consecuencia de ello las restricciones a las voladuras y los criterios de daño.

Tabla 1.1 Variabilidad de los parámetros del Modelo de Vibraciones de Devine, para diferentes Minas y Macizos Rocosos.

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	-1.6
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

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 serie de monitoreos y modelamientos, en forma independiente no sólo en cada mina si no en cada dominio geomecánico de la misma.

1.4.2.2 Modelo de Campo Cercano

En el campo cercano (muy cerca de los taladros donde ocurre la detonación), la ecuación se debe modificar para tomar en cuenta la forma cilíndrica de la carga explosiva.

La ecuación para la predicción de vibraciones en el campo cercano, como se muestra en la siguiente ecuación, fue desarrollada por Holmberg&Persson (1979).

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

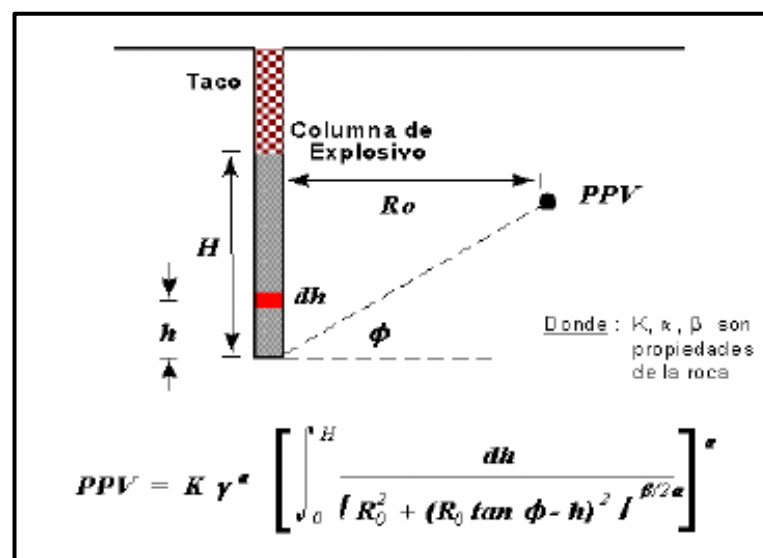


Figura 1.4 Modelamiento de Vibraciones en Campo Cercano

Donde K , α y β son las mismas constantes que se muestran en la ecuación de Devine y γ es la densidad 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 las vibraciones 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 taladro y la densidad de carga.

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

1.4.2.3 Comparación entre los Modelos de Devine y Holmberg&Persson:

Para el modelamiento en el campo cercano, se requieren primero los datos vibracionales adquiridos lo más cercanos posibles a una carga explosiva típica, con geófonos o acelerómetros de un alto rango dinámico de respuesta, capacitados para medir niveles más altos de vibraciones. 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 de 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.

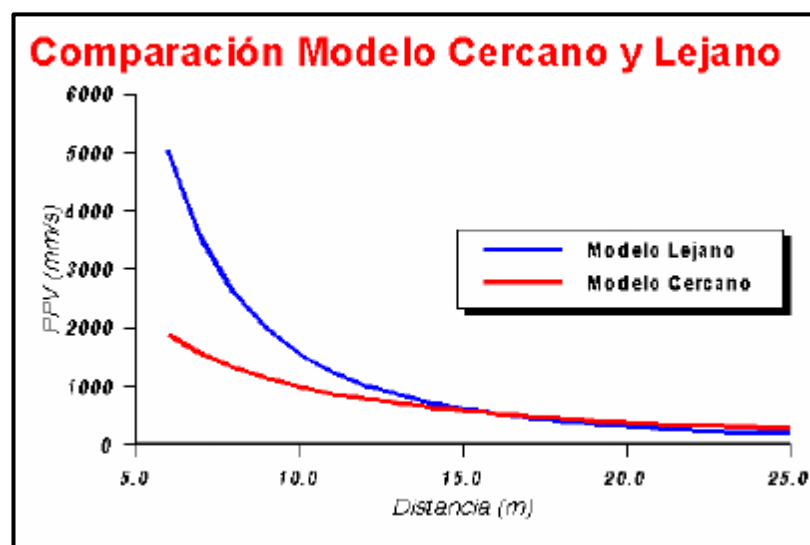


Figura 1.5 Diferencia en la predicción de Vibraciones según el Modelo Devine y Holmberg & Persson

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

1.4.3 Estimación de la velocidad pico de partícula crítica (PPVc)

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

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

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

$$\varepsilon = PPV/Vp$$

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

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

$$PPV_c = \frac{\sigma_t * V_p}{E} \quad \left(\frac{mm}{s} \right)$$

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

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

Tabla 1.2 Estimación de la Velocidad Pico de Partícula Crítica Teórica en distintos tipos de roca

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

Finalmente, se estima que un nivel equivalente a la cuarta parte, es decir el 25% del valor de PPVc, es suficiente para iniciar extensión de fracturas preexistentes. Se sugiere ocupar este nivel de $\frac{1}{4}$ PPVc, como límite conservador y a partir del cual se deben controlar los diseños de carguío para que las voladuras no ocasionen daño al macizo rocoso.

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

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

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

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

1.5 Propiedades de frecuencia y tiempo en voladura

La amplitud, frecuencia, y duración de las vibraciones en el macizo rocoso cambian mientras se propagan a través de éste, debido a:

- La interacción con varios medios geológicos e interfaces estructurales.
- La expansión del grupo de ondas a través de la dispersión.
- La absorción, la cual es mayor para las frecuencias más altas.

Cerca de la voladura el carácter de las vibraciones es afectado por los factores del diseño de voladura y la geometría de la mina, particularmente el peso de la carga explosiva por retardo, intervalo de retardo, y hasta cierto punto la dirección de iniciación, burden y el espaciamiento. A distancias mayores los factores del diseño de voladura se vuelven menos críticos y el medio de transmisión de la roca y la sobrecarga del macizo rocoso dominan las características de la onda.

Las amplitudes de velocidad de partícula dan cuenta de la energía sísmica que viaja desde un material dentro de otro, probablemente por conservación de la energía. Sin embargo, la frecuencia de las vibraciones y consecuentemente las amplitudes de desplazamiento y aceleración dependen fuertemente del medio de propagación. La sobrecarga de los taladros, también como las distancias absolutas largas (opuestas a las escaladas) crean grupos de ondas de larga duración y baja frecuencia esto aumenta la respuesta y potencial de daño de las estructuras próximas.

Las frecuencias menores a 10 Hz producen desplazamientos del macizo rocoso y altos niveles de tensión, y también se acoplan eficientemente dentro de las estructuras donde las frecuencias de resonancia típicas son de 4 a 12 Hz para los movimientos de deformación transversal y vertical. Las características de frecuencia de las vibraciones de voladura dependen fuertemente de la geología y de los intervalos de retardo utilizados para secuencia de la voladura.

Terremotos, voladuras nucleares, y voladuras en minas de gran envergadura, producen vibraciones del macizo rocoso potencialmente dañinas, también como lo hacen otras fuentes de vibración estáticas y cuasiestáticas (tráfico, manejo de pilas, bombas sónicas, etc.). El primer resumen de vibraciones de voladuras en 1942 de la Oficina de Minas de Estados Unidos examinó los niveles

de vibraciones de terremotos y las intensidades Mercalli correspondientes para el daño producido, y concluyó que estas no se aplican a las vibraciones generadas por las voladuras. Los terremotos producen eventos de muy baja frecuencia y larga duración, a diferencia de las voladuras que son eventos de alta frecuencia y corta duración.

Los niveles de aceleración son comúnmente usados por los sismólogos para cuantificar el potencial de daño de un terremoto. Estos pueden ser de niveles moderados y aún más bajos que los generados por una voladura; sin embargo, sus bajas frecuencias producen desplazamientos y altas velocidades de partícula. Como un ejemplo, Richter establece que una aceleración de 0.1g a 1 Hz es ordinariamente considerada dañina en la sismología de terremotos, la velocidad de partícula y el desplazamiento correspondiente son 155.9 mm/s y 24.8 mm respectivamente, asumiendo el movimiento armónico simple. La misma aceleración a 20 Hz solo produciría una velocidad de partícula de 7.8 mm/s y un desplazamiento de 0.06 mm. Richter también observa que el potencial de daño de una vibración dada depende de su duración, con 0.1 g a 1 Hz es probable que no se produzca daño para eventos de pocos segundos, pero sí muy serios para eventos del tipo terremotos de 25 a 30 segundos.

1.6 Instrumentación para monitorear las vibraciones

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

Por ello para manejar algunos conocimientos de las ondas sísmicas generadas por la voladura a su alrededor. Estas son importantes puesto que transportan la energía vibracional, por lo tanto, se debe tener presente sus

relevancias que dependen de la geometría, posición de la voladura y sistema estructural, por ejemplo, la onda superficial es de menor amplitud y viaja más distancia, por lo tanto son importantes su medición en un campo lejano, al contrario de las ondas P y S que son más significativas cerca de la voladura. Por esto los registros de las vibraciones producidas por voladuras son almacenados en los sismógrafos, los cuales graban las amplitudes y duración de los movimientos del macizo rocoso, producto de dichas voladuras, usando los siguientes componentes:

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

1.6.1 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 vibraciones de buena calidad. La característica de estos datos tiene directa relación con el tipo de transductor utilizado, la técnica empleada para su instalación y orientación.

Existe una gran variedad de estos equipos disponibles en el mercado, que tienen la capacidad de medir velocidad o aceleración de partículas. Su función es convertir el movimiento físico generado durante el paso de las vibraciones, en una señal de voltaje equivalente, según sea su

sensibilidad. Los transductores deben reunir algunas consideraciones prácticas, como son las siguientes:

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

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

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

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

1.6.1.1 Acelerómetros

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

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



Figura 1.6 Modelos de acelerómetros

Características Generales

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

1.6.1.2 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.



Figura 1.7 Geófono Triaxial

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 pico de partícula, según los requerimientos de los datos antes mencionados. Como regla general se puede establecer que resulta inadecuado usar un transductor de velocidad del tipo bobina móvil, cuando las frecuencias dominantes sean probablemente muy superiores a los 500 Hz.

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

Características Generales

- Su unidad de medida es el Volt/mm/s
- Entregan una medición directa de la velocidad
- Miden bien en el rango de 1mm/s hasta 1200mm/s
- Su respuesta a la frecuencia varía entre 4.5 a 1000 Hz
- La sensibilidad varía entre 0.003Volts/[mm/s] a 0.041Volts/[mm/s]

1.6.1.2.1 Frecuencias de registro de los geófonos

Se distinguen dos tipos de geófonos, los de campo cercano y los de campo lejano, los cuales poseen un rango de

aceptabilidad en la medición que depende de frecuencia que es capaz de registrar, diferenciando los geófonos de 14 Hz y 28 Hz. Los geófonos de 14 Hz son capaces de medir vibraciones a partir de esa frecuencia con perfecta precisión, mientras que los geófonos de 28 Hz son capaces de medir vibraciones a partir de frecuencias sobre los 28 HZ.

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

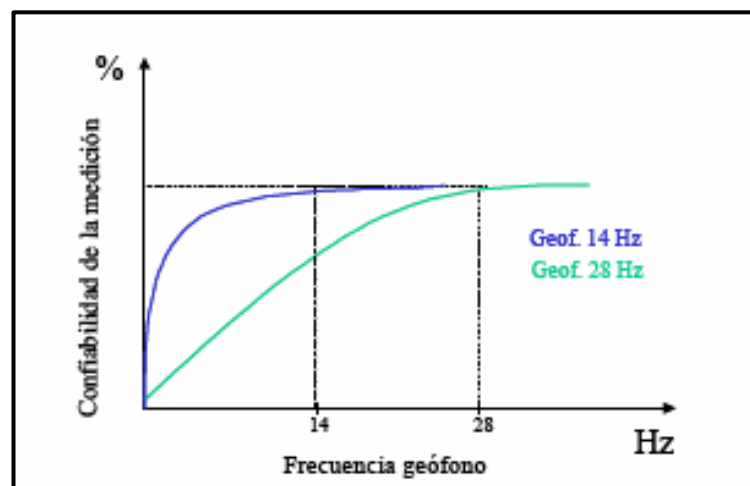


Figura 1.8 Confiabilidad de la medición por tipo de Geófono

1.6.1.2.2 Sensibilidad

Por otra parte existe la sensibilidad del geófono, la cual indica la magnitud máxima de vibraciones que puede recibir un geófono, y ésta se indica en unidades de volt/(mm/s).

Para obtener el rango máximo de vibraciones 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.

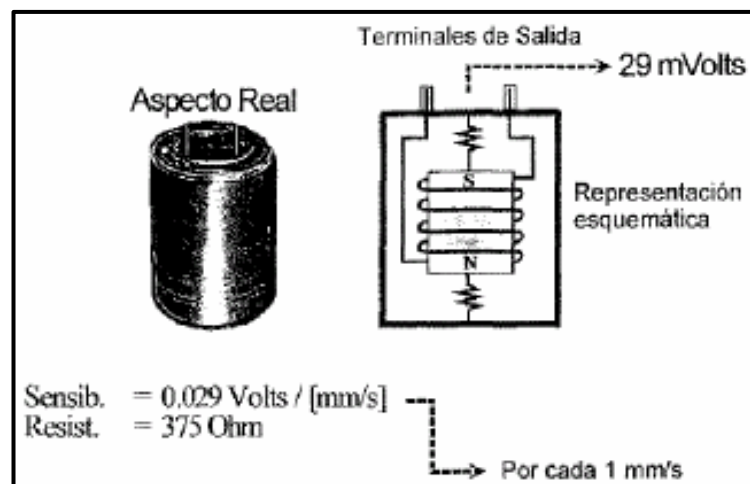


Figura 1.9 Sensibilidad de un Geófono

1.6.1.2.3 Máximo desplazamiento del Geófono

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

1.6.1.2.4 Número de Transductores

El número de transductores usados depende de la cantidad de información requerida, por lo tanto existen arreglos de geófonos uniaxiales, los cuales miden la velocidad de partículas en un solo eje, arreglos biaxiales que consisten en dos geófonos orientados en dos ejes y arreglos triaxiales los que permiten registrar la velocidad de partículas en los tres ejes, lo que permite obtener el 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 taladro, 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 a 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 puede ser determinada la localización relativa de la fuente emisora.

1.6.1.2.5 Instalación de transductores

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

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

1.6.1.2.6 Orientación

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

1.6.1.2.7 Acoplamiento

Una vez que el transductor está ubicado en el taladro del 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 un taladro que tenga la mínima diferencia entre los diámetros, pero que facilite la operación. La idea en definitiva es disminuir la zona de interfase entre los dos medios esto es, la roca y el instrumento detector.

Los sismógrafos contienen tres Geófonos, los cuales montados adecuadamente registran las tres ondas: vertical, longitudinal y transversal. Cada una de estas tres componentes del movimiento del macizo rocoso tendrá una velocidad pico partícula (PPV) o máxima amplitud de la onda. La velocidad pico partícula que se considera es la de mayor valor, es decir, el pico puede ocurrir en cualesquiera de las tres ondas, por lo que es

importante considerar también que el Vector Resultante no debe ser confundido con la velocidad pico de partícula.

1.6.2 Equipo de adquisición

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

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

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



Figura 1.10 Equipo Minimate Plus - InstanTel

1.6.2.1 Modo de Activación del Sismógrafo

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

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

1.6.3 Equipo de análisis

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

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

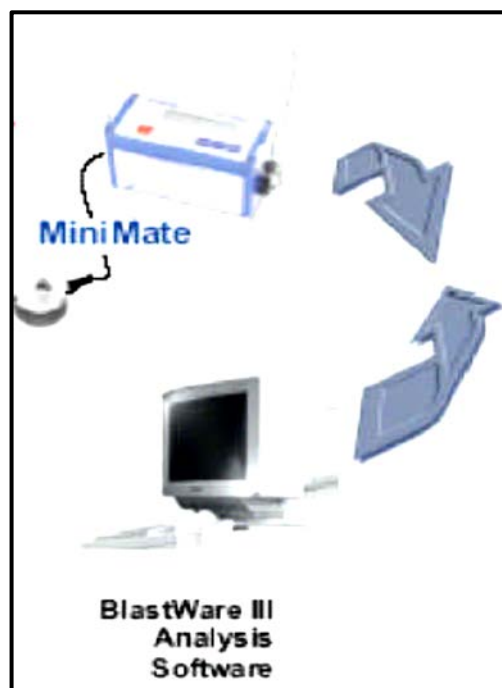


Figura 1.11 Arreglo para la descarga de la información del Sismógrafo hacia la PC

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

1.7 Aplicación: Voladuras sector espesador de una mina “x”

La problemática se presenta ante la necesidad de realizar la construcción de un nuevo espesador a un costado del actualmente operativo. Para la construcción de este nuevo espesador fue necesario realizar una zanja de las siguientes dimensiones:

Tabla 1.3 Dimensiones del espesador

Profundidad	15 m
Largo	120 m
Ancho	12 m (*)

(*) Ancho en sector más angosto

La distancia más cercana entre el espesador y la zanja eran 70 metros, distancia a la cual debieron estar enmarcadas las restricciones de configuraciones de carga y secuencia de iniciación. En la Figura 1.12 se muestra el actual espesador y diseño de la zanja respectivamente.

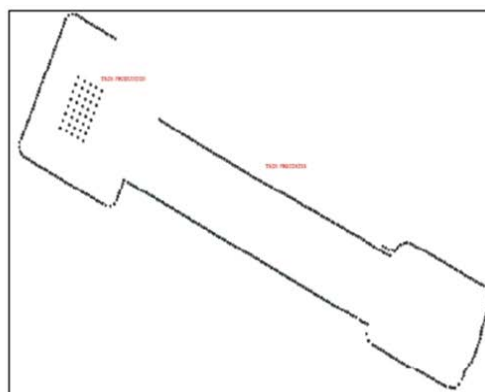


Figura 1.12 Lado izquierdo actual espesador – Lado derecho diseño de zanja para nuevo espesador

El área de ingeniería, a partir de los antecedentes de construcción del actual espesador, definió las siguientes restricciones en términos de velocidad de partícula:

Tabla 1.4 Velocidades máximas de partículas

Horizontal	22 mm/s
Vertical	33 mm/s

Debido a la falta absoluta de información se realizaron pruebas en un sector de las mismas características geológicas (Ignimbrita), para estos efectos fueron perforados 3 taladros en un diámetro de 3 ½" con una profundidad promedio de 6.5 metros y espaciados a 7 metros, los taladros fueron cargados con ANFO de acuerdo a la configuración mostrada en la Figura 1.13. Para efectos de obtención de datos se dispuso de una configuración de geófonos superficiales alineados en relación a cada taladro con el objetivo de registrar el nivel de vibraciones a diferentes distancias, esta estrategia permitió cubrir una distancia entre 5 a 100 metros (Figura 1.14). En términos de secuenciamiento cada taladro fue detonado en forma independiente, condición que permitió reubicar los geófonos en las diferentes posiciones.

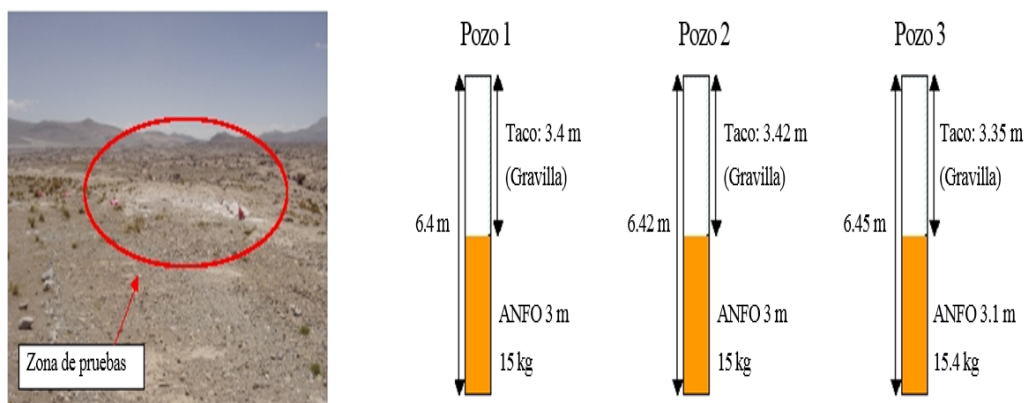


Figura 1.13 Lado izquierdo sector de prueba – Lado derecho configuración de las cargas explosivas para realizar las pruebas

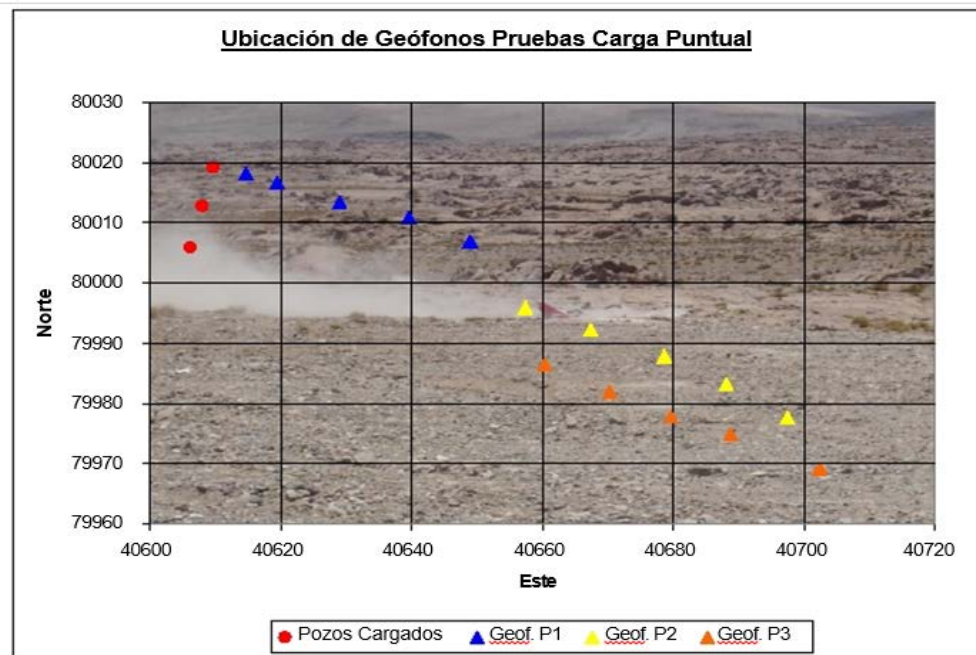


Figura 1.14 Distribución de geófonos para pruebas

El análisis de los registros de vibraciones, permite conocer la velocidad de partícula generada por cada carga o grupos de carga en el punto de interés o medición. Una vez obtenidos los valores de velocidad de partícula, distancia y carga se pueden ajustar a la ecuación del modelo propuesto por Devine. E, este modelo predictivo de vibraciones para campo lejano da cuenta del comportamiento de las vibraciones en función de las distancia. El modelo obtenido, generalmente es ajustado, a objeto de establecer un modelo más representativo y confiable, el ajuste en cuestión consiste en desplazar paralelamente el modelo originalmente obtenido (50% de confianza), de modo que cubra un número mayor de puntos obtenidos en el macizo rocoso, a este modelo se denomina "modelo ajustado".

El gráfico de la Figura 1.15 muestra los datos graficadas en escala logarítmica, es importante destacar el valor del coeficiente de correlación (R^2) de 0,97. Esto significa que cuando R^2 está cercano a 1 un individuo con un alto valor en una de las variables tendrá probablemente un alto valor en la otra variable y un

individuo con un bajo valor en una de las variables tendrá probablemente un bajo valor en la otra.

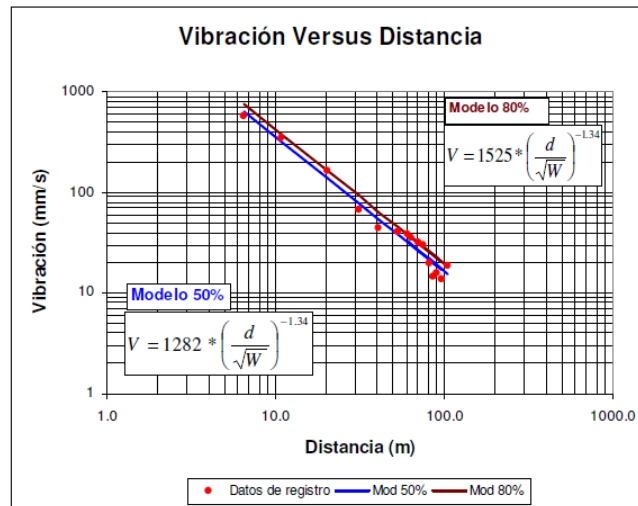
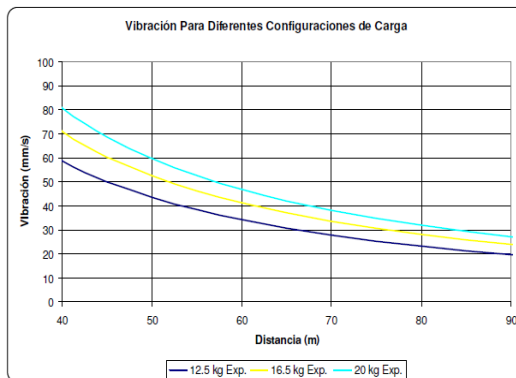


Figura 1.15 Muestra de los datos obtenidos en escala logarítmica con los respectivos modelos (50% y 80%)

A partir del modelo predictivo de vibraciones (80% confianza) obtenido, se construyeron los respectivos ábacos de diseño; ábaco para carga explosiva y nivel de vibraciones. Las Figuras 1.16 y 1.17 muestran los respectivos ábacos.



Distancia (m)	EXPLOSIVO (KG)		
	12.5	16.6	20
10	378	457	518
20	149	180	204
30	86	105	119
40	59	71	81
50	44	53	60
60	34	41	47
70	28	34	38
80	23	28	32
90	20	24	27
100	17	21	24
110	15	18	21
120	13	16	18

Figura 1.16 Ábaco de diseño según carga explosiva

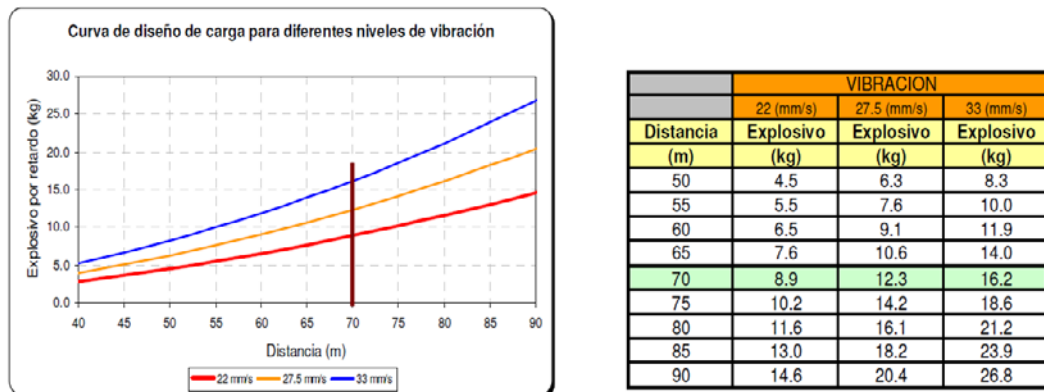


Figura 1.17 Ábaco de diseño según nivel de vibraciones

Para efectos de simulación se requieren valores de Velocidad de Propagación de onda (VP), en el marco de las pruebas realizadas fue posible medir la VP para cada uno de los taladros detonados, la Figura 1.18 muestra el tiempo de arribo (5.469 ms) correspondiente al primer taladro detonado a una distancia por propagación conocida. Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 1.5, el valor promedio de las 3 mediciones son 1202 m/s, valor que da cuenta de una roca de baja calidad geotécnica producto del alto nivel de meteorización superficial.

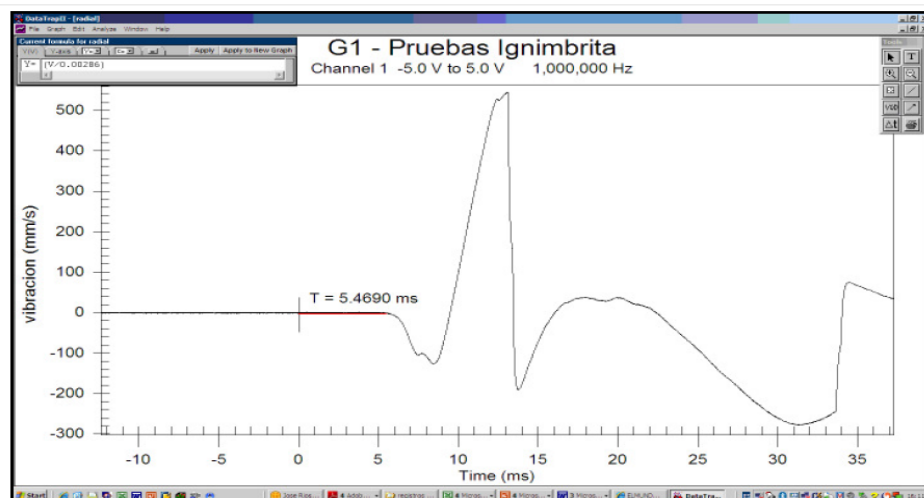


Figura 1.18 Onda elemental cálculo Vp

Tabla 1.5 Valores de velocidad de propagación de la onda Vp

Prueba	V _p (m/s)
1	1224
2	1186
3	1196

De las pruebas realizadas fue posible obtener el siguiente modelo de frecuencia; con un coeficiente de correlación (R²) de 0.89:

$$f = 215 * d^{-0.469}$$

Dónde:

f = Frecuencia (Hz)

d = Distancia (m)

A partir de la ecuación, para un 80% de nivel de confianza fue posible calcular las frecuencias para las distancias de interés (Tabla 1.6). A partir de estos valores es posible obtener el tiempo de acoplamiento (Figura 1.19), para una distancia de 70 metros este tiempo corresponde a los 34 ms.

Tabla 1.6 Frecuencia para distancias críticas entre espesor y zanja

Distancia (m)	Frecuencia (Hz)
60	31.5
70	29.3
80	27.5

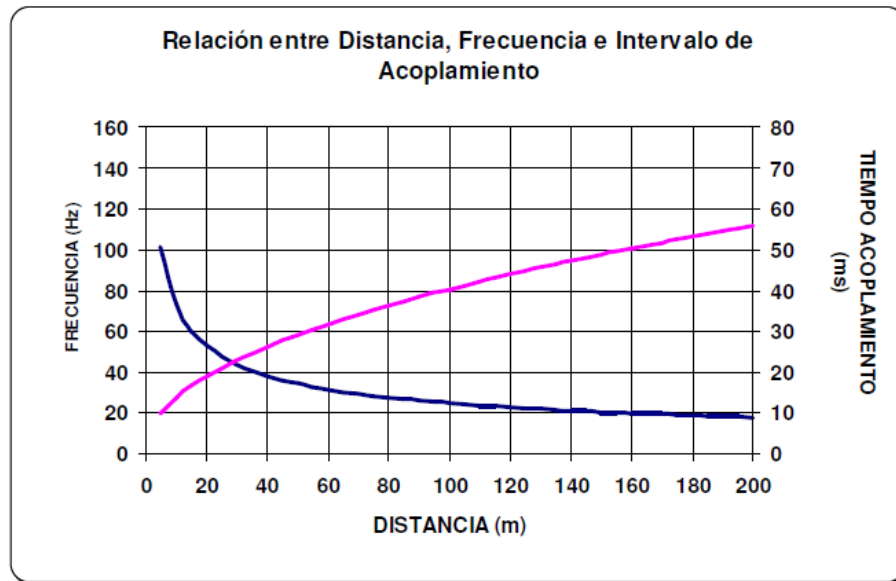


Figura 1.19 Frecuencia – tiempos de acoplamiento de ondas en función de la distancia

En forma paralela al análisis anterior, a modo de corroborar la asignación de tiempos para el diseño, se analizó a partir de las ondas elementales el efecto amplificador de los niveles de vibraciones a partir de la variación del tiempo de retardo. Los resultados obtenidos y que se muestran en la figura 1.20 y 1.21 indican que el tiempo asignado (33 ms) coincide en ambos análisis.

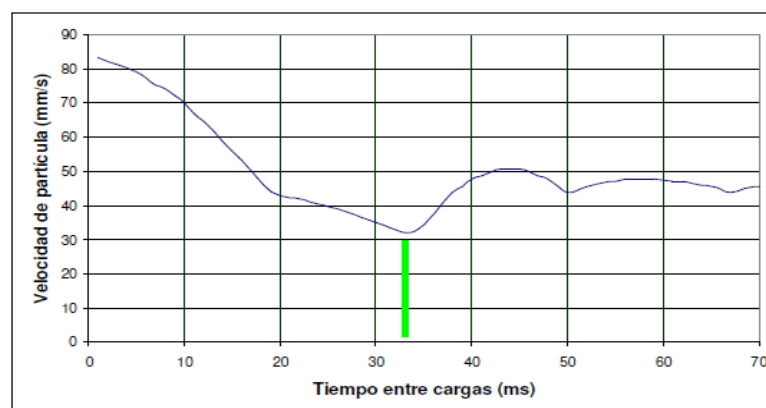


Figura 1.20 Retardo coincidente 33 ms

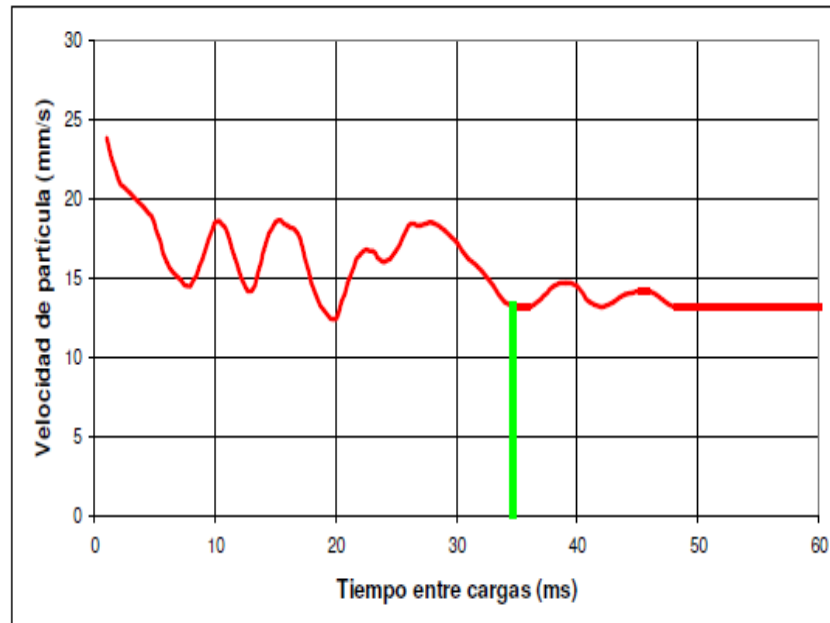


Figura 1.21 En este gráfico se pueden observar varios tiempos de retardo adecuados

1.7.1 Simulación de MonteCarlo

El tamaño de las voladuras fue definido en 1540 m³, volumen que garantiza la operación de extracción para 2 días, esta condición enmarcó el tamaño de las voladuras. El diseño fue definido con un diámetro de 3" y una configuración de 1.7 m x 1.7 m (Burden x Espaciamiento). Con el diseño definido se simuló diferentes alternativas de secuencia de iniciación para analizar los niveles de vibraciones generados para las distancias críticas definidas, la tabla 1.7 resume los tiempos simulados y los resultados obtenidos para cada simulación. Tal como se presumía, de acuerdo a los análisis del modelo de frecuencia y ondas elementales, la simulación con tiempos de retardo de 33 ms entre taladros y 40 ms entre filas arrojó el menor nivel de vibraciones en el punto A (70 metros) y punto B (90 metros).

Tabla 1.7 Resumen valores de vibraciones simuladas

Tiempo entre Pozos	Tiempo entre Filas	Vibración Simulada (mm/s)			
		Pto A	Std. Dev	Pto B	DE
9	15	105	3.2	138	3.6
9	25	76.3	1.8	102.2	1.4
17	25	49.1	2.2	37.8	2.5
17	33	37.2	1.5	24	1.8
17	40	32.3	1.8	28.2	1.9
17	50	33.1	2.6	26.4	2.1
17	60	34.2	2.1	27.1	2.4
17	42	36.6	1.6	28.4	1.8
25	40	35.9	1.5	29.4	1.6
33	40	30.4	2.1	22.1	1.9

Las etapas realizadas para el desarrollo del proceso de simulación fueron las siguientes:

- Creación diseño y definición de puntos de control o monitoreo
- Variables de entrada
- Simulación (secuencia iniciación, punto de inicio)
- Distribución
- Contornos Isovibraciones

En las Figuras 1.22 y 1.23, se muestran las etapas del proceso de simulación y corresponden para la simulación del diseño 33 ms entre taladros y 40 ms entre filas.

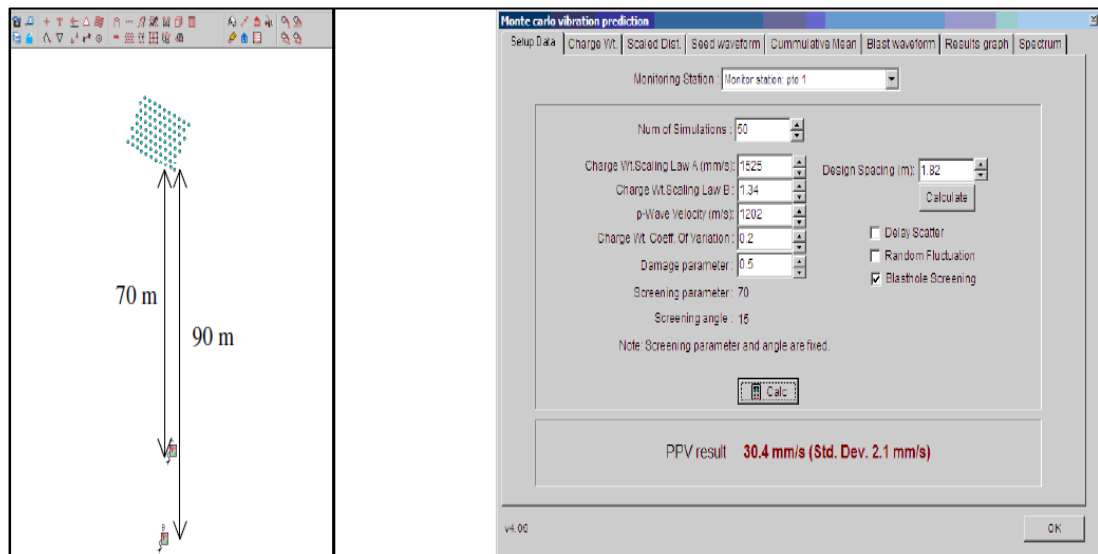


Figura 1.22 Lado izquierdo diseño y puntos de control – Lado derecho variables de entrada

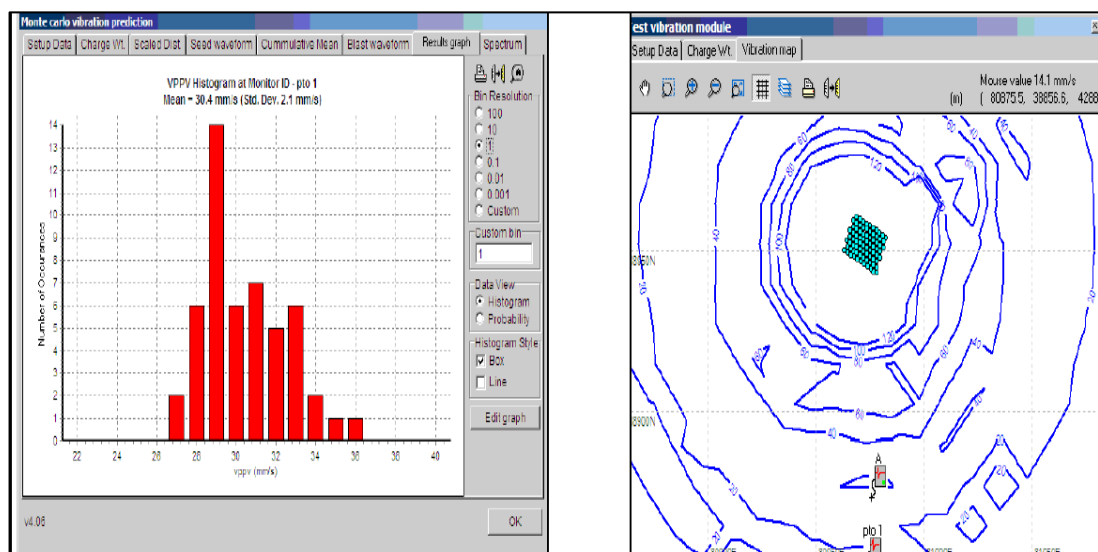


Figura 1.23 Lado izquierdo distribución – Lado derecho contornos isovibraciones

1.7.2 Resultados de las vibraciones monitoreadas durante la construcción

Las voladuras realizadas en la zanja fueron monitoreadas en forma simultánea en 2 puntos en el espesador, para este efecto se utilizaron geófonos superficiales de 14Hz adheridos solidariamente a la superficie:

- Geófono instalado sobre espesador
- Geófono instalado bajo espesador

Los valores medidos fueron:

Tabla 1.8 Valores entregados por los geófonos

Voladura	Vibración sobre espesador (mm/s)	Vibración bajo espesador (mm/s)
1	6.4	5.1
2	4.6	2.4
3	9.9	5.2
4	4.8	2.5
5	12	7.5



Figura 1.24 Zanja construida

CAPITULO II

DESARROLLO Y EJECUCIÓN EFICIENTE DEL DISEÑO DE VOLADURA CONTROLADA

Para John L. Floyd, la eficiencia del diseño de la voladura controlada puede ser definida como el logro de la seguridad y la estabilidad del talud a un menor costo. Básicamente el tiempo y esfuerzo en desarrollar e implementar un diseño eficiente y seguro contra las futuras fallas. La pregunta es “¿Cuánta seguridad se necesita?” la respuesta a la pregunta no siempre es clara, pero está en relación a los siguientes factores:

- Condiciones geológicas y de agua
- Diseño del talud
- Vida del talud (1 año, 5 años, permanente)
- Valor de la excavación

Para una producción desde el punto de vista objetivo de la voladura controlada, es lograr una buena fragmentación del macizo rocoso y no dañar el área circundante al disparo. Esto puede ser todo un reto debido a algunos factores que influyen en los daños que puede producir la voladura.

El desarrollo eficiente del diseño de la voladura controlada consta en entender el mecanismo de falla del macizo rocoso como las limitaciones del

proceso, adicionando un diseño preciso, evaluado y mejorado como una base técnica, económica, ecológica y social.

2.1 Factores que influyen en la estabilidad del macizo rocoso

Hay cuatro factores principales en el control de la estabilidad del macizo rocoso, que son los siguientes:

- Geología
- Diseño del talud.
- Diseño de la voladura.
- Control operacional en las implementaciones del diseño.

Obviamente, la geología del lugar influirá en el diseño del talud y el diseño de la voladura. Es importante prestar atención a las condiciones geológicas del macizo rocoso, ya que estas influirán en la voladura, por ello se debe evaluar la integridad de la estructura, el tipo, medidas, persistencia, orientación (dirección de buzamiento y rumbo), frecuencia de discontinuidades, diaclasas. Los esfuerzos de corte, compresión y tracción sobre el macizo rocoso deberán ser hallados para determinar la estabilidad de este.

En muchos casos el diseño final del talud es modificado durante el proceso de la excavación cuando las condiciones del lugar son conocidas, adicionalmente el cambio del plan de minado puede alterar el diseño del talud.

Los parámetros principales que definen el diseño de un talud son: Altura de banco, altura total, ángulo de talud, ángulo de inclinación y ancho de banco. Estos parámetros se ilustran en la figura 2.1.

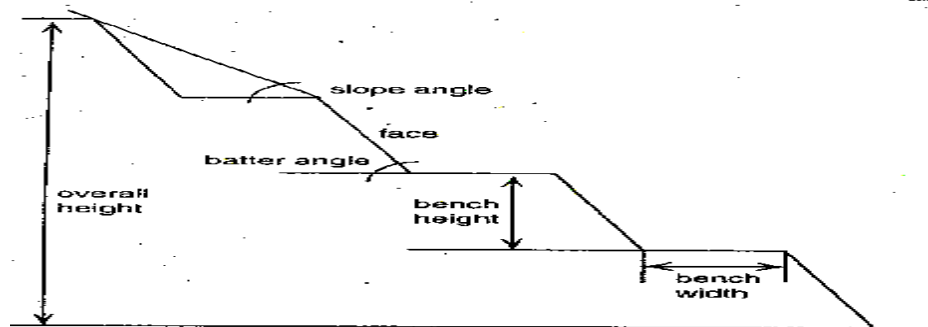


Figura 2.1 Parámetros de diseño de talud

Algunos factores de diseño de voladura que influyen en la estabilidad de la pared tales como:

- Burden
- Concentración de energía adyacente a la pared.
- Tamaño y duración de la voladura.

El último importante factor que controla la estabilidad del talud es implementado durante el minado, incluso un buen programa de control de daños no se realizara apropiadamente si no hay un compromiso para la calidad. Calidad en este caso se refiere a una cara limpia y a una perforación y carguío de los taladros de manera precisa.

2.2 Mecanismos de daños inducidos por la voladura

El daño inducido por la voladura puede ser agrupado dentro de 3 categorías:

- Esfuerzos de falla (compresión, tensión y corte)
- Penetración de los gases a alta velocidad en las discontinuidades del bloque.
- Daños por la carga del disparo.

En la figura 2.2 se muestra, el daño inducido a la pared por efecto de la voladura, el esfuerzo de falla ocurre cuando éste se intensifica y es mayor que el esfuerzo de la roca.

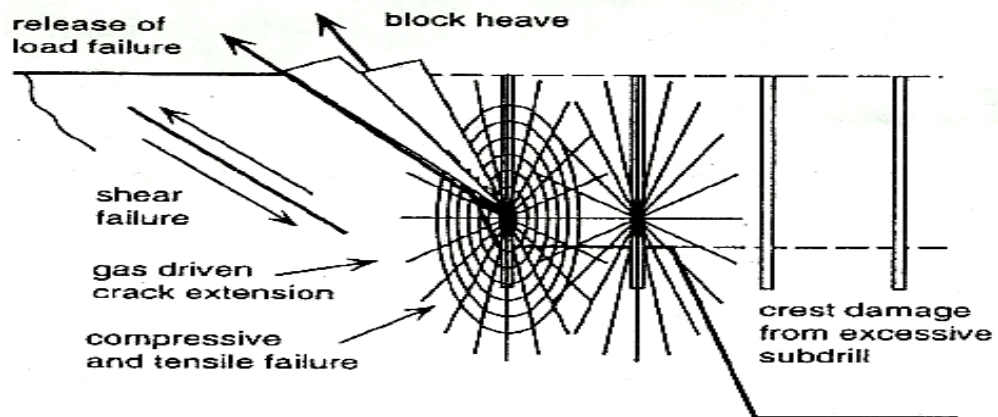


Figura 2.2 Daño en la cara del banco por la voladura

2.3 Diseño de la voladura controlada

Es conveniente hacer un diseño de voladura controlada para cada área de la excavación, antes de hacer este diseño, el área del lugar debería ser evaluada para tener un diseño apropiado, esta evaluación debería incluir:

- Esfuerzos de compresión, tensión y corte del macizo rocoso.
- Caracterización geomecánica de la estructura (tipo de fallas, tamaño, orientación, persistencia, filtraciones, espaciamiento, tipo de relleno).
- Factor de seguridad del talud.
- Condición de agua.
- Limitaciones de la producción.
- Operaciones económicas.
- Medida de la perforación, capacidad, productividad y disponibilidad.

2.4 Los métodos usados para la voladura controlada

- Perforación en línea (línea drilling)
- Voladura de precorte (Pre splitting)
- Voladura amortiguada

Modificar la producción de la voladura es más exitoso en macizos competentes o en taludes diseñados con un alto factor de seguridad. La desventaja de modificar la producción de la voladura es que la pared no está protegida contra la agrietación producida por la penetración del gas y el peso del material. En la modificación de la voladura de producción el nivel de energía disminuye junto a la pared para reducir la sobre excavación. Esto se logra por simple reducción de la cantidad de carga (30 a 60%) en la fila más cercana del talud como se muestra en la figura 2.3.

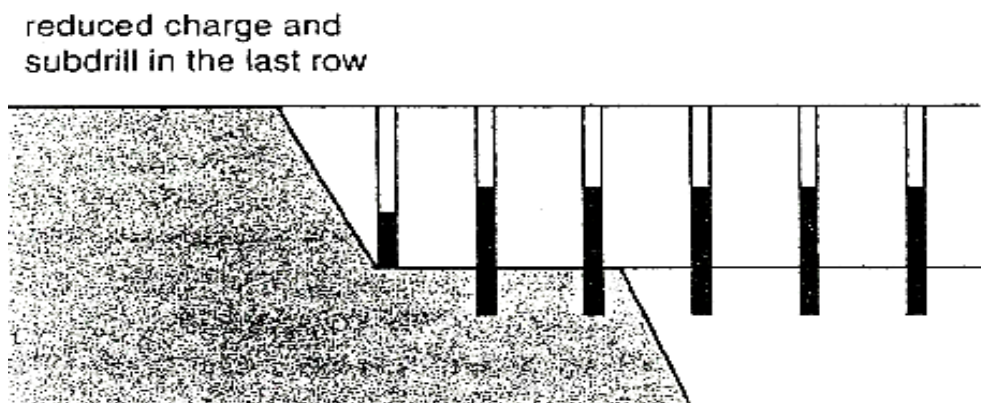


Figura 2.3 Diseño modificado de voladura en condiciones favorables

Sin embargo, muchos tipos de rocas requieren una modificación al diseño para minimizar los daños. Estas modificaciones pueden incluir cubiertas de aire, reducción del burden y espaciamiento (por 25%), minimizando la perforación y aumentando el tiempo de retardo entre las dos últimas filas de los taladros.

Para modificar el diseño de los taladros de producción se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Localizar la última fila a 1 metro del pie del talud.
- Reducir la cantidad de carga a un 50% en la última fila.
- Usar cámaras de aire y minimizar la longitud de los taladros de la última fila.

- Minimizar la sobreperforación cuando los taladros estén cerca a la cara del banco.
- Reducir el burden y el espaciamiento de la última fila a un 25%
- Aumentar la simpatía entre las cargas explosivas que conforman las últimas dos filas de taladros.

Estos parámetros fueron desarrollados para un rango de tipo de roca y consideraciones estructurales. El rendimiento de la modificación de la inicialización del diseño de producción debería ser evaluado en términos de sobre excavación y costo. En algunos casos no es necesario aplicar todas las recomendaciones de modificación de diseño para lograr buenos resultados.

El segundo método para el control es la voladura de precorte, la voladura de precorte es generalmente usado en macizos que son muy sensibles para modificar la voladura de producción. Tres tipos de voladuras son usadas: precorte, buffer y modificación de los taladros de producción. Un típico diseño para unas condiciones favorables se muestra en la figura 2.4.

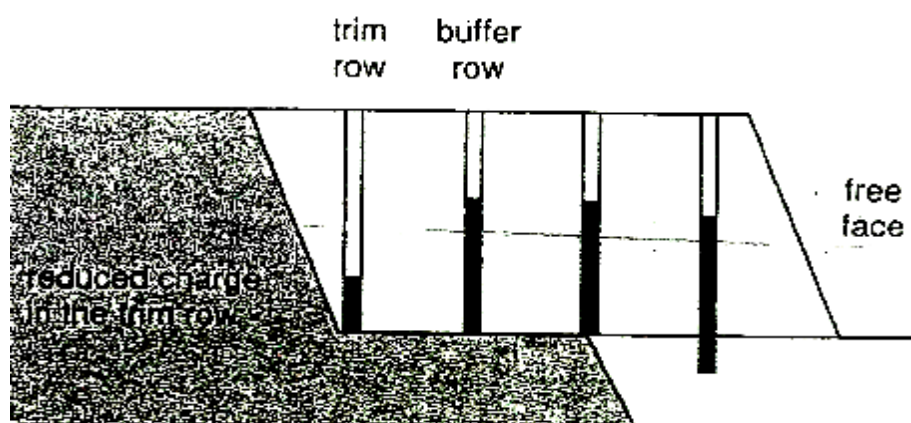


Figura 2.4 Ajuste del diseño de voladura en condiciones favorables

La figura 2.5 ilustra el tipo de modificaciones que quizás sea requerido para la voladura de precorte en condiciones desfavorables.

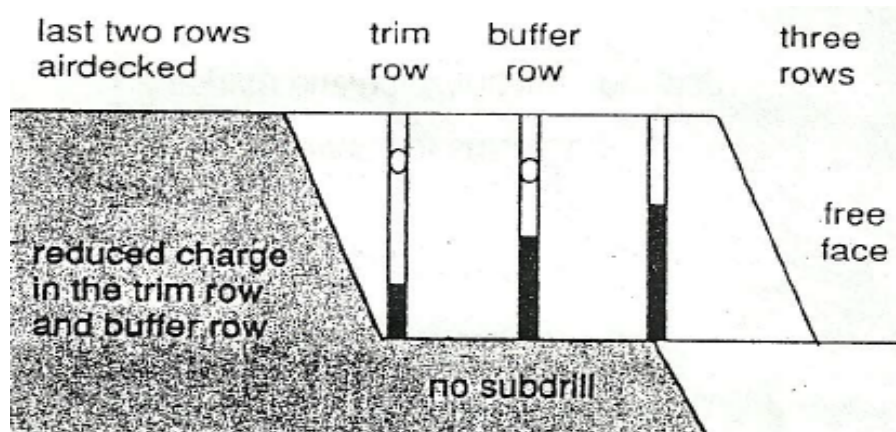


Figura 2.5 Ajuste de diseño de voladura para condiciones desfavorables

Los elementos del diseño para la voladura de precorte son:

- El ajuste del soporte de la última fila del pie del talud (dado por la resistencia de la roca).
- .Ancho de rango (dado por las condiciones del lugar)
- .El espaciamiento de la última fila del corte es típicamente menor que la dimensión del burden
- Cara de burden (alivio horizontal)
- Configuración de la sincronización
- Nivel de energía total (depende de la resistencia de la roca)
- Distribución de la energía

Tabla 2.1 Parámetros de diseño de la fila del ajuste inicial

Blasthole Diameter mm (inch)	Loading Density kg/m (lb./ft)	Burden m (ft)	Spacing m (ft)
76 (3")	.5 (.35)	1.5 (5)	1.2 (4.0)
89 (3.5")	.7 (.45)	1.7 (5.5)	1.4 (4.5)
102 (4")	.9 (.60)	2.0 (6.5)	1.7 (5.5)
127 (5")	1.3 (.90)	2.4 (8.0)	2.0 (6.5)
152 (6")	1.9 (1.3)	2.9 (9.5)	2.4 (8.0)
171 (6.75")	2.5 (1.7)	3.4 (11.0)	2.7 (9.0)
200 (7.87")	3.4 (2.3)	3.8 (12.5)	3.2 (10.5)
229 (9")	4.9 (3.3)	4.4 (14.5)	3.7 (12.0)
251 (9.87")	5.9 (4.0)	4.7 (15.5)	4.0 (13.0)
267 (10.62")	6.8 (4.6)	5.0 (16.5)	4.3 (14.0)
311 (12.25")	8.1 (5.5)	5.5 (18.0)	4.6 (15.0)

Sin embargo, desde que la columna del precorte es detonado, la penetración de los gases causa la extensión del fracturamiento produciendo un excesivo daño. La siguiente opción es voladura de precorte.

La voladura de precorte consiste en cargar la última fila ligeramente, ajustando los espacios entre los taladros adyacentes al final del talud que es encendido antes de la detonación de los otros taladros. Esto crea el plano de fractura para ventilar este con los gases y reducir la propagación de las grietas. Una típica voladura de precorte en roca favorable se muestra en la figura 2.6.

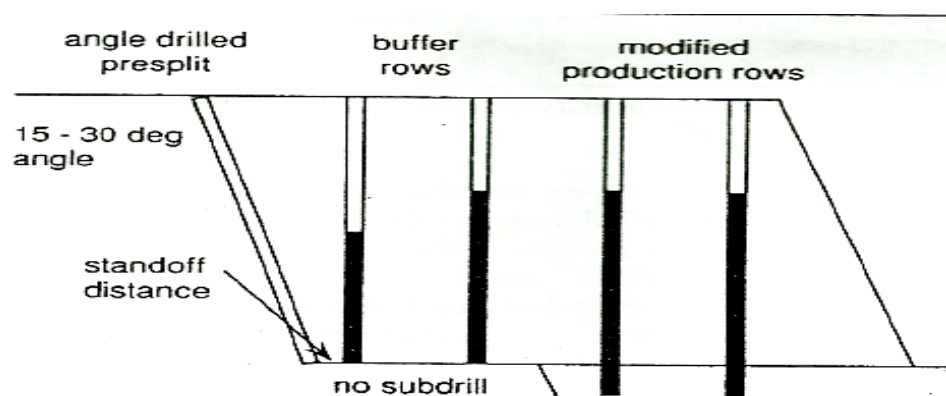


Figura 2.6 Típico diseño de precorte

En muchos tipos de rocas los taladros del precorte y un adecuado ángulo debería dar mayor estabilidad a la pared.

El ángulo seleccionado debería ser basado en el diseño del talud, en la estructura de la roca, en el tipo de perforación y requerimiento de cargas de los taladros. Los factores que controlan los sucesos del precorte son:

- Precisión de la perforación.
- Geología estructural, dureza.
- Espaciamiento de los taladros del precorte.
- Carga de los taladros del precorte.
- Soporte de distancia de la fila de búffer interno.
- Cara del burden.
- Ancho de banco para un radio de altura.
- Configuración de la sincronización.
- Nivel de energía total.

Si las condiciones llegan a ser más desafiantes, el diseño del precorte debe ser modificado para producir resultados satisfactorios. En macizos rocosos competentes, se debe tener una corta distancia entre los taladros buffer (inner buffer) y el divisor anterior para lograr una adecuada fragmentación. La sobre perforación quizás sea requerida para estabilizar la estabilidad del banco cuando la roca es dura. Si el macizo rocoso es poco competente o relativamente débil, quizás se necesite usar cámaras de aire en la fila de buffer. En la figura 2.7 se observa algunas modificaciones requeridas para el diseño del precorte en condiciones desfavorables.

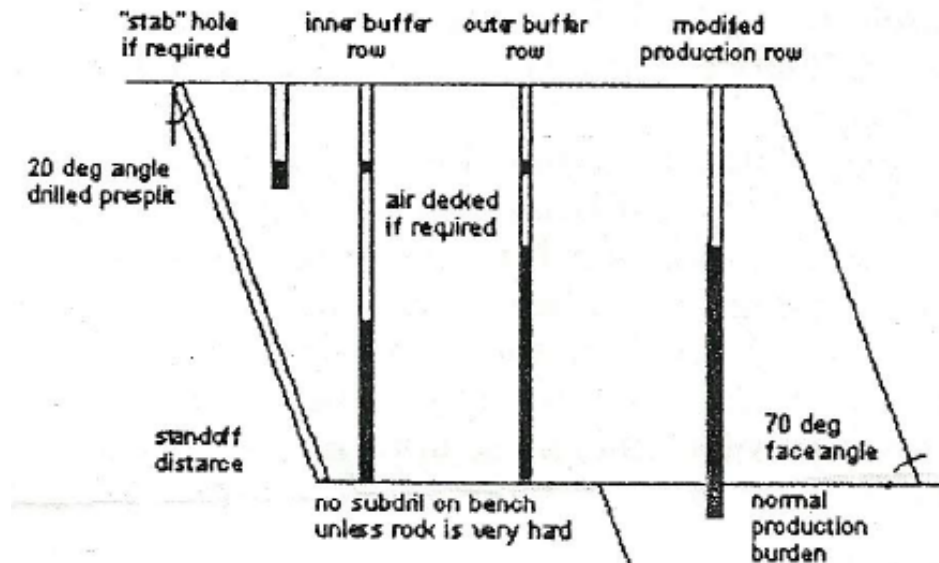


Figura 2.7 Diseño del precorte en condiciones desfavorables

Uno de los elementos del diseño de la voladura de Precorte es la carga de la última fila. Normalmente la carga está desacoplada para reducir la presión dentro del taladro por debajo de la resistencia de la compresión de la roca. Esto se puede lograr cubriendo con aire una carga de diámetro menor que el diámetro del taladro. En la figura 2.8 se observa las opciones de precorte.

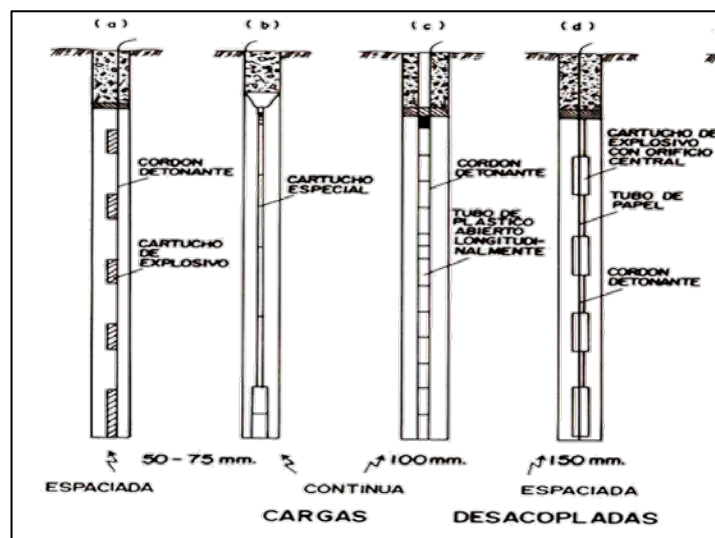


Figura 2.8 Opciones de carga del precorte

La cámara de aire es el método menos costoso y es apropiado cuando el macizo rocoso es relativamente masivo. Esto típicamente consiste en colocar una pequeña carga a granel en la base de la perforación y dejar el taladro remanente abierto para lograr el desacople. Mientras la detonación continua es la opción más costosa para el precorte esto provee el mejor rendimiento en condiciones desfavorables. Los parámetros de la sugerencia inicial del diseño del presplit son mostrados en la figura 2.9.

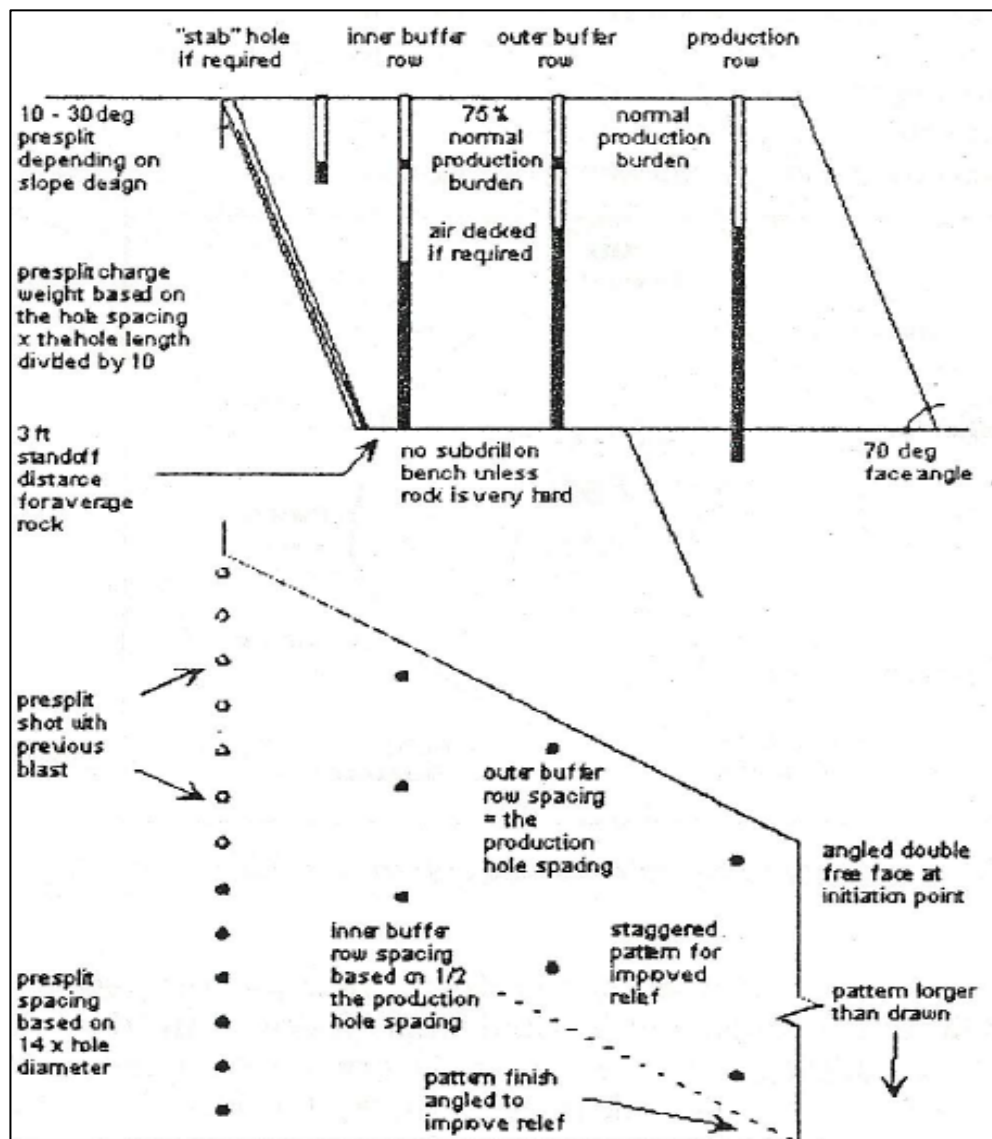


Figura 2.9 Directrices de Precorte

El Precorte puede ser el método más costoso y trabajoso de los métodos de la voladura controlada, sin embargo, el beneficio de realizar esto es que se puede reducir los costos maximizando el ángulo del talud.

2.5 Implementación del diseño

El programa de control debería ser establecido e implementado en términos consistentes y básicos.

Los pasos para obtener un rendimiento adecuado en la implementación de voladuras controladas son las siguientes:

- Proveer una buena comunicación entre los operadores.
- Estabilizar el rendimiento de cada operación.
- Redactar un documento de los procesos de diseño y monitoreo de estabilidad.
- Monitorear cada voladura (video, sismógrafo).
- Instruir a cada grupo para un apropiado control de procesos para lograr un eficiente rendimiento.
- Proveer un plan de voladura a cada grupo.

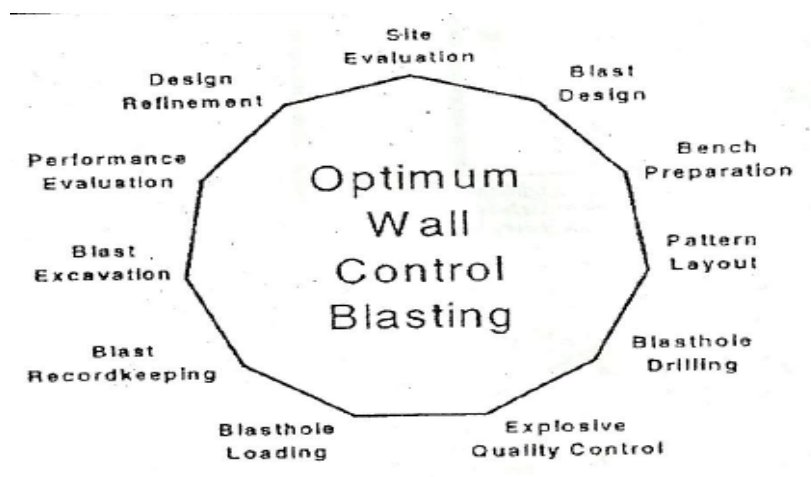


Figura 2.10 Requisitos para la voladura controlada

2.6 Aplicación: Evaluación de voladuras de corte de talud en roca (Proyecto Toromocho)

El objetivo es detallar en forma objetiva sobre las condiciones de estabilidad física y las características finales de presentación de las excavaciones en talud de corte en roca masiva, para cuya ejecución necesariamente se han utilizado mezclas explosivas comerciales.

2.6.1 Caracterización geomecánica del macizo rocoso

Uno de los parámetros de caracterización del macizo rocoso, el cual estará sujeto a los efectos de voladura con empleo de explosivos, está representado por el coeficiente de valoración geomecánica **RMR** - Rock Mass Rating, el cual califica a la roca desde el punto de vista estructural y su comportamiento en etapas posteriores a las voladuras para conformar excavaciones en bóveda (obras subterráneas) o excavaciones en cortes de talud, como es el caso del presente estudio.

En la tabla 2.2, se presenta la evaluación RMR, en una superficie de corte en talud típico figura 2.11 que presenta la excavación en la zona de emplazamiento de la chancadora primaria que se construye en el Proyecto Toromocho.

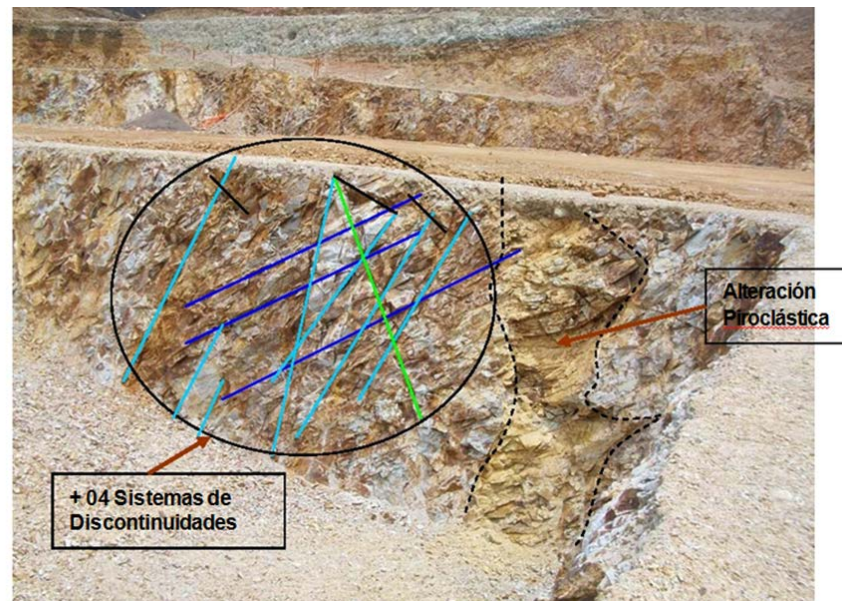


Figura 2.11 Superficie de corte en talud típico

Tabla 2.2 Evaluación RMR del corte en talud típico

I	RESISTENCIA DE LA ROCA SANA	CARGA PUNTUAL (Kg/cm ²)	>100	40 - 100	20 - 40	10.0 - 20.0	Compresión Simple		RESUMEN
		COMP. SIMPLE (Kg/cm ²)	>2500	1000 - 2500	500 - 1000	250 - 500	50 - 250	10 - 50.0	
	VALORACIÓN		15	12	7	(5) - 4	2	1	7
	RQD		90%-100%	75%-90%	60%-75%	25%-50%	< 25%		
II	VALORACIÓN		20	17	13	8	3		6
III	SEPARACIÓN ENTRE DISCONTINUIDADES		> 2.0m	0.6 - 2.0m	0.20 - 0.60m	0.06 - 0.20m	< 0.06m		
	VALORACIÓN		20	15	9	8	5		9
IV	ESTADO DE DISCONTINUIDADES		Muy Rugosas, Discontinuas, Borde Sano y Duro	Ligeramente Rugosas, e<1.0mm, Borde Duro	Ligeramente Rugosas, e<1.0mm, Bordes Blandos	Rellenos e<5.0mm, Abiertas, Continuas	Rellenos Blandos, >5.0mm, Continuos		
	VALORACIÓN		30	20	15	8	0		8
V	PRESENCIA DE AGUA SUBTERRANEA	Caudal Tramo de 10m.	Nulo (0 - 10)	< 10 (5 - 10)	10 - 25 (4 - 6)	25 - 125 (2 - 4)	> 125 (0 - 2)		5
		σ_{H1}/σ_{H2}	0 (< 2)	0.0 - 0.1 (1.0 - 1.5)	0.1 - 0.2 (0.5 - 1.0)	0.2 - 0.5 (0.2 - 0.5)	> 0.5 (0.0 - 0.2)		0
		Estado	Seco (< 3)	Lig. Húmedo (1.5 - 2.0)	Húmedo (1.0 - 1.5)	Goteando (0.5 - 1.0)	Flujando (0.0 - 0.5)		2
	VALORACION		15	10	7	(4) - 4	0		7
TOTAL			81 - 100	61 - 80	41 - (41) - 60	21 - 40	< 20		37
CLASE			I	II	III	IV	V		IV
DESCRIPCIÓN			MUY BUENA	BUENA	REGULAR	MALO	MUY MALO		
Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)									800
Resistencia a la Tracción (Kg/cm ²)									16.27
Gravedad específica (gr/cm ³)									2.70
Fricción a través de discontinuidad									30° a 40°
Cohesión (Kg/cm ²)									1.0 a 1.5
Elasticidad (Kg/cm ²)									100000 - 400000
Coeficiente de poisson									0.25 a 0.30
Comentarios:			Granodiorita intensamente fracturada, silicificada por alteración piroclástica, meteorizada en profundidad, cuyos fenómenos caracterizan una Roca de Mala a Muy Mala Calidad.						

2.6.2 Voladura con aplicación del método de Precorte

Para conformar taludes de excavación de corte en roca, que presenten competencia de estabilidad y de soporte a la acción de la carga inducida por la masa rocosa situada por encima del talud, es recomendable la aplicación de la técnica de "Precorte", la cual consiste en perforar taladros a lo largo de la línea límite de la excavación, con carga explosiva y espaciamiento controlado, de modo que al disparar en forma simultánea antes de iniciar la voladura principal, exceda la resistencia dinámica de la roca y se genere un plano de debilidad que defina una pared de superficie regular, y que amortigüe las vibraciones inducidas por la voladura.

En el diseño del Precorte, se debe tener en cuenta, las siguientes consideraciones:

- La inclinación del talud del banco de corte e inter-rampas, debe estar comprendido entre los 70° a 80° respecto de la horizontal.
- Las perforaciones deben ser lo más exacta posible, en cuanto se refiere a la inclinación, espaciamiento y orientación, con la finalidad de obtener una pared de corte uniforme.
- Se debe evitar la sobre-fragmentación de la roca en la zona de la cresta de la excavación.
- Ajuste del diámetro de los taladros: Cuanto más grande sea el diámetro del taladro, el radio de acción de rotura también es mayor, por lo que debe reducirse el diámetro de los taladros del precorte, respecto de la voladura principal o masiva.

2.6.2.1 Determinación de los parámetros del Precorte

Presión de Detonación, para explosivos sin desacople

$$P_d = 110 * \rho_{exp} * (VOD)^2$$

Cargas Desacopladas y Cargas Distribuidas

$$FD = \left[\left(\frac{d_{exp}^2}{Dh^2} \right) * \left(\frac{l_{exp}}{H} \right) \right]$$

Reducción de la Presión de Detonación

$$P_b = 110 * FD^n * \rho_{exp} * (VOD)^2$$

Espaciamiento entre Taladros

$$S = \left[0.0254 * \frac{Dh * (P_b + T)}{T} \right]$$

Donde:

P_d = Presión de detonación (Mpa)

ρ_{exp} = Densidad del explosivo (gr/cc)

VOD = Velocidad de detonación del explosivo (km/s)

FD = Razón de desacoplamiento

d_{exp} = Diámetro de explosivo (pulg)

Dh = Diámetro del taladro (pulg)

P_b = Presión de detonación dentro del taladro (Mpa)

S = Espaciamiento entre taladros (m)

T = Esfuerzo de tensión de la roca (Mpa)

n = Exponente para taladros secos

Tabla 2.3 Parámetros de cálculo del precorte

PARAMETROS DE CÁLCULO		TIPO DE ROCA		
		Unidad	Granod. Silicificada	Observ.
Presión en la pared del taladro	P_d	Mpa.	3,437.5	Datos del fabricante
Densidad del explosivo	ρ_{exp}	gr/cc.	1.25	
Velocidad de detonación	VOD	Km/s	5.0	
Razón de desacoplamiento	FD	—	0.0189	Se utilizó 0.710 Kg. de dinamita Senatel-Magnafrac.
Diámetro del explosivo	d_{exp}	Pulg.	1.125	
Diámetro del taladro	D_h	Pulg.	3.5	
Longitud del explosivo	l_{exp}	m.	0.915	
Longitud del taladro	H.	m.	5.0	
Presión de detonación reducida	P_b	Mpa.	24.09	Datos del fabricante.
Exponente para taladros secos	n	—	1.25	
Espaciamiento entre taladros	S.	m.	1.50	Taladros a 1.0m. de espaciamiento.
Esfuerzo de tensión de la roca	T.	Mpa.	1.50	

Nota: En negrita son los resultados de aplicación teórica.



Figura 2.12 Vista general de la excavación, donde se observa los cortes de talud

CAPITULO III

CONTROL DE PROYECCIONES DE FRAGMENTOS DE ROCA INDUCIDAS POR LA VOLADURA

3.1 Cálculo de parámetros de perforación y voladura

El cálculo del burden, es considerado la variable geométrica más crítica en el diseño de una voladura, en la mayoría de los casos involucra el conocimiento de un gran número de variables que deben ser considerados en los parámetros de diseño. Por lo cual las ecuaciones clásicas del cálculo son herramientas de diseño para las primeras voladuras y luego la posterior caracterización de las rocas, la perforación efectuada y otras pruebas de monitoreo, determinarán el esquema adecuado para una malla requerida.

3.2 Cómo se originan las proyecciones de fragmentos de roca

Las proyecciones de fragmentos de roca o flyrock son causados por las siguientes posibles causas en orden de importancia:

- Taladros poco profundos, cuando el burden y el espaciamiento exceden la profundidad del taladro
- Taco insuficiente y/o material inadecuado para el taco
- Burden inadecuado especialmente cuando los taladros son inclinados

- Taladros sobrecargados y/o disparo sobreconfinado con alto factor de carga
- Taladros mal secuenciados o retardos fuera de secuencia
- Explosivos cargados en zonas vacias dentro del taladro o en estructuras suaves
- Voladura secundaria de pedrones, etc.

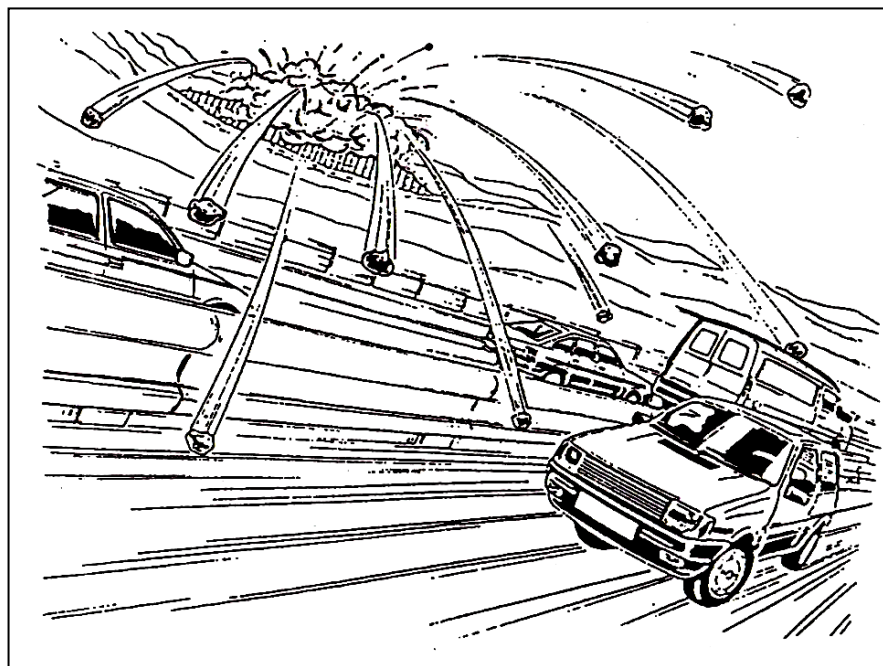


Figura 3.1 Típica proyección de fragmentos de roca

3.2.1 Modelos matemáticos mas usados para predecir el excesivo lanzamiento de fragmentos de roca inducidos por la voladura

Los investigadores han demostrado que la distancia máxima de proyeccion ocurre a un ángulo de 45° sin considerar los efectos del aire, se puede aplicar la siguiente formula para calcular la velocidad inicial de la proyeccion del fragmento de roca o flyrock.

$$Vi = \sqrt{\frac{Rg}{\text{sen}\theta}}$$

$$R = \frac{Vi^2 \text{sen } 2\theta}{g}$$

Donde:

Vi = Velocidad inicial de lanzamiento (m/s)

R = Rango alcanzado por el fragmento de roca (m)

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

θ = Ángulo de lanzamiento (rad)

3.2.2 Modelo Matemático de la SDEREFO

The swedish detonic research foundation (SDEREFO); algunos años atrás; realizó una serie de investigaciones para determinar en primer lugar las zonas peligrosas circundantes a las areas de los disparos primarios.

Luego de llevar a cabo una serie de casos-estudio; ellos determinaron el siguiente modelo matemático para este proposito:

$$Vi = 10 * HB\emptyset * 2600(Fz - \rho r)$$

Donde:

Vi = Velocidad inicial (m/s)

HB∅= Diámetro del taladro (pulgadas)

Fz = Tamaño de los fragmentos de roca (m)

pr = Densidad de la roca (Kg/m³)

Usando el modelo matemático anterior y algunas formulas aplicadas en balística, se tendra la siguiente relación matemática:

$$Rmax = 260(BH\phi)^{2/3} (m)$$

Por otro lado, el diámetro de los fragmentos de roca puede ser calculado usando la siguiente relación matemática:

$$Fz = 0.1(BH\phi)^{2/3} (m)$$

3.3 Uso de protecciones

Como medida de prevención a los posibles daños de las proyecciones de los fragmentos de roca, es de uso común en trabajos de obras civiles el uso de arena, su aplicación es sólo para trabajos de pequeña dimensión como zanjas de anchos menores a 1.0 m.

En voladuras de superficie con uso de explosivos, un sistema usado con conocimiento de causa es el de mallas o telas metálicas, neumáticos o trozos de fajas entramados como medida de protección para evitar las proyecciones.

El sistema de protección elegido debería de cumplir con las siguientes características:

- Alta resistencia y peso reducido
- Facilidad de unión
- Permeabilidad de gases
- Facil de colocar y retirar
- Económico y recuperables para otras voladuras

- Capacidad de cubrir grandes áreas

Es difícil conseguir un sistema de protección para un área de voladura grande.

3.4 Recomendaciones para el control de proyecciones de fragmentos de roca inducidos por la voladura

Una voladura exitosa sin proyecciones es la culminación de diferentes factores importantes con los mejores estándares de seguridad y calidad, que cubren las principales operaciones durante la voladura.

Cuando se realizan voladuras de superficie en las cuales se requiera controlar las proyecciones para evitar dañar las estructuras y/o monumentos próximos, se debe tener en consideración lo siguiente:

- a). Replantear en campo el esquema de perforación, teniendo mayor cuidado si el macizo rocoso es irregular, muy común en obras de construcción.
- b). Controlar las desviaciones y profundidades de los taladros.
- c). Controlar la dimensión del burden de la primera fila.
- d). Controlar la existencia de fracturamiento o cavidades en los taladros.
- e). Controlar el factor de carga de los taladros.
- f). Mejorar el atacado, medir su longitud y emplear material adecuado.
- g). Emplear una adecuada secuencia de salida que incremente el tiempo de retardo entre filas, permitiendo el movimiento horizontal de la roca fragmentada, y evitando el movimiento vertical.
- h). Elegir adecuadamente el direccionamiento, que debe ser orientado en sentido opuesto a cualquier estructura o zona a conservar.
- i). Iniciación en el fondo de los taladros.

Se puede deducir que usando ciencia y tecnología moderna se puede controlar, supervisar y ejecutando las recomendaciones y consideraciones mencionadas en los nueve puntos básicos, deben ser la regla general para todas las personas que esten inmersas en las operaciones de voladura de rocas.

CONCLUSIONES

1. Los servicios de perforación y voladura deben ser ejecutados por experimentados técnicos y profesionales que pasan por entrenamientos intensivos. La empresa asume la responsabilidad total por los resultados de la voladura, eliminando de este modo los riesgos que se pudieran presentar para el cliente.
2. Durante el proceso de la voladura, uno es consciente del grado de dificultad y riesgo, que exige el trabajo, por eso es indiscutible, que se debe tomar las previsiones de seguridad oportunas y coherentes.
3. La caracterización del macizo rocoso permite redefinir los parámetros de voladura de acuerdo a la calidad del frente teniendo en cuenta la separación de las discontinuidades, la resistencia a la compresión, RQD, densidad de la roca, entre otros.
4. En términos de diseño, estos siempre deben estar pensados en minimizar el nivel de confinamiento de cada taladro, pero por otro lado, también buscar aquella secuencia de iniciación que minimice los niveles de acoplamiento de ondas en pro de la reducción del nivel de vibraciones, pero que también no afecte la fragmentación obtenida. Mezclando ambos conceptos (vibración – frecuencia), es posible pensar que se debe utilizar el menor retardo entre taladros posibles (de acuerdo al análisis) que favorezca el no acoplamiento de ondas y se logre obtener una adecuada granulometría del material volado.

5. La realización de monitoreos constantes en un frente de explotación durante las voladuras permiten analizar la velocidad de la partícula como de onda aérea las cuales reconocen la posibilidad que se esté por encima o por debajo de los umbrales de daño estipulados en las normas.
6. Como la roca no es un medio isotrópico, dificulta predecir el nivel de vibraciones para una determinada distancia. Las diferentes ondas generadas en una voladura se ven fuertemente influenciadas por las diferentes serie de estructuras, zonas de debilidad y zonas de rocas de diferente competencia. Producto de esta condición, si se debe realizar voladuras dentro de un radio crítico conocido, siempre es recomendable realizar pruebas preliminares que abarquen esas distancias críticas. Siempre será mejor realizar una interpolación a una extrapolación de datos.
7. La aplicación de herramientas computacionales, alimentadas con datos de calidad, facilita los procesos de análisis dándoles un mayor dinamismo y velocidad, esta condición que permite jugar con diferentes escenarios variando las diferentes variables e ir iterando hasta encontrar los valores deseados.
8. La aplicación de detonadores electrónicos, permite seleccionar el tiempo de retardo adecuado para una condición en particular, definitivamente la aplicación de esta tecnología para condiciones de voladuras complejas mejora las posibilidades de éxito.

RECOMENDACIONES

- Mediante los controles de desviación de taladros se puede minimizar la proyección, la onda aérea, y mejorar la fragmentación. El método utilizado y la capacitación de los operadores sirven para el éxito de este trabajo.
- Para lograr una mayor precisión en el diseño del modelo predictivo es necesario trabajar con equipos más especializados; como por ejemplo, en el momento de medir distancias es recomendable utilizar equipos como estaciones totales o GPS, ya que al utilizar cintas métricas se incurre en errores, ya sean del instrumento en sí, humanos o los originados por la dificultad del terreno, aumentando así el error total de medición.
- Se deberían desarrollar, para las condiciones propias del país, límites de vibraciones (no solo debidos a voladuras sino a otros fenómenos como el tráfico vehicular pesado –por ejemplo paso de Tractocamiones o buses articulados de sistemas de transporte masivo, operación de equipos de construcción, etc) ajustados a las condiciones locales y de construcción de edificaciones. Para ello es necesario desarrollar una mayor cantidad de proyectos de investigación que involucren el registro de las vibraciones debidas a fenómenos naturales en conjunto con mediciones de las fisuras en edificaciones de vivienda cercanas.
- Los monitoreos de vibraciones deben ser realizados por personal entrenado y experimentado para poder recabar información confiable y poder tomar decisiones correctas.

- En la práctica los detonadores de microrretardo presentan una dispersión en los tiempos de salida, tanto mayor cuanto más alto es el número de la serie. Por esta razón, las simulaciones con ordenador deben ser de tipo probabilístico más que determinístico, pudiendo aplicarse la simulación de Monte Carlo para establecer los tiempos de salida de cada carga mediante la generación de números aleatorios y uso de las funciones de densidad de los tiempos nominales de microrretardo.

BIBLIOGRAFÍA

- FITGERALD NICHOLSON, Roy (2005). Universidad: Lulea University of Technology Determination of blast vibrations using Peak Particle Velocity in Bengal Quarry, in St Ann, Jamaica.
- ORIARD, LEWIS (1999). The effects of vibrations and environmental forces.
- SISKIND - STAGG – KOPP – DOWNDING (1981). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine design.
- HOLMBERG, JOHANSSON, “Control de Daño en Voladuras en Minería, Civil y Construcción”, Viña del Mar, Chile 1999
- LOPEZ JIMENO, “Manual de Perforación y Voladuras de Roca”
- ORICA Mining Services, “Antecedentes en Vibraciones”, OMS. Apuntes Generales, “Normas y Criterios Internacionales, relacionados al daño de estructuras por vibraciones”
- HAINES, A. y P. TERBRUGGE J. (1991). Estimación preliminar de la estabilidad de la roca con pendiente rock sistemas de clasificación de masas. Proc. Séptimo Int. Cong. Int. Soc. Rock Mech. Aachen. Balkema, Rotterdam, vol 2, pp 887-892.

- STEWART, R.M. y KENNEDY, B. A. (1971). El papel de la estabilidad de taludes en la economía, diseño y operación de minas a cielo abierto. Proc. 1er Simposio sobre la estabilidad en la explotación minera a cielo abierto, Vancouver 1970. Publicado por A.I.M.E. Nueva York, 1071: pp 5-21.
- BOADU, F.K. 1997. Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties—Analytical studies. J. Applied Geophys. 36, 1–19. Cruden D.M. 1977
- DERSHOWITZ W.S. & HERDA H.H. 1992. Interpretation of fracture spacing and intensity. Tillerson J.R. & Wawersik W.R. (eds.), proc., 33rd US Symp. On rock Mech, Belkema, Rotterdam, pp. 757–765.
- GASMI H., HAMDI E. & BOUDEN ROMDHANE N. 2008. Influence of the in situ rock mass structure on the blast induced vibrations. Int. Conf. On Geotech Engineering—ICGE'08, Hammamet, Tunisia, March 24–26, pp.523–532.
- DUBINSKI J. & KONOPKO W. 2000. Rockbursts—Assessment, Prediction and Control (in Poland), Central Mining Institute, Katowice. Dvorsky P. & Konicek P. 2005. Systems of Rock Blasting as a rock burst measure in the Czech Part of the Upper Silesian Coal Basin.
- HOLUB K, RUSAJOVÁ, HOLECKO J. Particle velocity generated by rockburst during exploitation of the longwall and its impact on the workings, Int. J Rock Mech Min Sci 2011, 48(2011): 942–949.

- KONÍČEK P. 2009. Evaluation of Effectiveness of Rock Blasting for Stress Release in Rock Mass (in Czech). Documenta Geonica 2009/1, Ústavgeoniky AV ČR, v.v.i., Ostrava, 2009. Konicek P., Konecny P. and Ptacek J. (2011a) Destress Rock Blasting as a Rockburst Control Technique, In Proceedings of the 12th International Congress on Rock Mechanics, Beijing, 18–21 October 2011, Taylor & Francis Group, pp. 1221–1226.

- KRATKY D. & SMUZ V. 2008. General design of distress blasting in area of longwall No. 339 503j (in Czech), unpublished, Darkov Colliery, pp. 10. Kratky D. & Macura M. 2011. General design of distress blasting in area of longwall No. 340 206 (in Czech).

- Methodical instructions of rock burst control in OKR—Rock blasting (in Czech), Paskov, unpublished. OKD, DPB, a. s. 2005. Working rules of rock burst control in OKR (in Czech), Paskov, unpublished.

- PETUCHOV I. M. & ZAMARSKI B. 1990. Rockbursts and their Prevention in Hardcoal Mines (in Czech), SNTL, Prague, pp. 192.