

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA MINERA Y METALURGICA

SECCION DE POS GRADO



**DISEÑO DE LAS MALLAS DE PERFORACION Y
VOLADURA UTILIZANDO LA ENERGIA PRODUCIDA
POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS**

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN:

INGENIERIA DE MINAS

PRESENTADO POR:

VICTOR ALEJANDRO AMES LARA

LIMA - PERU

2008

Con amor y mucho cariño a:
Mi esposa Soledad Tenorio
Mis hijos: Paolo Alejandro
Renzo Víctor
Gianella Claudia

Al recuerdo imperecedero de
mi madre Bernardina Lara
A mi padre Félix Ames.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional de Ingeniería, institución que me acogió con los brazos abiertos para estudiar la Maestría en la Sección Post Grado de la Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica, y cumplir con ese sueño de mejorar mi nivel académico en una universidad de prestigio.

También el agradecimiento a todos los docentes de la Mención en Ingeniería de Minas y a mis Asesores del presente trabajo de investigación, en especial al Dr. Carlos Agreda Turriate quién influyó, con sus enseñanzas y consejos, a que me introdujera al fascinante mundo de la Ingeniería de Explosivos y la Voladura de Rocas, los cuales seguiré estudiando cotidianamente; además, al M. Sc. José Corimanya Mauricio por su contribución a mejorar el contenido de la presente investigación.

RESUMEN

La tendencia a utilizar explosivos de gran energía hace que también sea una necesidad la aplicación de nuevas técnicas para el diseño de mallas de perforación y voladura, por lo que en este trabajo se da a conocer la utilización de la potencia relativa por volumen (RBS).

Esta teoría tiene el sustento en que la energía de un explosivo comparado con la de otro explosivo es muy diferente, en el mismo volumen de un taladro, por lo que al cambiar en una mina en operación, un explosivo en uso por otro de mayor energía se tiene que tener en cuenta la diferencia en el contenido de energía de cada explosivo. Este criterio también implica que el uso del factor de energía debe ser una herramienta cotidiana en vez del uso del factor de carga o factor de potencia, el cual a la fecha es utilizada en todas las unidades mineras de nuestro país a pesar que el factor de energía tiene muchos años de vigencia en los países desarrollados porque permite cuantificar correctamente el rendimiento de la energía del explosivo.

La potencia relativa por volumen (RBS) permite modificar rápidamente las dimensiones originales del burden y espaciamiento y de esta manera permite ahorrar tiempo y costo en los ensayos de prueba y error para la implementación de las nuevas dimensiones en las operaciones de perforación y voladura. En el presente trabajo se realiza un cambio de ANFO a Anfo pesado 50/50 y se determinó que se puede reducir los costos de perforación y voladura con un explosivo más energético, así como también se mejoró la fragmentación obtenida usando ANFO.

ABSTRACT

The tendency to use explosive of great power makes that it is also a necessity the application of new techniques to design the drilling patterns, because is necessary to know the use of the relative bulk strength (RBS) in the present investigation.

This theory has its base in that the energy of an explosive compared to each other is very different, in the same hole volume, that is why changing in a mine operation, an explosive in use for another of more energy has to keep in mind the difference about the energy of each explosive. This approach also implies that the use of the energy factor should be a daily factor instead of the use of the load factor or power factor, which is used in most of the mining units of our country however the energy factor has many years of validity in the developed countries up to date because it allows to quantify the yield of the energy of the explosive correctly.

The RBS allows to modify the original dimensions of the burden (B) and spacing (S) quickly and in this way it allows us to save time and cost in the test rehearsals and error for the implementation of the new dimensions in the field. In the work is carried out a change from ANFO to heavy Anfo 50/50 and it was determined that it can decrease the drilling and blasting costs with a more energetic explosive, as well as it improved the fragmentation obtained using ANFO.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes	1
1.2 Formulación del problema	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Justificación	3
1.5 Marco teórico	3
1.6 Hipótesis	4
1.7 Metodología del estudio	4
1.7.1 Método de Investigación	4
1.7.2 Diseño metodológico	4

CAPITULO II

2.0 INTRODUCCION

2.1 Introducción.	7
-------------------	---

CAPITULO III

3.0 ESTUDIO Y ANALISIS DEL MODELO MATEMATICO QUE UTILIZA LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN (RBS) EN EL DISEÑO DE LAS MALLAS DE PERFORACION Y VOLADURA

3.1 Estudio Bibliográfico	10
3.1.1 Combustión o deflagración	10
3.1.2 Detonación.	10
3.1.3 Explosión	11
3.1.4 Determinación de las principales ecuaciones para los cálculos termodinámicos.	11

3.1.4.1 Ecuación de la presión de detonación	12
3.1.4.2 Ecuación de Ranking – Hugoniot	13
3.1.4.3 Hipótesis de Chapman – Jouguet	13
3.1.4.4 Ecuación BKW	13
3.2 Físico química de los explosivos	14
3.3 Energía las mezclas explosivas	15
3.3.1 Determinación de la energía	17
3.3.1.1 Medición de la energía	17
3.3.1.2 Cálculo de la energía	18
3.3.2 Potencia de los explosivos	18
3.3.2.1 Potencia absoluta por peso (AWS)	18
3.3.2.2 Potencia absoluta por volumen (ABS)	18
3.3.2.3 Potencia relativa por peso (RWS)	19
3.3.2.4 Potencia relativa por volumen (RBS)	19
3.3.3 Eficiencia de los explosivos	19
3.3.4 Factor de energía	20
3.4 Características geomecánicas del macizo rocoso que tienen una influencia determinante en los resultados de la voladura de rocas	21
3.4.1 Propiedades físico – mecánicas de las rocas	22
3.4.2 Características geológicas y geotécnicas del área en estudio	23
3.4.2.1 Litología	23
3.4.2.2 Fracturas preexistentes	24
3.4.2.3 Tensiones de campo	24
3.4.2.4 Presencia de agua	25
3.3.5 Temperatura de macizo rocoso	25
3.5 Variables de la geometría del disparo	25
3.5.1 Burden	25
5.5.2 Espaciamiento	26
3.5.3 Otros	26

3.6 Caracterización matemática del modelo de la potencia relativa por volumen (RBS)	28
3.6.1 Modelo de Crosby & Pinco	28
3.6.2 Ecuación modificada por el autor	28
3.6.2.1 Desarrollo del modelo matemático modificado	30
3.6.2.2 Ejemplos de la utilización de la ecuación modificada	32
3.6.2.3 Esquema para la verificación del modelo matemático	34

CAPITULO IV

4.0 APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO QUE UTILIZA LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN (RBS)

4.1 Parámetros de diseño	36
4.1.1 Básicos	36
4.1.2 Principales	36
4.2 Perforación y voladura	37
4.3 Diseño de la malla de perforación y voladura con el criterio RBS	38
4.3.1 Condiciones cuando se usaba ANFO	38
4.3.2 Cálculo de las nuevas dimensiones	39
4.3.2.1 Desmonte	40
4.3.2.2 Mineral	40
4.3.2.3 Mineral – desmonte	41
4.3.2.4 Resumen	41
4.3.3 Características de las voladuras de prueba utilizando ANFO pesado 50/50 (emulsión/ANFO)	42
4.3.4 Cálculo del factor de energía	43
4.4 Cálculo computarizado de las mallas de perforación y voladura	45
4.4.1 Algoritmo y diagrama de flujo del programa	45
4.4.2 Validación del programa	46

CAPITULO V**5.0 ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS**

5.1 Discusión técnica	48
5.1.1 Análisis de los resultados de la fragmentación	48
5.1.1.1 Análisis de la fragmentación en la primera prueba	48
5.1.1.2 Análisis de la fragmentación en la segunda prueba	49
5.1.2 Cálculo del factor de energía	49
5.2 Discusión económica	50
5.3 Discusión Ecológica	50
5.4 Análisis de los resultados	51

CAPITULO VI**6.0 CONCLUSIONES****CAPITULO VII****7.0 RECOMENDACIONES****CAPITULO VIII****8.0 BIBLIOGRAFIA****CAPITULO IX****9.0 APENDICES**

9.1 Ejemplo del cálculo de la energía del ANFO.	
9.2 Procedimiento para utilización del material explosivo – ANFO PESADO.	
9.3 Software.	
9.4 Resultados de las voladuras de prueba.	
9.4.1 Primera Prueba.	
9.4.2 Segunda Prueba.	
9.5 Cálculo de los costos de perforación y voladura con el uso del ANFO y el ANFO PESADO 50/50.	

INDICE DE TABLAS

	Página
3.1. Pérdida de energía en el AN/FO por contenido incorrecto de petróleo	15
3.2. Distribución de la energía en diferentes eventos	16
3.3. Eficiencia de los Explosivos	20
3.4. Tipos de discontinuidades.	24
4.1 Parámetros básicos del Tajo	36
4.2 Parámetros de diseño del Tajo	37
4.3 Parámetros de perforación y Voladura	37
4.4 Energía de las mezclas a granel del ANFO pesado	39
4.5 Resumen de las nuevas dimensiones de burden (B) y espaciamiento (E)	41
4.6 Resumen de los factores de energía	44

INDICE DE FIGURAS

	Página
3.1. Mostrando el proceso de detonación de una mezcla explosiva	11
3.2. Esquema para la deducción de ecuaciones.	12
3.3. Esquema para la medición de la energía del explosivo bajo el agua	17
3.4 Interacción de las propiedades de las rocas y las variables Controlables con las operaciones mineras	23
3.5 Variables de la geometría del disparo en minería superficial	27
3.6 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a dos tipos (carga de fondo y carga de columna)	29
3.7 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a tres tipos de explosivos usando los tacos intermedios	30
3.8. Cambio de explosivo ANFO a otros dos tipos de explosivos	33
3.9. Cambio de explosivo ANFO a otros tres tipos de explosivos	34
3.10 Esquema para la verificación del modelo matemático	35
4.1. Esquema del carguío del taladro con ANFO	39
4.2. Esquema del carguío del taladro con ANFO pesado 50/50	43
4.3 Diagrama de Flujo para el diseño de una voladura	45
4.4 Presentación del programa para el cálculo de la malla de perforación y voladura usando la RBS	46
4.5. Pantalla interactiva del programa, muestra el ingreso de datos y los parámetros de salida	46
4.6 Pantalla mostrando una corrida del programa con las nuevas dimensiones del trabajo de investigación, cambiando de ANFO a ANFO pesado en mineral	47

LISTA DE SIMBOLOS

ABS	Potencia absoluta por volumen	MJ/Kg.
AWS	Potencia absoluta por peso	MJ/Kg.
B	Burden	m
c	Velocidad del sonido	m/s
D	Velocidad de la onda de choque	m/s
D	Diámetro del taladro	pulgadas
δ	Densidad	g/cc.
E	Energía	MJ
E	Espaciamiento	m
F. E.	Factor de energía	MJ/TM.
F.C.	Factor de carga	kg/TM
H	Altura de banco	m
lc	Longitud de carga	m
lq	Longitud de carga	m
lp	Longitud de perforación	m
ls	Longitud de sobre perforación	m
O _B	Balance de oxígeno	atm - gr
P	Presión	MPa
Ph	Presión hidrostática	MPa
Q3	Calor de explosión	MJ/Kg.
Qr	Calor de reactantes	MJ/Kg.
Qp	Calor de los productos	MJ/Kg.
RBS	Potencia relativa por volumen	adimensional
RWS	Potencia relativa por peso	adimensional
T	Temperatura	°K
t	Tiempo	minutos, segundos, horas
Up	Velocidad de la partícula	m/s
V	Volumen	m ³ , litros
VOD	Velocidad de detonación	m/s
VOD _{cj}	VOD en el plano Chapman - Jouguet	m/s

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Revisado la bibliografía e informaciones de origen nacional se ha podido determinar que no existen trabajos respecto a la aplicación de la energía del explosivo como un elemento fundamental para el diseño de la mallas de perforación y voladura.

Cuando se inició la Maestría en Ingeniería de Minas en la UNI, en las clases de voladura de rocas, recién se llegó a conocer que uno de los elementos importantes a tener en cuenta era los explosivos, por lo que en tecnología de explosivos se dio énfasis en el cálculo de la energía del explosivo y en la termo hidrodinámica se calcula la VOD, la presión de detonación y la presión de explosión teniendo en cuenta la energía liberada por el explosivo.

En el III SIPERVOR del año 1995, organizado por la UNI se presentó el trabajo “Factor de Potencia vs. Factor de Energía de las Mezclas Explosivas Comerciales usadas en la Voladura de Rocas” del autor de la presente Tesis en la que se indica las bondades del control de la eficiencia de los explosivos teniendo en cuenta la energía liberada por las mezclas explosivas, factor de energía, en contraste con el factor de potencia que toma en cuenta solo el peso del explosivo. A pesar de este trabajo a la fecha en la totalidad de las empresas mineras del país se sigue utilizando el criterio del factor de potencia para evaluar el rendimiento de los explosivos.

A nivel mundial la tendencia a utilizar explosivos de gran potencia (energía), como es el caso en el Canadá y otros países se están desarrollando los explosivos físicos los cuales liberan energía desde 2 200 a 3 865 Kcal./kg., mientras que el kilogramo de nitroglicerina pura libera solo 1 600 kcal. Estos avances obligan como una necesidad la aplicación de nuevas técnicas para el diseño de mallas de perforación y voladura.

1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

La tendencia al cambio de explosivos de mayor energía en la minería nacional es impostergable. ¿Es posible el uso de modelos matemáticos que toman en cuenta la energía del explosivo para el diseño de las mallas de perforación y voladura y evitar las pruebas de ensayo y error que generan mayor consumo de tiempo y gastos innecesarios?

1.3 OBJETIVOS

a) Objetivos Generales

- Analizar y aplicar la energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura correctamente.
- Para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Mención en Ingeniería de Minas.

b) Objetivos Específicos:

- Conocer y determinar la energía de los explosivos.
- Analizar el uso de la potencia relativa por volumen (RBS).
- Determinar la geometría del disparo con el uso de la potencia relativa por volumen.
- Analizar el rendimiento de los explosivos con el uso del factor de energía.
- Mejorar el grado de fragmentación de las rocas.

1.4 JUSTIFICACION

En nuestro país no se utiliza el diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía de explosivo, así como existe desconocimiento que la mejor evaluación del rendimiento de un explosivo es por medio del factor de energía porque 1 kilogramo de cada tipo de explosivo libera diferentes cantidades de energía.

1.5 MARCO TEORICO

La tendencia a utilizar explosivos de gran potencia hace que también sea una necesidad la aplicación de nuevas técnicas para el diseño de mallas de perforación y voladura, por lo que en este trabajo se da a conocer la utilización de la potencia relativa por volumen (RBS).

Esta teoría tiene el sustento en que la energía de un explosivo comparado al de otro es muy diferente, en el mismo volumen de taladro, por lo que al cambiar, en una mina en operación, de explosivo se tiene que tener en cuenta la cantidad de energía del explosivo en uso y los que se van usar..

La potencia relativa por volumen RBS permite modificar rápidamente las dimensiones originales del burden y espaciamiento y de esta manera nos permite ahorrar tiempo y costos en los ensayos de prueba y error para la implementación de las nuevas dimensiones en las operaciones de perforación y voladura.

Esto también implica que el uso del factor de energía debe ser una herramienta cotidiana para medir el rendimiento de los explosivos en vez del uso del factor de carga o factor de potencia, el cual a la fecha es utilizada en todas las unidades mineras de nuestro país a pesar que el factor de energía tiene vigencia hace muchos años en los países desarrollados porque permite cuantificar correctamente el rendimiento de la energía del explosivo.

Esto significa que la RBS permite diseñar las mallas de perforación y voladura mientras que el factor de energía no permite medir el rendimiento de energía de los explosivos.

1.6 HIPOTESIS

El modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS) es adecuado para el diseño de mallas de perforación y voladura..

1.7 METODOLOGIA DEL ESTUDIO

1.7.1 Método de Investigación

Método general: Análisis y comparación.

Método específico: Observación y medición.

1.7.2 Diseño Metodológico

a) Población y Muestra

Población : Industria minera del país.

Muestra : Una empresa minera del norte del país.

b) Variables

Cuadro Nº 1.1. Variables de entrada y salida	
Variable	Descripción
Entrada	Geología de la mina, energía de los explosivos, potencia relativa por volumen de los explosivos (RBS), diámetro de taladro, burden, espaciamento, sistemas de iniciación, costos de explosivos y accesorios.
Salida	Diseño de la malla, burden, espaciamento, factor de potencia, factor de energía, fragmentación.

c) Escala de Medición

Cuadro Nº 1.2. Unidades de las variables de entrada y salida	
Variable	Descripción
Entrada	Cubicación de mineral (t) Energía de los explosivos (Kcal/kg) Potencia Relativa por volumen, adimensional Diámetro (pulgadas) Burden (en uso) (m) Espaciamiento (en uso) (m) Costo de explosivos y accesorios (US \$)
Salida	Burden (a usar) (m) Espaciamiento (a usar) (m) Factor de potencia (kg/TM, kg/m ³) Factor de energía (kcal/TM, kcal/ m ³) Fragmentación (%) Costo de voladura (US \$/TM)

d) Modelo de Observación

$$Y_i \rightarrow X_j$$

e) Unidad de Observación

Factor de potencia (kg/TM, kg/m³), factor de energía (kcal/TM, kcal/ m³), fragmentación (%)

f) Diseño de Investigación

Muestra → Observación

g) Técnicas y Procedimientos de Recolección de Datos

Se tiene los catálogos de fabricantes de explosivos nacionales y extranjeros para la determinación de las principales propiedades de los explosivos.

La empresa dispone de los datos técnicos sobre las operaciones de perforación y voladura.

Para la elaboración de este trabajo se tomó como referencia el artículo “More Power to the Pop” escrito por W. Crosby y M. Pinco, para tener un fundamento científico.

h) Materiales y Equipos a utilizar

Computadoras y software respecto al tema, cámaras fotográficas, y otros.

CAPITULO II

2.0 INTRODUCCION

La tendencia, en la minería nacional, a usar explosivos de gran potencia tales como las emulsiones (altos explosivos y agentes de voladura) y los ANFOs pesados se hace más evidente tanto en minería superficial como en minería subterránea.

Pero, la aplicación de nuevas mezcla explosivas de mayor energía (actualmente se tiene los explosivos físicos que son de mayor energía que los explosivos químicos), en minas en operación, significa el cambio de las diferentes dimensiones, burden y espaciamiento principalmente, de las mallas de perforación y voladura. Esto es un problema cuando no se tiene un modelo matemático que nos permita establecer las nuevas dimensiones y que se realizan empíricamente empezando el uso de las nuevas mezclas explosivas con la malla de perforación y voladura del explosivo que se estaba usando, esto consume tiempo e incrementa los costos de las operaciones de perforación y voladura, hasta determinar las dimensiones adecuadas mediante estas pruebas de ensayo y error.

Por consiguiente se necesita la aplicación de nuevas técnicas para el diseño de mallas de perforación y voladura. Un nuevo criterio para el mencionado diseño es aquel modelo matemático que tiene como fundamento la potencia relativa por volumen (RBS).

Como se ha señalado en el capítulo anterior el objetivo principal de esta Tesis es el de analizar y aplicar la energía producida por una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura, en particular con el uso de la potencia relativa por volumen (RBS) con la

utilización del modelo matemático propuesto por Crosby & Pinco, posteriormente dicho modelo es modificado por el autor para el uso de dos o más explosivos.

El modelo matemático tiene como fundamento que la energía de una mezcla explosiva comparada al de otra mezcla diferente, también difiere en la cantidad de energía que puede liberar en el proceso de combustión-detonación - explosión, en el mismo volumen de taladro, esto se puede observar nítidamente cuando se realiza el cálculo de la potencia relativa por volumen (RBS) en cualquier tipo de mezcla explosiva.

Por lo tanto, en una mina en operación que ya estableció la malla de perforación y voladura, burden y espaciamiento principalmente, es posible calcular las nuevas dimensiones de la malla debido al cambio de una mezcla explosiva de mayor o menor energía que aquel en uso. Como se observa la potencia relativa por volumen (RBS) nos permite modificar rápidamente las dimensiones originales del burden y espaciamiento y de esta manera podemos ahorrar tiempo y costos en los ensayos de prueba y error para la implementación de las nuevas dimensiones en las operaciones de perforación y voladura.

Estos criterios también implican el uso de otra forma de evaluación del rendimiento de los explosivos, en este caso se tiene la utilización del factor de energía. Este factor deberá ser una herramienta de uso cotidiano en vez del uso del factor de carga o el factor de potencia, el cual a la fecha es utilizada en todas las unidades mineras de nuestro país a pesar que el factor de energía tiene muchos años de vigencia en los países desarrollados porque permite cuantificar correctamente el rendimiento de la energía del explosivo.

La etapa de verificación del modelo consiste en realizar las pruebas de perforación y voladura utilizando las nuevas dimensiones calculadas con el modelo matemático de la potencia relativa por volumen (RBS) y que en

el presente trabajo se realizó dos pruebas utilizando ANFO pesado para reemplazar al ANFO, sabiendo que el ANFO pesado 50/50 utilizado tiene una potencia relativa por volumen (RBS) igual a 1,34; mientras que el ANFO tiene una RBS igual a 1,00. La evaluación de los resultados se basó en el grado de fragmentación producido por los explosivos.

CAPITULO III

3.0 ESTUDIO Y ANALISIS DEL MODELO MATEMATICO QUE UTILIZA LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN (RBS) EN EL DISEÑO DE LAS MALLAS DE PERFORACION Y VOLADURA

3.1 ESTUDIO BIBLIOGRAFICO

Para el mejor entendimiento de la tecnología de explosivos es necesario conocer y entender correctamente las siguientes definiciones ¹:

3.1.1 Combustión o deflagración

La combustión de una sustancia condensada, significa una reacción exotérmica que toma lugar en la superficie de los granos que componen el material. Esta reacción es mantenida por el calor transmitido de los productos gaseosos de la reacción.

3.1.2 Detonación

La detonación es una reacción exotérmica específica la cual está asociada con una onda de choque. La reacción química empieza debido al calor, el cual es un resultado de la compresión por la onda de choque. La energía liberada en la reacción mantiene la onda de choque. Una característica muy importante de la detonación es que los productos de la reacción tienen inicialmente una densidad más alta que la sustancia sin reacción.

¹ Johansson, C. H. and Persson, P. A.: "Detonics of High Explosives", Academic Press, London, New York, 1970

3.1.3 Explosión

La explosión de una sustancia explosiva es una rápida expansión de la misma en un volumen más grande que su volumen original.

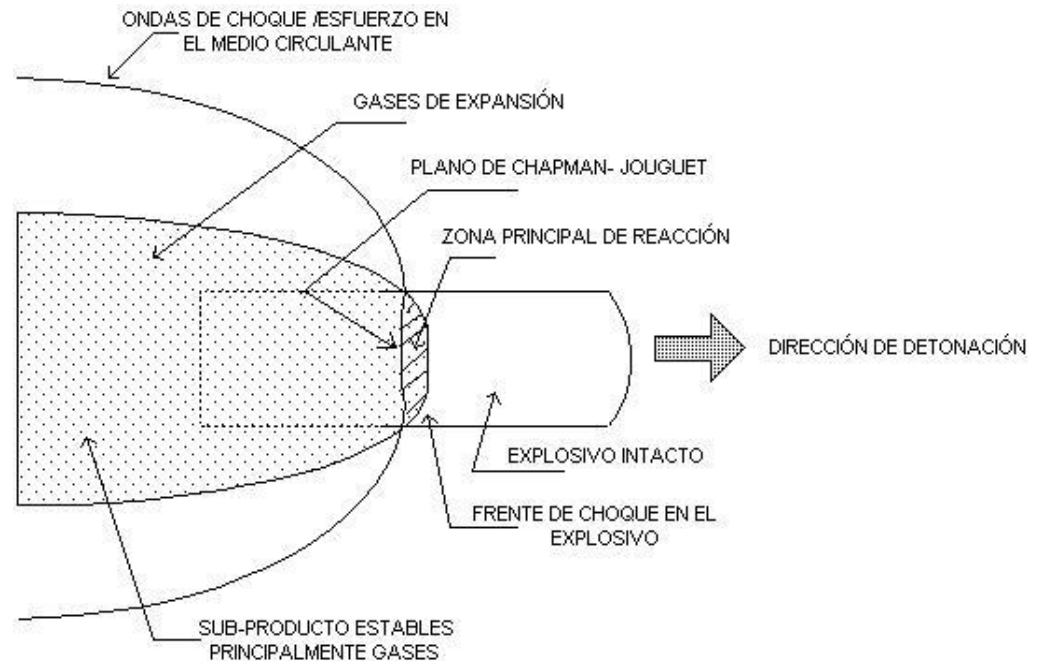


Figura 3.1. Mostrando el proceso de detonación de una mezcla explosiva

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

3.1.4 Determinación de las Principales Ecuaciones para los Cálculos Termodinámicos ²

Es muy conocido que la velocidad de detonación es una característica constante de un explosivo en particular cuando los otros parámetros son mantenidos constantes. Esto explica que el conocimiento de la velocidad de detonación puede llevar a estimados muy exactos de la presión de detonación el cual es de particular importancia y difícil de ser medido directamente.

² P.D. (Takis) Katsabanis: "Explosives Technology", Department of Mining Engineering, Queen[s] University, Canada, 2000.

3.1.4.1 Ecuación de la presión de detonación

Consideremos una onda en el plano de detonación el cual ha sido establecido en un explosivo (figura 3.2).

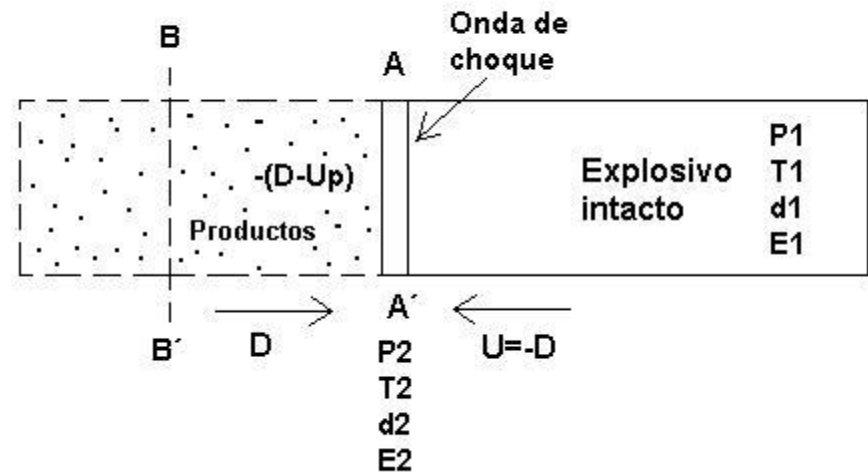


Figura 3.2. Esquema para la deducción de ecuaciones.

Fuente: Technology Explosives. Queen's University. Canada. 2000

El frente de la onda avanza hacia el explosivo con una velocidad constante D . El explosivo no detonado fluye hacia el frente de choque AA' con una velocidad constante $U = -D$. La presión, temperatura, densidad y energía interna por unidad de masa son P_1 , T_1 , δ_1 , E_1 en todos los puntos al lado derecho de AA' . El frente de la onda es una discontinuidad en comparación a los cambios que ocurren detrás de él. Por lo tanto en AA' estos valores cambian a los valores P_2 , T_2 , δ_2 , E_2 . Estos aún pueden cambiar mas tarde de etapa (explosión).

La velocidad aparente de la masa que va dejando el frente es $-(D-U_p)$ donde U_p es la velocidad de la partícula (velocidad de masa) en la zona entre AA' , BB' , relativo a las coordenadas fijadas.

Seguendo criterios y procedimientos químicos, termodinámicos y otros tenemos que la presión de detonación está dado por:

$$P_2 = \delta_1 (D^2/4) \quad (3.1)$$

Además la presión de taladro o explosión para un explosivo completamente acoplado es la mitad de la presión de detonación. Así:

$$P_e = P_3 = P_2/2 \quad (3.2)$$

3.1.4.2 Ecuación de Rankine-Hugoniot

La conservación de la energía es expresada mediante la siguiente ecuación:

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2} (P_1 + P_2)(V_2 - V_1) \quad (3.3)$$

3.1.4.3 Hipótesis de Chapman-Jouguet

La hipótesis de Chapman-Jouguet que dice que la velocidad de detonación es igual a la velocidad del sonido en el lugar más la velocidad de la partícula en el estado de detonación. Por lo tanto:

$$VOD_{CJ} = C + U_p \quad (3.4)$$

3.1.4.4 Ecuación BKW

La correcta descripción de los gases de detonación es uno de los puntos clave en el cálculo termodinámico de explosivos. La ecuación de estado (EDE) para gases Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) tiene una larga y venerable historia en el campo de los explosivos.

La expresión de la ecuación BKW es:

$$\frac{P_v}{RT} = 1 + X e^{\beta X} \quad (3.5)$$

Donde β es una constante, y X :

$$X = \frac{K}{v_g (T + \theta)^\alpha}$$

v_g es el volumen molar y α y θ constantes. K es un covolumen, definido como:

$$K = \kappa \sum x_j k_j$$

Donde κ es una constante, x_j la fracción molar y k_j el covolumen de cada especie gaseosa

Las ecuaciones anteriores permiten el cálculo de los parámetros de la detonación en los cálculos termodinámicos.

3.2 FISICO – QUÍMICA DE LOS EXPLOSIVOS

En las mezclas explosivas, la liberación de la energía es optimizada haciendo el balance de oxígeno cero. Si un explosivo está balanceado en oxígeno se puede expresar por:

$$O_B = O_0 - 2CO_2 - H_2O = 0$$

También se puede expresar como:

$$O_B = O_0 - 2C_0 - 1/2 H_0$$

Donde O_0 , C_0 y H_0 representan el número de átomos-gramo por unidad de peso de la mezcla explosiva. La determinación de los atm-gr. de cada elemento servirá para determinar el calor liberado por el explosivo.

El calor de detonación puede ser determinado de la Ley de Hess:

$$Q = \sum H_f^0 \text{ (productos)} - \sum H_f^0 \text{ (reactantes)}$$

Donde: $\sum H_f^0$ se refiere al calor de formación en condiciones normales.

El principio de balance de oxígeno se ilustra mejor por la reacción de las mezclas de nitrato de amonio y petróleo llamado AN/FO. Los efectos del contenido incorrecto de petróleo se aprecian en la tabla 3.1.

TABLA 3.1. Pérdida de energía en el AN/FO por contenido incorrecto de petróleo

Condición	% FO	Pérdida de energía (%)	Efecto en la voladura
Balance de oxígeno	5,5	Ninguna	Mejores resultados
Bajo contenido de petróleo	5,0	5,2	Exceso de oxígeno, gran pérdida de energía, produce gases nitrosos. Humos anaranjados.
	4,0	12,1	
	3,0	20,0	
Alto contenido de petróleo	7,0	1,5	Oxígeno insuficiente menor pérdida de energía, humos oscuros.
	8,0	2,9	
	9,0	4,9	

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

3.3 ENERGIA DE LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS³

La energía es la característica más importante de una mezcla explosiva. La energía explosiva está almacenada como energía química, y durante la detonación es liberada y usada en eventos como los mostrados en la tabla 3.2.

³ Atlas Powder: "Explosives and Rock Blasting", U. S. A., 1987.

TABLA 3.2. Distribución de la energía en diferentes eventos

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

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

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

La utilización de la energía explosiva está gobernada por las leyes de conservación de la energía, masa y tiempo. La energía de la mezcla explosiva es liberada en la roca circundante en dos formas diferentes: Presión de detonación (energía de tensión) que ejerce una fuerza de fragmentación sobre la roca y la Presión de taladro (energía de burbuja) que se debe a la formación de gases y es causa principal del desplazamiento de la masa rocosa. La energía de burbuja puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$E_b = .684 P_h^{2.5} t^3 \rho_w^{-1.5} \quad 4$$

Donde:

E_b = Energía de burbuja

P_h Presión hidrostática

t periodo de tiempo entre la pulsación del choque y la primera implosión de la burbuja,

ρ_w densidad del agua

⁴ C. K. Mc Kenzie: "Surface Blast Design", 1998.

3.3.1 Determinación de la Energía

La energía explosiva puede ser medida o calculada para determinar su rendimiento termoquímico de la mezcla explosiva.

3.3.1.1 Medición de la Energía

La medición de la energía de una mezcla explosiva, generalmente, se realiza por comprobación a otra de características ya conocidas. Para esta medición se usa los métodos siguientes:

1. Ensayo del mortero balístico.
2. Ensayo de Trauzl en bloque de plomo.
3. Ensayo de brisance.
4. Concepto de potencia por peso.
5. Ensayo de energía de burbuja bajo el agua.

El método más usado es el ensayo de energía de burbuja bajo el agua; éste es el más recomendable. Ver figura 3.3

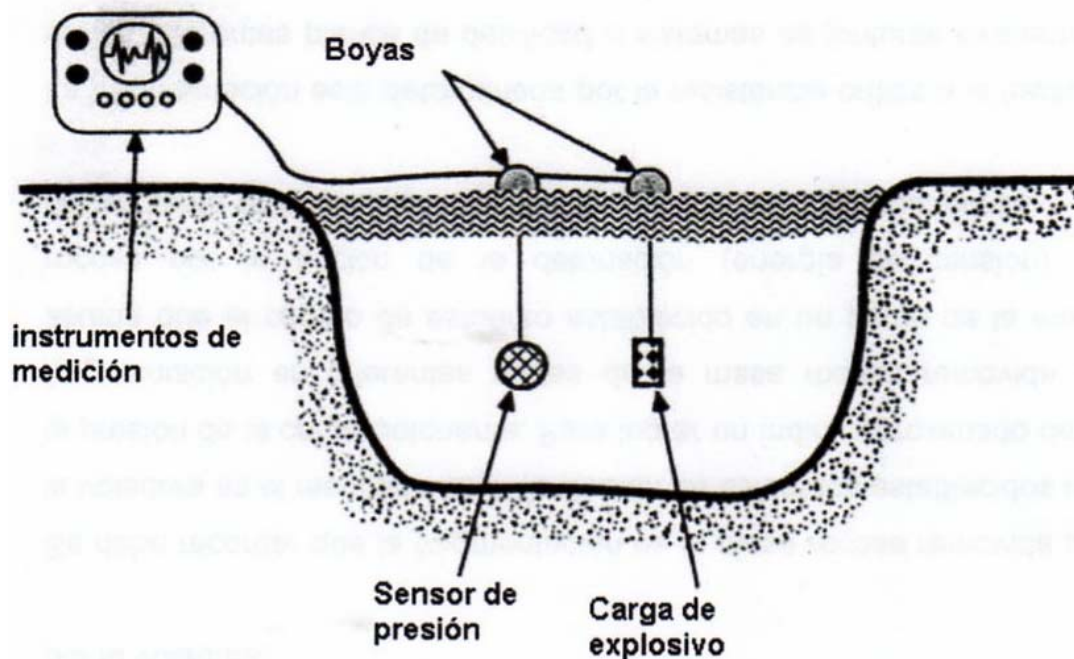


Figura 3.3. Esquema para la medición de la energía del explosivo bajo el agua.

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

3.3.1.2 Cálculo de la Energía

La energía explosiva es calculada usando técnicas basadas en las leyes de la termodinámica, siguiendo estrictamente principio químicos y matemáticos. La energía de los explosivos se puede expresar en Kcal/kg o MJ/kg. Un ejemplo del cálculo de la energía se puede ver en el Apéndice 9.1

Los valores obtenidos de esta manera representan el trabajo teórico disponible del explosivo asumiendo 100% de eficiencia.

3.3.2 Potencia de los Explosivos⁵

La potencia es la medida de la cantidad de energía de un explosivo. Se expresa como potencia absoluta por peso (AWS) y potencia absoluta por volumen (ABS). También se puede expresar como una comparación de la energía de un explosivo respecto al del ANFO, el cual es tomado como el 100%, obteniéndose la potencia relativa por peso o la potencia relativa por volumen.

3.3.2.1 Potencia Absoluta por Peso (AWS)

Esta es la medida de la cantidad de energía disponible (en calorías), en cada gramo de explosivo. Ejemplo: la AWS del ANFO es 900 cal/g.

3.3.2.2 Potencia Absoluta por Volumen (ABS)

Esta es le medida de la cantidad de energía disponible (en calorías) en cada centímetro cúbico de explosivo. Esto se obtiene multiplicando la AWS por la densidad del explosivo.

$$ABS = AWS \times \bar{\rho}_{\text{explosivo}}$$

⁵ Atlas Powder, "Explosives and Rock Blasting", U. S. A., 1987.

3.3.2.3 Potencia Relativa por Peso (RWS)

Esta es la medida de la energía disponible de explosivo comparado a un peso igual de ANFO. Esta se calcula dividiendo la AWS del explosivo por la AWS del ANFO y multiplicado por 100.

$$RWS = \frac{AWS_{\text{explosivo}}}{AWS_{\text{ANFO}}} \times 100$$

3.3.2.4 Potencia Relativa por Volumen (RBS)

Esta es la energía disponible por volumen de explosivo comparado a igual volumen de ANFO, con una densidad de 0,85 g/cc. Esto se calcula dividiendo la ABS de un explosivo por la ABS del ANFO y multiplicado por 100.

$$RBS = \frac{ABS_{\text{explosivo}}}{ABS_{\text{ANFO}}} \times 100$$

3.3.3 Eficiencia de los Explosivos

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

La eficiencia total es una función de muchas variables, algunas de las cuales son internas e inherentes dentro del explosivo por la virtud de su formulación química y algunas de las cuales son externas y parte del diseño de la voladura o condiciones encontradas en el lugar. Las variables externas que pueden afectar la eficiencia total de un explosivo incluyen, a la eficiencia de la iniciación, condiciones de agua, diámetro de carga, longitud de carga, grado de confinamiento, temperatura, efectos de la detonación de cargas explosivas adyacentes, etc.

Las mediciones de las eficiencias de los explosivos han sido desarrolladas para evaluar la potencia práctica del explosivo y sugieren sus propiedades en el campo. La eficiencia es posible determinar empíricamente mediante la técnica de la "energía de burbuja" en las voladuras bajo el agua, y se mide como el porcentaje de energía aprovechable. Mediciones efectuadas en los Estados Unidos permiten obtener los siguientes rangos de factores de eficiencia para las distintas familias de explosivos. Ver tabla 3.3.

TABLA 3.3. Eficiencia de los Explosivos

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

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

3.3.4 Factor de Energía

La preocupación para poder cuantificar el rendimiento del explosivo utilizado hizo que se utilice el factor de carga. En el factor de carga se supone que el peso del explosivo es igual a la energía explosiva; esto es incorrecto. Un kg. de dinamita, AN/FO o emulsión, tienen rendimientos de energía diferentes. Podría ser válida cuando el taladro tiene un solo tipo de explosivo, ¿Cómo se podría expresar el factor de carga si en un taladro hubiera dos o más tipos de mezclas explosivas?. Esta situación justifica el uso del FACTOR DE ENERGIA.

Con los explosivos antiguos la energía explosiva aumentaba directamente con la densidad; pero, actualmente se puede encontrar dos tipos de explosivos con la misma densidad pero con diferentes rendimientos de energía; ejemplo, en las emulsiones. Entonces es necesario utilizar el factor de energía.

El factor de energía es un parámetro que nos permite determinar la cantidad de energía usada para fragmentar una tonelada de mineral o un metro cúbico de material estéril (en el movimiento de tierras), y se puede usar la siguiente relación:

$$\text{Factor de Energía} = \frac{\text{kcal (MJ) de energía}}{\text{TM } \text{om}^3 \text{ de material fragmentado}}^6$$

3.4 CARACTERISTICAS GEOMECANICAS DEL MACIZO ROCOSO QUE TIENEN UNA INFLUENCIA DETERMINANTE EN LOS RESULTADOS DE LA VOLADURA DE ROCAS

Las propiedades del macizo rocoso son importantes en las operaciones de perforación y voladura, por ser el medio en el que actuará los explosivos. Existen diferencias significativas aún entre rocas de la misma zona en una determinada mina por lo que necesario cuantificar algunas de sus propiedades. Por lo que en esta parte, se estudiará las principales propiedades del macizo rocoso.

⁶ Atlas Powder, “Explosives and Rock Blasting”, U. S. A., 1987.

3.4.1 Propiedades Físico - Mecánicas de las Rocas

Las propiedades de las rocas constituyen el principal obstáculo en el camino hacia una voladura óptima. Los materiales poseen ciertas características que son función de su origen y de los procesos geológicos posteriores que actuaron sobre ellos. El conjunto de estos fenómenos conduce a un determinado entorno, a una litología en particular con unas heterogeneidades debido a los agregados minerales policristalinos y a las discontinuidades de la masa rocosa (poros y fisuras), y a una estructura geológica con un gran número de discontinuidades (planos de estratificación, fracturas, diaclasas, etc.). En la figura 3.4, se establece la interdependencia que existe entre las propiedades de las rocas, las variables controlables y algunas de las operaciones básicas del ciclo minero.

Para seleccionar la mezcla explosiva que mejor se adecue a las propiedades del macizo rocoso es necesario definir desde el punto de vista físico y geológico. Las propiedades físicas y mecánicas que influyen en la reacción del macizo rocoso a la energía producida por la detonación de un explosivo son⁷:

1. Densidad.
2. Resistencia a la compresión y tracción.
3. Módulo de Young.
4. Relación de Poisson.
5. Módulo de Bulk o compresibilidad.
6. Velocidad de la onda longitudinal.
7. Porosidad.
8. Fricción interna.

⁷ Carlos y Emilio López Jimeno, "Manual de Perforación y Voladura de Rocas", Madrid, 2003

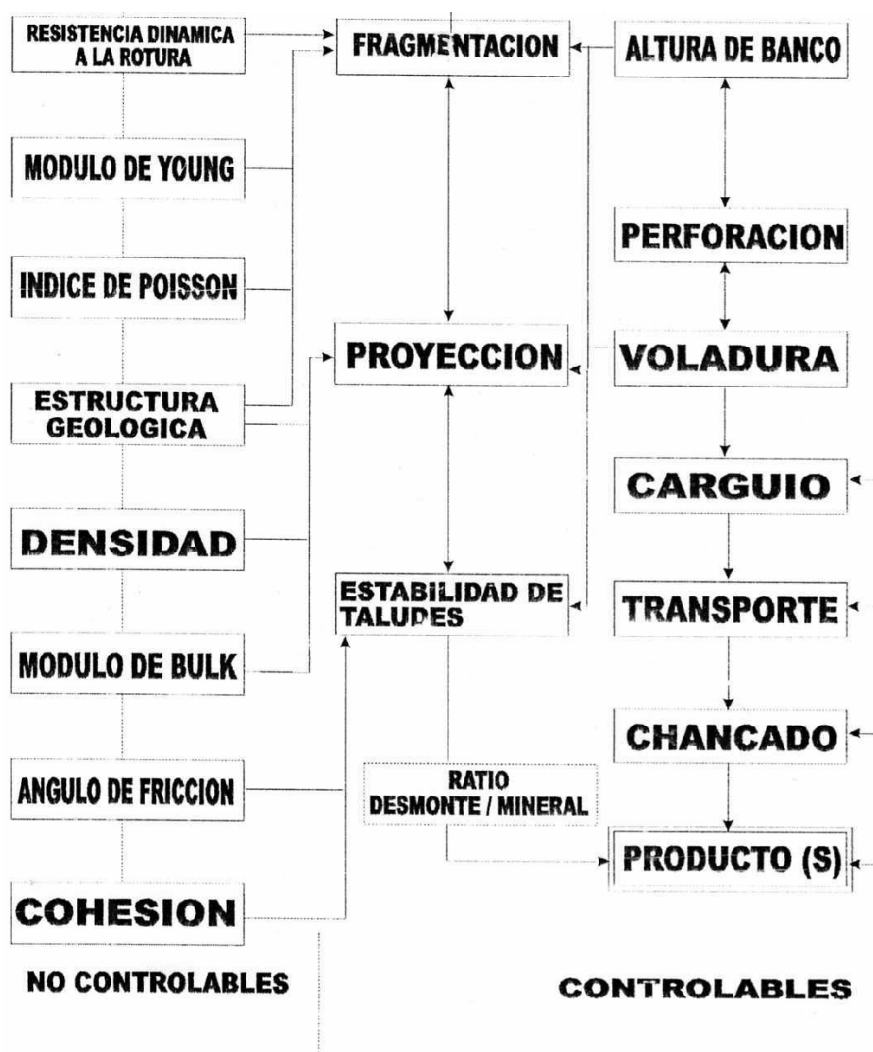


Figura 3.4 Interacción de las propiedades de las rocas y variables controlables con las operaciones mineras.
Fuente: López Jimeno. Manual de Perforación y Voladura.

3.4.2 Características Geológicas y Geotécnicas del Área en Estudio⁸

3.4.2.1 Litología

La voladura en zonas donde se produce un cambio litológico brusco obliga a reconsiderar el diseño, pudiendo seguir dos alternativas: Esquemas iguales para los dos tipos de roca y variación de las cargas unitarias. Esquemas distintos pero con igual carga por taladro.

⁸ Córdova Rojas David, "Geomecánica y Voladura", Lima, Julio, 2004.

3.4.2.2 Fracturas Preexistentes

Todas las rocas presentan discontinuidades, micro fisuras y macro fisuras, que influyen de manera directa en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y por lo tanto en los resultados de la voladura. En la tabla 3.4 se puede apreciar los tipos de discontinuidades.

TABLA 3.4. Tipos de discontinuidades.

ABSORCION DE LA ENERGIA DE ONDA DE TENSION DE LAS FRACTURAS	ABERTURA DE LAS FRACTURAS (mm)	NATURALEZA DE LAS FRACTURAS
1. Pequeña (<20%)	(A) 0 (B) 0 – 4,0	(A) Fuertemente cementada (B) Cementada con un material de impedancia acústica similar a de la matriz
2. Ligera (20% - 40%)	(A) <0,5 (B) <4,0	(A) Fracturas rellenas con agua o aire (B) Cementada con un material de impedancia acústica 1,5 – 2 veces menor que de la matriz
3. Media (40% - 80%)	0,5 – 1,0	Fracturas abiertas rellenas con aire o agua
4. Grande (>50%)	(A) 0,1 – 1,0 (B) 1,0	(A) Fracturas rellenas con material suelto y poroso (B) Fracturas abiertas rellenas de material suelto poroso, aire y agua

Fuente: Geomecánica y Voladura, Córdova Rojas David.

3.3.2.3 Tensiones de Campo

Cuando actúan las tensiones de cargas residuales, tectónicas y/o gravitacionales, el esquema de fracturas generado alrededor de los taladros puede estar influenciado por la concentración no uniforme de tensiones alrededor del mismo. En rocas masivas homogéneas, las grietas que empiezan a propagarse radialmente desde los taladros tienden a seguir la dirección de las tensiones principales.

3.3.2.4 Presencia de Agua

Las rocas porosas y los macizos rocosos intensamente fracturados saturados de agua presentan habitualmente algunos problemas:

- Obligan a seleccionar explosivos no alterables por agua.
- Producen la pérdida de taladros por hundimientos internos.
- Dificultan la perforación inclinada.

3.3.2.5 Temperatura del Macizo Rcoso

Los yacimientos que contienen piritas suelen presentar problemas de altas temperaturas de la roca por efecto de la oxidación, haciendo que los agentes explosivos del ANFO reaccionen a partir de una temperatura de 120°. Una recomendación general cuando se presentan estos problemas es delimitar el número de taladros por voladura a fin de disminuir el tiempo que transcurre entre la carga y el disparo.

3.5 VARIABLES DE LA GEOMETRIA DEL DISPARO

Las condiciones particulares de cada macizo rocoso determinarán los detalles del diseño de voladura. Las dimensiones principales son el burden y el espaciamiento.

La relación de las diferentes dimensiones usadas en el diseño de la malla de perforación y voladura superficial es mostrada por una vista geométrica en la figura 3.5.

3.5.1 Burden

El burden es la distancia perpendicular desde un taladro hasta la superficie libre más cercana en el momento de la detonación.

El burden se considera como el adecuado a aquel con el que se ha logrado en la producción continua los requerimientos siguientes:

- Un grado uniforme y específico de fragmentación.
- Una rotura completa del piso.
- Un lanzamiento suficiente del material.

3.5.2 Espaciamiento

Distancia entre taladros y cargas en una fila, medida perpendicularmente hacia el burden y paralelo a la cara libre del movimiento esperado de la roca.

3.5.3 Otros

Entre otros parámetros geométricos importantes tenemos al diámetro de taladro que es importante para obtener una fragmentación adecuada a un costo porque permite a mayor diámetro se puede acumular mayor cantidad de energía y generalmente, el costo de perforación y de explosivos disminuye a medida que el diámetro del taladro aumenta.

También se considera a la altura de banco para tener un diseño de voladura superficial satisfactorio el burden y la altura de banco deben ser compatibles. La altura de banco debe ser por lo menos igual a la distancia del burden y a lo más dos veces el burden.

La sobre perforación se perfora debajo del nivel del piso para asegurar que la cara completa de la roca sea removida hasta los límites deseados de la excavación. La sobre perforación permite a la amplitud de la onda de esfuerzo estar en su máximo en el nivel del fondo del banco.

El taco que es la distancia entre la boca del taladro hasta la parte superior de la columna explosiva debe ser llenado con material estéril, para dar confinamiento a los gases de la explosión y reducir el chorro de aire (air blast).

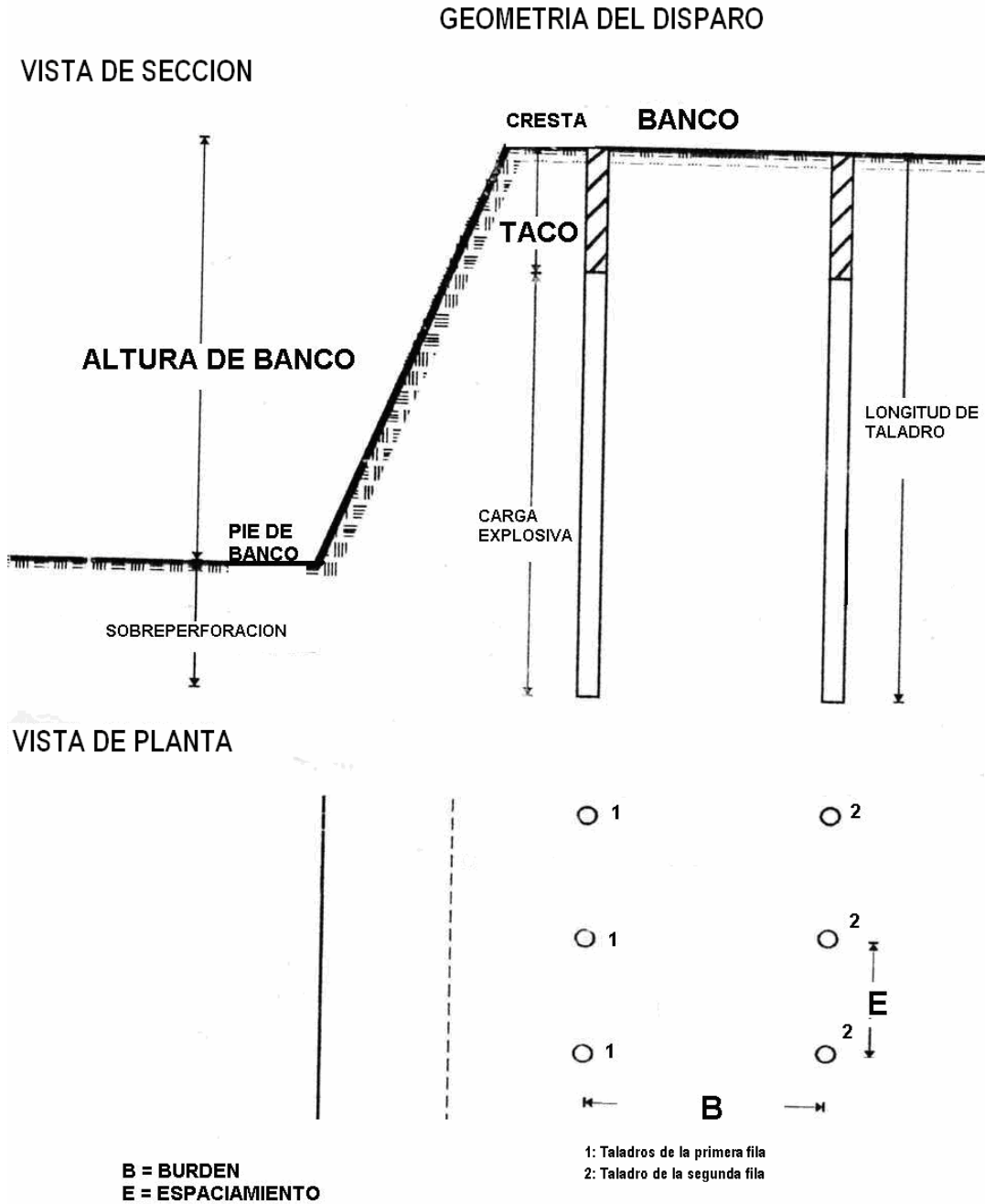


Figura 3.5 Variables de la geometría del disparo en minería superficial

3.6 CARACTERIZACION MATEMATICA DEL MODELO DE LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN (RBS)

3.6.1 Modelo de Crosby & Pinco

En el artículo “More Power to the Pop” escrito por W. Crosby y M. Pinco, ambos científicos plantean un modelo matemático basado en la potencia relativa por volumen (RBS), que en el caso de no cambiar el diámetro del taladro, se puede determinar nuevas dimensiones del burden y el espaciamiento, utilizando un nuevo explosivo de una potencia relativa por volumen en particular en vez del explosivo en uso, pero en este caso es necesario mantener invariables las dimensiones del taco (el volumen de explosivo es invariable) y la sobre perforación, las nuevas dimensiones se pueden calcular con la ecuación siguiente:

$$\left[\frac{RBSa}{RBSu} \right]^{1/3} x Du = Da^9 \dots\dots (3.6)$$

Donde:

RBSu = explosivo en uso.

RBSa = explosivo a usar.

Du = dimensión en uso.

Da = dimensión a usar.

3.6.2 Ecuación modificada por el autor

De acuerdo a la revisión bibliográfica tanto nacional como extranjera, en diversos diseños de mallas de perforación y voladura, especialmente en tajos abiertos, en un mismo taladro se utilizan varios tipos de explosivos. Por ejemplo, en algunos casos los explosivos se usan como cargas de fondo y cargas de columna o en los deck charge (carga de explosivos

⁹ W. Crosby and M. Pinco: “More Power the Pop. When to use aluminum in bulk explosives”, E&MJ, May, 1992. pp. 26 . 31.

por pisos con tacos intermedios), los cuales dependen de las condiciones de campo, tipos de roca, etc.

El modelo matemático planteado por Crosby y Pinco no permite determinar las nuevas dimensiones del burden y espaciamiento cuando hay más de un tipo de explosivo dentro de los taladros, por lo que es necesaria la modificación del mismo.

Para modificar el modelo de Crosby y Pinco y determinar las dimensiones del burden y espaciamiento en el caso del uso de dos o más tipos de explosivos y tener mejor idea del modelo matemático modificado se tiene en cuenta las siguientes figuras:

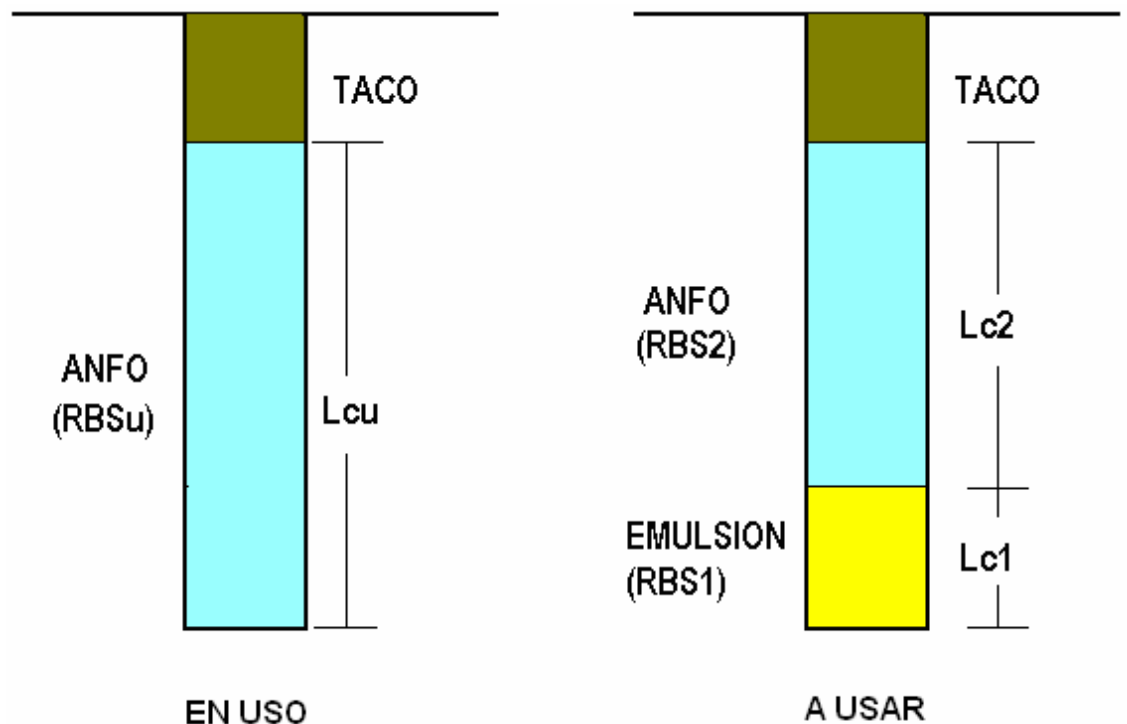


Figura 3.6 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a dos tipos (carga de fondo y carga de columna).

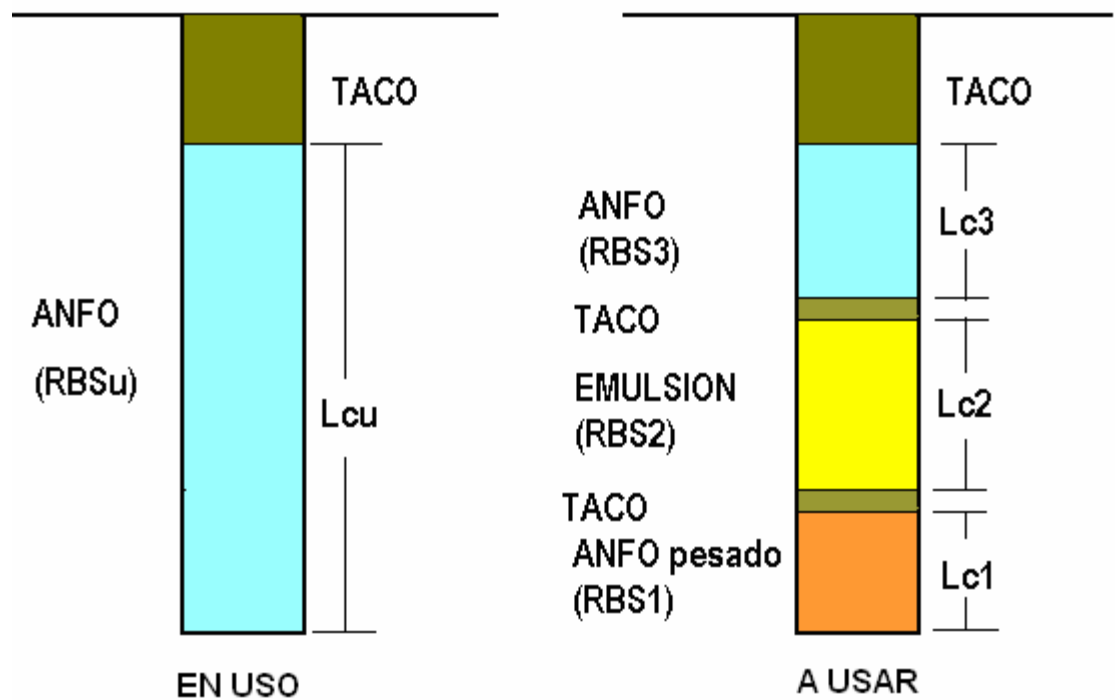


Figura 3.7 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a tres tipos de explosivos usando los tacos intermedios.

3.6.2.1 Desarrollo del modelo matemático modificado

Considerando:

V_e = Volumen de explosivo, y reemplazando en la ecuación 3.6

$$\left[\frac{V_e \times RBS_a}{V_e \times RBS_u} \right]^{1/3} \times D_u = D_a \quad (3.7)$$

Sabiendo que al cambiar el tipo de explosivo es invariable el volumen de explosivo, hacemos:

$$V_e = V_u = V_a$$

V_u = volumen de explosivo en uso

V_a = volumen de explosivo a usar

Luego en la ecuación 3.7

$$\left[\frac{V_a \times RBS_a}{V_u \times RBS_u} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (3.8)$$

Además:

$V_e = \text{área del taladro} \times \text{longitud de carga}$

$$V_e = A \times l_c$$

$$V_u = A \times l_{cu} \quad (3.9)$$

$$V_a = A \times l_{ca} \quad (3.10)$$

Donde

l_{cu} = longitud de carga en uso

l_{ca} = longitud de carga a usar

Tomando en cuenta la figura 3.7 donde se tiene tres tipos de explosivos, el volumen total de explosivo a usar sería:

$$V_a = A \times l_{c1} + A \times l_{c2} + A \times l_{c3} \quad (3.11).$$

Al factorizar la ecuación 3.11 obtenemos:

$$V_a = A \times (l_{c1} + l_{c2} + l_{c3}) \quad (3.12)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.9 y 3.12 en 3.8:

$$\left[\frac{A \times (l_{c1} + l_{c2} + l_{c3}) \times RBS_a}{A \times l_{cu} \times RBS_u} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (3.13)$$

Simplificando y sabiendo que cada tipo de explosivo tiene diferente potencia relativa por volumen (RBS), la ecuación 3.13 desarrollada será:

$$\left[\frac{lc1 \times RBS1 + lc2 \times RBS2 + lc3 \times RBS3}{lcu \times RBSu} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (3.14)$$

Por lo que para el cálculo de nuevas dimensiones del burden y espaciamiento, en taladros en el que se va usar dos o más tipos de explosivos, el autor generaliza la ecuación 3.14:

$$Da = Du \times \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Lc_i \times RBS_i) \right]^{1/3}}{(Lcu \times RBSu)^{1/3}}, \quad n \in \mathbb{Z}^+ \quad (3.15)$$

Donde:

RBS_i = Potencia relativa de los explosivos a usar

Lc_i = longitud de los explosivos a usar.

n = número de explosivos a usar

3.6.2.2 Ejemplos de la utilización de la ecuación modificada

1. Con dos explosivos

En este ejemplo vamos considerar que la malla de perforación y voladura (burden x espaciamiento) es 5 m x 6 m.

Se tiene en cuenta que se va hacer un cambio de explosivo en uso que es el ANFO que tiene una RBS es 1,00 y su longitud de carga es 8 m; con otros dos tipos de explosivos en el que se utilizará como carga de fondo una emulsión cuya RBS es 1,20 y la longitud de la carga es 3,00 m. Se usará como carga de columna el explosivo ANFO cuya RBS es 1,00 y la longitud de la carga es de 5,00 m. El gráfico correspondiente se muestra en la figura 3.8.

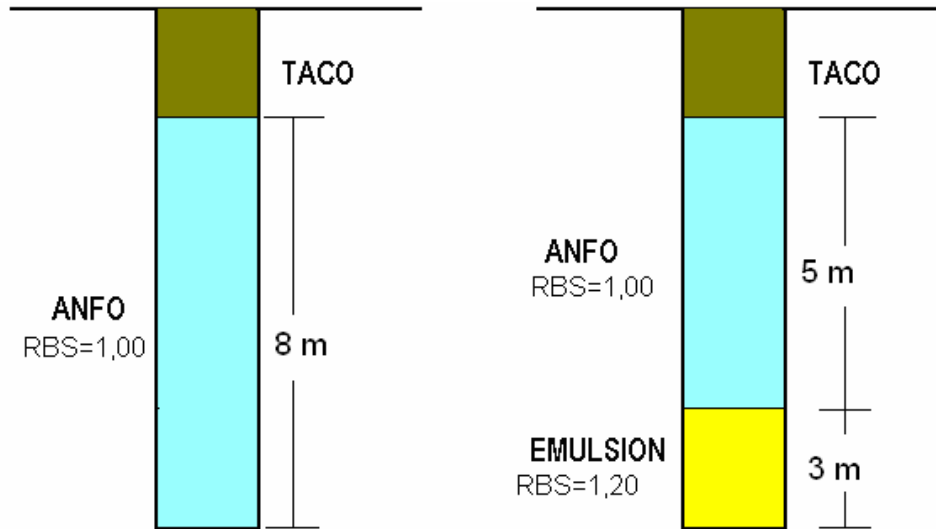


Figura 3.8. Cambio de explosivo ANFO a otros dos tipos de explosivos.

Cálculo de las nuevas dimensiones utilizando la ecuación 3.15

$$B2 = 5x \frac{[3x1,20 + 5x1,00]^{1/3}}{(8x1,00)^{1/3}} = 5,12m.$$

$$E2 = 6x \frac{[3x1,20 + 5x1,00]^{1/3}}{(8x1,00)^{1/3}} = 6,15m.$$

Esto significa que la nueva malla de perforación y voladura al cambiar los explosivos sería 5,12 m x 6,15 m.

2. Con tres explosivos y tacos intermedios

En este ejemplo también vamos considerar que la malla de perforación y voladura (burden x espaciamiento) es 5 m x 6 m y se realizará el cambio del explosivo ANFO con tres tipos de explosivos con la distribución mostrada en la figura 3.9.

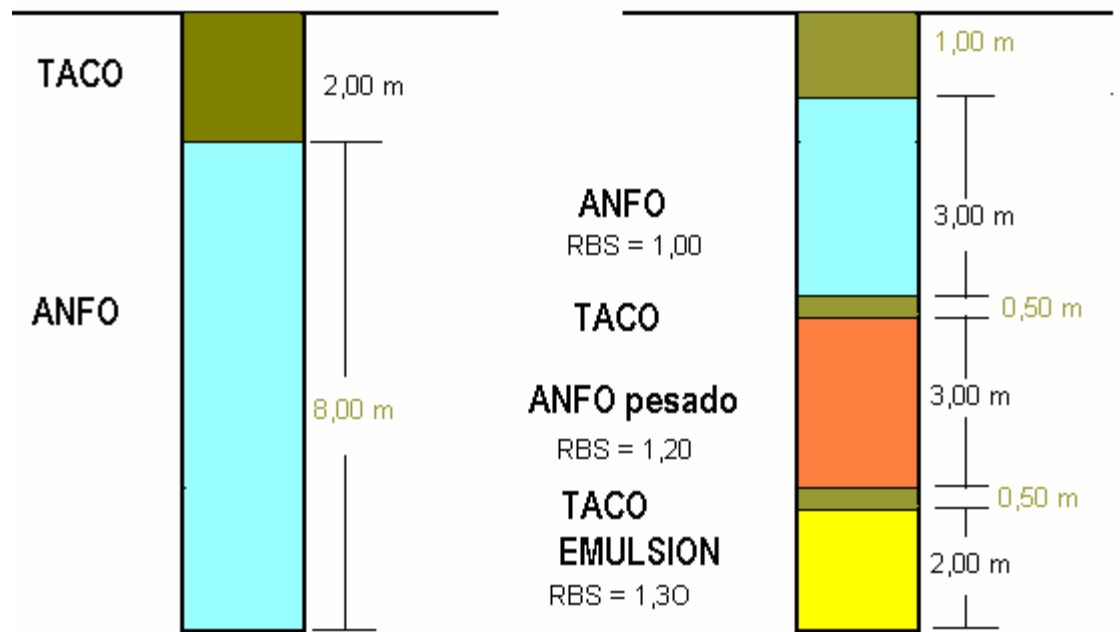


Figura 3.9. Cambio de explosivo ANFO a otros tres tipos de explosivos.

Cálculo de las nuevas dimensiones utilizando la ecuación 3.15

$$B2 = 5x \frac{[2x1,30 + 3x1,20 + 3x1,00]^{1/3}}{(8x1,00)^{1/3}} = 5,24m.$$

$$E2 = 6x \frac{[2x1,30 + 3x1,20 + 3x1,00]^{1/3}}{(8x1,00)^{1/3}} = 6,29m.$$

Entonces se puede generalizar los cálculos para el uso de mayor cantidad de explosivos tal como se muestra en la ecuación 3.15.

3.6.2.3. Esquema para la verificación del modelo matemático

El modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS) tendrá que ser verificado si cumple o no con los objetivos del presente trabajo de investigación, para lo cual su validez deberá ser comprobada con el esquema siguiente:

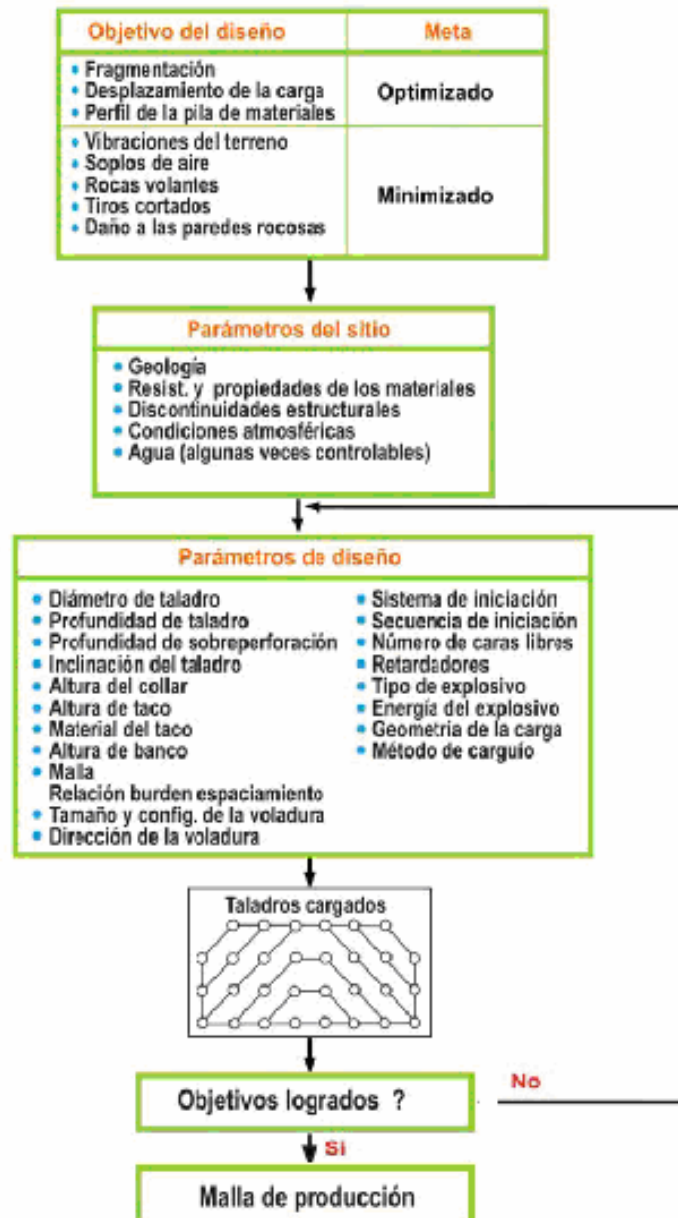


Figura 3.10. Esquema para la verificación del modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS) para el diseño de mallas de perforación y voladura.

CAPITULO IV

4.0 APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO QUE UTILIZA LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN (RBS)

4.1 PARAMETROS DE DISEÑO

4.1.1 Básicos

Los parámetros básicos que se toman en cuenta en el diseño de un tajo abierto se resumen en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1 Parámetros Básicos del Tajo

DATOS	PARÁMETROS ASUMIDOS	PROPORCIONADOS POR
Producción diaria	36 500 TM	Superintendencia General
Topografía base		Topografía
Modelo de bloques		Geología mina
Diseño de pit final		Planeamiento Mina
Dilución		
Talud final	Variable	Planeamiento mina
Recuperación proyectada	58 %	Planta

Elaboración: Propia

4.1.2 Principales

De acuerdo a las condiciones geológico mineras del Tajo se han determinado los parámetros geométricos de diseño que se resume en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2 Parámetros de diseño del Tajo

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
Altura de banco	m	8
Altura de banco	m	6
Angulo de talud de banco	grado	55
Ancho de berma inter banco	m	3.5
Ancho de rampa principal	m	12
Ancho de vías	m	12
Angulo de talud final Inter. Rampa	grado	45
Angulo de talud final Inter. Rampa	grado	42

Elaboración: Propia

4.2 PERFORACION Y VOLADURA

La perforación se realiza con una perforadora Ingersoll Rand DM-45 de 5 ¾" de diámetro, los principales parámetros de perforación y voladura se resume en la Tabla 4.3.

TABLA 4.3. Parámetros de perforación y Voladura antes del uso de la RBS

Banco	Dimensiones		Altura de Banco	Longitud de Perforación	Sobre perforación	Longitud de Carga	Longitud de taco	Factor de carga	Rendimiento
	B (m)	E (m)	(h)	(Lp)	(Is)	(Lq)	(lt)	(kg/TM)	TM/m
En desmonte	5.50	6.30	8	8.5	0.5	6.5	2.0	0.137	83
En mineral	4.80	5.50	8	8.5	0.5	6.5	2.0	0.181	63
En mineral y desmonte	4.50	5.20	6	6.5	0.5	5.0	1.5	0.213	55

Elaboración: Propia

Se considera la densidad: Desmonte 2,4 TM/m³; mineral 2,55 TM/m³ y mineral-desmonte 2,35 TM/m³.

4.3 DISEÑO DE LA MALLA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA CON EL CRITERIO RBS

4.3.1. Condiciones cuando se usaba ANFO

Antes de la aplicación de trabajo de investigación en una mina en el norte del país se utilizaba como explosivo de manera generalizada el ANFO, para lo cual se tenía en cuenta las siguientes condiciones:

1. Se preparaba el ANFO manualmente y con las proporciones 94 % y 6% en peso, caso contrario se usaba .ANFO embolsado de origen nacional.

2. El taladro cargado tenía siguientes características:

-Roca	:	Mineral
-Densidad de roca	:	2,55 TM/m ³
-Profundidad de taladro	:	8,50 m
-Altura de banco	:	8,00 m
-Malla	:	Burden: 4,80 m Espaciamiento: 5,50 m
-Taco	:	2,00 m
-Diámetro de perforación	:	5 ¾" (146,0 mm.)

3. Explosivos y accesorios:

-Fanel Dual 1000 / 25 ms		
-Booster HDP – 1	:	(Ubicado a 0,5 m del fondo)
-ANFO		
-Densidad Nitrato	:	0,68 g / cm ³
-Densidad como ANFO		0,84 g / cm ³
- Longitud de carga	:	6,50 m

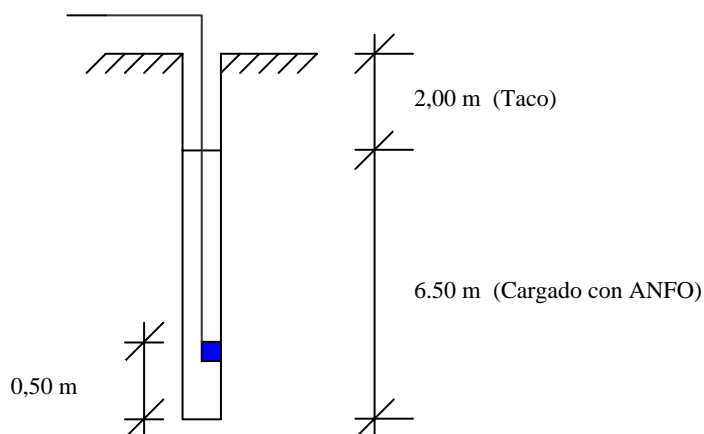


Figura 4.1. Esquema del carguío del taladro con ANFO

4.3.2. Cálculo de las nuevas dimensiones

Para el diseño de las nuevas dimensiones geométricas se tomará en cuenta el ANFO pesado 50/50 (emulsión/ANFO). Las características de algunas combinaciones son mostradas en la Tabla 4.4.

TABLA 4.4. Energía de las mezclas a granel del ANFO pesado

Características	%Emulsión/%ANFO			
	25/75	30/70	40/60	50/50
Densidad (gr/cc)	0,95	1,05	1,20	1,28
Energía kcal/kilogramo	852	840	815	791
Energía MJ/kilogramo	3,57	3,52	3,43	3,31
Velocidad (VOD) m/s	3 900	3 950	4 050	3 900
P.RELAT. (ANFO=100) Peso	0,95	0,94	0,91	0,88
P.RELAT. (ANFO=100) Volumen	1.07	1.17	1.30	1.34

Fuente: FAMESA

Haciendo uso de las consideraciones para la aplicación de la ecuación 3.6, se puede calcular las nuevas medidas del burden y el espaciamiento. Se considera un ANFO de densidad 0,84 g/cc y energía de 3,75 MJ/kg.

En el presente trabajo se realizará el reemplazo del agente de voladura ANFO con el ANFO pesado, al granel, mezcla explosiva que nos permite obtener diferentes combinaciones de emulsión/ANFO, estas combinaciones dependerán del tipo de material (desmante, mineral, y mineral-desmante) en cual se utilizará el ANFO pesado.

Como un ejemplo para el cálculo de un nuevo diseño de la malla de perforación voladura se utiliza el ANFO pesado de relación emulsión/ANFO igual a 25/75 cuyo RBS es 1,07, que es el explosivo a usar y el explosivo en uso es el ANFO cuyo RBS es 1,00 por ser explosivo estándar. Los cálculos son los siguientes:

4.3.2.1 Desmante

Burden

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 5,50 m = 5,62 m$$

Espaciamiento

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 6,30 m = 6,44 m$$

4.3.2.2 Mineral

Burden

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 4,80 m = 4,90 m$$

Espaciamiento

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 5,50 m = 5,62 m$$

4.3.2.3 Mineral - Desmonte

Burden

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 4,50 m = 4,60 m$$

Espaciamiento

$$\left[\frac{1,07}{1,00} \right]^{1/3} \times 5,20 m = 5,32 m$$

4.3.2.4 Resumen

Siguiendo el mismo procedimiento se puede realizar los cálculos correspondientes con los explosivos de la tabla 4.4, resultando la Tabla 4.5, la cual es un resumen de dichos cálculos.

TABLA 4.5. Resumen de las nuevas dimensiones de burden (B) y espaciamiento (E)

POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN (RBS)	TIPO DE MATERIAL					
	Desmonte		Mineral		Mineral desmonte	
	B (m)	E (m)	B (m)	E (m)	B (m)	E (m)
1,00	5,50	6,30	4,80	5,50	4,50	5,20
1,07	5,63	6,44	4,91	5,63	4,60	5,32
1,17	5,80	6,64	5,06	5,80	4,74	5,48
1,30	6,00	6,88	5,24	6,00	4,91	5,68
1,34	6,06	6,94	5,29	6,06	4,96	5,73

Elaboración: Propia

En la tabla anterior se observa que se puede determinar las nuevas dimensiones de burden y espaciamiento para los diferentes tipos de materiales, tomando en cuenta también los diferentes tipos de mezclas explosivas de los cuales se considera su potencia relativa por volumen (RBS), y esto tiene como ventaja evitar las pruebas de ensayo y error, porque los valores calculados nos dan la idea de las nuevas dimensiones de la malla por el cambio de los explosivos con mayor cantidad de energía.

El cambio de ANFO pesado en vez del ANFO no solo involucra al nuevo diseño de la malla sino también el conocimiento del procedimiento correcto de su utilización por lo que se adjunta en el Apéndice 9.2 el Procedimiento para la utilización del material explosivo ANFO PESADO.

4.3.3. Características de las voladuras de prueba utilizando ANFO pesado 50/50 (Emulsion HA y anfo)

Para la evaluación técnica se realizó dos pruebas de voladura. Por razones prácticos redondeamos los valores de la malla teórica obtenida en la tabla 4.5 para un ANFO pesado cuyo RBS es 1,34 (5,29 m x 6,06 m) a los valores 5,30 m x 6,00 m. y se tuvo en cuenta las siguientes características.

El resumen de las características para las pruebas son las siguientes:

-Tipo de roca	: Mineral (Densidad 2,55 TM/m ³).
-Profundidad de los taladros	: 8,50 m
-Diámetro de los taladros	: 5 ¾ “
-Burden	: 5,30 m
-Espaciamiento	: 6,00 m
-Taco	: 2,00 m

-Accesorios y explosivos

- Anfo pesado : 50 / 50
- RBS : 1,34
- Fanel Dual : 1000 / 25 ms x 15 m

NONEL DUAL 1000/25 MS

Accesorio de Voladura:

Sensible al Golpe (Fulminante)

Retardo Superficial 25 MS

Retardo de Fondo 1000 MS

-Booster HDP – 1 : (1 libra)

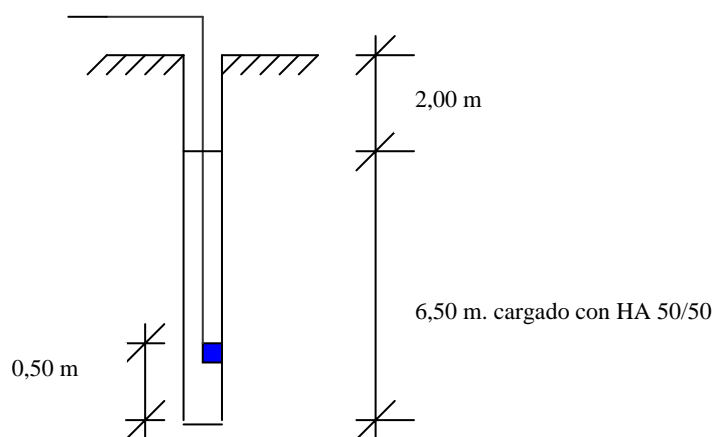


Figura 4.2. Esquema de carguío del taladro con ANFO pesado 50/50

Con estas mismas consideraciones se realizo dos pruebas; la primera consistente de 22 taladros y la siguiente de 20 taladros. Los resultados se discuten en el capítulo siguiente.

4.3.4. Cálculo del Factor de Energía

Se calcula el factor de energía de los resultados mostrados en la Tabla 4.5. A manera de un ejemplo se puede trabajar con el ANFO pesado 25/75, tiene una energía de 3,57 MJ/kg.; el diámetro de taladro es 5 ¾" igual a 14,605 cm., altura de banco 8 m y longitud de carga de 6,5 m:

Desmante:

Tonelaje = volumen x densidad

$$TM = 5,63 \text{ m} \times 6,44 \text{ m} \times 8,00 \text{ m} \times 2,4 \text{ TM/m}^3 = 696,14 \text{ TM.}$$

Energía del ANFO pesado en el taladro:

Energía total = $\pi \times \text{diámetro}^2 \times \text{longitud de carga} \times \text{densidad} \times \text{energía}/40$

$$\text{Energía total} = \pi(14,605 \text{ cm})^2 \times 6,50 \text{ m} \times 0,95 \text{ g/cc} \times 3,57 \text{ MJ/kg}/40$$

$$\text{Energía total} = 369,31 \text{ MJ}$$

Factor de Energía

$$F.E. = 369,31 \text{ MJ} / 696,14 \text{ TM} = 0,530 \text{ MJ/TM}$$

Con los mismos procedimientos podemos calcular el factor de energía con los demás tipos de ANFO pesado de la tabla 4.5 y presentar la Tabla 4.6.

TABLA 4.6. Resumen de los factores de energía.

RBS	TIPO DE MATERIAL								
	Desmante			Mineral			Mineral desmante		
	B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM	B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM	B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM
1,00	5,50	6,30	0,516	4,80	5,50	0,634	4,50	5,20	0,801
1,07	5,63	6,44	0,530	4,91	5,63	0,654	4,60	5,32	0,822
1,17	5,80	6,64	0,544	5,06	5,80	0,713	4,74	5,48	0,897
1,30	6,00	6,88	0,562	5,24	6,00	0,745	4,91	5,68	0,934
1,34	6,06	6,94	0,572	5,29	6,06	0,706	4,96	5,73	0,886

Elaboración: Propia

Como se puede ver en la tabla anterior el factor de energía es el mejor parámetro para cuantificar el rendimiento del explosivo porque la energía del explosivo es el que fragmenta al macizo rocoso.

4.4 CALCULO COMPUTARIZADO DE LAS MALLAS DE PERFORACION Y VOLADURA

En la revisión de programas para el diseño de las mallas de perforación y voladura tal como el JK Simblast se ha podido determinar que en el diseño de las mallas no se utiliza el criterio de la potencia relativa por volumen (RBS), solamente se realiza un análisis de la distribución de la energía en los taladros, por lo que se propone un programa sencillo y versátil para el cálculo computarizado.

4.4.1. Algoritmo y diagrama de flujo del programa

Para el desarrollo del programa se tiene en cuenta el algoritmo que es similar a la figura 3.10.



Figura 4.3. Diagrama de Flujo para el diseño de una voladura
El software se adjunta en el Apéndice 9.3.

4.4.2. Validación del programa

El programa ha sido desarrollado en Visual Fox Pro versión 6,0. Se observa en la figura 4.4 la presentación del programa.

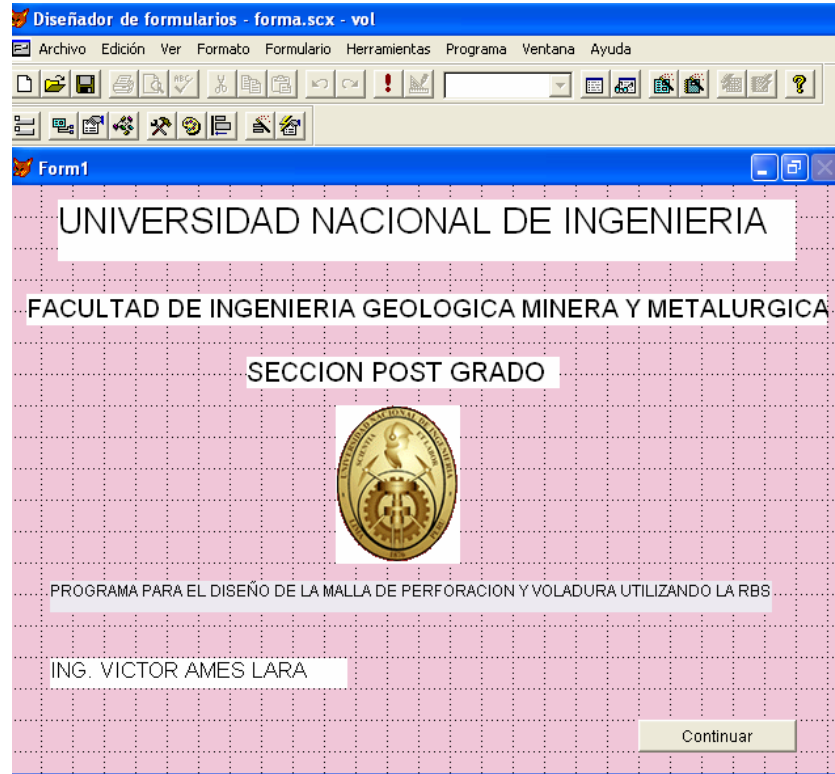


Figura 4.4. Presentación del programa para el cálculo de la malla de perforación y voladura usando la RBS

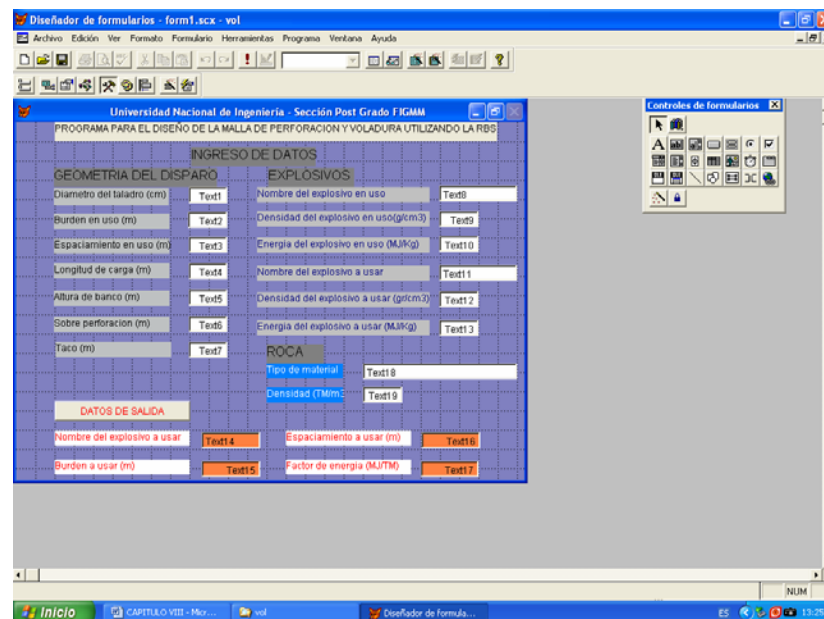


Figura 4.5. Pantalla interactiva del programa, muestra el ingreso de datos y los parámetros de salida.

El software se encuentra en la carpeta VOL. La validación se ha realizado con diversas corridas de acuerdo a los datos de ingreso requeridos y se han obtenido los resultados similares a los realizados manualmente, claro mayor precisión y menor tiempo de consumo. Se adjunta en la figura 4.6 una corrida que valida las nuevas dimensiones calculadas en el trabajo de investigación. Se adjunta en el Apéndice 9.3 algunas corridas del programa. Los resultados se pueden contrastar con la tabla 4.5 y 4.6.

The screenshot shows the 'vol' software interface with the following data:

INGRESO DE DATOS	
GEOMETRIA DEL DISPARO	
Diametro del taladro (cm)	14.60
Burden en uso (m)	4.80
Espaciamiento en uso (m)	5.50
Longitud de carga (m)	6.50
Altura de banco (m)	8.00
Sobre perforacion (m)	0.50
Taco (m)	2.00
EXPLOSIVOS	
Nombre del explosivo en uso	ANFO
Densidad del explosivo en uso (g/cm ³)	0.85
Energia del explosivo en uso (MJ/Kg)	3.75
RBS del explosivo en uso	1.00
Nombre del explosivo a usar	ANFO PESADO
Densidad del explosivo a usar (g/cm ³)	1.28
Energia del explosivo a usar (MJ/Kg)	3.31
RBS del explosivo a usar	1.34
ROCA	
Tipo de material	MINERAL
Densidad (TM/m ³)	2.55
DATOS DE SALIDA	
Nombre del explosivo a usar	ANFO PESA
Burden a usar (m)	5.291874
Espaciamiento a usar (m)	6.063606
Factor de energia (MJ/TM)	0.704331

Figura 4.6. Pantalla mostrando una corrida del programa con las nuevas dimensiones del trabajo de investigación, cambiando de ANFO a ANFO pesado en mineral

CAPITULO V

5.0 ANALISIS y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

5.1 DISCUSION TECNICA

Se implementó una permanente supervisión del carguío al granel del ANFO pesado en los taladros, también de los amarres de las líneas troncales y el muestreo de densidades de la mezcla explosiva. El laboratorio químico de la mina continuamente realiza las mediciones de las densidades de la Emulsión Matriz, de esta manera se establece un permanente control de calidad del producto a utilizar en los disparos.

5.1.1. Análisis de los resultados de la fragmentación:

Después de las pruebas de voladura se realizó la toma de fotografías, las fechas se pueden ver en las fotografías, de las pilas de escombros para el respectivo análisis granulométrico. Los resultados de lo analizado por el programa Wip Frag se adjuntan en el Apéndice 9.4. Luego del análisis del grado de fragmentación que produjo cada una de las pruebas se puede resumir y concluir en los siguientes:

5.1.1.1. Análisis de la fragmentación en la PRIMERA PRUEBA (Apéndice 9.4.1)

1. Tamaño de los fragmentos:

Tamaño mínimo 0,008 m

Tamaño máximo 0,276 m

2. Distribución de los fragmentos:

El 100 % < a 0.30 m

El 69 % < a 0.15 m

El 57,3 % < a 0.125 m

5.1.1.2. Análisis de la fragmentación en la SEGUNDA PRUEBA (Apéndice 9.4.2)

1. Tamaño de los fragmentos:

Tamaño mínimo 0,006 m

Tamaño máximo 0,215 m

2. Distribución de los fragmentos:

El 100 % < a 0.30 m

El 90,7 % < a 0.15 m

El 83,0 % < a 0.125 m

Se considera que los resultados a nivel de fragmentación son satisfactorios, particularmente en la segunda prueba porque el 90,7% de los fragmentos tienen tamaños menores a 0,15 m y por lo tanto son adecuados para el proceso de lixiviación, porque para este proceso se requiere que el material fragmentado tenga tamaños reducidos. Anteriormente cuando se usaba ANFO la evaluación era de forma visual después del disparo y de acuerdo a los ingenieros encargados de la voladura eran más grandes y en algunos casos tenía que realizase voladura secundaria para reducir el tamaño de los bancos.

5.1.2. Cálculo del factor de energía

Tomando las consideraciones de 4.3.3., 4.3.4. y la tabla 4.4 se puede determinar el factor de energía de la nueva malla, de la manera siguiente:

Mineral:

$$TM=5,30 \text{ m} \times 6,00 \text{ m} \times 8,00 \text{ m} \times 2,55\text{TM}/\text{m}^3 = 648,72 \text{ TM}.$$

Energía del ANFO pesado en el taladro:

Energía total = $\pi(14,605 \text{ cm})^2 \times 6,50 \text{ m} \times 1,28 \text{ g/cc} \times 3,31$
MJ/kg/40

Energía total = 461,37 MJ

Factor de Energía

F.E. = 461,37 MJ / 648,72 TM = 0,711 MJ/TM

5.2 DISCUSION ECONÓMICA

Como es conocido el cálculo de los costos de perforación y voladura mediante el método manual es tedioso y complicado por lo que se ha desarrollado un programa para tal fin en la hoja electrónica Excel, cuyos resultados para el uso de ANFO y el ANFO pesado 50/50 del nuevo diseño son los siguientes:

ANFO:

Costo de perforación y voladura US\$/ton 0,234

Anfo pesado 50/50

Costo de perforación y voladura US\$/ton 0,220

Observándose una reducción en los costos de perforación y voladura con el uso del ANFO pesado 50/50. Los cálculos computarizados respectivos puede observarse en el Apéndice 9.5.

5.3 DISCUSION ECOLOGICA

En lo que respecta a la seguridad y el medio ambiente se tiene que cada semana se debe inspeccionar que los Kit anti derrames (Trajos absorbentes, bolsas plásticas y bandejas de contención) se encuentren en perfecto estado. Cotidianamente se debe realizar limpieza externa y el mantenimiento de la bomba utilizada para la descarga de la emulsión matriz de la cisterna al silo.

5.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

De los resultados presentados anteriormente se puede deducir que el cambio del ANFO PESADO por el ANFO ha llevado a obtener resultados satisfactorios en el aspecto técnico porque se puede apreciar que en la primera prueba el 69% de los fragmentos tenían dimensiones menores a 0,15 m y en la segunda prueba el 90,7% de los fragmentos eran menores que dicho tamaño, los cuales son adecuados para el tratamiento por lixiviación del mineral fragmentado.

Respecto a los resultados económicos la diferencia de US\$/ton es 0,014 a favor del ANFO PESADO y si el movimiento de material es 36 500 TM/día el ahorro sería de US\$ 183 960.

En lo concerniente a la evaluación ecológica se tendrá que implementar un programa riguroso para las inspecciones semanales de los kits anti derrames y otros para evitar el impacto del uso del ANFO PESADO.

AREA DE PERFORACION Y VOLADURA

CALCULO DE COSTOS DE PERFORACION Y VOLADURA CON ANFO PESADO

FECHA:

TAJO:

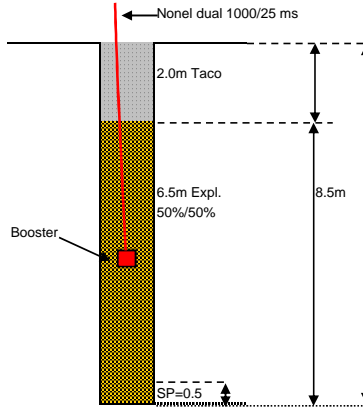
PROYECTO: SA05-017

BANCO: 340

TIPO DE ROCA: MEDIA

PERFORADORA: DM45E

PERFORACION			
Perforación:	9,00	US\$/m	
Altura Banco	8,00	m	
Sobre Perforación	0,50	m	
Long. Taladro	8,50	m	
Malla			
Espaciamiento:	6,00	m	
Burden:	5,30	m	
Densidad Material	2,55	ton/m3	
Nro de Taladros	20	tal	
Diametro de Taladro	5,75	pulg	0,146
Altura de Carga en Taladro	6,50	m	
Taco	2,00	m	
TONELADAS/TALADROS:	649	ton/tal	



Radio de Perforación	76,32	Tm/m
Costo Perforación/tal	77	US\$/tal

Costo Perforación/ton 0,118 US\$/t

DISEÑO DE CARGA				
Explosivo: Heavy Anfo	50	50%	50%	
Densidad (g/cm3)	1300	Kg/m3	1,30	g/cc
Explosivos/Taladro	142	Kg/tal		
Emulsión	71	Kg/tal		
ANFO	71	Kg/tal	100%	
Nitrato de Amonio	67	Kg/tal	94%	
Petroleo	4	Kg/tal	6%	

Factor de Potencia 0,22 Kg/ton

AGENTE DE VOLADURA	Uni		\$/Uni.	Cant.	Total US\$
Nitrato de Amonio	kg.		0,4400	67	29,292
Combustible D-2	gl.	3,21	1,0250	4	4,356
Emulsión	kg.		0,3800	71	26,912
Costo Total Explosivo/Tal				US\$/tal	60,560

Costo Explosivo/ton US\$/ton 0,093

ACCESORIOS	Uni	\$/Uni.	Cant.	Total US\$
Booster de 1 Lb.	Pza	2,1000	1,00	2,100
Nonel dual 1000ms/17ms	Pza	3,4000	0,00	0,000
Nonel dual 1000ms/25ms	Pza	3,4000	1,00	3,400
Linea CTD N° 0 (1m)	Pza	1,0200	0,01	0,009
Linea CTD N° 65 (6m)	Pza	1,9400	0,03	0,053
Linea CTD N° 109 (6m)	Pza	1,7000	0,05	0,078
Fulminante Nro 08	Pza	0,0880	0,02	0,002
Mecha de Seguridad	m	0,0900	0,02	0,002
Cordon Detonante 5G	m	0,1160	0,00	0,000
Costo Accesorios/tal			US\$/tal	5,644

Costo Accesorios/ton US\$/ton 0,009

COSTO PERFORACION VOLADURA US\$/TON. 0,220