



Universidad
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Trabajo de Investigación

Optimización de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas de mina subterránea en la Compañía Minera Ares S.A.C.

para optar el Grado Académico de Bachiller en
Ingeniería de Minas

Emerson Hinton Abril Barahona

Arequipa, 2018



Repositorio Institucional Continental

Trabajo de Investigación



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación “tesina” fue realizado con mucho sacrificio y tesón, por ese motivo agradezco a DIOS, por bendecirme y darme fuerzas para culminarlo, haciendo realidad la meta que me propuse al iniciar este trabajo.

A la UNIVERSIDAD CONTINENTAL por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mi Asesor Ing. William Vladimir Mullisaca Atamari, por su guía, así como a varios docentes quienes, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y motivación me han apoyado incondicionalmente para que pueda terminar mis estudios.

Agradezco la amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía a todas las personas que estuvieron conmigo en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas que están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

DEDICATORIA

*A mi gran familia,
amigos y docentes
que me orientaron a
ser un hombre de
bien*

ÍNDICE

CARATULA.....	I
AGRADECIMIENTO	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	XI
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1 TITULO DE LA INVESTIGACION.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	2
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO	3
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4 HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	3
1.4.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	3
1.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	3
1.5 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.5.1 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION.....	3
1.5.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION.....	3
1.6 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACION	3
1.6.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	3
1.6.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	4
1.6.3 DELIMITACIÓN SOCIAL	4
1.6.4 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL	4
1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.8 HIPOTESIS.....	4
1.9 VARIABLES E INDICADORES.....	4
1.9.1 VARIABLE INDEPENDIENTE	4
1.9.2 VARIABLE DEPENDIENTE	4
1.10 OPERACIONALIZACION DE VARIABLES.....	4
CAPITULO II MARCO TEORICO	6
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	6
2.2 BASES TEÓRICAS.....	8
2.2.1 ACTIVIDAD MINERA.....	8
2.2.2 TENDENCIAS MINERAS.....	8

2.3	MARCO TEORICO	10
2.4	MARCO CONCEPTUAL	13
2.4.1	DISEÑO DE MALLA DE PERFORACION	13
2.4.2	VOLADURA SUBTERRANEA	13
2.4.3	PARAMETROS DE ROCA.....	14
2.4.4	PARAMETROS DE EXPLOSIVO	14
2.4.5	PARAMETROS DE CARGA.....	14
2.4.6	NUVA TEORIA PARA CALCULAR EL BURDEN	14
2.4.7	COMBUSTION O DEFLAGRACION.....	15
2.4.8	DETONACION.....	15
2.4.9	EXPLOSION	15
2.4.10	DETERMINACION DE LAS PRINCIPALES ECUACIONES PARA LOS CALCULOS TERMODINAMICOS	16
	2.4.10.1 ECUACION DE LA PRESION DE LA DETONACION	16
	2.4.10.2 ECUACION DE RANKINE-HUGONIOT.....	18
2.4.11	HIPOTESIS DE CHAPMAN JOUGUET	18
2.4.12	ECUACION BKW.....	18
2.4.13	FISICO-QUIMICA DE LOS EXPLOSIVOS.....	19
2.4.14	ENERGIA DE LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS.....	20
2.4.15	DETERMINACION DE LA ENERGIA	21
	2.4.15.1 MEDICION DE LA ENERGIA.....	21
	2.4.15.2 CALCULO DE LA ENERGIA.....	22
	2.4.15.3 POTENCIA DE LOS EXPLOSIVOS.....	22
	2.4.15.4 POTENCIA ABSOLUTA POR PESO (AWS)	22
	2.4.15.5 POTENCIA ABSOLUTA POR VOLUMEN (ABS)	22
	2.4.15.6 POTENCIA RELATIVA POR PESO (RWS)	22
	2.4.15.7 POTENCIA ABSOLUTA POR VOLUMEN (ABS)	23
2.2.16	EFICIENCIA DE LOS EXPLOSIVOS.....	23
2.2.17	FACTOR DE ENERGIA	24
2.5	CARACTERISTICAS GEOMECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO	24
2.6	PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DE MECANICAS DE LAS ROCAS.....	24
2.6.1	CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y GEOTECNICAS DEL AREA EN ESTUDIO.....	26
2.7	VARIABLES DE LA GEOMETRIA DEL DISPARO	28
2.7.1	BURDEN.....	28
2.7.2	ESPACIAMIENTO	28
2.7.3	OTROS	28
2.8	CARACTERIZACION MATEMÁTICA DEL MODELO DE LA POTENCIA (RBS).....	30
2.8.1	MODELO DE CROSBY & PINCO.....	30
2.8.2	ECUACION MODIFICADA PARA LA INVESTIGACION.....	30
2.8.3	DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO MODIFICADO	31
2.8.4	EJEMPLO DE LA UTILIZACION DE LA ECUACION MODIFICADA	32
2.8.5	ESQUEMA DE LA VERIFICACION DEL MODELO MATEMATICO	35
CAPITULO III		
3.1	MÉTODO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	36

3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
3.3	UNIDAD DE ESTUDIO	36
3.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	36
3.4.1	TÉCNICAS.....	36
3.4.2	INSTRUMENTOS	37
3.5	UNIDAD DE ESTUDIO	37
3.6	DETERMINACIÓN DE COSTOS ENERGÉTICOS DE CHANCADOR.....	40
3.7	DETERMINACIÓN DE BENEFICIO DE TONELAJE PASANTE CHANCADOR.....	41
3.8	DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS POR CARGAS REDIRECCIONADAS POR FRAGMENTACIÓN GRUESA ..	41
3.9	DETERMINACIÓN DEL P80.....	42
3.10	ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO ASOCIADO A PERFORACIÓN Y VOLADURA.....	45
	CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANALISIS.....	48
	CONCLUSIONES.....	49
	RECOMENDACIONES	52
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	ANEXO1 MATRIZ DE CONSISTENCIA	54
	ANEXO 2 CUADRO DE INSUMO PARA REGISTRAR LOS ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN DEL PROBLEMA.....	55
	ANEXO 3 CUADRO DE INSUMO PARA ELABORAR EL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN	56
	ANEXO 4 CUADRO DE INSUMO PARA REGISTRAR LA DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distintas mallas de perforación	12
Figura 2: Desplazamiento de rocas.....	13
Figura 3: Área de influencia de un taladro después de la voladura	14
Figura 4: Mostrando el proceso de detonación de una mezcla explosiva.....	16
Figura 5: Esquema para la deducción de ecuaciones.....	17
Figura 6: Esquema para la medición de la energía del explosivo bajo el agua	21
Figura 7: Interacción de las propiedades de las rocas y variables controlables con las operaciones mineras	26
Figura 8: Variables de la geometría del disparo en minería superficial	29
Figura 9 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a dos tipos (carga de fondo y carga de columna	31
Figura 10 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a tres tipos de explosivos usando los tacos intermedios.....	31
Figura 11: Variables de diseño en voladura en banco.	33
Figura 12: Cambio de explosivo ANFO a otros dos tipos de explosivos	33
Figura 13. Cambio de explosivo ANFO a otros tres tipos de explosivos	34
Figura 14. Esquema para la verificación del modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS) para el diseño de mallas de perforación y voladura	35
Figura 15: Sugerida toma de imágenes en la frente de carguío.....	42
Figura 16: Sugerida toma de imágenes.....	43
Figura 17: Como funciona Split Desktop	43
Figura 18: Imagen filtrada en Split Desktop.....	44
Figura 19: Curva granulométrica obtenida en Split Desktop	44

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Pérdida de energía en el AN/FO por contenido incorrecto de petróleo.....	19
TABLA 2. Distribución de la energía en diferentes eventos	20
TABLA 3. Eficiencia de los Explosivos	23
TABLA 4. Tipos de discontinuidades.....	27

RESUMEN

“OPTIMIZACION DE LAS MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZANDO LA ENERGIA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS DE MINA SUBTERRANEA EN LA COMPAÑÍA MINERA ARES S.A.C.”

“Dentro del proceso minero, se tiene que los costos operacionales alcanzan una relevancia significativa, por lo tanto, para reducir estos costos primero se deben visualizar los procesos involucrados a ellos. Se tiene que los procesos de perforación y voladura son las primeras operaciones unitarias que resultan del diagrama de flujos en la extracción del material, implicando que un buen comienzo podría generar mejoras en los procesos posteriores” Ames (2008).

En consecuencia, el presente trabajo busca encontrar la rentabilidad técnico-económica de aplicar explosivos de alta energía en la voladura mediante análisis de fragmentación, análisis de pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa, costos y rendimiento de la chancadora, con el objetivo de optimizar la operación mediante la reducción de costos y granulometría con el propósito de estandarizar la voladura en un sector particular de la minera.

Ames (2008) en su trabajo “comienza con un análisis granulométrico tanto de propuestas simuladas como de pruebas en terreno mediante los softwares, luego, a las distintas pruebas se les realiza análisis técnico-económico a partir de los distintos parámetros y configuraciones impuestas en cuanto a los diseños de la malla de voladura y carguío de la malla, y en conjunto analizar la manera en que afectan al chancado en temas energéticos”.

De los resultados obtenidos, se tiene que utilizando un explosivo de alta energía se logra un proceso exitoso en términos de optimización, ya que logra reducir la granulometría (P80), sin embargo, los costos del proceso de perforación y voladura aumentan. Esto último se ve compensado en el flujo de caja, ya que se obtienen resultados más favorables en cuanto a las pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa las cuales

se redujeron en sobremanera con la utilización del explosivo de alta energía, obteniéndose un balance global positivo en cuanto al uso de esta nueva alternativa. Estas nuevas medidas incrementan la rentabilidad del proceso total de minería, ya que se traducen en beneficios posteriores a la voladura en sí, logrando cumplir con los objetivos impuestos en un comienzo, por lo que la utilización de explosivos de alta energía contribuye en gran manera a mejorar la fragmentación y el rendimiento del chancador, y en consecuencia hacer rentable el negocio desde una visión global.

PALABRAS CLAVES: Proceso Minero, Explosivos, Mallas De Perforación

ABSTRACT

"OPTIMIZATION OF THE MILLS OF DRILLING AND BLASTING USING THE ENERGY PRODUCED BY THE EXPLOSIVE MIXES OF UNDERGROUND MINE IN THE COMPANY MINERA ARES S.A.C."

In the mining process, it has that the operating costs achieve significant importance, therefore, to reduce these costs must first visualize the processes involved with them. It has that the drilling and blasting processes are the first unit operations resulting from the flowchart in extracting the material, implying that a good start could generate improved downstream processing.

Consequently, the present work seeks to find the technical and economic viability of applying high- energy explosive blasting through fragmentation analysis, losses by redirected loads by coarse fragmentation analysis, costs and performance crusher, with the aim of optimizing the operation by reducing costs and granulometry in order to standardize the blast in a particular sector of the mining.

It begins with an analysis of fragmentation both simulated proposals as field tests using the software, then, to the various tests were carried out technical and economic analysis from the various parameters and settings imposed as for the designs mesh blasting and loading of the mesh, and together analyze how they affect the crusher in energetic issues.

From the results, it has that using a high-energy explosive a successful process is achieved in terms of optimization, because it manages to reduce the particle size (P80), however, the costs of drilling and blasting process increases. The latter is compensated in the cash flow, since more results that are favorable are obtained in terms of losses by redirected loads by coarse fragmentation, which is greatly reduced with the use of high-energy explosive, giving an overall positive balance the use of this new alternative.

These new measures increase the profitability of the total mining process, and which result in further benefits to the blast itself, managing to meet the objectives set at the beginning, so the use of high-energy explosives contributes greatly to improve fragmentation and the performance of the crusher, and in consequence make profitable business from a global perspective.

KEYWORDS: Mining Process, Explosives, Drilling Screens

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 TITULO DE LA INVESTIGACION

OPTIMIZACIÓN DE LAS MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZANDO LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS DE MINA SUBTERRÁNEA EN LA COMPAÑÍA MINERA ARES S. A. C.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Revisando 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 las mallas de perforación y voladura.

En una de las primeras maestrías en Ingeniería de Minas impartidas en la UNI (universidad nacional de ingeniería), en las clases de voladura de rocas, recién se llegó a conocer que uno de los elementos importantes a tener en cuenta eran los explosivos, por lo que respecta a esta tecnología de explosivos se dio énfasis en el cálculo de la energía del explosivo, en la termohidrodinámica del explosivo, el cual uno de sus indicadores es el cálculo de la VOD (velocidad de detonación), también la presión de detonación y por último la presión de explosión teniendo en cuenta la energía liberada por el explosivo.

En el III SIPERVOR (Simposio Internacional de Perforación y Voladura de Rocas) 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 estudiante Víctor Alejandro Ames Lara, donde se menciona 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”.

Ames Víctor (2008), en su tesis “Diseño De Las Mallas De Perforación Y Voladura Utilizando La Energía Producida Por Las Mezclas Explosivas”, afirma que “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”.

1.3 FORMULACION DEL PROBLEMA

A. PROBLEMA GENERAL

¿COMO OPTIMIZAR LAS MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZANDO LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS DE LA MINA SUBTERRÁNEA EN LA COMPAÑÍA MINERA ARES SAC?

B. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Por qué es necesario conocer la energía de los explosivos?

¿Cómo analizar el uso y potencia relativa por volumen (RBS)?

¿Cuál es la relación de la geometría del disparo con el uso de la potencia relativa por volumen?

¿Cuál es el análisis del rendimiento de los explosivos con el uso del factor de energía?

¿Por qué se necesita mejorar el grado de fragmentación de las rocas?

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar y aplicar la energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura correctamente.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

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.

1.5 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION

1.5.1 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION

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.

1.5.2 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACION

La importancia de esta investigación radica en 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 del rendimiento de la energía del explosivo.

1.6 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL

La investigación se realizó en la mina subterránea - compañía minera ares S. A. C.

1.6.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL

El presente estudio se desarrolló de mayo a setiembre del año 2018

1.6.3 DELIMITACIÓN SOCIAL

Realizar voladuras eficientes asegurando así el cumplimiento de los planeamientos mensuales programados por parte de la compañía. Por lo que se justifica plenamente de su ejecución y su aplicación permitirá minimizar las estadísticas de voladuras deficientes en los frentes de trabajo mecanizado.

1.6.4 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL

Desde el punto de vista se desarrollará conceptual teóricamente y en práctica nuestras variables de investigación relacionadas con el análisis y la aplicación de la energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura correctamente

1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La implementación y aplicación del diseño de mallas de perforación y voladura basado en la energía del explosivo, tiene como objetivo exponer la factibilidad de la reducción de los costos operativos en la empresa minera Ares aplicando para ello el reemplazo del explosivo Anfo por otro explosivo de mayor energía (Anfo Pesado 50/50), para lograr de esta manera que la empresa minera obtenga una mayor utilidad bruta

1.8 HIPOTESIS

La energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura correctamente.

1.9 VARIABLES E INDICADORES

1.9.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Geología de la mina, energía de los explosivos.

1.9.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Diseño de la malla, burden, espaciamento, factor de potencia.

1.10 OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

Cuadro 1: Operacionalización de las variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	SUB VARIABLE	INDICADORES
Geología de la mina, energía de los explosivos		Cubicación de mineral (t)
	entrada	Energía de los explosivos (Kcal/kg)
		Potencia Relativa por volumen, adimensional

VARIABLE DEPENDIENTE	SUB VARIABLE	INDICADORES
Diseño de la malla, burden, espaciamiento, factor de potencia		Diámetro (pulgadas)
		Burden (en uso) (m)
	salida	Espaciamiento (en uso) (m)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II: MARCOTEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Bernaola, Castilla & Herrera (2013) en el trabajo titulado “*perforación y voladura de rocas en minería*”, engloba todas aquellas formas de perforación en las que la fragmentación de la roca se produce básicamente por impacto de un útil de filo más o menos aguzado sobre la misma. Sostiene que “los sistemas de percusión simple son todavía utilizados en algunos equipos viejos de perforación de pozos de agua (perforadoras de cable), que básicamente consisten en un trépano en forma de cuchilla con el filo inferior más o menos aguzado y que, suspendido de un cable, se deja caer sobre el fondo del pozo. En este fondo se retiran periódicamente los fragmentos producidos mediante un útil especial (cuchara) que los recoge junto con una cierta cantidad de agua que se añade para facilitar la operación”.

“Este sistema se encuentra en la actualidad totalmente obsoleto. Los sistemas que se van a abordar en este capítulo y que se utilizan actualmente son rotopercusivos, en los que además de la percusión proporcionan al útil de corte un movimiento de rotación y una relativamente pequeña fuerza de empuje para una transmisión de la energía más eficaz. En estos sistemas la velocidad de perforación es proporcional a la potencia de percusión (producto de la energía de impacto por la frecuencia de golpes). En cambio, la rotación y el empuje son meras acciones auxiliares que, siempre y cuando se superen unos valores mínimos necesarios para espaciar convenientemente los puntos de incidencia de los impactos y mantener el útil de perforación en contacto con la roca, influyen relativamente poco en la velocidad de perforación” Bernaola, Castilla & Herrera (2013).

Aguirre (2016) “*optimización de parámetros de voladura en función de explosivos de alta energía en sociedad contractual minera el abra*”, nos dice que “es una temática relevante la situación que conlleva a los costos operacionales asociados a la minería, tanto en la mina misma como en planta, por lo tanto es un constante mejoramiento continuo lo que debe realizarse para lograr alcanzar mayores beneficios y utilidades, esto se debe principalmente a la volatilidad que poseen los precios de los metales, en especial el cobre, para este caso”.

“Por lo tanto, para reducir estos costos primero se deben visualizar los procesos involucrados a ellos y dentro de esto, se tiene que los procesos de perforación y voladura son las primeras operaciones unitarias que resultan del diagrama de flujos dentro de lo que es el proceso minero de extracción del material, lo que implica que un buen comienzo podría generar mejoras en los procesos aguas abajo” Aguirre (2016).

“Este nuevo tipo de explosivos de alta energía a utilizar llamados, Vistan 225 y Vistis 225, son nuevos productos explosivos a granel que la empresa Orica ha desarrollado para el mercado. El primero corresponde al tipo ANFO pesado y el segundo a emulsiones dopadas bombeables. Estos productos proporcionan altos grados de energía, muy superior al cualquier explosivo a granel existente. Fueron especialmente diseñados para lograr altos grados de fragmentación, cuyo propósito principal es alcanzar mayores contenidos de finos en las voladuras, para así aumentar el desempeño de los procesos de Chancado Primario”. (Orica Mining Services [1], 2015)

Jaime (2014) en su trabajo titulado “*Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto*” dice que “la detonación de un explosivo en condiciones confinadas, transmitirá ondas de compresión, las cuales a su vez generan tracciones tangenciales en el macizo rocoso. Las presiones originadas por la onda de tensión, deben superar la resistencia de compresión de la roca, produciendo la rotura de la misma o deformándola elásticamente en el área de la línea de menos resistencia (burden); a medida que la onda de compresión se va alejando del taladro, su amplitud se atenuará a valores por debajo de la resistencia a la compresión de la roca, decayendo en forma proporcional a la distancia recorrida y al tipo de roca. De aquí más la onda de compresión propagará a la velocidad sísmica, la misma que dependerá de la naturaleza del medio en que transita”.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1. ACTIVIDAD MINERA

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 nos permite medir el rendimiento de energía de los explosivos.

2.2.2. TENDENCIAS MINERAS

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 (explosivos de alta potencia), pesados se hace más evidente tanto en minería superficial como en minería subterránea.

Pero, la aplicación de nueva 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 este proyecto de investigación, 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.

2.3 MARCO TEÓRICO.

- **Malla;** “Plan de colocación geométrica de los barrenos para ser perforados en una voladura”,² de igual manera se puede afirmar: “Es la forma en la que se distribuyen los taladros de una voladura, considerando básicamente a la relación de burden y espaciamiento y su dirección con la profundidad de taladros”.³
- **Perforación;** “Metros de barreno o volumen perforado por tonelada o metro cúbico de roca arrancada”,⁴ también se puede afirmar: “Es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es el de abrir en la roca huecos cilíndricos destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores, denominados taladros, barrenos, hoyos, o blast hole”.⁵
- **Voladura;** “fragmentación de la roca y otros materiales de los sólidos mediante explosivos confinados en barrenos o adosados a su superficie”,⁶ también se puede afirmar: “De acuerdo con los criterios de la mecánica de

rotura, la voladura es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro del taladro perforados en roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos; fragmentación y desplazamiento”.⁷

- **Subterráneo:** “Excavación natural o hechas por el hombre debajo de la superficie de la tierra”.⁸
- **Tanda;** “Es el número de taladros de perforación efectuados en una tarea normal de 8 horas al día”.⁹
- **Frente;** “Superficie libre en una voladura”.¹⁰
- **Frente o frontón;** “Es el lugar en donde se emplaza personal y máquina de perforar para realizar el avance de una galería o crucero, mediante perforación y voladura”.¹¹
- **Parámetros;** “Se denomina así a las diversas ratios obtenidos en la práctica, a través de la Observación en el lugar de trabajo”,¹² de igual manera: “Es el valor de las características que nos interesan en el colectivo o universo. Este valor se infiere a partir de las estadísticas, es el valor estimado del parámetro”.¹³
- **Burden (Piedra);** “Distancia desde el barreno al frente libre de la roca, medida perpendicular al eje del taladro”.¹⁴
- **Burden;** “También denominado piedra, bordo o línea de menor resistencia a la cara libre. Es la distancia desde el pie o eje del taladro a la cara libre perpendicular más cercana. También la distancia entre filas de taladros en una voladura”.¹⁵
- **Burden (bordo);** “La dimensión del bordo se define como la distancia más corta al punto de alivio al momento que un barreno detona. La selección del bordo apropiado es una de las decisiones más importante que hay que hacer en cualquier diseño de voladuras”.¹⁶

² Carlos López Jimeno, MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS.

³ Exsa. MANUAL PRACTICO DE VOLADURA, Pág. 177.

⁴ Carlos López Jimeno, MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS.

⁵ Exsa. MANUAL PRACTICO DE VOLADURA, Pág. 79.

⁶ Carlos López Jimeno, MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS.

⁷ Exsa. MANUAL PRACTICO DE VOLADURA, Pág. 161.

⁸ D. F. Coates, FUNDAMENTOS DE MECANICA DE ROCAS

⁹ Universidad Nacional de Ingeniería, METODOLOGÍA DE COSTO DE OPERACIÓN EN MINERÍA

¹⁰ Carlos López Jimeno, MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS.

¹¹ Universidad Nacional de Ingeniería, METODOLOGÍA DE COSTO DE OPERACIÓN EN MINERÍA.

- **Burden;** “Distancia entre el barrenos y la cara libre más próxima. La dureza de la roca, fracturas, explosivos utilizados y la fragmentación requerida determina la selección del burden”.¹⁷
- **Espaciamiento;** “Distancia entre barrenos de una misma fila”.¹⁸ también se puede decir que la “distancia entre lo barrenos, perpendicular al burden, normalmente fluctúa entre 1 y 1.8 por la distancia del burden, se obtiene de resultados óptimos de distribución de energía cuando el espaciamiento es equivalente a la dimensión del burden por 1.15 y el patrón es distribuido en una configuración inclinada, el agrietamiento primario paralelo al a cara libre puede permitir un espaciamiento mayor”.¹⁹
- **Perforación;** Ames (2018) menciona que la “perforación es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es abrir en la roca huecos cilíndricos denominados taladros y están destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores.

El principio de la perforación se basa en el efecto mecánico de percusión y rotación, cuya acción de golpe y fricción producen el astillamiento y trituración de la roca”.

- **Mallas de perforación;** Ames (2018) dice que “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”.



Figura 1: Distintas mallas de perforación.

- **Malla;** es la forma geométrica en la que se disponen los taladros de una voladura, considerando básicamente la relación burden y espaciamiento.

¹² Universidad Nacional de Ingeniería, METODOLOGÍA DE COSTO DE OPERACIÓN EN MINERÍA.
¹³ Rubén Calsin M. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN EDUCACIONAL
¹⁴ Carlos López Jimeno, MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS.
¹⁵ Exsa, MANUAL PRÁCTICO DE VOLADURA, Pág. 168.
¹⁶ Calvin J. Conya, DISEÑO DE VOLADURAS, Pág. 77.
¹⁷ Jay A. Rodgers, TECNICAS EFICIENTE PARA VOLADURAS, Pág. 28.
¹⁸ Carlos López Jimeno, MANUAL DE PERFORACIÓN Y VOLADURA DE ROCAS.
¹⁹ Jay A. Rodgers, TECNICAS EFICIENTE PARA VOLADURAS, Pág. 30.

- **Desplazamiento;** consiste en el movimiento de la masa rocosa triturada como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos hacia una dirección establecida.

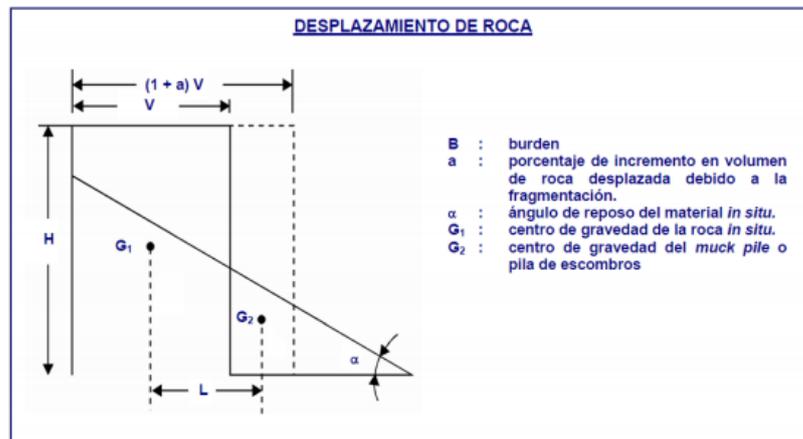


Figura 2: Desplazamiento de rocas.

- **Cable de Conexión;** este se empaqueta en cajas de fibracel que contienen 12 rollos, cada rollo de 200 m. Se utiliza para el amarre de los detonadores electrónicos, va conectado al Logger permitiéndole verificar la conexión de cada uno de ellos.

2.4 MARCO CONCEPTUAL.

2.4.1. Diseño de Malla de Perforación.

Es el esquema que indica la distribución de los taladros con detalle de distancias, cargas de explosivo y secuencia de encendido a aplicarse.

2.4.2. Voladura Subterránea.

En la ingeniería de las excavaciones subterráneas, las voladuras son igual de importantes que la elección de la forma correcta de la excavación que tendrá que adaptarse al campo *in situ* de los esfuerzos y del diseño del sistema correcto de la voladura.

Dos de los factores más importantes se deben de considerar cuando se hacen voladuras en excavaciones subterráneas, son:

1. La voladura tendrá que romper la roca de una manera eficiente y económica.
2. el macizo rocoso que quede, deberá dañarse lo menos posible para producir caída de rocas.

2.4.3. Paramentos De Roca.

Son determinantes como variables incontrolables, los cuales tenemos:

- Las propiedades físicas, (densidad, dureza, tenacidad, porosidad).
- Las Propiedades elásticas o de resistencia (resistencia a la compresión, tensión, fricción interna, cohesión).
- Condición geológica (textura, presencia de agua).

2.4.4. Parámetros De Explosivo.

Son variables controlables como las propiedades físicas o químicas (densidad, velocidad de detonación, presión de detonación, energía del explosivo, sensibilidad, volumen de gases).

2.4.5. Parámetros de Carga.

Son también variables controlables en el momento del diseño de la malla de perforación y voladura, (diámetro del taladro, longitud del talado, confinamiento, acoplamiento, densidad de carga longitud de carga).

2.4.6. Nueva teoría para calcular el burden.²⁰

“Es un nuevo modelo matemático para diseñar malla de perforación y voladura, calculando el área de influencia por taladro y fue desarrollada de la siguiente manera: Este método de diseño nace de la siguiente Figura”:

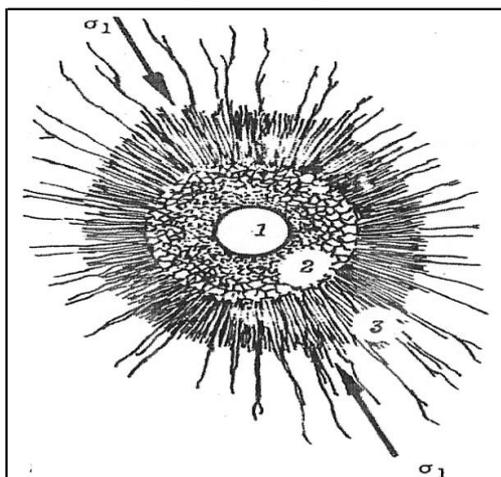


Figura 3: Área de influencia de un taladro después de la voladura Fuente: E. HOEK / E.T. BROWM, “Excavaciones subterráneas en roca”

“En donde la zona 1; es el diámetro del taladro, la zona 2 es la zona pulverizada por el explosivo y la zona 3 es el área de influencia del taladro después de una voladura.

En este caso la nueva teoría calcula el espesor fracturado por el explosivo y que luego se demostrara el burden.

Esta teoría es realizada con los criterios de resistencia de materiales, mecánica de rocas y parámetros del explosivo y perforación”.

2.4.7. Combustión O Deflagración.

Ames (2008) dice que “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”.

2.4.8. 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” Ames (2008).

2.4.9. Explosión

“La explosión de una sustancia explosiva es una rápida expansión de la misma en un volumen más grande que su volumen original” Ames (2008).

20 Teoría fue sustentado en el IV congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geociencias “IV CONEINGEMMET” en Huancayo 2003

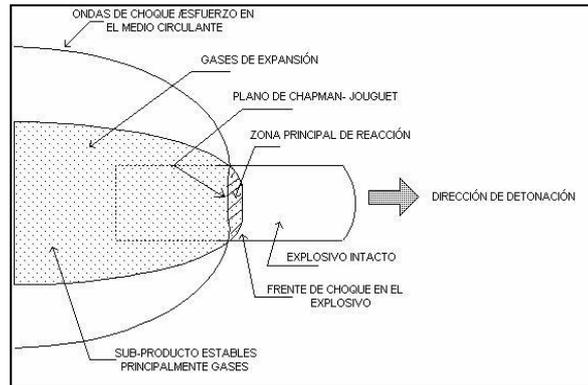


Figura 4: Mostrando el proceso de detonación de una mezcla explosiva. Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Power. 1987.

2.4.10. Determinación De Las Principales Ecuaciones Para Los Cálculos Termodinámicos¹

Ames (2008) sostiene que “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”.

2.4.10.1. Ecuación de la presión de detonación

Consideremos una onda en el plano de detonación el cual ha sido establecido en un explosivo (figura 5).

¹ P.D. (Takis) Katsabanis: “Explosives Technology”, Department of Mining Engineering, Queen[s University, Canada, 2000.

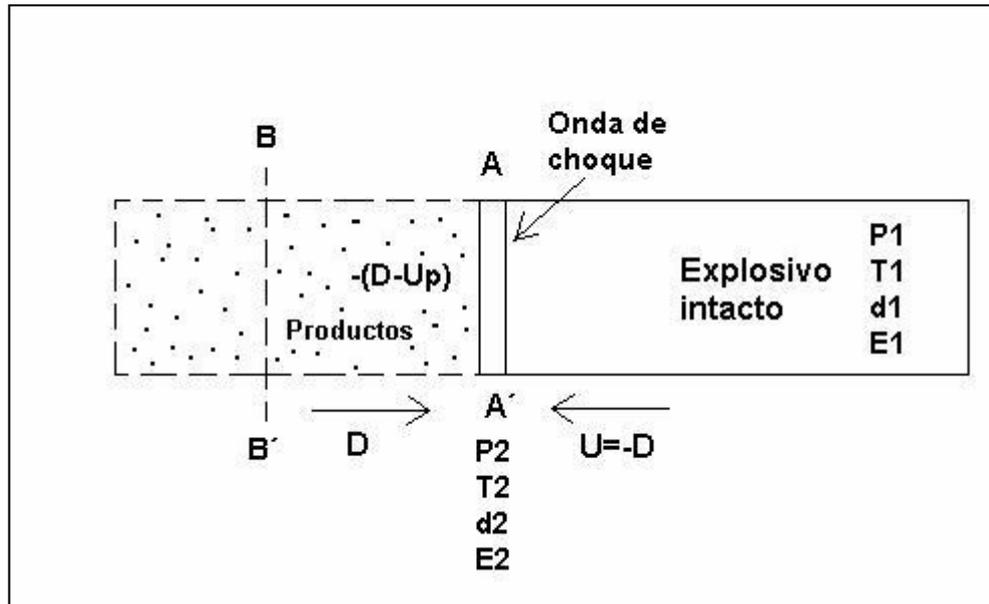


Figura 5: Esquema para la deducción de ecuaciones. Fuente: Technology Explosives. Queen's University. Canadá. 2000

Ames (2018) sostiene que “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 más 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” Ames (2008).

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

$$P_2 = \delta_1 (D^2/4) \quad (1)$$

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

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

2.4.10.2. Ecuación de Rankine-Hugoniot

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

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) (V_2 - V_1) \quad (3)$$

2.4.11. 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:

$$V_{ODCJ} = C + U_p \quad (4)$$

2.4.12. 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” Ames (2008).

La expresión de la ecuación BKW es:

$$Pv = \frac{1 + \chi e^{\beta X}}{RT}$$

Donde β es una constante, y X :

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

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

$$K = k \sum x_j k_j$$

Donde K 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.

2.4.13. Físico – 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:

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

Dónde: $\sum H_f^0$ 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 1.

TABLA 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 4,0 3,0	5,2 12,1 20,0	Exceso de oxígeno, gran pérdida de energía, produce gases

Alto	7,0	1,5	Oxígeno insuficiente
contenido de	8,0	2,9	Menor pérdida de
petróleo	9,0	4,9	energía, humos oscuros.

Fuentes: Explosives and Rock Blasting. Atlas Power. 1987.

2.4.14. Energía De Las Mezclas Explosivas

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 2.

TABLA 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

Fuentes: 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”.

Ames (2008) deduce que “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”:

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

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

2.4.15. Determinación de la Energía

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

2.4.15.1. Medición de la Energía

Ames (2008) dice que “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 6.

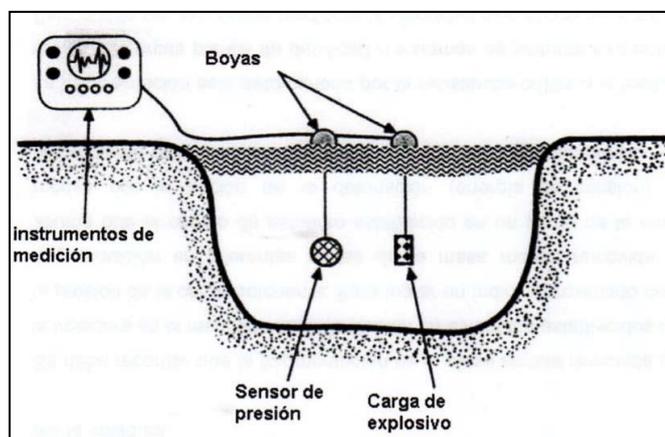


Figura 6: Esquema para la medición de la energía del explosivo bajo el agua. Fuentes: Explosives and Rock Blasting. Atlas Power. 1987.

2.4.15.2. 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. Los valores obtenidos de esta manera representan el trabajo teórico disponible del explosivo asumiendo 100% de eficiencia” Ames (2008).

2.4.15.3. Potencia de los Explosivos²

“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” Ames (2008).

2.4.15.4. 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” Ames (2008).

2.4.15.5. Potencia Absoluta por Volumen (ABS)

“Esta es la 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” Ames (2008).

$$ABS = AWS \times \delta_{\text{explosivo}}$$

2.4.15.6. 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” Ames (2008).

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

² Atlas Powder, “Explosives and Rock Blasting”, U. S. A., 1987.

2.4.15.7. 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” Ames (2008).

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

2.4.16. 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” Ames (2008).

Ames (2008) sostiene que “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” Ames (2008). Ver tabla 3.

TABLA 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 Power. 1987.

2.4.17. 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 energía**” Ames (2008).

“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” Ames (2008).

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:

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

2.5 CARACTERÍSTICAS 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” Ames (2008).

2.6 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)” Ames (2008)

En la figura 7, 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 son” Ames (2008):

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.

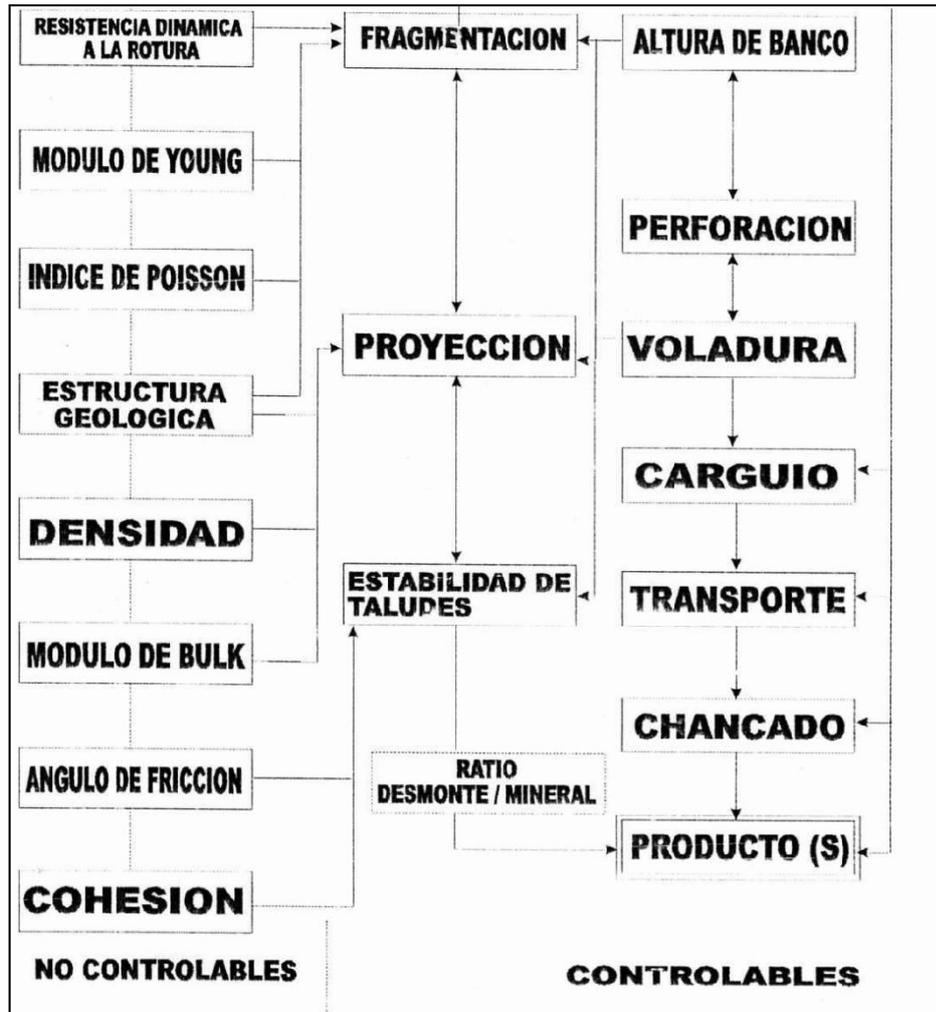


Figura 7: Interacción de las propiedades de las rocas y variables controlables con las operaciones mineras. Fuente: López Jimeno. Manual de Perforación y Voladura.

2.6.1. Características Geológicas y Geotécnicas del Área en Estudio

- **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.

- **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 4 se puede apreciar los tipos de discontinuidades.

TABLA 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
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: Geo mecánica y Voladura, Córdoba Rojas David.

• **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.

• **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.

- **Temperatura del Macizo Rocoso**

“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°C. 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” Ames (2008).

2.7 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” Ames (2008) en la figura 8.

2.7.1. 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.

2.7.2. 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.

2.7.3. 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” Ames (2008).

“También se considerada 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” Ames (2008).

Ames (2008) menciona que “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 llenada con material estéril, para dar confinamiento a los gases de la explosión y reducir el chorro de aire (air blast)” Ames (2008).

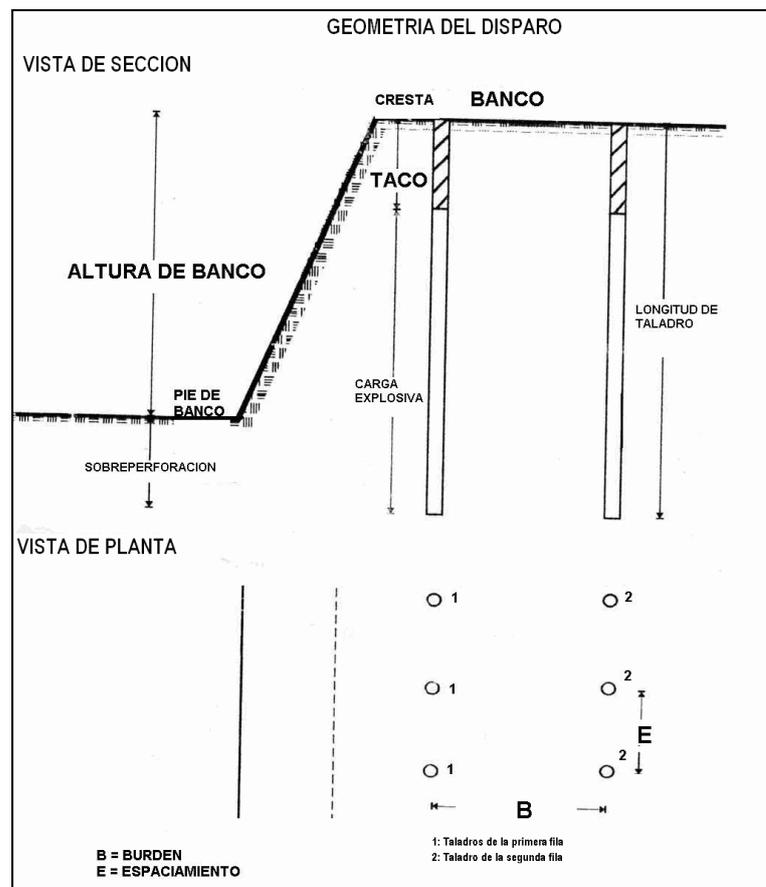


Figura 8: Variables de la geometría del disparo en minería superficial

2.8 CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO DE LA POTENCIA RELATIVA POR VOLUMEN (RBS)

2.8.1. 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 espaciamento, 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”:

$$\left[\frac{RBSa}{RBSu} \right]^{1/3} \times Du = Da^9 \quad (5)$$

Donde:

RBSu = explosivo en uso.

RBSa = explosivo a usar.

Du = dimensión en uso.

Da = dimensión a usar.

2.8.2. Ecuación modificada para la investigación.

“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 por pisos con tacos intermedios), los cuales dependen de las condiciones de campo, tipos de roca, etc” Ames (2008).

“El modelo matemático planteado por Crosby y Pinco no permite determinar las nuevas dimensiones del burden y espaciamento cuando hay más de un tipo de explosivo dentro de los taladros, por lo que es necesaria la modificación del mismo” Ames (2008).

Para modificar el modelo de Crosby y Pinco y determinar las dimensiones del burden y espaciamento 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:

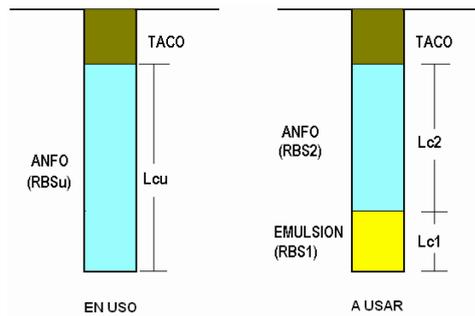


Figura 9 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a dos tipos (carga de fondo y carga de columna).

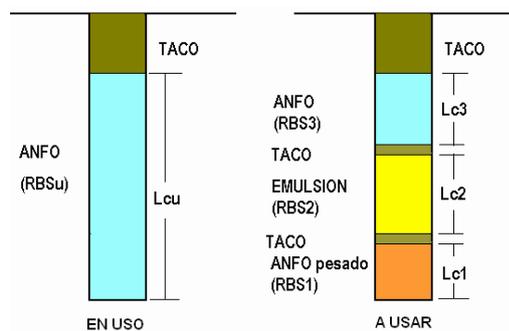


Figura 10 Cambio de explosivo de un solo tipo de explosivo a tres tipos de explosivos usando los tacos intermedios.

2.8.3. Desarrollo del modelo matemático modificado

Considerando:

V_e = Volumen de explosivo, y reemplazando en la ecuación 6

$$\left[\frac{V_e \times RBS_a}{V_e \times RBS_u} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (6)$$

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

$$\left[\frac{V_a \times RBS_a}{V_u \times RBS_u} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (7)$$

Además:

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

$$V_e = A \times l_c$$

$$V_u = A \times l_{cu} \quad (8)$$

$$V_a = A \times l_{ca} \quad (9)$$

Donde

l_{cu} = longitud de carga en uso

l_{ca} = longitud de carga a usar

Tomando en cuenta la figura 10 donde se tiene tres tipos de explosivos, el volumen total de explosivo a usar sería:

$$V_a = A \times l_{c1} + A \times l_{c2} + A \times l_{c3} \quad (10).$$

Al factorizar la ecuación 3.11 obtenemos:

$$V_a = A \times (l_{c1} + l_{c2} + l_{c3}) \quad (11)$$

Reemplazando las ecuaciones (8) y (11) en (7):

Simplificando y sabiendo que cada tipo de explosivo tiene diferente potencia relativa por volumen (RBS), la ecuación (11) desarrollada será:

$$\left[\frac{l_{c1} \times RBS_1 + l_{c2} \times RBS_2 + l_{c3} \times RBS_3}{l_{cu} \times RBS_u} \right]^{1/3} \times D_u = D_a \quad (12)$$

Por lo que para el cálculo de nuevas dimensiones del burden y espaciamiento, en taladros en el que se va a usar dos o más tipos de explosivos, el autor generaliza la ecuación (12):

$$D_a = D_u \times \frac{\left[\sum_{i=1}^n (L_{c_i} \times RBS_i) \right]^{1/3}}{(L_{cu} \times RBS_u)^{1/3}}, \quad n \in \mathbb{Z}^+ \quad (13)$$

Donde:

RBS_i = Potencia relativa de los explosivos a usar

L_{c_i} = longitud de los explosivos a usar. n = número de explosivos a usar

2.8.4. 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 12.



Figura 11: Variables de diseño en voladura en banco. Fuente: centro tecnológico de voladura EXSA SA 2009.

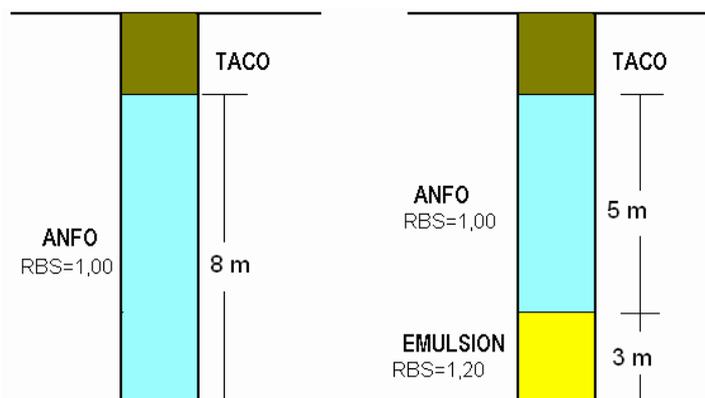


Figura 12: Cambio de explosivo ANFO a otros dos tipos de explosivos.

2. Cálculo de las nuevas dimensiones utilizando la ecuación (9)

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

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

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

3. Con tres explosivos y tacos intermedios

En este ejemplo también vamos considerar que la malla de perforación y voladura (burden x espaciamento) 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 13.

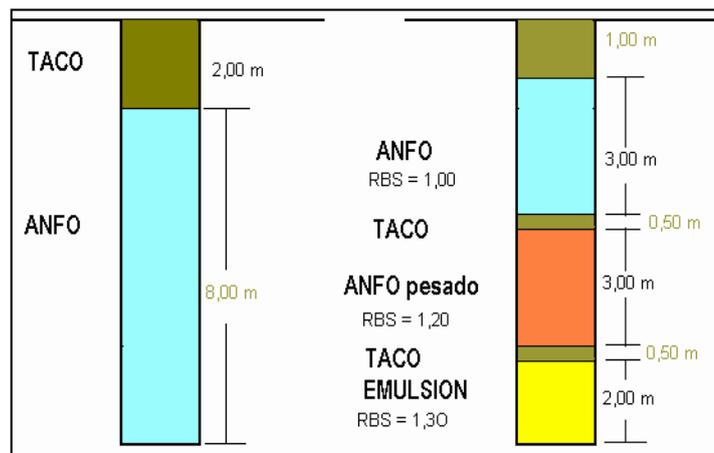


Figura 13. Cambio de explosivo ANFO a otros tres tipos de explosivos.

4. Cálculo de las nuevas dimensiones utilizando la ecuación (13)

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

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

Entonces se puede generalizar los cálculos para el uso de mayor cantidad de explosivos tal como se muestra en la ecuación (9).

2.8.5. 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” Ames (2008):

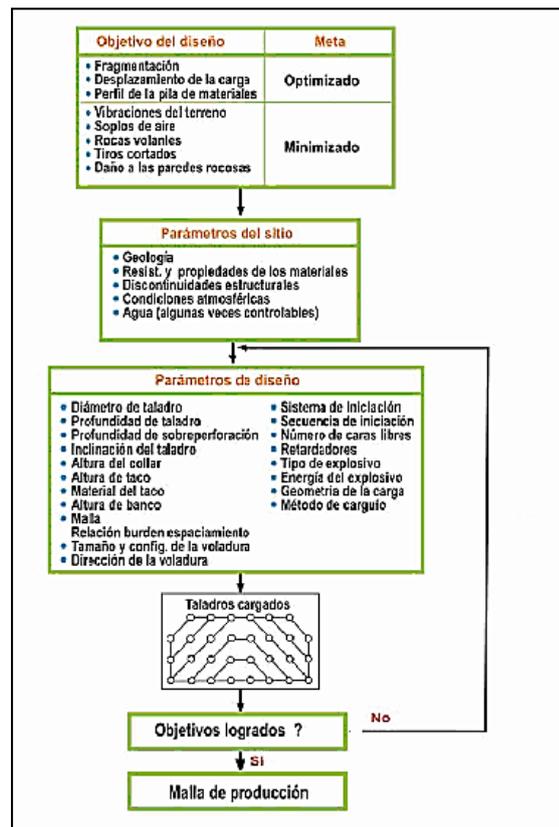


Figura 14. Esquema para la verificación del modelo matemático que utiliza la potencia relativa por volumen (RBS) para el diseño de mallas de perforación y voladura.

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1 METODO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACION

Para este trabajo se utiliza un enfoque netamente empírico y totalmente aplicado, debido a que los resultados conseguidos y resultados predichos son calculados y obtenidos a partir de fórmulas empíricas, sin embargo, se utiliza un marco teórico lo suficientemente fuerte como para determinar qué factores son relevantes al problema para luego ser evaluados. Además, se utiliza investigación descriptiva, pues se requiere de una muestra para las variables de interés para luego establecer conductas a partir de estos datos. Además, se tiene que el conocimiento de los explosivos, accesorios y demás implementos a utilizar para la investigación poseen datos técnicos duros respaldados por la empresa Minera Ares S.A.C.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación utilizo un diseño no experimental transversal (transaccional)

3.3 TIPO DE INVESTIGACION

El tipo de investigación está clasificada según su finalidad como APLICADA y según su alcance temporal seccional y por su profundidad descriptiva

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

3.4.1 TÉCNICAS

Técnicas 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.

Técnicas de análisis de datos

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.

3.4.2 INSTRUMENTOS

Materiales y Equipos a utilizar Computadoras y software respecto al tema, cámaras fotográficas, y otros.

3.5 UNIDAD DE ESTUDIO

La unidad de estudio es el proyecto que se basa en solucionar un tema en concreto, el cual puede extenderse a otras mineras.

La Compañía Minera Ares S.A.C., filial del productor peruano de metales preciosos Hochschild Mining, la cual ofrece servicios de exploración de oro y plata. La mina Ares, 100% de su propiedad, se localiza a unos 25km de Arcata, mina de Hochschild en el sur de Perú. Ares, que comenzó a producir en 1998, suspendió sus faenas el segundo trimestre de 2014. En el primer semestre de ese año reportó 1,2Moz de plata equivalente. Tras un programa 2014 de mapeo geológico, está prevista para 2015 una campaña para perforar 2.500m, siempre y cuando se reciban los permisos de exploración.

Por lo tanto, el procedimiento resultante es el siguiente:

1) Definición y contextualización del tema de memoria a realizar: Se comienza con una recopilación de antecedentes e información:

“Para esto se ingresa a la base de datos de la minera, de manera de poder abarcar la mayor cantidad de datos relevantes para la investigación, tanto teórica como empírica y poder dar aplicación a esta en etapas posteriores, con el objetivo de poseer una base sólida para la memoria” Aguirre (2016).

“Primero se recolecta información técnica de los explosivos a utilizar y utilizados, calidad del terreno en la mina, características generales de la mina, diseños de mallas de perforación y voladura utilizados, fragmentación obtenida hasta el momento, etc.

También se busca información bibliográfica y posibles antecedentes que den cuenta del uso de explosivos de alta energía en otras faenas” Aguirre (2016).

2) Definición de la estructura de trabajo: según Aguirre (2016) “la herramienta WBS (Work Breakdown Structure) se genera para obtener principalmente los alcances del trabajo de memoria visualizados en forma simple y esquemática. Se define aquí el tipo de explosivos a utilizar, diseño de mallas de perforación y voladura a implementar, sector de donde se realizará colocación de mallas de perforación y voladura, el tiempo de toma de datos y en general hasta donde queda acotada la evaluación de desempeño en post de la entrega de resultados al final del periodo de memoria”.

3) Levantamiento de datos de terreno: “Luego de estipular el tiempo en el punto 2) se procede a la toma de datos en terreno, la cual consiste principalmente en visitar constantemente el sector donde se instalará mallas de perforación y voladura donde será evaluado la aplicación del nuevo explosivo durante la jornada de trabajo y medir en forma empírica los datos relevantes para la evaluación de desempeño, es decir, el rendimiento del explosivo de alta energía y los insumos utilizados para la obtención de costos operacionales, en conjunto al modo de operar, de manera de almacenar la mayor cantidad de información” Aguirre (2016).

4) Análisis y comparación de resultados: “Se compilan y ordenan los datos para calcular los parámetros de interés de la evaluación de desempeño. De esta manera, se comparan los rendimientos de los explosivos regularmente utilizados y el nuevo de alta energía a utilizar, con el objetivo de visualizar desviaciones y cambios, logrando resultados a través de un cuadro comparativo de manera de observar la eficiencia en fragmentación, costos de operación, costos de producción y rendimientos en el chancador. Todo lo anterior en post de mostrar los resultados en forma clara y simplificada en los entregables de la memoria. Además, con los resultados obtenidos y

comparaciones realizadas se procede a calificar cuales son las causas puntuales generadoras de posibles aumentos o disminuciones de los costos y con ello otorgar medidas de control adecuadas en cada caso de manera de generar mayor eficiencia al proceso de perforación y voladura”. Aguirre (2016)

5) Discusión y Conclusiones: Se discute y emiten conclusiones acerca del trabajo realizado.

En suma, capturando el análisis de la parte 4) se procede a realizar las reflexiones necesarias para observar si se cumplieron los objetivos impuestos en un comienzo y reparos en cuanto al trabajo realizado durante todo el periodo de la memoria.

A continuación, se dará una lista de análisis a realizar cuando se pase al lado experimental.

- Primero se realizará un análisis técnico-económico y de fragmentación para 5 propuestas simuladas mediante el software a escoger.
- Se harán los mismos análisis para 3 voladuras de prueba realizadas en terreno llamadas “Demoblast”, siendo este el análisis en **específico**, donde para ambos casos se realizará una comparación con un **caso base**, donde no se utiliza el nuevo explosivo de alta energía. Este caso base, para las “Demoblast” posee las mismas dimensiones de malla, forma de carguío y explosivo que un número variable voladuras realizadas, de manera de no perder representatividad en los resultados obtenidos.
- También se realizará un análisis histórico, donde se verán los costos de voladura asociados a los meses escogidos, meses en los cuales todavía no eran utilizados los nuevos explosivos de alta energía y luego para los meses posteriores, donde si fue aplicado la nueva iniciativa de cambio de explosivo.

“Dentro del análisis final de las pruebas en terreno, se considerará los efectos de la fragmentación en el rendimiento del chancador con el objetivo de ver los costos energéticos asociados al analizar potencia; aumento o disminución del tonelaje ingresado al chancador con respecto al cambio de explosivo de manera de observar los beneficios o pérdidas al ingresar más o menos el mineral materia de estudio; y pérdidas por “cargas redireccionadas por fragmentación gruesa”, con esto se hace referencia a cuando el material correspondiente a cierta voladura es cargado pero debido a mala fragmentación (presencia de material de gran diámetro de partícula) no es enviado al

destino correspondiente, por ejemplo, una voladura es netamente mineral y se debe enviar al chancador, sin embargo, por poseer material demasiado grueso es enviado a ROM generando pérdidas considerables en cuanto a recuperación” Aguirre (2016).

Para el caso del análisis del rendimiento del chancador y cargas redireccionadas por fragmentación gruesa, se realizará un análisis histórico, donde para el primer escenario se observará potencia y tonelaje para los meses en los cuales todavía no eran utilizados los nuevos explosivos de alta energía y luego para los meses donde si fue aplicado la nueva iniciativa de cambio de explosivo, con el fin de observar cambios en potencia y tonelaje del chancador; y para el caso de las cargas redireccionadas por fragmentación gruesa, observar el cambio de tonelaje distribuido en la mina, conjunto a esto también se realizará un análisis específico para ciertas “Demoblast” en comparación al caso base, de manera de observar cambios directos en el rendimiento del chancador y las cargas redireccionadas por fragmentación gruesa para estos casos.

Finalmente, se confeccionará un flujo de caja para el análisis histórico de manera de observar la rentabilidad de la alternativa de cambio de explosivo, además de un flujo de caja para el análisis específico de las “Demoblasts”. Estos flujos de caja considerarán:

- Aumento o disminución de tonelaje en chancador.
- Pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa.
- Costos energéticos asociados al chancador de acuerdo a la potencia utilizada.
- Costo de perforación y voladura.

NOTA: LOS FORMULAS DADAS A CONTINUACION SON PARA HALLAR LOS DIFERENTES TIPOS DE COSTO, PERO NO SE DARAN VALORES EN NINGUN CASO

3.6 DETERMINACIÓN DE COSTOS ENERGÉTICOS DE CHANCADOR

- Caso análisis histórico:

Costo energético de Ch. [USD]

$$= \sum_{i=1}^3 \text{Potencia } ch_i \left[\frac{kW}{h} \right] * 24 \left[\frac{hr.}{día} \right] * \text{días}_i \left[\frac{día}{mes} \right] * \text{Costo energía} \left[\frac{USD}{kW} \right] \\ * \text{Eficiencia del } ch_i$$

- Caso análisis específico:

Costo energético de Ch. [USD]

$$= \text{Potencia Ch.} \left[\frac{kW}{h} \right] * 24 \left[\frac{hr.}{día} \right] * 1 [\text{día}] * \text{Costo energía} \left[\frac{USD}{kW} \right] * \text{Eficiencia del ch.}$$

3.7 DETERMINACIÓN DE BENEFICIO DE TONELAJE PASANTE CHANCADOR

- Caso análisis histórico:

Beneficio Tonelaje pasante Ch. [USD]

$$= \sum_{i=1}^3 \text{Toneladas Ch.}_i \left[\frac{ton}{h} \right] * 24 \left[\frac{hr.}{día} \right] * \text{días}_i \left[\frac{día}{mes} \right] * \text{Eficiencia}_i * \text{Ley promedio} * \text{Precio Cobre} \left[\frac{USD}{lb} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{lb}{ton} \right]$$

- Caso análisis específico:

Beneficio Tonelaje pasante Ch. [USD]

$$= \text{Toneladas Ch.} \left[\frac{ton}{h} \right] * 24 \left[\frac{hr.}{día} \right] * 1 [\text{día}] * \text{Ley promedio} * \text{Eficiencia del ch.} * \text{Precio Cobre} \left[\frac{USD}{lb} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{lb}{ton} \right]$$

3.8 DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS POR CARGAS REDIRECCIONADAS POR FRAGMENTACIÓN GRUESA

- Caso análisis histórico:

Pérdidas por CRD [USD]

$$= \sum_{i=1}^3 \text{Toneladas CRD} [\text{ton}]_i * \text{Ley promedio} * \text{Precio Cobre} \left[\frac{USD}{lb} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{lb}{ton} \right]$$

- Caso análisis específico:

Pérdidas por CRD [USD]

$$= \text{Toneladas CRD} [\text{ton}] * \text{Ley promedio} * \text{Precio Cobre} \left[\frac{USD}{lb} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{lb}{ton} \right]$$

3.9 DETERMINACIÓN DEL P80

“Para la determinación de la granulometría observada en una voladura (para evaluar si la voladura fue exitosa en términos de fragmentación), se emplea el término P80, que se define como el 80% de material pasante de una muestra” Aguirre (2016).

Para determinar el P80 se emplea el software de análisis de fragmentación por ejemplo el Split Desktop y Split Online.

El procedimiento utilizado para la obtención del P80 con el software mencionado es el siguiente:

- Capturar la imagen en el frente de carguío (alrededor de 5 fotos por punto).
- Analizar el set de imágenes capturadas, con una escala definida, la cual para el caso de la minera ARES se usa un escalímetro de 50 centímetros.
- Obtener la curva granulométrica para evaluar el P80.

La captura de imágenes en el frente de carguío se debe realizar en forma de una letra “M” para abarcar en lo posible todas las zonas de la frente. Para entender mejor esta práctica se presenta la siguiente figura, donde en cada punto verde se alrededor de 5 fotos:



Figura 15: Sugerida toma de imágenes en la frente de carguío. Fuente: propia.

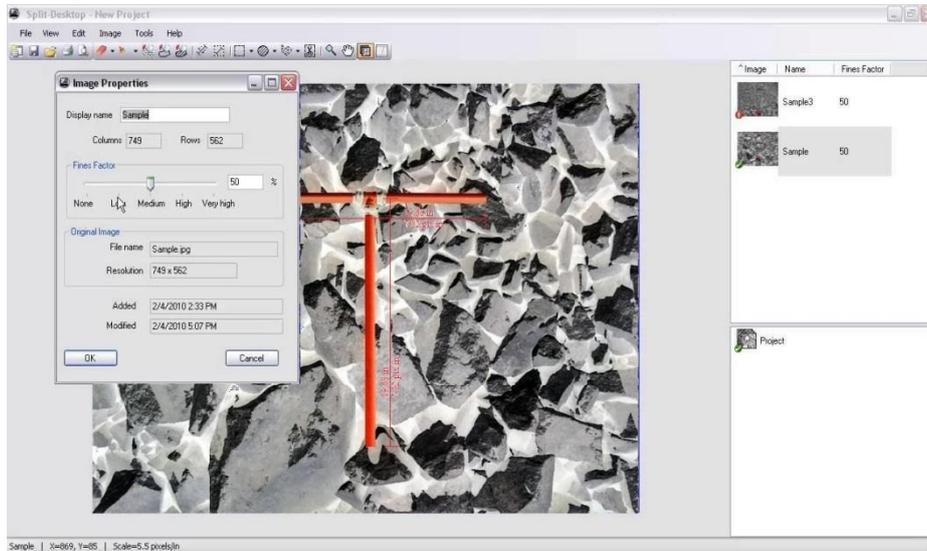


Figura 18: Imagen filtrada en Split Desktop. Fuente elaboración propia

Todo esto se realiza con el fin de generar la curva granulométrica asociada a la imagen y determinar el P80 de la voladura. La curva entregada por el software se ilustra en la siguiente figura:

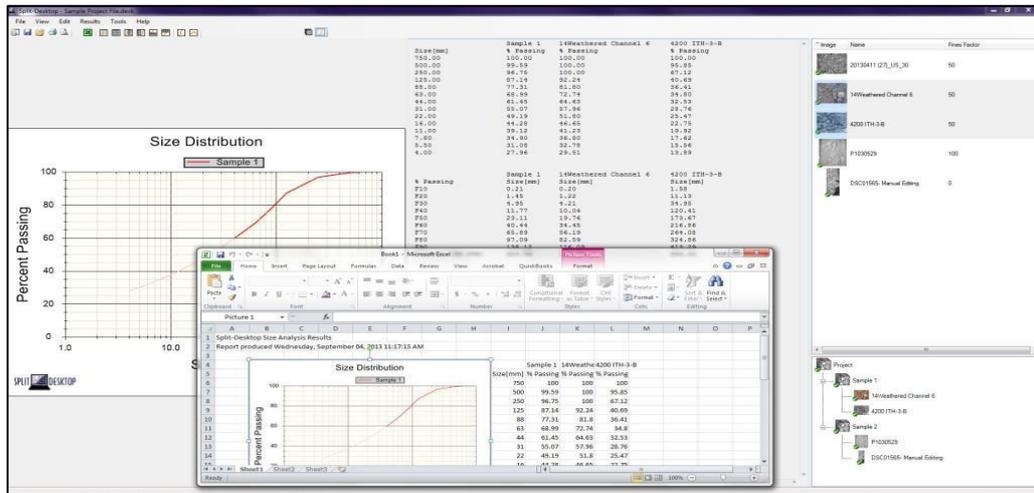


Figura 19: Curva granulométrica obtenida en Split Desktop. Fuente elaboración propia.

3.10 ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO ASOCIADO A PERFORACIÓN Y VOLADURA

Para realizar el análisis técnico-económico, es de relevancia calcular el factor de carga [g/ton]:

$$\text{Factor de Carga} \left[\frac{g}{ton} \right] = \frac{\text{grs. Explosivo}}{\text{Tonelaje a remover}}$$

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\rho_e * \text{Volumen Columna de Explosivo}}{B * E * \rho_r * H}$$

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\rho_e * \left[((H + P) - T) * \frac{\pi}{4} * \phi^2 \right]}{B * E * \rho_r * H}$$

donde:

ρ_e = Densidad del explosivo [g/cm³].

ρ_r = Densidad de la roca [ton/m³].

B = Burden [m].

E = Espaciamiento [m].

T = Taco [m].

P = Pasadura [m].

H = Altura de banco [m].

ϕ = Diámetro del pozo [cm].

Para el caso del factor de carga total de ANFO equivalente, basta con llevar el factor de carga total a gramos equivalentes de ANFO mediante la potencia en peso relativa.

- Caso análisis histórico:

Se considera un costo de perforación promedio histórico representativo de 12 [USD/m] el cual incluye los costos de acero y costos asociados al equipo de perforación:

$$\text{Costo de perforación} = \frac{PT}{VU} + \frac{CM}{VP}$$

Donde:

PT = Precio del tricono [USD].

VU = Vida útil del tricono [m].

CM = Costo máquina [USD/h].

VP = Velocidad de penetración [m/h].

Para calcular el costo de perforación por tonelada en [USD/ton] se consideran los metros perforados obtenidos de la base de datos de minera Ares con respecto al cuartil a analizar y a cuanto tonelaje removido en ese mismo cuartil. (Para el caso del mes de septiembre se utiliza un factor de escalamiento de 2, para escalar a un mes de funcionamiento normal).

$$\text{Costo de perforación por ton.} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{Metros perforados} * \text{Costo de perforación}}{\text{Toneladas por pozo}}$$

$$\text{Costo de perforación por tonelada} = \frac{(H+P) * \text{Costo de perforación}}{B * E * H * \rho_r}$$

Donde:

ρ_r = Densidad de la roca [ton/m³].

B = Burden [m].

E = Espaciamiento [m]. P = Pasadura [m].

H = Altura de banco [m].

Luego, para el precio por tonelada en la voladura [USD/ton] se obtiene a partir de la base de datos de minera Ares para el cuartil analizado.

Por último, el costo final por tonelada de todo el proceso de perforación y voladura [USD/ton] se obtiene como la suma del costo de perforación por tonelada y el precio por tonelada en la voladura.

-Caso análisis específico:

Se considera el mismo costo de perforación promedio histórico representativo de 12 [USD/m] considerado en el análisis histórico, con esto, para calcular el costo de perforación por tonelada en [USD/ton] se consideran los metros perforados (dados del diseño de la malla de voladura) y a cuanto tonelaje por pozos corresponde.

$$\text{Costo de perforación por ton.} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{Metros perforados} * \text{Costo de perforación}}{\text{Toneladas por pozo}}$$

$$\text{Costo de perforación por tonelada} = \frac{(H+P) * \text{Costo de perforación}}{B * E * H * \rho_r}$$

Donde:

ρ_r = Densidad de la roca [ton/m³].

B = Burden [m].

E = Espaciamiento [m].

P = Pasadura [m].

H = Altura de banco [m].

Luego, para el precio por tonelada en la voladura [USD/ton], se tiene lo siguiente:

$$\text{Costo explosivo bulk} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{Precio explosivo} * \text{Toneladas de explosivo} + \text{Accesorios} * \text{Precio accesorios}}{\text{Tonelaje a remover}}$$

Por último, el costo final por tonelada de todo el proceso de perforación y voladura [USD/ton] se obtiene como:

$$\text{Costo final por ton. (PyT)} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \text{Costo de perforación por ton.} + \text{Precio por ton. (Tronadura)}$$

NOTA: LOS FORMULAS DADAS SON PARA HALLAR LOS DIFERENTES TIPOS DE COSTO, PERO NO SE DARAN VALORES EN NINGUN CASO.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANALISIS

Se debe tener especial cuidado con el proceder durante el proceso de voladura, de manera de observar si se realizaron correctamente los pasos de manera de no generarse datos erróneos, en post de conseguir mejores resultados, más correctos y confiables.

Es de relevancia observar la factibilidad de la aplicación de un nuevo explosivo de alta energía, de ser factible su utilización se considera una aplicación general en la mina en particular en sectores de alta dureza.

CONCLUSIONES

Se tiene que claramente especificar el explosivo que es de más energía en comparación al resto de explosivos, por lo tanto, radica en una mayor fragmentación de la roca por medio del fracturamiento debido a mayor energía liberada, ayudando a resolver los constantes problemas de material de gran tamaño resultantes debido a la existencia de roca altamente competente.

Ahora bien, comentando los costos asociados a la variación en el explosivo, se observa que económicamente son rentables tanto como las “Demoblast” y las propuestas, a pesar de que existe el factor de un explosivo que alcanza mayor precio en el mercado generando altos costos principalmente en voladura. Estos costos son los que presentan gran diferencia entre las pruebas en comparación a los demás, sin embargo, el tema aún más relevante son las cargas redireccionadas, que influyeron de manera significativa en el flujo de caja generando la rentabilidad buscada.

Claramente existe un beneficio en el caso histórico, donde se supera con creces al primer cuartil, confirmando que el uso del nuevo explosivo de alta energía trajo beneficios considerables e incluso a pesar de no realizar todas las voladuras con el explosivo de alta energía en el tercer cuartil, aun así, se logra un cambio beneficioso.

Para el caso de las propuestas se observa que la configuración resultante con más oportunidad de ser aplicada por poseer la mayor cantidad de beneficios (a escoger), ya que a pesar de no ser la propuesta con mayor beneficio en P80, alcanza un valor bastante elevado y aceptable, si existiera una gran presencia de finos puede afectar el proceso aguas abajo (Complicación en la pila de lixiviación por ejemplo disminuyendo la recuperación). También se tiene que alcanzar incrementos tanto en energía del

explosivo como en factor de carga total, aunque en este último solo de un 1%; en los costos de perforación no aumentan y mantiene el menor costo de voladura, lo que se traduce en un menor costo del proceso completo de Perforación y Voladura, manteniendo la misma dimensión de la malla, pero alcanzando mayores beneficios en fragmentación. Por lo que la configuración recomendada para ser aplicada en la faena sería la propuesta experimentada.

Con respecto a las pruebas en terreno “Demoblast”, se concluye que la configuración de la “Demoblast” es la más factible de ser aplicada, alcanza los menores costos en el proceso de Perforación y Voladura y prácticamente nulos en perforación, además conlleva a un excelente desempeño en cuanto a fragmentación, teniendo un gran incremento en el beneficio del P80, presenta un incremento aceptable en lo que respecta a porcentaje pasante con el objetivo de no afectar procesos posteriores de recuperación. En cuanto a factor de carga y energía presenta incrementos mínimos pero que dado los exitosos resultados son dispensables. Por lo que la “Demoblast” resulta ser eficiente y aplicable para los sectores de roca altamente competente, y así lograr rentabilidad con buenos resultados. En cuanto al flujo de caja de costos, aunque no se logra la mayor reducción, la diferencia es mínima y además como se menciona, posee mayores beneficios en cuanto a fragmentación, logrando también beneficio y rentabilidad por esta parte.

Por lo tanto, se logra alcanzar un óptimo para una malla utilizando el explosivo Escogido con carga en el taco, logrando reducir el P80 aproximadamente a la mitad, mejorando radicalmente el proceso al equiparar con mallas de la misma dimensión

El no cambiar el diseño de la malla ayuda a generar simpleza en el cambio, además al existir mallas más grandes y no variar, se logra utilizar menor cantidad de explosivo al reducir la cantidad de pozos, que esto a su vez genera mayor disponibilidad en las perforadoras (con disponibilidad se hace referencia a lo disponible que se encontrará la perforadora para realizar otras tareas), ya que si fuera el caso de existir reducción de malla la perforadora necesitaría mayor tiempo para realizar más pozos, alargándose el proceso de voladura y dificultando la operación causando problemas a la hora de cumplir metas, tanto de tonelaje como de plazos. Por lo que la utilización de explosivos de alta energía contribuye en gran manera a mejorar el rendimiento de la fragmentación y hacer rentable el negocio desde una visión global.

En cuanto al chancador, solo es atribuible el cambio de explosivo a la mejora en términos energéticos, logrando disminuir el consumo energético debido a la menor granulometría al utilizar explosivos de alta energía en comparación con el actuar habitual de la minera.

Estas medidas incrementan la rentabilidad del proceso global de minería, ya que se traducen en beneficios posteriores a la voladura en sí, logrando cumplir con los objetivos impuestos en un comienzo.

Se tiene que el análisis y toma de datos en el proceso de Perforación y Voladura es muy complejo, siendo la base de todos los resultados la manera en que se obtienen los datos para conformar la base de la información, por lo que los procedimientos para conseguir los datos de diseño deben ser seguidos adecuada y prolijamente, una mala toma de datos se traduce en un fracaso en el análisis técnico económico realizado.

RECOMENDACIONES

Inspeccionar y monitorizar invariablemente el avance en el frente de la galería antes durante y después de la perforación y voladura para realizar su rastreo concerniente para observar la disposición de la roca y medir el modelo de la malla de perforación y la carga explosiva apropiada para aminorar los costos en base al burden y su extensión, porque no hay nada más variable que el macizo rocoso el cual aparenta no vislumbrar nuestros conflictos en entenderlo.

Realizar un arduo acompañamiento al frente de la galería en el instante de la perforación de modo así que se logra regular el paralelismo y se logra sacar provecho a los guidores, y que el modelo de malla conveniente de perforación tenga repercusión para disminuir los costos de perforación

Se aconseja, tener mucho cuidado en la firmeza de la carga explosiva correcta, para aminorar los costos de voladura conforme a la conducta de la roca que se muestra para incurrir a los costos que se realizaran.

Regular el factor de la carga por metro cubico de roca volada del suministro de la carga explosiva por disparo en base a la capacidad del material quebrado o fraccionado para obtener la medida de explosivo que se está empleando por metro cubico de roca fraccionada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUIRRE García, Andrés Alejandro. *Optimización De Parámetros De Tronadura En Función De Explosivos De Alta Energía En Sociedad Contractual Minera El Abra*. Tesis (ingeniería civil de minas). Santiago de Chile: universidad de chile, departamento de ingeniería de minas, 2016. 166 pp.
2. AMES Lara, Víctor Alejandro. *Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas*. Tesis (maestría en ciencias). Lima: Universidad Nacional De Ingeniería, Sección de postgrado, 2008. 64 pp.
3. BERNAOLA, J., CASTILLA, J., & HERRERA, J. *Perforación y voladura de rocas en minería* [en línea]. 1.ra ed. Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Copyright © 2013. [Fecha de consulta: 18 de noviembre de 2018]. Disponible en: http://oa.upm.es/21848/1/20131007_PERFORACION_Y_VOLADURA.pdf
4. JIMENO, C. L., JIMENO, E. L., & BERMÚDEZ, P. G. *Manual de perforación y voladura de rocas*. 2.da ed. Madrid: ETIMSA, 2003. 545 pp. ISBN 84-7840-164-4.
5. LÓPEZ, E., LÓPEZ, C., PERNIA, J., & ORTIZ, F. *Manual de perforación y voladura de rocas*. 1.ra ed. Madrid: ETIMSA, 1988. 464 pp. ISBN 84-505-7007-7.
6. PIJUSH, P. *Rock Blasting Effects and Operations*. 2. da ed. CRC Press, 2005. 380 pp. ISBN 9780415372305.

ANEXO 1:

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: OPTIMIZACIÓN DE LAS MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZANDO LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS DE MINA SUBTERRÁNEA EN LA COMPAÑÍA MINERA ARES S. A. C.

Formulación de problema	Objetivos	Hipótesis	Sistema de variables	Metodología
<p>General: OPTIMIZACIÓN DE LAS MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA UTILIZANDO LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS DE MINA SUBTERRÁNEA EN LA COMPAÑÍA MINERA ARES SAC</p>	<p>General: Analizar y aplicar la energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura correctamente.</p> <p>Específicos</p> <p>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.</p>	<p>General: La energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura correctamente.</p> <p>Específicas La geometría del disparo con el uso de la potencia relativa por volumen. Y el rendimiento de los explosivos con el uso del factor de energía. Mejorar el grado de fragmentación de las rocas</p>	<p>Variable: Entrada</p> <p>Indicadores: 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)</p>	<p>Método: Análisis y comparación</p> <p>Diseño de investigación: cuasi experimental Población: Industria minera del país.</p> <p>Muestra: Una empresa minera(ARES-SAC)</p> <p>Instrumento: Computadoras y software respecto al tema, cámaras fotográficas, y otros</p> <p>Estadígrafos:</p>

ANEXO 2

CUADRO DE INSUMO PARA REGISTRAR LOS ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN DEL PROBLEMA

AÑO	AUTOR - TÍTULO	TIPO DE FUENTE	REGISTRO DE LA INFORMACIÓN	APORTE PARA EL TRABAJO
2013	Bernaola, Castilla & Herrera "en trabajo titulado <i>"perforación y voladura de rocas en minería"</i>	Tesis	Esta denominación engloba todas aquellas formas de perforación en las que la fragmentación de la roca se produce básicamente por impacto de un útil de filo más o menos aguzado sobre la misma.	Este fondo se retira periódicamente los fragmentos producidos mediante un útil especial (cuchara) que los recoge junto con una cierta cantidad de agua que se añade para facilitar la operación.
2016	Aguirre <i>"optimización de parámetros de voladura en función de explosivos de alta energía en sociedad contractual minera el abra"</i>	Tesis	Es una temática relevante la situación que conlleva a los costos operacionales asociados a la minería, tanto en la mina misma como en planta, por lo tanto es un constante mejoramiento continuo lo que debe realizarse para lograr alcanzar mayores beneficios y utilidades, esto se debe principalmente a la volatilidad que poseen los precios de los metales, en especial el cobre, para este caso.	Este nuevo tipo de explosivos de alta energía a utilizar llamados, Vistan 225 y Vistis 225, son nuevos productos explosivos a granel que la empresa Orica ha desarrollado para el mercado.
2014	Jaime <i>"Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto"</i>	Tesis	Las presiones originadas por la onda de tensión, deben superar la resistencia de compresión de la roca, produciendo la rotura de la misma o deformándola elásticamente en el área de la línea de menor resistencia (burden); a medida que la onda de compresión se va alejando del taladro, su amplitud se atenuará a valores por debajo de la resistencia a la compresión de la roca, decayendo en forma proporcional a la distancia recorrida y al tipo de roca. De aquí más la onda de compresión propagará a la velocidad sísmica, la misma que dependerá de la naturaleza del medio en que transita.	La detonación de un explosivo en condiciones confinadas, transmitirá ondas de compresión, las cuales a su vez generan tracciones tangenciales en el macizo rocoso

ANEXO 3

CUADRO DE INSUMO PARA ELABORAR EL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADOR	ITEM	RESPUESTA
	Entrada	Geología de la mina, energía de los explosivos, Potencia relativa por volumen de los explosivos (RBS), diámetro de taladro, burden, espaciamiento, sistemas de iniciación, costos de explosivos y accesorios.	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)	$Y_i \rightarrow X_j$
	Salida	Diseño de la malla, burden, espaciamiento, factor De potencia, factor de energía, fragmentación.	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)	Factor de potencia (kg/TM, kg/m ³), factor de energía (kcal/TM, kcal/m ³), fragmentación (%) Muestra → Observación

ANEXO 4

CUADRO DE INSUMO PARA REGISTRAR LA DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

TÉRMINO BÁSICO	DEFINICIÓN	FUENTE
Perforación	<p>La perforación es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es abrir en la roca huecos cilíndricos denominados taladros y están destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores.</p> <p>El principio de la perforación se basa en el efecto mecánico de percusión y rotación, cuya acción de golpe y fricción producen el astillamiento y trituración de la roca.</p>	(AMES L. 2008) diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas
Mallas de perforación	<p>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.</p>	(AMES L. 2008) diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas