UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO
"Una nueva Universidad para el Desarrollo"

REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNASAM

Dirección del Instituto de Investigación

FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, PARA A OPTAR GRADOS ACADÉMICOS Y TÍTULOS PROFESIONALES EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL - UNASAM

Conforme al Reglamento del Repositorio Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI.
Resolución del Consejo Directivo de SUNEDU Nº 033-2016-SUNEDU/CD

1. Datos del Autor:

Apellidos y Nombres: **ELMAN EINER GARCÍA CHAVEZ**

Código de alumno: 02.0521.0.AH Teléfono: 920184048

Correo electrónico: **elmenfimgm@hotmail.com** DNI o Extranjería: 43482214

2. Modalidad de trabajo de investigación:

( ) Trabajo de investigación ( ) Trabajo académico

( ) Trabajo de suficiencia profesional (X) Tesis

3. Título profesional o grado académico:

( ) Bachiller (X) Título ( ) Segunda especialidad

( ) Licenciado ( ) Magister ( ) Doctor

4. Título del trabajo de investigación:
"APLICACIÓN DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS EN EL DISEÑO DE MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA - 2017"
Facultad de: Ingeniería de Minas, Geología y Metalurgia

6. Escuela, Carrera o Programa: Ingeniería de Minas

7. Asesor:

Apellidos y Nombres: Dr. Ing. **Sotelo Montes Javier Enrrique** Teléfono:943606331

Correo electrónico: **ensotelo@hotmail.com** D.N.I: 31601882

A través de este medio autorizo a la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, publicar el trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA) y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI).

Asimismo, por la presente dejo constancia que los documentos entregados a la UNASAM, versión impresa y digital, son las versiones finales del trabajo sustentado y aprobado por el jurado y son de autoría del suscrito en estricto respeto de la legislación en materia de propiedad intelectual.

Firma: .....

D.N.I 43482214

Fecha: 27 / 11 / 19

UNIVERSIDAD NACIONAL "SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y METALURGIA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

APLICACIÓN DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS EN EL DISEÑO DE MALLAS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN COMPAÑÍA MINERA ANTAMINA – AÑO 2017

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

Presentado por:

Bach. GARCÍA CHÁVEZ, Elman Einer

Asesores:

Dr. Ing. SOTELO MONTES, Javier Enrrique

Dr. Ing. PÉREZ FALCÓN, Julián

HUARAZ - PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mis padres por su dedicación, apoyo y contribución en la ejecución de la presente tesis.

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a la **Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo",** institución donde me forme y estudie la carrera **de Ingeniería de Minas en la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Metalurgia,** y cumplir con el objetivo de ser profesional.

También el agradecimiento a los docentes de la mencionada Facultad de Ingeniería de Minas y a mis asesores del presente trabajo de Investigación, quienes influyeron, con sus enseñanzas y consejos, a que me introdujera al fascinante mundo de la voladura.

A los ingenieros de la Compañía Minera Antamina S.A., con quienes aprendí las nuevas innovaciones de la aplicación de perforación y voladura.

Por último, agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, su comprensión, su cariño y entrega en mi formación de Ingeniero de Minas.

Elman García

RESUMEN

La aplicación de nuevas técnicas para el diseño de mallas de perforación y voladura, en la Compañía Minera Antamina S.A., por lo que en esta tesis se da a conocer la utilización de la potencia relativa por volumen (RBS).

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

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

PALABRAS CLAVES: Energía producida por las mezclas explosivas.

ABSTRACT

The application of new techniques for the design of perforation and blasting meshes, in “Antamina Mining Company S.A.”, so in this thesis the use of relative power by volume (RBS) is disclosed.

This theory is based on the fact that the energy of an explosive compared to that of another explosive is very different, in the same volume of a drill, so when changing in a mine in operation, an explosive in use by another of higher energy the difference in the energy content of each explosive must be taken into account. This criterion also implies that the use of the energy factor should be a daily tool rather than the use of the load factor or power factor, which to date is used in all mining units of our country, despite the fact that of energy has many years of validity in developed countries, which allows to correctly quantify the energy performance of the explosive.

The relative power by volume (RBS) allows to modify quickly the original dimensions of the burden and spacing, in this way it allows to save time and cost in the trials of trial and error for the implementation of the new dimensions in the operations of drilling and blasting. In the present work a change from Anfo to Anfo heavy 50/50 was made and it was determined that the costs of drilling and blasting with a more energetic explosive could be reduced, as well as the fragmentation obtained by using ANFO.

KEYWORDS: Energy produced by explosive mixtures.

ÍNDICE

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTO iii

RESUMEN iv

ABSTRACT v

TABLAS ix

FIGURAS x

INTRODUCCIÓN xi

CAPÍTULO I

GENERALIDADES 1

1.1. Entorno Físico. 1

1.1.1. Ubicación y acceso. 1

1.1.2. Topografía 2

1.1.3. Geomorfología. 3

1.2. Entorno Geológico. 4

1.2.1. Geología regional 4

1.2.2. Geología local. 6

1.2.3. Geología estructural. 7

1.2.4. Geología económica. 8

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN 12

2.1. Marco Teórico. 12

2.1.1. Antecedentes de la investigación. 12

2.2. Fundamentación teórica. 14

2.2.1. Estudio y Análisis del Modelo Matemático que Utiliza la Potencia Relativa por Volumen (RBS) en el Diseño de las Mallas de Perforación y Voladura. 14

2.2.2. Características Geo mecánicas del Macizo Rocoso que tienen una Influencia Determinante en los Resultados de la Voladura de Rocas. 25

2.2.3. Variables de la Geometría del Disparo. 30

2.3. Definición de Términos. 37

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA 39

3.1. El Problema. 39

3.1.1. Identificación y selección del problema. 39

3.1.2. Formulación del Problema. 40

3.1.3. Objetivos de la investigación. 40

3.1.3.1. Objetivo General. 40

3.1.3.2. Objetivos Específicos. 40

3.1.4. Justificación 41

3.1.5. Importancia. 41

3.1.6. Limitaciones. 41

3.1.7. Alcances 41

3.2. Hipótesis. 42

3.3. Variables. 42

3.4. Diseño de la investigación 42

3.4.1. Tipo de investigación 42

3.4.2. Nivel de la investigación 43

3.4.3. Diseño de investigación 43

3.4.4. Método 43

3.4.5. Población y muestra 43

3.4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 43

3.4.7. Instrumentos de recolección de datos 44

3.4.8. Metodología de recolección de datos 44

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN 45

4.1. Descripción de la realidad y procesamiento de datos..... 45

4.2. Análisis e Interpretación de la Información 47

4.2.1. Parámetros de Diseño Básico. 47

4.2.2. Principales..... 48

4.2.3. Perforación y Voladura..... 48

4.2.4. Diseño de la Malla de Perforación y Voladura con el Criterio RBS 50

4.2.5. Cálculo de las Nuevas Dimensiones..... 51

4.2.6. Características de las Voladuras de Prueba Utilizando Anfo Pesado 50/50 (Emulsión Heavy Anfo y Anfo) 54

4.2.7. Cálculo del Factor de Energía..... 55

4.2.8. Análisis y Discusión de los Resultados 60

4.2.9. Análisis de Fragmentación 61

4.2.10. Cálculo del Factor de Energía..... 62

4.2.11. Discusión Económica 63

4.2.12. Discusión Ecológica 63

4.3. Discusión de resultados 64

CONCLUSIONES..... 68

RECOMENDACIONES 69

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 70

ANEXOS..... 72

Anexo N° 1: Plano de ubicación de mina Antamina..... 73

Anexo N° 2: Mapa Geológico Regional..... 74

Anexo N° 3: Mapa Geológico Local. 75

TABLAS

Tabla N° 1: Reservas Minables por Tipo de Mineral 11

Tabla N° 2: Pérdida de Energía en el AN/FO por Contenido Incorrecto de Petróleo 19

Tabla N° 3: Distribución de la energía en diferentes eventos 20

Tabla N° 4: Eficiencia de los Explosivos 24

Tabla N° 5: Tipos de Discontinuidades 28

Tabla N° 6: Técnicas e instrumentos de recolección de datos 44

Tabla N° 7: Parámetros Básicos del Tajo 47

Tabla N° 8: Parámetros de Diseño del Tajo 48

Tabla N° 9: Parámetros de Perforación y Voladura antes del Uso de la RBS 49

Tabla N° 10: Energía de las Mezclas a Granel del ANFO Pesado 51

Tabla N° 11: Resumen de las Nuevas Dimensiones de Burden (B) y Espaciamiento (E) 53

Tabla N° 12: Resumen de los factores de energía. 56

Tabla N° 13: Tabla Perforación 65

Tabla N° 14: Diseño de carga 68

Tabla Nº 15: Costo del explosivo 69

Tabla N° 16: Accesorios. 67

FIGURAS

Figura N° 1: Ubicación y Acceso a la compañía minera Antamina..... 2

Figura N° 2: Mostrando el Proceso de Detonación de una Mezcla Explosiva 15

Figura N° 3: Esquema para la Deducción de Ecuaciones. 16

Figura N° 4: Esquema para la Medición de la Energía del Explosivo Bajo el Agua. 22

Figura N° 5: Interacción de las Propiedades de las Rocas y Variables Controlables con las Operaciones Mineras. 27

Figura N° 6: Variables de la Geometría del Disparo en Minería Superficial..... 31

Figura N° 7: Esquema del Carguío del Taladro con ANFO 51

Figura N° 8: Esquema del Carguío del Taladro con ANFO pesado 50/50..... 55

Figura N° 9: Diagrama de Flujo para el Diseño de una Voladura. 58

Figura N° 10: La presentación del programa. 59

Figura N° 11: Pantalla mostrando una corrida del programa. 60

INTRODUCCIÓN

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 en la Cia. Minera Antamina.

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

La tesis tiene la siguiente estructura de:

La dedicatoria; el agradecimiento, el resumen, el abstract, índice general, de tablas, de figuras y la introducción.

Capítulo I: Generalidades.

Capítulo II trata sobre la fundamentación.

Capítulo III trata la Metodología.

Capítulo IV trata sobre los resultados de la investigación.

Se finaliza con las conclusiones, las recomendaciones, las referencias y los anexos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Entorno Físico.

1.1.1. Ubicación y acceso.

La Mina Antamina se ubica en la Cordillera Occidental de los Andes, en la parte Nor-Central del Perú, ubicado en el departamento de Ancash, provincia de Huari y Distrito de San Marcos, a 270 Km., en línea recta al Norte de Lima. Huaraz es la ciudad más cercana a la mina y se puede llegar por vuelo directo desde Lima o por carretera en 6 horas.

Acceso:

El acceso a la mina de la ciudad de Huaraz es por una vía asfaltada a 3.5 horas de manejo (200km). Sus coordenadas UTM y Geodésicas son:

- Este : 274, 000 m.
- Norte : 8, 945, 500 m.
- Nivel : 4,200 a 4,700 m.
- Latitud : 9° 32” S
- Longitud : 77° 03” W

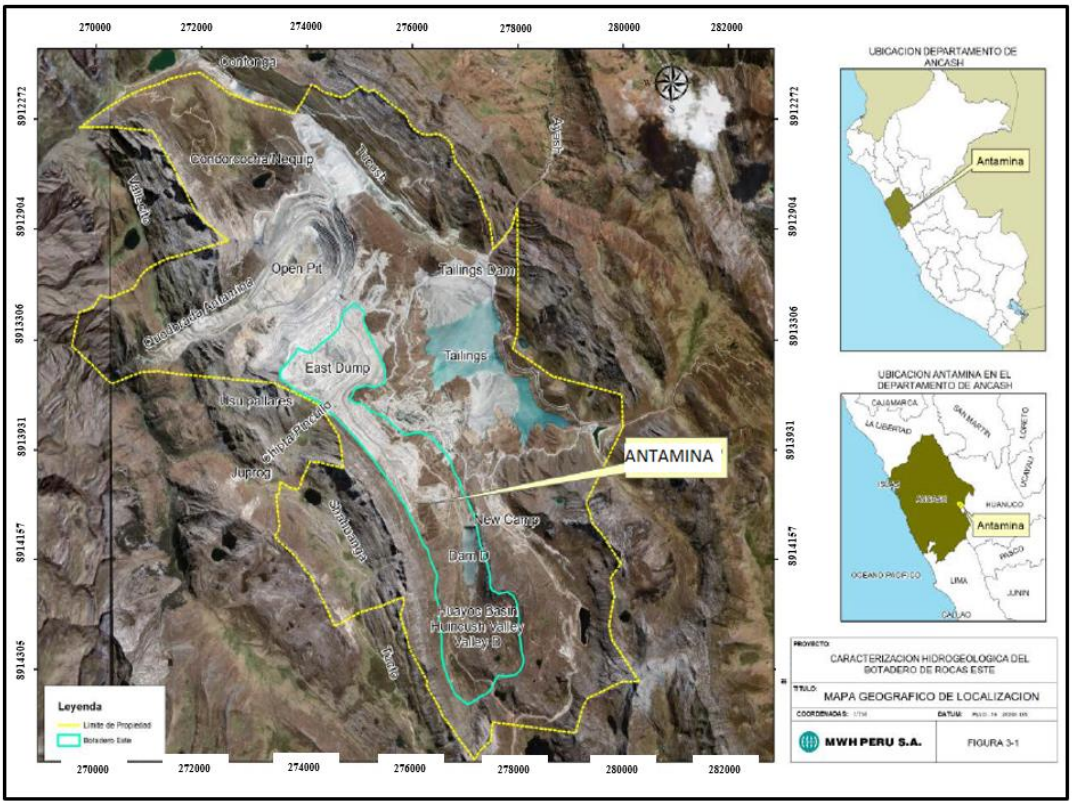


Figura N° 1: Ubicación y Acceso a la compañía minera Antamina.
Fuente: Departamento de geología de compañía minera Antamina.

1.1.2. Topografía.

El emplazamiento minero de Yanacancha se encuentra entre los 4300 msnm y los 4500 msnm en la eco región denominada Puna, caracterizada por una cobertura vegetal mayormente conformada por pastos naturales y arbustos. Es una región montañosa de relieve accidentado con pendientes y altitudes variables, las quebradas que forman las cadenas de montaña son amplias en sus orígenes y angostas y afiladas aguas abajo.

El paisaje también lo componen humedales como bofedales, yaretales y cuerpos de agua de diversa dimensión, existiendo algunas lagunas de singular belleza. También se encuentran ciertos relictos de bosques de Queñua entre algunas quebradas. Destacando el bosque de Juprog por su extensión y estado de conservación. Las zonas de vida identificadas en el área de la mina son: Tundra Pluvial Alpina, Páramo Húmedo Subalpino Tropical, Páramo Muy Húmedo Subalpino Tropical, Páramo Pluvial Subalpino Tropical y Estepa Montano Tropical. La mina se asienta en las cabeceras de las cuencas de los ríos Ayash, Yanacancha, Carash y Antamina.

Estos sistemas fluviales a su vez fluyen hacia dos cuencas, el Carash hacia el río Mosna que pasa cerca de la población de San Marcos y el Ayash que llega a la cuenca del río Puchca que forma parte de la Cuenca del Alto Amazonas. (Departamento de geología , Compañia minera Antamina, 2016).

1.1.3. Geomorfología.

El área se caracteriza por poseer una topografía muy abrupta con grandes desniveles. La morfología actual es el resultado de los procesos glaciales del Pleistoceno, que tallaron los valles en forma de U. los fondos de los valles contienen depósitos glaciales compuestos de pequeñas morrenas.

Las lagunas que se encuentran por Antamina son relativamente pequeñas y se forman en glaciales, depresiones y valles donde el patrón de drenaje natural ha sido bloqueado por morrenas y material aluvial. (Departamento de geología , Compañia minera Antamina, 2016).

1.2. Entorno Geológico.

1.2.1. Geología regional.

La geología Regional puede caracterizarse en términos de rocas sedimentarias que se encuentran en el flanco este de la Cordillera Blanca y las rocas intrusivas, las cuales aparecen en la cuenca del Río Santa (que incluye el flanco occidental de la Cordillera Blanca).

A continuación, se describirá las diferentes formaciones reconocidas en el área de emplazamiento de Antamina.

- **Formación Celendín:** Está formado por: Margas calcáreas, pobremente estratificados, de color amarrillo plomizo con intercalaciones de caliza, esquistos de barro plomo y margas. La formación tiene un grosor de aproximadamente 500m y se observa como un centro de sinclinales con rumbo NW-SE.

- **Formación Jumasha:** La formación Celendín es concordante con respecto a esta formación. Presenta caliza gris masiva compuesta por estratos de aproximadamente 1 a 2 m de grosor. Esta formación resistente al intemperismo tiene un grosor menor que 700 m y se presenta como cadenas sobresalientes y elevadas. Esta formación es cárstica, contiene numerosas cuevas y sumideros.

- **Formación Pariatambo:** La formación Jumasha es concordante a esta formación, presenta margas de color marrón oscuro con intercalaciones de caliza con esquistos de color marrón. La formación tiene aproximadamente 100 m y es concordante con la formación pariahuanca.

- **Formación Pariahuanca:** Caliza masiva de color plomo azulado, con estratos de 1 a 2 m de grosor. La formación tiene aproximadamente 100 m de grosor y sobre yace en concordancia con la formación Carhuaz.

- **Grupo Goyarisquizga:** Presenta areniscas friables de color blanquecino con estratificaciones transversales de 2 m de grosor o menos en ciertos casos, con intercalación de esquistos y lodolitas interestratificadas. Este grupo es el equivalente a tres formaciones las cuales son: Formación Carhuaz, Santa y Chimú.

- **Formación Carhuaz:** Se observan lutitas litificadas de color gris a gris verdoso, con algunos interestratos de arenisca. La formación es de aproximadamente 600 m de espesor y es concordante con la formación santa.

- **Formación Santa:** Se puede observar caliza de color azul grisáceo, con estratos de 0.1 a 1 m de espesor, con nódulos horstenos grises a blancos. La formación tiene aproximadamente entre 100 y 150 m de espesor y es concordante con la formación Chimú.

- **Formación Chimú:** Presenta arenisca de color blanco a blanco rojizo en láminas de aproximadamente 1 a 3 m de grosor. La formación tiene un espesor de aproximadamente 100 m.

- **Formación Oyón:** Presenta Arenisca parda y basáltica de fino grano y de color gris oscuro, con inserciones de esquistos de barro y carbón.

- **Formación Chicama:** Presenta esquistos grises y areniscas.

- **Rocas Ígneas Intrusivas Plutónicas:** En el área de emplazamiento de la mina Antamina, presenta rocas ígneas intrusivas plutónicas como es el caso del Batolito de la Cordillera Blanca. (Departamento de geología , Compañia minera Antamina, 2016).

1.2.2. Geología local.

El depósito de Antamina (es decir el Intrusivo Cuarzo Monzonítico) se emplaza en las calizas de la Formación Celendín, al oeste de Antamina, la Formación Jumasha forma una rampa de escurrimiento sobre una lengua sobre escurrida de Jumasha (es decir sobre sí misma) y la Formación Celendín. Jumasha forma montañas prominentes pronunciadas de calizas bien estratificadas gris claras generando así el Skarn. Esta secuencia forma la faja de pliegues y sobre escurrimientos de la Zona Subandina.

- **Formación Celendín:** La mineralización del depósito de Antamina se encuentra emplazada dentro de la caliza es decir dentro de la formación de Celendín. Esta formación aflora al este de Antamina y es suave con escasa exposición. Forma el núcleo de un sinclinorio, el eje se inclina ligeramente al SE y corre a lo largo de la quebrada denominado Huincush. Presenta una roca sello de textura afanítica.

- **Formación Jumasha:** La Formación Jumasha forma montañas prominentes pronunciadas de caliza bien estratificadas gris claras, presenta metalotécto altamente carbonatada.

- **Las rocas ígneas Intrusivas:** presentes en el área de estudio es en sí, el Pórfido cuarzo monzonítico que se le denomina con las siglas IQM.

- **Como rocas metamórficas**: en el área de estudio se tiene la presencia de Skarn, Hornfels y Mármol producido por el contacto del intrusivo con las rocas calcáreas de la formación Celendín y Jumasha. (Departamento de geología , Compañia minera Antamina, 2016).

1.2.3. Geología estructural.

En los cuadrángulos geológicos elaborados por el INGEMMET, se han referido dentro del área de nuestro interés, allí se han definido estructuras geológicas tipo fallamientos, antiguos y modernos:

- **Fallamientos Antiguos:** Son un conjunto de trazas de fallas segmentadas que siguen un rumbo generalmente SENW, interceptadas por otras fallas menores de rumbo S-N, que atraviesan tanto a las rocas sedimentarias como a las rocas volcánicas, descritas. En algunos casos, estas estructuras constituyen un contacto fallado entre ambos tipos de rocas, lo que significa que en su momento (tiempo geológico) sirvieron como línea de efusión del magma, que fluyo del interior de la tierra. Por lo observado en el terreno, estas fallas antiguas no ejercen influencia alguna en la estabilidad de los terrenos que atraviesan, siendo observables solo por interpretación geológica.

- **Fallamientos Moderno:** En el mapeo geológico regional (cartografía del INGEMMET), se ha definido una traza de falla longitudinal (en realidad, es un conjunto de fallas que constituyen un "sistema") que domina la margen occidental de la Cordillera Blanca, en una longitud aproximada de 200 Km; con inicios, por el sur, a la altura de la Laguna Conococha (y probablemente más al sur) hasta el nevado Rosco (la parte más norte de la Cordillera Blanca). Esta "Falla de la Cordillera Blanca", con claras evidencias de ser un

fallamiento activo desde el punto de vista geológico. (Departamento de geología , Compañia minera Antamina, 2016).

1.2.4. Geología económica.

El depósito de Antamina es un skarn de cobre muy desarrollado conteniendo zinc, plata, molibdeno, plomo y bismuto formado por la intrusión del cuerpo de cuarzo monzonita en las calizas. Las características de una zona de skarn dependen de la naturaleza de la roca intruída y las emanaciones activadas por el cuerpo intrusivo. Se reconocen dos tipos de alteración: re cristalización o reacomodo de los constituyentes presentes en las rocas y adición de materiales. Los skarn más evidentes se desarrollan cuando la roca encajonante es una roca sedimentaria de composición carbonatada. La depositación de minerales en los depósitos de skarn típicamente muestra controles estructurales y estratigráficos. La litología del skarn generalmente es zoneada a partir del centro hacia los bordes.

El depósito de Antamina muestra características tanto de un skarn de cobre como de zinc. Los skarns de cobre normalmente se forman en asociación proximal con el intrusivo que es la fuente de los metales, mientras que los skarns de zinc generalmente se forman distales a la fuente de fluídos.

Los estudiosos del depósito de Antamina creen que los fluídos mineralizantes se originaron en una fuente distal más profunda y por lo tanto no estuvieron en equilibrio con el intrusivo presente en el valle actual. Esto resultó en una reacción de los fluídos tanto en los intrusivos como en las calizas formando las unidades endoskarn y exoskarn.

Se cree que los intrusivos previamente emplazados causaron un evento de metamorfismo termal formando los hornfels que rodean el depósito con wollastonita asociada y colapso en el volumen. Estas unidades luego actuaron como trampas para sucesivos eventos mineralizantes que forzaron a los fluídos a reaccionar con los intrusivos formando el endoskarn y limitaron la reacción hacia la roca circundante formando los exoskarns.

Se cree que los fluídos fluyeron a través de los contactos originales intrusivo-caliza y varios otros planos de debilidad estructural. La mineralización se pudo extender distancias significativas del depósito a través de las fallas de sobre-escurrimiento, planos de falla, contactos con diques y a través de las unidades estratigráficas favorables.

A medida que el sistema se desarrollaba se piensa que ocurrió una sobre presurización con un violento destape del sistema y la formación de las brechas hidrotermales.

El sistema de la mineralización colapsó como resultado de este evento. Después del evento de brecha apareció un último evento de mineralización como se evidencia por las venillas que cortan la brecha.

Hay una fase final de alteración retrógrada muy débil generalmente evidente sólo en las áreas de debilidad estructural que permitieron el flujo de fluídos.

Mineralización

Minerales de Mena:

Como minerales de mena para Antamina se tiene la calcopirita (S_2CuFe) esfalerita (SZn), galena (SPb), bornita (S_4Cu_5Fe), molibdenita (S_2Mo), fluorita (CaF_2), tennantita ($S_{13}As_4Cu_{12}$), bismutita (S_3Bi_2) y cosalita ($Pb_2Bi_2S_5$).

Minerales de Ganga:

Como minerales de ganga para Antamina se tiene pirita (S_2Fe), magnetita (Fe_3O_4), calcitas (CO_3Ca), cuarzos (SiO_2), pirrotina (SFe) y hematites (Fe_3O_2).

Controles de Mineralización

En el depósito de Antamina se tiene los siguientes controles de la mineralización:

Controles Estructurales:

- **El control estructural**: en el depósito de Antamina está determinado por fallas transversales al sistema andino (valle Antamina) cuya orientación es al NE y además por los Sobreescurrimiento y plegamientos con orientación andina presentes en la dirección NW.

- **Controles Estratigráficos / Litológicos:** El controlo litológico, es muy importante ya que el pórfido Intrusivo Cuarzo Monzonítico de Antamina es controlado por las calizas de la Formación Celendín, al Oeste de Antamina la Formación Jumasha forma una rampa de escurrimiento sobre una lengua sobreescurrida de Jumasha (es decir sobre sí misma) y la Formación Celendín; pero gran parte de la mineralización se encuentra dentro del Porfido Cuarzo Monzonitico.

Reservas de Mineral

Después de completar el Modelo de Recursos del 2000 se estimaron las Reservas Minables usando el programa Whittle 4X que aplica el Algoritmo de Lersch & Grossman. (Departamento de Planeamiento Mina CMA, 2017).

(0.7% Cut-off Con Dilución externa Strip 2.7: 1)

Tabla N° 1: Reservas Minables por Tipo de Mineral

Tipo de Mineral	Tons (Millones)	% de Mineral	%Cu	%Zinc	ppmAg	%Mo	ppmBi
Cu	239	42.8	1.3	0.13	8	0.05	7
Cu(Bi)	64	11.4	1.3	0.2	12	0.03	82
Cu-Zn	65	1.6	1.2	1.6	12	0.01	10
Cu-Zn(Bi)	132	23.6	1	2.6	16	0.01	185
Bornite	23	4.2	1.4	0.2	26	0.05	107
Bornite(Zn)	36	6.4	1.6	2.5	38	0.02	70
Total	559	100	1.2	1	14	0.03	70

Fuente: Departamento de Planeamiento Cia. Minera Antamina.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN

2.1. Marco Teórico.

2.1.1. Antecedentes de la investigación.

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 en la Cia. Minera Antamina.

En el trabajo presentado en el III SIPERVOR del Año 1995, autor Ingeniero Víctor Ames Lara, el Factor de potencia vs. Factor de energía de las mezclas explosivas comerciales usadas en la voladura de rocas, indica que 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.

Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso - GOLD MILL (caso minera Yanacocha) - tesis de grado PUCP – José Luis POMA FERNÁNDEZ. En Minera Yanacocha (primeros meses del año 2011), ocurrió un problema suscitado específicamente en el throghput(Rendimiento) de la Chancadora Primaria de la Planta Gold Mill (reducción de 800 a 720 TPH), por lo que José Luis POMA FERNÁNDEZ, realiza un evaluación sobre la reducción de TPH y plasma en su tesis de Grado en PUCP la importancia de la fragmentación de la roca en el proceso - GOLD MILL (caso minera Yanacocha), y para llegar a la solución del problema se analizó todos los procesos operativos de la mina que intervienen en la obtención del material fragmentado a la Chancadora Primaria de la Planta Gold Mill, a fin de determinar las posibles causas básicas del problema.

Revisando bibliografías existentes acerca de problemas similares en otras mineras, se llegó a establecer que una de las causas recurrentes es la fragmentación del material volado (específicamente por temas de

perforación y voladura) por tanto, se tuvo un especial cuidado en el análisis de este proceso.

En el análisis del proceso operativo se pudo determinar que la roca existe en el Tajo el Tapado (donde provenía el 80% de material para Gold Mill) era de una roca tipo sílice masiva de alta dureza (UCS mayor a 150 MPa) y que el P80 obtenido era de 14.6 cm. (lo cual para un proceso de lixiviación no representa mayor problema, sin embargo si afecta el throughput(Rendimiento) de la Chancadora Primaria).

Se trabajó en la mejora de la fragmentación del material volado aplicando teorías de voladura en incremento del Powder Factor, Selección de tiempos de detonación y Relación de Impedancia (Roca vs Explosivo).

La aplicación de estas teorías permitió la mejora del P80 a 6.5 cm., con lo cual el throughput(Rendimiento) tuvo una mejora a 841 TPH (sostenible), lográndose las mejoras en la Chancadora Primaria de la Planta Gold Mill

2.2. Fundamentación teórica.

2.2.1. Estudio y Análisis del Modelo Matemático que Utiliza la Potencia Relativa por Volumen (RBS) en el Diseño de las Mallas de Perforación y Voladura.

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

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

- **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. 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.

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

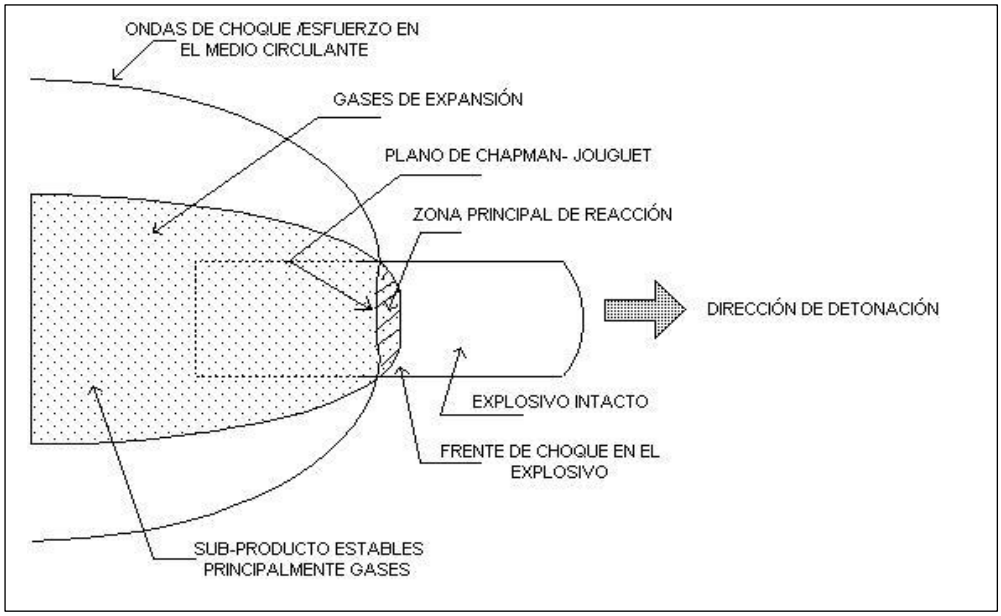


Figura N° 2: Mostrando el Proceso de Detonación de una Mezcla Explosiva

Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder.

Determinación de las Principales Ecuaciones para los Cálculos Termodinámicos:

- **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.

- **Ecuación de la Presión de Detonación:** Se considera una onda en el plano de detonación el cual ha sido establecido en un explosivo (Figura Nº 3).

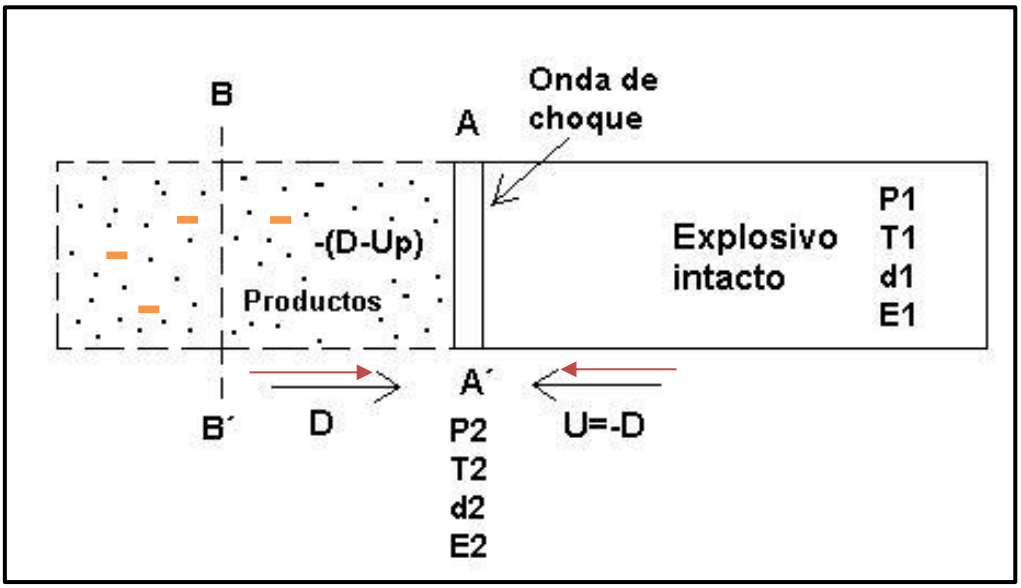


Figura N° 3: Esquema para la Deducción de Ecuaciones.
Fuente: Technology Explosives. Queen's University. Canadá.

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 P1, T1, δ1, E1 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 P2, T2, δ2, E2. Estos aún pueden cambiar más tarde de etapa (explosión). La velocidad aparente de la masa que va dejando el frente es - (D-Up) donde Up es la velocidad de la partícula (velocidad de masa) en la zona entre AA´, BB´, relativo a las coordenadas fijadas.

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

$P2 = \delta 1\ (D2/4)$ ……(E.1)

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

Así:

$Pe = P3 = P2/2$……(E.2)

- **Ecuación de Rankine-Hugoniot:** La conservación de la energía es expresada mediante la siguiente ecuación:

  $E2 - E1 = ½\ (P1+P2)\ (V2 - V1)$ ……(E.3)

- **Hipótesis de Chapman-Jouguet:** La hipótesis de Chapman-Jouguet que dice que la velocidad de detonación es igual a la velocidad del

sonido en el lugar más la velocidad de la partícula en el estado de detonación. Por lo tanto:

VODCJ = C + Up …… (E.4)

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

La expresión de la ecuación BKW es:

$$\frac{Pv}{RT} = 1 + Xe^{\beta X} \qquad \text{(E.5)}$$

Donde β es una constante y X: es el volumen molar y α y θ constantes. K es un volumen, definido como:

$$X = \frac{K}{v_g (T+\theta)^{\alpha}} \qquad K = k \sum x_i k_i \qquad \text{(E.6)}$$

Donde K es una constante, x¡ la fracción molar y k¡ el volumen de cada especie gaseosa. Las ecuaciones anteriores permiten el cálculo de los parámetros de la detonación en los cálculos termodinámicos.

- **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:

OB = O0 - 2CO2 - H2O = 0

También se puede expresar como:

$$OB = O0 - 2C0 - 1/2\ H0$$

Donde O0, C0 y H0 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:

$$Q = \Sigma\ Hf\ 0\ (productos) - \Sigma\ Hf\ 0\ (reactantes)$$

Dónde:

Σ Hf 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 N° 2.

Tabla N° 2: Pérdida de Energía en el AN/FO por Contenido Incorrecto de Petróleo

CONDICIÓN	%FO	PÉRDIDA DE ENERGÍA (%)	EFECTO EN LA VOLADURA
Bajo contenido de petróleo	5.0 4.0 3.0	5.2 12.1 20.0	Mucho oxígeno, gran pérdida de energía, genera gases nitrosos y humos anaranjados.
Balance de Oxígeno	**5.5**	**NINGUNA**	**Excelentes Resultados**
Alto contenido de petróleo	7.0 8.0 9.0	1.5 2.9 4.9	Oxígeno insuficiente, menor Perdida de energía, humos oscuros.

Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder.

- **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 N° 3.

Tabla N° 3: 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 del aire	15
TOTAL	100

Fuente: Explosives and Rock Blasting, Atlas Powder.

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

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

del desplazamiento de la masa rocosa. La energía de burbuja puede ser calculada con la siguiente ecuación:

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

Dónde:

Eb = Energía de burbuja

Ph = Presión hidrostática

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

ρw =Densidad del agua

- **Determinación de la Energía:** La energía explosiva puede ser medida o calculada para determinar su rendimiento termoquímico de la mezcla explosiva.

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

  - Ensayo del mortero balístico.
  - Ensayo de Trauzl en bloque de plomo.
  - Ensayo de brisance.
  - Concepto de potencia por peso.
  - 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 N° 4.

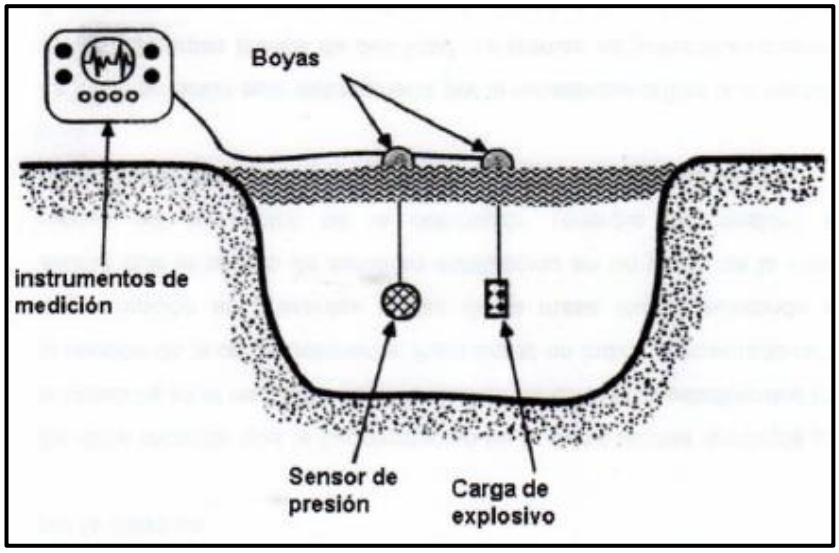


Figura N° 4: Esquema para la Medición de la Energía del Explosivo Bajo el Agua.
Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder.

- **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.

- **Potencia de los Explosivos:** 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.

- **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.

- **Potencia Absoluta por Volumen (ABS):** Esta es le medida de la cantidad de energía disponible (en calorías) en cada centímetro cúbico de explosivo. Esto se obtiene multiplicando la AWS por la densidad del explosivo.

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

- **Potencia Relativa por Peso (RWS):** Esta es la medida de la energía disponible de explosivo comparado a un peso igual de ANFO. Esta se calcula dividiendo la AWS del explosivo por la AWS del ANFO y multiplicado por 100.

$$RWS = \frac{AWS\,explosivo}{AWS\,ANFO} x100$$

- **Potencia Relativa por Volumen (RBS):** Esta es la energía disponible por volumen de explosivo comparado a igual volumen de ANFO, con una densidad de 0,85 g/cc. Esto se calcula dividiendo la ABS de un explosivo por la ABS del ANFO y multiplicado por 100.

$$RBS = \frac{ABS\,explosivo}{ABS\,ANFO} x100$$

- **Eficiencia de los Explosivos:** Este factor es un índice del grado de aprovechamiento práctico de la energía liberada por una mezcla explosiva, en relación a los parámetros termodinámicos calculados en forma teórica. La eficiencia total es una función de muchas variables, algunas de las cuales son internas e inherentes dentro del explosivo por la virtud de su formulación química y algunas de las cuales son

externas y parte del diseño de la voladura o condiciones encontradas en el lugar. Las variables externas que pueden afectar la eficiencia total de un explosivo incluyen, a la eficiencia de la iniciación, condiciones de agua, diámetro de carga, longitud de carga, grado de confinamiento, temperatura, efectos de la detonación de cargas explosivas adyacentes, entre otros.

Las mediciones de las eficiencias de los explosivos han sido desarrolladas para evaluar la potencia práctica del explosivo y sugieren sus propiedades en el campo. La eficiencia es posible determinar empíricamente mediante la técnica de la "energía de burbuja" en las voladuras bajo el agua, y se mide como el porcentaje de energía aprovechable. Mediciones efectuadas en los Estados Unidos permiten obtener los siguientes rangos de factores de eficiencia para las distintas familias de explosivos. Ver tabla N° 4.

Tabla N° 4: Eficiencia de los Explosivos

MEZCLA EXPLOSIVA	EFICIENCIA%
EXPLOSIVOS MOLECULARES	95-100
EMULSIONES	90-95
ANFOS PESADOS BOMBEABLES	75-90
ANFOS PESADOS COMUNES	65-85
ACUAGELES	55-70
AN/FO	60-80
SANFO	50-70

Fuente: Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder.

- **Factor de Energía:** La preocupación para poder cuantificar el rendimiento del explosivo utilizado hizo que se utilice el factor de carga. En el factor de carga se supone que el peso del explosivo es igual a la energía explosiva; esto es incorrecto. Un kg. de dinamita, AN/FO o emulsión, tienen rendimientos de energía diferentes. Podría ser válida cuando el taladro tiene un solo tipo de explosivo, ¿Cómo se podría expresar el factor de carga si en un taladro hubiera dos o más tipos de mezclas explosivas. Esta situación justifica el uso del FACTOR DE ENERGIA. Con los explosivos antiguos la energía explosiva aumentaba directamente con la densidad; pero, actualmente se puede encontrar dos tipos de explosivos con la misma densidad pero con diferentes rendimientos de energía; ejemplo, en las emulsiones. Entonces es necesario utilizar el factor de energía.

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

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

2.2.2. Características Geo mecánicas 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.

A) 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, entre otros). En la figura N°04, 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:

- Densidad.

- Resistencia a la compresión y tracción.
- Módulo de Young.
- Relación de Poisson.
- Módulo de Bulk o compresibilidad.
- Velocidad de la onda longitudinal.
- Porosidad.
- Fricción interna.

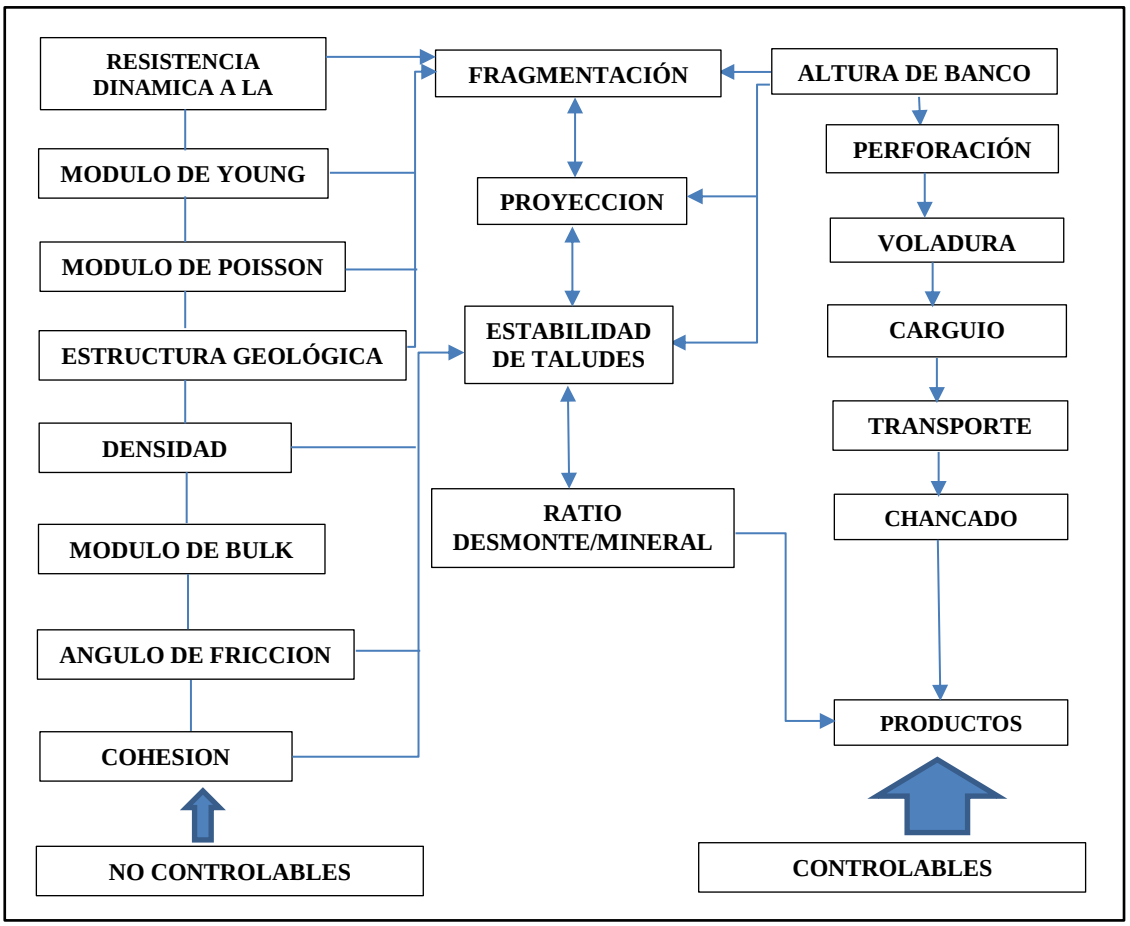


Figura N° 5: Interacción de las Propiedades de las Rocas y Variables Controlables con las Operaciones Mineras.

Fuente: López Jimeno. Manual de Perforación y Voladura.

B) 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 N°05, se puede apreciar los tipos de discontinuidades.

Tabla N° 5: Tipos de Discontinuidades

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

Fuente: Geomecánica y Voladura, Córdova Rojas David.

- **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°.

  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.

2.2.3. Variables de la Geometría del Disparo.

Las condiciones particulares de cada macizo rocoso determinarán los detalles del diseño de voladura. Las dimensiones principales son el burden y el espaciamiento. La relación de las diferentes dimensiones usadas en el diseño de la malla de perforación y voladura superficial es mostrada por una vista geométrica en la figura N° 6.

- **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.

- **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.

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

También se 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.

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).

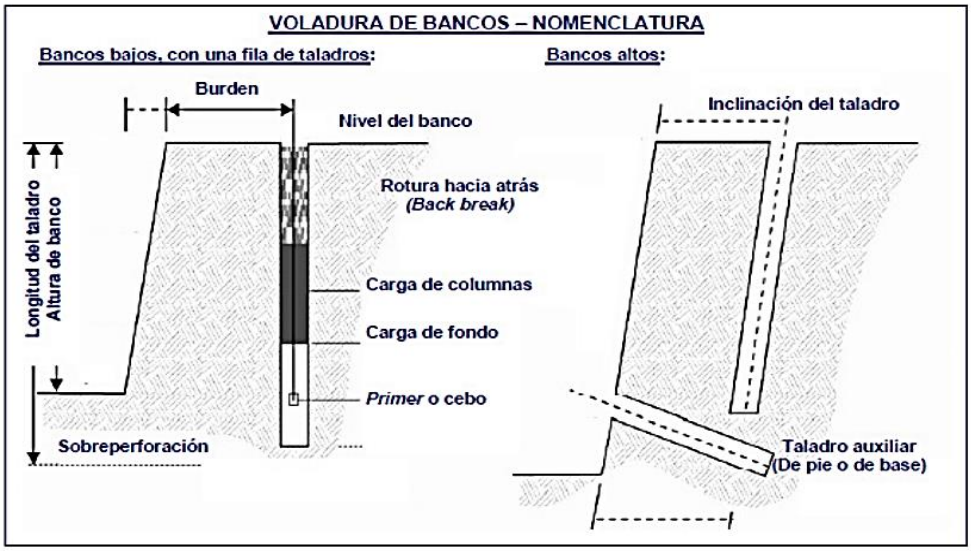


Figura N° 6: Variables de la Geometría del Disparo en Minería Superficial

Fuente: Geomecánica y Voladura, Córdova Rojas David.

Según **Ames Lara, Víctor Alejandro** en su Tesis Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas (2008), manifiesta que la tendencia a utilizar explosivos de gran energía hace que también sea una necesidad la aplicación de nuevas técnicas para el diseño de mallas de perforación y voladura, por lo que en este trabajo se da a conocer la utilización de la potencia relativa por volumen (RBS). Esta teoría tiene el sustento en que la energía de un explosivo comparado con la de otro explosivo es muy diferente, en el mismo volumen de un taladro, por lo que al cambiar en una mina en operación, un explosivo en uso por otro de mayor energía se tiene que tener en cuenta la diferencia en el contenido de energía de cada explosivo. Este criterio también implica que el uso del factor de energía debe ser una herramienta cotidiana en vez del uso del factor de carga o factor de potencia, el cual a la fecha es utilizada en todas las unidades mineras de nuestro país a pesar que el factor de energía tiene muchos años de vigencia en los países desarrollados porque permite cuantificar correctamente el rendimiento de la energía del explosivo. La potencia relativa por volumen (RBS) permite modificar rápidamente las dimensiones originales del burden y espaciamiento y de esta manera permite ahorrar tiempo y costo en los ensayos de prueba y error para la implementación de las nuevas dimensiones en las operaciones de perforación y voladura. En el presente trabajo se realiza un cambio de ANFO a Anfo pesado 50/50 y se determinó que se puede reducir los costos de perforación y voladura con un explosivo más energético, así como también se mejoró la fragmentación obtenida usando ANFO.

Según **Rene Wilfredo Ojeda Mestas** INGENIERO DE MINAS (2008), manifiesta que el diseño de malla de perforación y voladura subterránea es aplicado por un modelo matemático de áreas de influencia usando una nueva teoría para calcular el burden. Por consiguiente para el diseño se utilizó los parámetros de perforación (diámetro del taladro, diámetro de alivio, longitud de taladro, longitud de carga, taco, desviación de perforación). En parámetro de explosivo (densidad, velocidad, presión de detonación, y dimensiones del explosivo) y en parámetro de roca (resistencia de la roca o minera y RQD). que se usaron para calcular el burden y espaciamiento en el diseño de mallas, estos datos son obtenidos in situ de la mina, para la perforación con equipo Jumbo y equipo Jackleg o Stoper. Como también se pronostica el porcentaje pasante, por medio de un análisis de fragmentación de Kuz-Ram, para determinar si el diseño es el óptimo.

Según **Oviedo Nina, Luis Franco** (2017), el presente trabajo de investigación trata de la aplicación del software de diseño y modelamiento Vulcan 8.0 con el uso de las herramientas drill and blast, así con una librería de explosivos comerciales como anfo, emulsión y anfo pesado, accesorios de voladura como los booster y retardadores, herramientas de diseño de mallas de perforación y voladura de taladros de producción, taladros de línea buffer, taladros de pre-corte y el análisis de la carga del taladro, cantidad de retardadores, iniciadores, noneles y taco, con el siguiente diseño de parámetros de voladura burden y espaciamiento. Se hizo un análisis de resultados sobre el tamaño de partícula se analizaron todos los procesos operativos de la mina que

intervienen en la obtención del material fragmentado revisando bibliografía existente de la empresa, acerca de problemas similares en otras mineras, se pudo observar que una de las causas recurrentes es la fragmentación del material volado (específicamente por temas de perforación y voladura), así que se tuvo un especial cuidado en el análisis de este proceso. La metodología para el análisis del proceso operativo se pudo determinar que la roca existe en el Tajo (donde provenía el 80% de material para el pàd) era de una roca tipo sílice masiva de alta dureza (UCS mayor a 150 Mpa) y que el P80 obtenido era de 14.6 cm. Se trabajó en la mejora de la fragmentación del material volado aplicando teorías de voladura en incremento del Powder Factor, Selección de tiempos de detonación y Relación de Impedancia (velocidad de onda de la roca y su densidad vs velocidad de detonación y densidad del explosivo). La aplicación de estas teorías permitió la mejora del P80 a 6.5 cm, con lo que se demuestra una optimización en la fragmentación del material volado, lo cual nos va a reducir los costos de carguío y acarreo y conminación (procesamiento metalúrgico), con un ligero incremento de los costos de perforación y voladura. Finalmente se hizo un análisis de optimización de la fragmentación a través de cuadros comparativos en relación a resultados anteriores y resultados propuestos.

Según **Churata Mamani Josué** (2013), la voladura al ser una de las principales operaciones en la actividad utiliza diferentes diseños, estos basados en diversos modelos matemáticos planteados, pero aun hoy en día existen fallas en la voladura que deben de ser superadas. En la empresa minera, en la zona de Chilca Bajo por mes se registra un

promedio de 25 tiros soplados, 5 tiros cortados, 3 tiros anillados, 30 casos de taqueo. En vista de este problema que genera pérdidas económicas es que se propone implementar un nuevo diseño de malla tomando en cuenta más parámetros para mejorar la voladura y lograr mejores resultados. A través de una investigación minuciosa podremos conocer a fondo las buenas y malas prácticas en la empresa minera y a partir de ello mejorar la situación actual. Una de las operaciones en minería es la voladura que es la forma en que se apertura labores de acceso hacia un yacimiento económico para posteriormente proceder a explotarlas. En este trabajo se busca la mejora continua en la perforación y voladura. En el diseño de la perforación y voladura, las características físicas, químicas y mecánicas de las rocas, así como la estratigrafía y los rasgos estructurales del macizo rocoso, juegan un papel importante pues permiten conocer la energía necesaria para romper dicho macizo. Actualmente, solo hay teorías o métodos con modelos matemáticos que enseñan a diseñar mallas de perforación en voladura subterránea y que tienen limitaciones para su aplicación, tal como: • El método de Roger Holmberg; Para diseño de malla en túneles. • Predicción granulométrica Kuz Ram. • La teoría de la comminución; para diseño de malla en rampas. • Métodos empíricos, que calculan número de taladros.

La voladura al ser una de las principales operaciones en la actividad utiliza diferentes diseños, estos basados en diversos modelos matemáticos planteados, pero aun hoy en día existen fallas en la voladura que deben de ser superadas. En la empresa minera, en la zona de Chilca Bajo por mes se registra un promedio de 25 tiros soplados, 5 tiros

cortados, 3 tiros anillados, 30 casos de taqueo. En vista de este problema que genera pérdidas económicas es que se propone implementar un nuevo diseño de malla tomando en cuenta más parámetros para mejorar la voladura y lograr mejores resultados. A través de una investigación minuciosa podremos conocer a fondo las buenas y malas prácticas en la empresa minera y a partir de ello mejorar la situación actual. Una de las operaciones en minería es la voladura que es la forma en que se apertura labores de acceso hacia un yacimiento económico para posteriormente proceder a explotarlas. En este trabajo se busca la mejora continua en la perforación y voladura. En el diseño de la perforación y voladura, las características físicas, químicas y mecánicas de las rocas, así como la estratigrafía y los rasgos estructurales del macizo rocoso, juegan un papel importante pues permiten conocer la energía necesaria para romper dicho macizo. Actualmente, solo hay teorías o métodos con modelos matemáticos que enseñan a diseñar mallas de perforación en voladura subterránea y que tienen limitaciones para su aplicación, tal como: • El método de Roger Holmberg; Para diseño de malla en túneles. • Predicción granulométrica Kuz Ram. • La teoría de la comminución; para diseño de malla en rampas. • Métodos empíricos, que calculan número de taladros.

2.3. Definición de Términos.

- **Alteración.-** Proceso de modificación de los minerales y rocas por acción de los agentes de erosión: agua, viento, hielo, sol, entre otros,. sinónimo: intemperismo, meteorización.

- **Bloque. -** Fragmento de roca de dimensiones superiores a 20 cm. de diámetro.

- **Cizallamiento.-** Es el proceso de fracturamiento de las rocas debido a los esfuerzos tectónicos.

- **Compactación.-** disminución del espesor o potencia de la secuencia estratigráfica por el peso y la presión de las rocas suprayacentes.

- **Estructura.-** Esta referido a la disposición, arreglo y cohesión de los materiales constituyentes de un determinado cuerpo rocoso.

- **Granulometría.-** Tecnología que se encarga de dictar normas correspondientes para determinar las dimensiones y las formas de los fragmentos de los materiales detríticos.

- **Macizo.-** Termino usado en geotecnia para referirse a áreas rocosas cuyo núcleo está constituido de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

- **Muestra.-** Pedazo de roca o mineral, de un tamaño y peso adecuado que pueda servir de elemento del cual se pueda obtener toda la información necesaria para realizar un estudio propuesto.

- **Plasticidad.-** Propiedad de las rocas de deformarse al recibir un esfuerzo

conservando la deformación al cesar el esfuerzo.

- **Porosidad.-** Es la relación existente entre el volumen de los intersticios porosos y el volumen total de la roca o suelo. La porosidad se expresa siempre en porcentaje.

- **Rumbo.-** Dirección que sigue la línea de intersección formada entre el plano horizontal y el plano del estrato o estructura geológica, con respecto al norte o al sur.

- **Talud.-** Superficie inclinada del terreno que se extiende de la base a la cumbre del mismo.

- **Textura. -** tamaño, forma y disposición de los minerales componentes de las rocas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. El Problema.

La tendencia al cambio de explosivos de mayor energía en la minería nacional es impostergable y más aun con la nueva tecnología en la aplicación de explosivos con el objetivo de obtener una buena fragmentación, 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 en minería superficial y evitar las pruebas de ensayo y error que generan mayor consuma de tiempo y gastos innecesarios.

3.1.1. Identificación y selección del problema.

Una de las causas que se tengan problemas después de la voladura es la mala fragmentación del material volado (específicamente por temas de perforación y voladura), y esto se produce por el mal diseño de la malla y elección del explosivo, por tanto se tiene que tener un especial cuidado en el

análisis de este proceso. La potencia relativa por volumen (RBS) permite modificar rápidamente las dimensiones originales del burden y espaciamiento, de esta manera permite ahorrar tiempo y costo en las operaciones de perforación y voladura y de esta manera mejorar el P80.

3.1.2. Formulación del Problema.

Formulación del problema General

¿De qué manera incidirá la energía producida por las mezclas explosivas en el diseño de mallas de perforación y voladura en Compañía Minera Antamina?

Problemas secundarios:

1. ¿Cómo afecta la energía producida en el diseño de mallas de perforación?
2. ¿Cómo afecta la energía producida en la voladura?

3.1.3. Objetivos de la investigación.

3.1.3.1.Objetivo General.

Determinar la energía producida por las mezclas explosivas en el diseño de mallas de perforación y voladura en Compañía Minera Antamina – Año 2017.

3.1.3.2.Objetivos Específicos.

1. Determinar los procedimientos aplicados en el diseño de mallas de perforación en la Compañía Minera Antamina S.A.
2. Determinar los procedimientos aplicados en el diseño de la voladura en la Compañía Minera Antamina S.A.

3.1.4. Justificación

La aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas en el diseño de mallas de perforación y voladura beneficiará a la Compañía Minera Antamina S.A., para garantizar la buena fragmentación después de la detonación en la operación minera.

3.1.5. Importancia.

La importancia del presente trabajo de investigación a la luz de los resultados es garantizar la buena voladura a través de la fragmentación en la operación minera y dar la mejor seguridad al recurso humano.

3.1.6. Limitaciones.

Para la realización de la presente investigación se presentaron diversas dificultades siendo uno de los principales la bibliografía técnica relacionada a la Compañía Minera Antamina S.A., relacionado a las fases u operaciones mineras unitarias como es la perforación y voladura de rocas.

3.1.7. Alcances

El estudio comprende básicamente la aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas en el diseño de mallas de perforación y voladura, para garantizar la buena fragmentación después de la detonación en la operación minera.

La investigación pretende plasmar un aporte en relación a la aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas en la Compañía Minera Antamina S.A, para los lectores y la Empresa.

3.2. Hipótesis.

Hipótesis General:

Con la aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas en el diseño de mallas de perforación y voladura en Compañía Minera Antamina,, se logra determinar la energía óptima para el caso.

Hipótesis específicas:

1. Los procedimientos aplicados en el diseño de mallas de perforación son los adecuados en la Compañía Minera Antamina S.A.

2. Los procedimientos aplicados en el diseño de la voladura son los adecuados en la Compañía Minera Antamina S.A.

3.3. Variables.

Variable Independiente (x):

La energía producida por las mezclas explosivas.

Variable dependiente (y):

Diseño de mallas de perforación y voladura.

3.4. Diseño de la investigación

3.4.1. Tipo de investigación

La investigación que se realizará será tipo descriptivo.

3.4.2. Nivel de la investigación

El nivel será de investigación es correlacional.

3.4.3. Diseño de investigación

La investigación es experimental transversal.

3.4.4. Método

Se empleará el método deductivo donde el proceso de los conocimientos se inicia por la observación de fenómenos de carácter general con el propósito de llegar a conclusiones particulares contenidos explícitamente en la situación general.

3.4.5. Población y muestra

Población

Datos acopiados de los procedimientos aplicados en el diseño de las mallas de perforación y voladura en la Compañía Minera Antamina S.A:

Muestra

Valores obtenidos aleatoriamente de los parámetros cuantificados de la aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas

3.4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica que se utilizó para la recolección de información son las siguientes:

Tabla N° 6: Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas de investigación	**Instrumentos**	**Informantes o fuentes**	**Ventajas**	**desventajas**
Análisis documental	Fichas bibliográficas	Libros, internet, tesis, entre otros.	Muy objetiva Puede constituir evidencias	Aplicación limitada a fuentes documentales
Observación del campo	Protocolo o guías de observación de campo	Toma de datos por parte del investigador	Contacto directo Con la realidad	Aplicación limitada a aspectos fijos o repetitivos

Fuente: Adaptación propia.

3.4.7. Instrumentos de recolección de datos

- Software de Microsoft Office, para la elaboración de la tesis y el procesamiento de los datos (Excel).

3.4.8. Metodología de recolección de datos

En la elaboración del presente trabajo de tesis se ha seguido dos etapas consistentes en:

- **Trabajo de campo:** Consistente en recoger la información y registro de la línea de base para ver los parámetros iniciales.
- **Trabajo de gabinete:** Consistente en la evaluación de datos, y la determinación los parámetros necesarios para realizar el estudio de investigación.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Descripción de la realidad y procesamiento de datos

En la actualidad hay el valle de Antamina revela producción minera artesanal por siglos. El primer propietario y operador registrado fue Leopoldo Pflucker en 1850. El construyó una pequeña fundición de cobre y plomo en Juproc (Pueblo cercano a Antamina) usando carbón de los afloramientos cercanos. El naturalista italiano Antonio Raymondi visitó el área en noviembre de 1860 y encontró a la fundición produciendo lingotes de 35 kg con 20 a 25 Oz Ag.

La compañía Cerro de Pasco Corporation fue la primera en realizar trabajo exploratorio de 1952 a 1971. Los trabajos se confinaron a las paredes

pronunciadas en el lado este del depósito donde la topografía permitía el fácil acceso subterráneo por medio de túneles. En octubre de 1970 todas las propiedades mineras se transfirieron al Gobierno del Perú.

Luego de la expropiación los derechos mineros de 2,200 hectáreas se pasaron a Minero Perú, la agencia administrativa de minería del Perú, la cual en 1974 formó la Empresa Minera Especial (EME) en sociedad con la agencia minera del Gobierno de Rumania llamada Geomin.

La EME desarrolló un cuidadoso y metódico programa de trabajo en la propiedad culminando en un completo estudio de factibilidad. La EME completó una serie de estudios de factibilidad completos de Antamina basados en las reservas probadas y probables determinadas por el muestreo de taladros y subterráneo. En 1992, Minero Perú usó los estudios mencionados como base para intentar poner en el mercado a Antamina y produjo un Compendio de Inversión que no fue totalmente circulado y los esfuerzos de venta fracasaron. En 1993 la propiedad de Antamina fue transferida a Centromin y fue parte de su paquete de venta.

En 1996 Rio Algom Limited e Inmet Corporation ambos de Canadá ofertaron exitosamente por la propiedad e inmediatamente formaron la Compañía Minera Antamina S.A. (CMA) en una sociedad de riesgo compartido de 50:50. En 1998 Inmet vendió sus intereses en Antamina a otras dos compañías canadienses y CMA fue reestructurada con una propiedad de 37.5% de Rio Algom, 37.5% de Noranda y 25% de Teck Corporation. En 1999, la propiedad fue modificada aún más ya que los 3 socios vendieron el 10% a

Mitsubishi Corporation, resultando en una distribución de 33.75% Rio Algom, 33.75% Noranda, 22.50% Teck y 10% Mitsubishi. En el 2000, Billiton PLC de Gran Bretaña compró el 100 de Rio Algom Limited y se convirtió en uno de los socios. Billiton y BHP así como Teck y Cominco se fusionaron con lo que comparten actualmente parte de la propiedad de CMA.

4.2. Análisis e Interpretación de la Información

4.2.1. Parámetros de Diseño Básico.

Los parámetros básicos que se toman en cuenta en el diseño de un tajo abierto se resumen en la Tabla N° 7.

Tabla N° 7: Parámetros Básicos del Tajo

Datos	Parámetros asumidos	Proporcionados por
✓ Producción diaria	36,500 TM	Superintendencia General
✓ Topografía base	_____	Topografía
✓ Modelo de bloques	_____	Geología mina
✓ Diseño de pit final	_____	Planeamiento Mina
✓ Dilución	_____	_____
✓ Talud final	Variable	Planeamiento mina
✓ Recuperación proyectada	58 %	Planta

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2. Principales

De acuerdo a las condiciones geológico mineras del Tajo se han determinado los parámetros geométricos de diseño que se resume en la Tabla N° 8.

Tabla N° 8: Parámetros de Diseño del Tajo

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

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3. Perforación y Voladura

La perforación se realiza con una perforadora Ingersoll Rand DM- 45 de 5 ¾” de diámetro, los principales parámetros de perforación y voladura se resume en la Tabla N° 9.

Tabla N° 9: Parámetros de Perforación y Voladura antes del Uso de la RBS

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

Fuente: Elaboración Propia.

Se considera la densidad: Desmonte 2,4 TM/m^3; mineral 2,55 TM/m^3 y mineral-desmonte 2,35 TM/m^3.

4.2.4. Diseño de la Malla de Perforación y Voladura con el Criterio RBS

a) Condiciones cuando se usaba ANFO

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

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

2. El taladro cargado tenía siguientes características:

   - Roca : Mineral
   - Densidad de roca : 2.55 TM/m3
   - Profundidad de taladro : 8,50 m
   - Altura de banco : 8,00 m
   - Malla : Burden:4.80m
     Espaciamiento: 5,50 m
   - Taco : 2.00 m
   - Diámetro de perforación 5 ¾" (146.00 mm)

3. Explosivos y accesorios:

   - Fanel Dual 1000 / 25 ms
   - Booster HDP – 1 : (Ubicado a 0,5 m del fondo)
   - ANFO
   - Densidad Nitrato :0.68 g / cm3
   - Densidad como ANFO 0.84 g / cm3
   - Longitud de carga :6.50 m

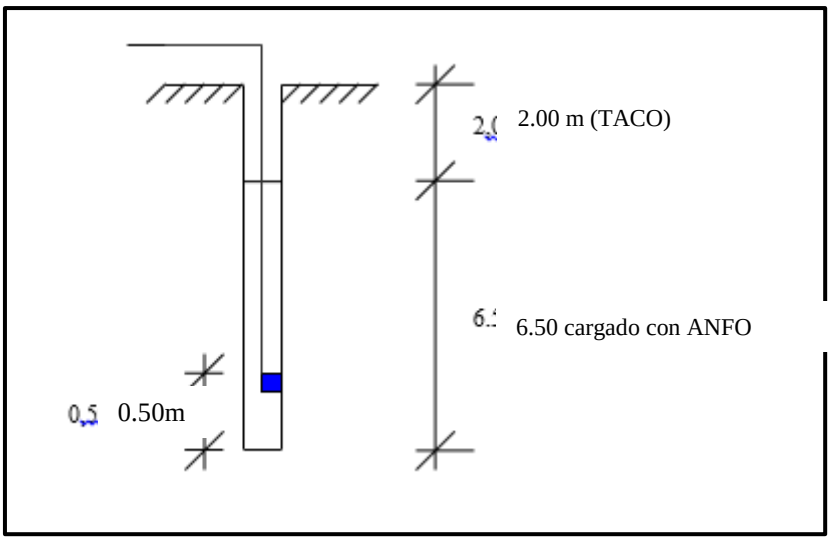


Figura N° 7: Esquema del Carguío del Taladro con ANFO

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.5. Cálculo de las Nuevas Dimensiones

Para el diseño de las nuevas dimensiones geométricas se tomará en cuenta el ANFO pesado 50/50 (emulsión/ANFO. Las características de algunas combinaciones son mostradas en la Tabla N° 10.

Tabla N° 10: Energía de las Mezclas a Granel del ANFO Pesado

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

Fuente: FAMESA.

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

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

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

DESMONTE

BURDEN

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

ESPACIAMIENTO

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

MINERAL

BURDEN

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

ESPACIAMIENTO

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

MINERAL – DESMONTE

BURDEN

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

ESPACIAMIENTO

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

RESUMEN

Siguiendo el mismo procedimiento se puede realizar los cálculos correspondientes con los explosivos de la tabla 10, resultando la Tabla N°11, la cual es un resumen de dichos cálculos.

Tabla N° 11: Resumen de las Nuevas Dimensiones de Burden (B) y Espaciamiento (E)

Potencia relativa por volumen (RBS)	**Tipo de material**					
	Desmonte		**Mineral**		**Mineral desmonte**	
	B (m)	**E (m)**	**B (m)**	**E (m)**	**B (m)**	**E (m)**
1,00	5,50	6,30	4.80	5,50	4,50	5,20
1,07	5,63	6,44	4,91	5,63	4,60	5,32
1,17	5,80	6,64	5,06	5,80	4,74	5,48
1,30	6,00	6,88	5,24	6,00	4,91	5,68
1,34	6,06	6,94	5,29	6,06	4,96	5.73

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla anterior se observa que se puede determinar las nuevas dimensiones de burden y espaciamiento para los diferentes tipos de materiales, tomando en cuenta también los diferentes tipos de mezclas explosivas de los cuales se considera su potencia relativa por volumen (RBS), y esto tiene como

ventaja evitar las pruebas de ensayo y error, porque los valores calculados nos dan la idea de las nuevas dimensiones de la malla por el cambio de los explosivos con mayor cantidad de energía.

El cambio de ANFO pesado en vez del ANFO no solo involucra al nuevo diseño de la malla sino también el conocimiento del procedimiento correcto de su utilización.

4.2.6. Características de las Voladuras de Prueba Utilizando Anfo Pesado 50/50 (Emulsión Heavy Anfo y Anfo)

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

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

- Tipo de roca : Mineral (Densidad 2,55 TM/m3).
- Profundidad de los taladros : 8,50 m
- Diámetro de los taladros : 5 ¾ “
- Burden : 5,30 m
- Espaciamiento : 6,00 m
- Taco : 2,00 m
- Accesorios y explosivos
- Anfo pesado : 50 / 50
- RBS : 1,34
- Fanel Dual : 1000 / 25 ms x 15 m

NONEL DUAL 1000/25 MS

Accesorio de Voladura:

Sensible al Golpe (Fulminante)

Retardo Superficial 25 MS

Retardo de Fondo 1000 MS

Booster HDP – 1 : (1 libra)

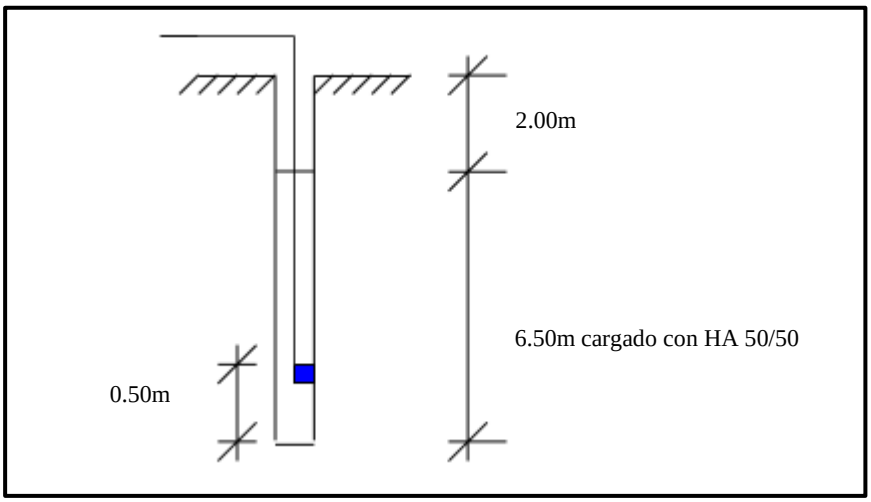


Figura N° 8: Esquema del Carguío del Taladro con ANFO pesado 50/50

Fuente: Elaboración Propia.

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

4.2.7. Cálculo del Factor de Energía

Se calcula el factor de energía de los resultados mostrados en la Tabla 4.5. A manera de un ejemplo se puede trabajar con el ANFO pesado 25/75, tiene una

energía de 3,57 MJ/kg.; el diámetro de taladro es 5 ¾” igual a 14,605 cm., altura de banco 8 m y longitud de carga de 6,5 m.

Desmonte:

Tonelaje = volumen x densidad

TM=5,63 m x 6,44 m x 8,00 m x 2,4TM/m3 = 696,14 TM.

Energía del ANFO pesado en el taladro:

Energía total = π x diâmetro2 x longitud de carga x densidad x energía/40 Energía total = π(14,605 cm)2 x 6,50 m x 0,95 g/cc x 3,57 MJ/kg/40 Energía total = 369,31 MJ

Factor de Energía

F.E. = 369,31 MJ / 696,14 TM = 0,530 MJ/TM

Con los mismos procedimientos podemos calcular el factor de energía con los demás tipos de ANFO pesado de la tabla 10 y presentar la Tabla N°12.

Tabla N° 12: Resumen de los factores de energía.

RBS	TIPO DE MATERIAL								
	Desmonte			Mineral			Mineral desmonte		
	B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM	B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM	B (m)	E (m)	F.E. MJ/TM
1,00	5,50	6,30	0,516	4.80	5,50	0,634	4,50	5,20	0,801
1,07	5,63	6,44	0,530	4,91	5,63	0,654	4,60	5,32	0,822
1,17	5,80	6,64	0,544	5,06	5,80	0,713	4,74	5,48	0,897
1,30	6,00	6,88	0,562	5,24	6,00	0,745	4,91	5,68	0,934
1,34	6,06	6,94	0,572	5,29	6,06	0,706	4,96	5.73	0,886

Fuente: Elaboración propia

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

Calculo Computarizado de las Mallas de Perforación y Voladura

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

Algoritmo y Diagrama de Flujo del Programa

Para el desarrollo del programa se tiene en cuenta el algoritmo que es similar a la figura N° 9.

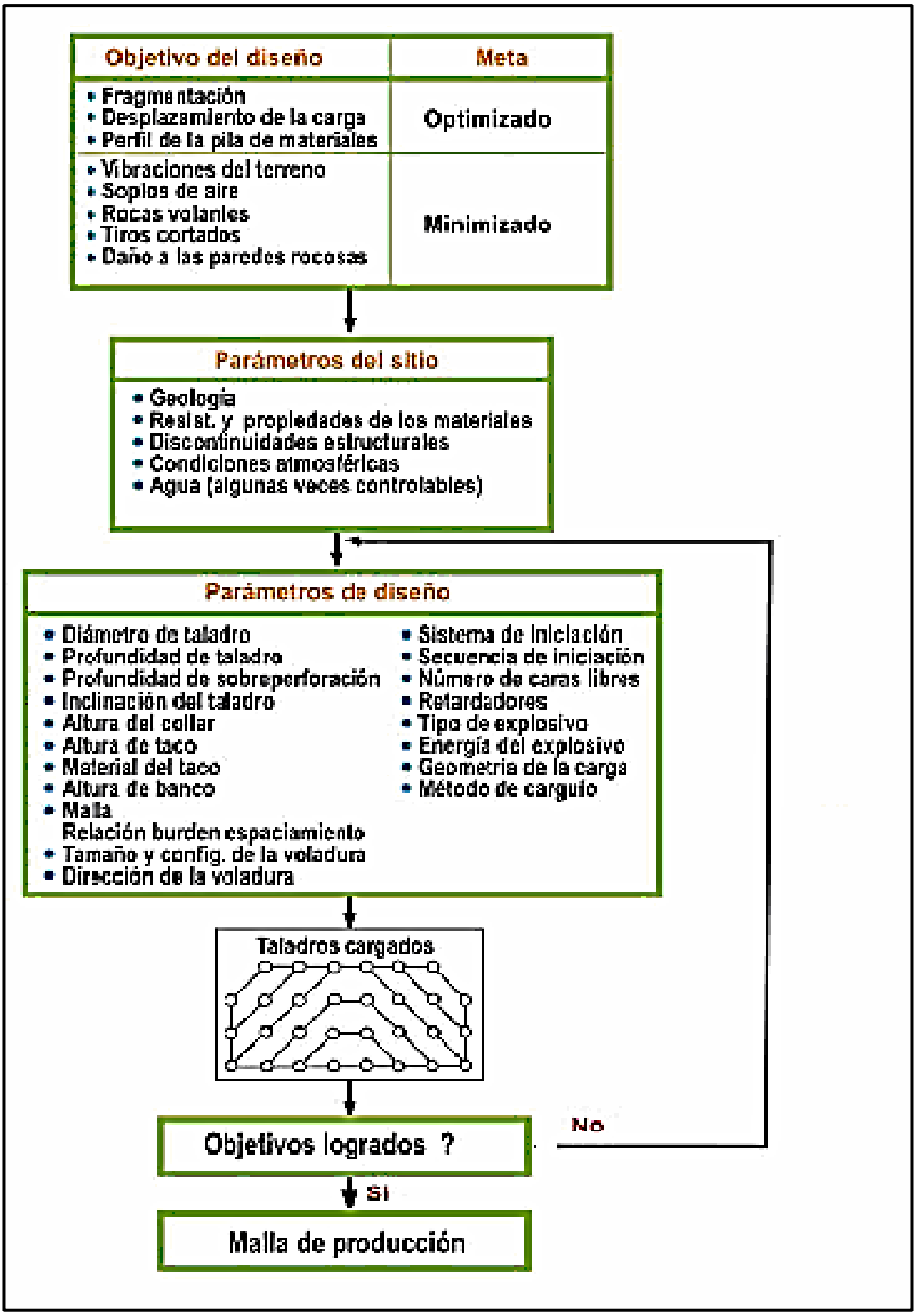


Figura N° 9: Diagrama de Flujo para el Diseño de una Voladura.

Fuente: Elaboración propia

Validación del Programa

El programa ha sido desarrollado en Visual Fox Pro versión 6,0.

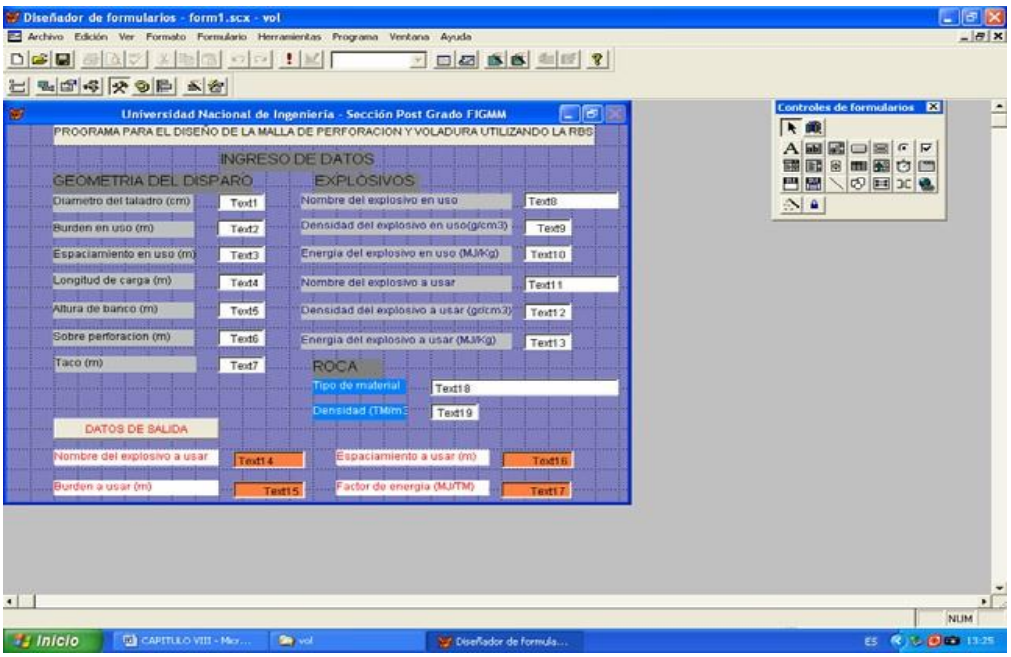


Figura N° 10: La presentación del programa.

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 10. Pantalla interactiva del programa, muestra el ingreso de datos y los parámetros de salida.

El software se encuentra en la carpeta VOL. La validación se ha realizado con diversas corridas de acuerdo a los datos de ingreso requeridos y se han obtenido los resultados similares a los realizados manualmente, claro mayor precisión y menor tiempo de consumo. Se adjunta en la figura N°10 una corrida que valida las nuevas dimensiones calculadas en el trabajo de investigación.

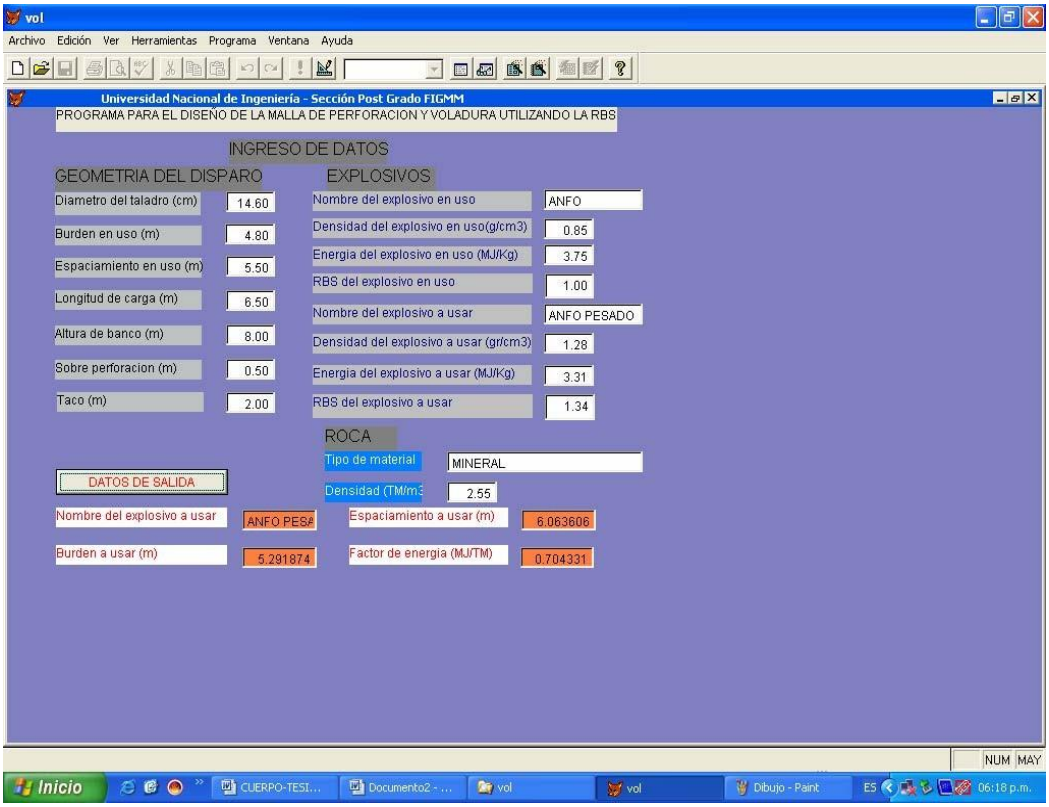


Figura N° 11: Pantalla mostrando una corrida del programa.

Fuente: Elaboración Propia

Figura N° 11: Pantalla mostrando una corrida del programa con las nuevas dimensiones del trabajo de investigación, cambiando de ANFO a ANFO PESADO (HEAVY ANFO) en mineral.

4.2.8. Análisis y Discusión de los Resultados

Discusión Técnica

Se implementó una permanentemente 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.

4.2.9. Análisis de Fragmentación

Después de las pruebas de voladura se realizó la toma de fotografías, en el cual se evidencia la reducción significativa de la granulometría, en el cual se realizó un análisis del grado de fragmentación que produjo cada una de las pruebas que se puede resumir y concluir en los siguientes:

Análisis de la fragmentación en la PRIMERA PRUEBA

- Tamaño de los fragmentos:
    - Tamaño mínimo 0,008 m
    - Tamaño máximo 0,276 m
- Distribución de los fragmentos:
    - El 100 % < a 0.30 m
    - El 69 % < a 0.15 m
    - El 57,3 % < a 0.125 m

Análisis de la fragmentación en la SEGUNDA PRUEBA

- Tamaño de los fragmentos:
    - Tamaño mínimo 0,006 m
    - Tamaño máximo 0,215 m
- Distribución de los fragmentos:
    - El 100 % < a 0.30 m
    - El 90,7 % < a 0.15 m

- El 83,0 % < a 0.125 m

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

4.2.10. Cálculo del Factor de Energía.

Tomando las consideraciones de 4.2.6., 4.2.7. y la Tabla Nº10, se puede determinar el factor de energía de la nueva malla, de la manera siguiente:

Mineral:

- TM=5,30 m x 6,00 m x 8,00 m x 2,55TM/m3 = 648,72 TM
- Energía del ANFO pesado en el taladro:
- Energía total = π (14,605 cm)2 x 6,50 m x 1,28 g/cc x 3,31 MJ/kg/40
- Energía total = 461,37 MJ
- Factor de Energía
- F.E. = 461,37 MJ / 648,72 TM = 0,711 MJ/TM

4.2.11. Discusión Económica

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

ANFO:

- Costo de perforación y voladura US$/ton 0,234
- Anfo pesado 50/50
- Costo de perforación y voladura US$/ton 0,220

Observándose una reducción en los costos de perforación y voladura con el uso del ANFO pesado 50/50.

4.2.12. Discusión Ecológica

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

El cambio del ANFO PESADO al ANFO normal dio buenos resultados cuya primera prueba llega a 69% de los fragmentos y tenían dimensiones menores a 0,15 m; en la segunda prueba el 90,7% de los fragmentos eran

menores que dicha tamaño, ocurriendo en ello la lixiviación del mineral fragmentado.

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

4.3. Discusión de resultados

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

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

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

ÁREA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

CÁLCULO DE COSTOS DE PERFORACION Y VOLADURA CON ANFO PESADO:

FECHA: ENERO 2017

TAJO: FASE7 NORTE

PROYECTO: SA05-017

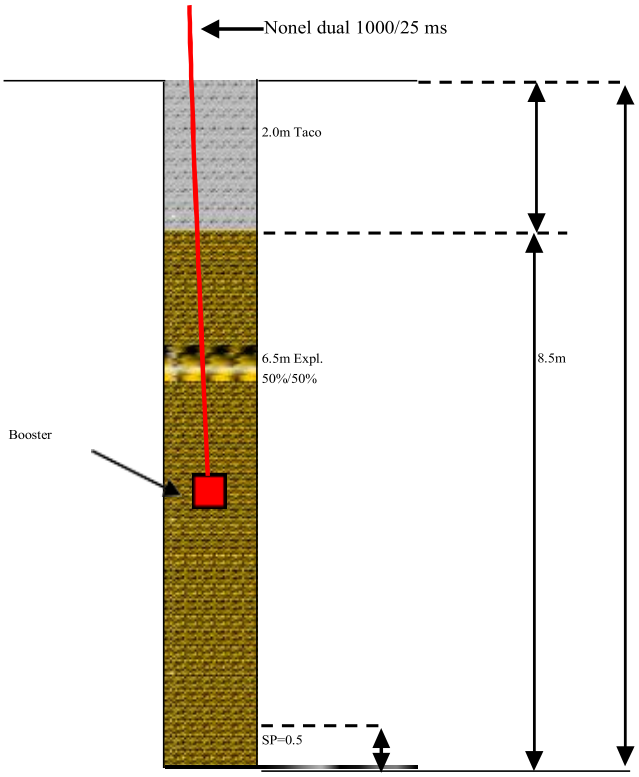
BANCO: 340

TIPO DE ROCA: MEDIA

PERFORADORA: DM45E

Tabla N° 13: Tabla de Perforación

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



Radio de Perforación	76.32	Tm/m
Costo Perforación/tal	77	US$/tal

Fuente: Elaboración Propia

Costo de perforación/toneladas = 0.118 US$/Ton

Tabla N°14: Diseño de carga

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

Fuente: Elaboración Propia

Factor de Potencia = 0.22 Kg/Ton

Tabla Nº15: Costo del explosivo/tonelada

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

Fuente: Elaboración Propia

Costo explosivo = 0.093 US$/Ton

Tabla N°16: Accesorios.

ACCESORIOS	Und.	$/Und.	Cant.	Total US$
Booster de 1 Lb.	Pza	2,1000	1,00	2,100
Nonel dual 1000ms/17ms	Pza	3,4000	0,00	0,000
Nonel dual 1000ms/25ms	Pza	3,4000	1,00	3,400
Linea CTD Nº 0 (1m)	Pza	1,0200	0,01	0,009
Linea CTD Nº 65 (6m)	Pza	1,9400	0,03	0,053
Linea CTD Nº 109 (6m)	Pza	1,7000	0,05	0,078
Fulminante Nro 08	Pza	0,0880	0,02	0,002
Mecha de Seguridad	m	0,0900	0,02	0,002
Cordon Detonante 5G	m	0,1160	0,00	0,000
Costo Accesorios/tal			**US$/tal**	**5,644**

Costo Accesorios /Ton = 0.009 US$/ton

Costo de perforación = 0.220 US$/ton

CONCLUSIONES

1. La energía producida por las mezclas explosivas se aplica en el diseño de mallas de perforación y voladura en Compañía Minera Antamina, Utilizando el ANFO pesado se obtuvieron mejores resultados del proceso de voladura en términos de técnicos, económicos y ambientales.

2. Los procedimientos aplicados en el diseño de mallas de perforación son los adecuados en la Compañía Minera Antamina S.A., de las pruebas realizadas en operación, se puede determinar que se obtuvieron mejores resultados en fragmentación del material volado disminuyendo un 13 % en el P80, la velocidad de detonación del ANFO pesado fue de 5581,9 m/s. y se realizó el monitoreo overbreak de la roca remanente obteniendo paredes estables.

3. Los procedimientos aplicados en el diseño de la voladura son los adecuados en la Compañía Minera Antamina S.A., se debe mencionar que utilizando el ANFO pesado no se generaron gases nitrosos, esto debido a que en su formulación química el nitrógeno presente en la mezcla pasar a nitrógeno molecular N2 siendo este estable además de evitar el fly rock y el monitoreo de la vibración se encuentra por debajo de la que recomienda la norma USBM RI 8750.

RECOMENDACIONES

1. Se debe propagar el uso de las mezclas explosivas comerciales como emulsiones gasificadas para obtener una buena fragmentación y de esta manera minimizar los costos en explosivos como los ANFO pesado, carguío, acarreo, chancado primario, lográndose de esta manera optimizar la rentabilidad de la empresa minera.

2. Se debe conocer el comportamiento geomecánico y geotécnico del macizo rocoso para tener mayores y mejores criterios en la determinación de nuestros parámetros de voladura y obtener una buena fragmentación.

3. Es importante relacionar las vibraciones producto de los disparos, con el uso de los retardos adecuados. Contamos también para el logro de este objetivo con el uso de los retardos electrónicos teniendo un mejor control en la dispersión, que pueden ser medidos a través del sismógrafo.

4. Si bien es cierto que el ANFO pesado no emite gases nitrosos por lo que las comunidades cercanas no se perjudican, el polvo producto de la voladura 116 genera un tipo de fase dispersa: SUSPENSIÓN (polvo en el aire), la fase dispersa (polvo) puede viajar según estudios hasta 5km; esto representa un peligro y su exposición un riesgo, generando potenciales problemas pulmonares., para lo cual se debe monitorear

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera & Campos, 2008. Fragmentación: ¿Distribución de tamaños o distribución de distribuciones?, VIII ASIEX. Pucón, Chile.

Aler & du Mouza, 1996. Measuring fragmentation efficiency of mine blasts, FRAGBLAST 5. Montreal, Canada.

Atlas Powder Company. (1987). Field Technical Operations. Explosives and Rock Blasting. Atlas Powder, Editorial: Dallas, Tex. : Field Technical Operations, Atlas Powder Co. Dallas - Estados Unidos.

Bergmann, 1983. Effect of explosive properties, rock type and delays on fragmentation in large model blasts, 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden.

Davila & Quiroz, 2010. Influencia de la Voladura en el Throughput del Molino. Simposium Perforación y Voladura de Rocas - Huaraz.

Departamento de geología . (2016). Compañia minera Antamina. San Marcos - Perú.

Departamento de Planeamiento Mina. (2017). Compañia Minera Antamina. San Marcos -

EXSA, 4th Edición. Manual Práctico de Voladura.

Katsabanis & Liu, 1996. Delay requirements for fragmentation optimization, FRAGBLAST 5. Montreal, Canada.

INGEMMET, Boletín 55, 1995. Geología del Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima.

Instituto Tecnológico Geominero de España. (1994). Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Madrid – España.

ISEE, 17th Edition, 1998. Blaster´s Handbook.

López J. C. (2003). Manual de perforación y voladura de rocas, Madrid – España. Madrid – España.

McKenzie, 1994. Estado del arte de la Tronadura. ENAEX, Gerencia Técnica.

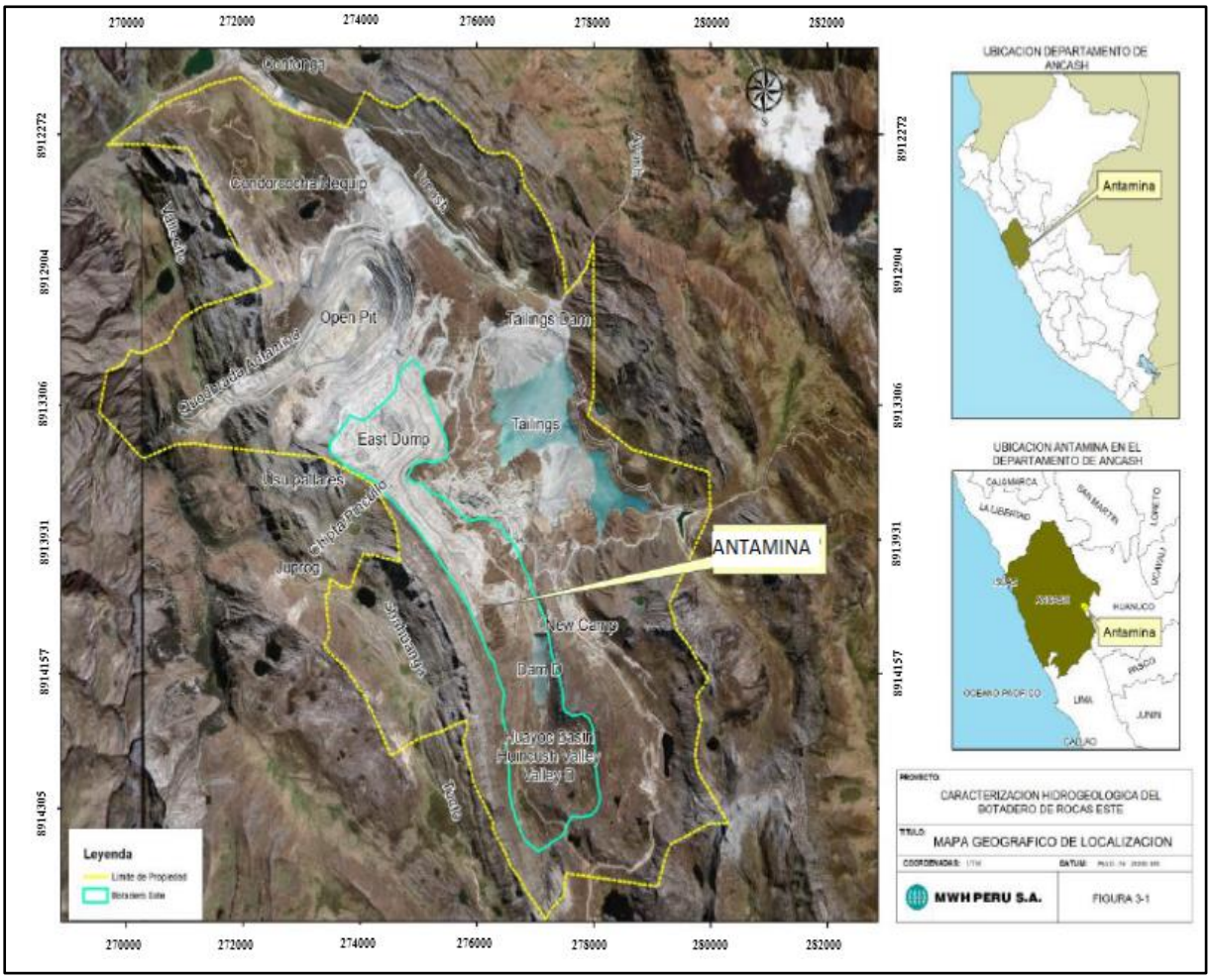
McKenzie, 2008. Excelencia en Voladura – Limitaciones Actuales. VII Jornada de Tronadura, ASIEX 2008. Puerto Varas – Chile.

Mendoza & Zúñiga, 2010. Memo IM-I-M-156 Cookbook de Perforación y Voladura – primer trimestre 2010. Doc. Interno Minera Yanacocha SRL.

Nielsen & Kristiansen, 1996. Blasting-Crushing-Grinding Optimisation of an Integrated Comminution System. FRAGBLAST 5, Montreal, Canada.

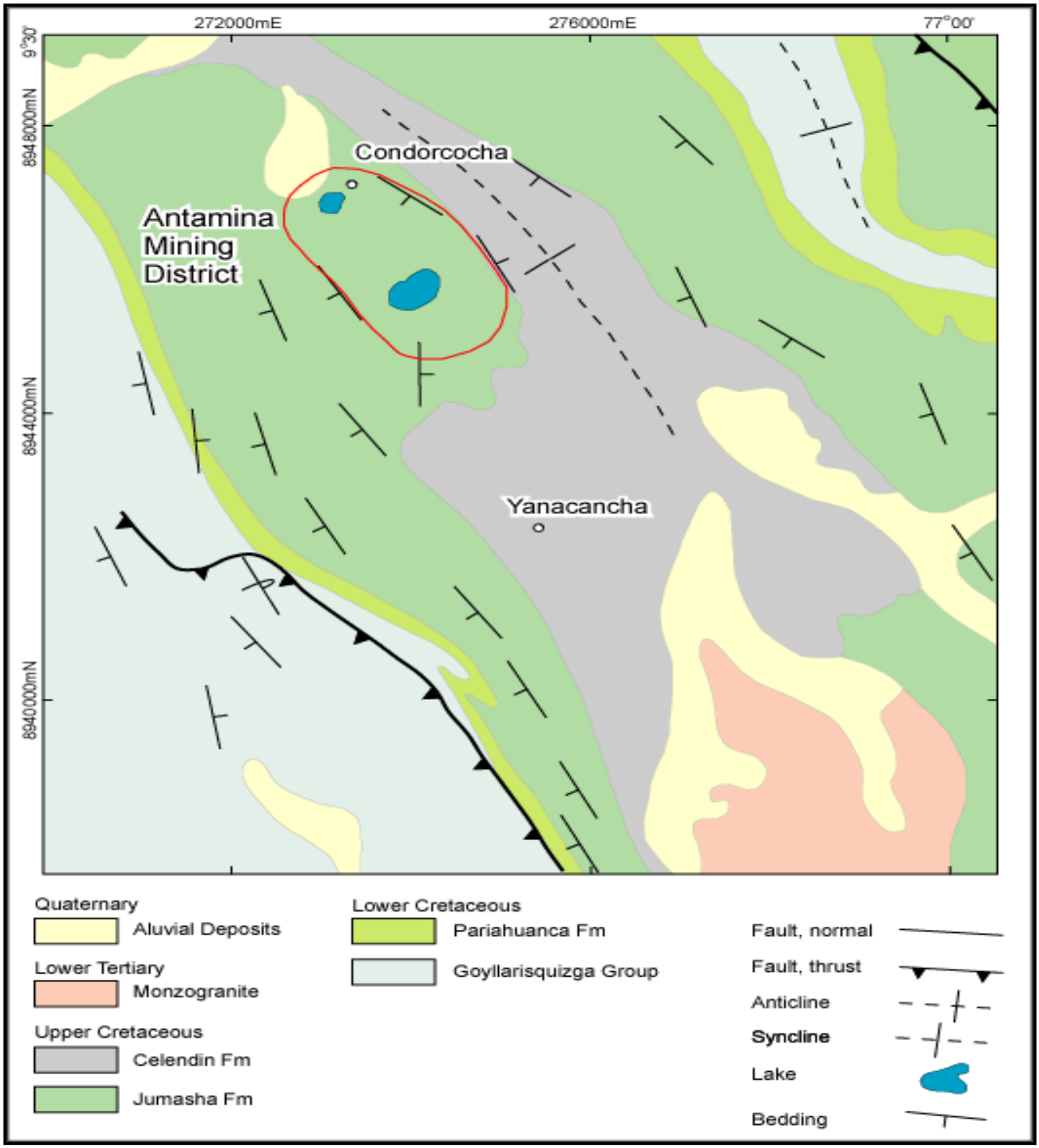
ANEXOS

Anexo N° 1: Plano de ubicación de mina Antamina



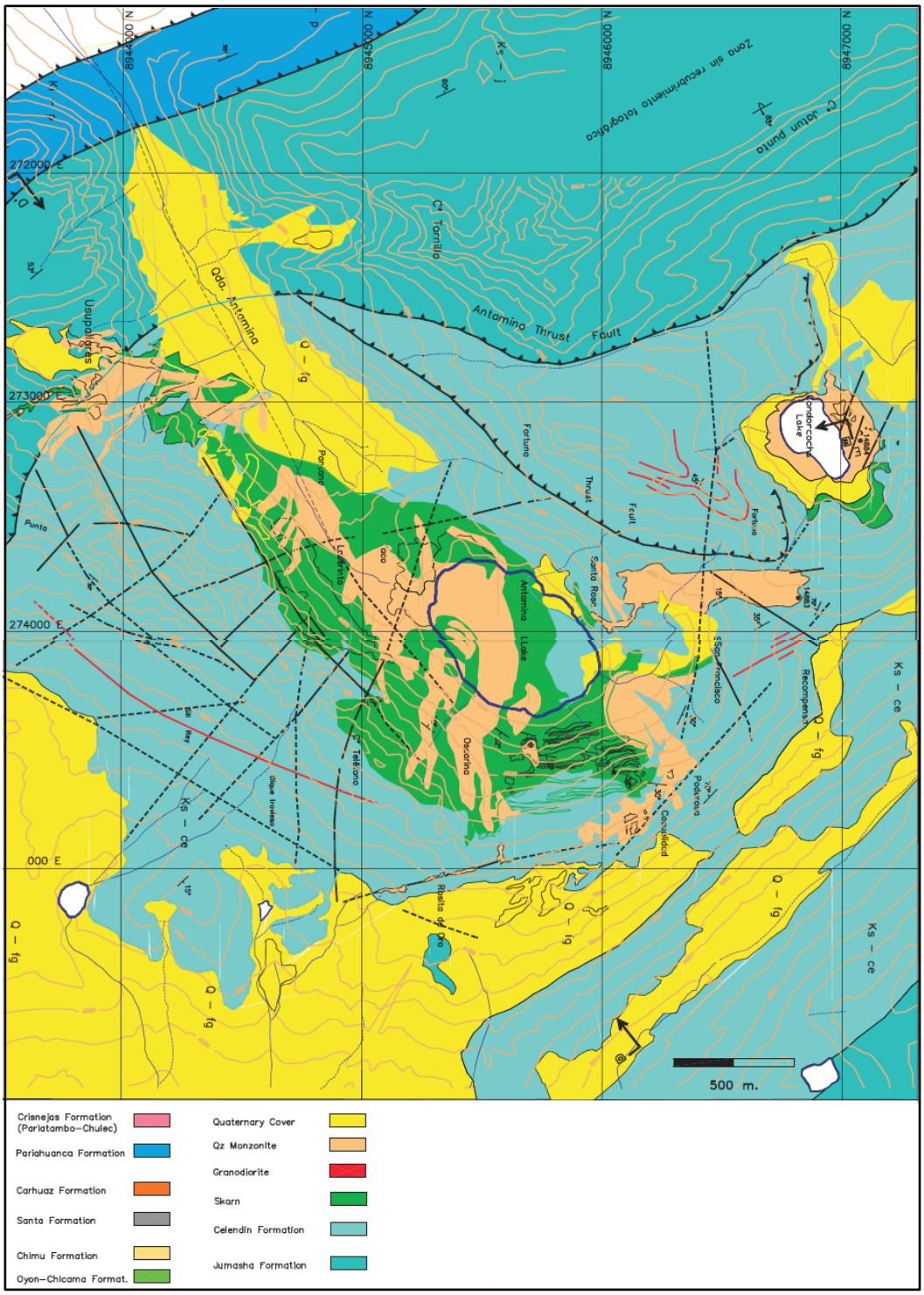
Fuente: Departamento de Geología

Anexo N° 2: Mapa Geológico Regional.



Fuente: INGEMMET Hoja 20-i.

Anexo N° 3: Mapa Geológico Local.



Fuente: Geología Antamina.