



**Universidad
Continental**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Trabajo de Investigación

**Optimización de la fragmentación en la
Mina Toquepala, mediante la aplicación
de explosivo gasificado**

Manuel Antonio Quispe Cuaila

Arequipa, 2018

Para optar el Grado Académico de Bachiller
en Ingeniería de Minas



Repositorio Institucional Continental

Trabajo de Investigación



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

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento profundo y especial a la Universidad Continental, Facultad de Ingenierías y la Carrera Profesional de Ingeniería de Minas que me han permitido realizar mis estudios universitarios con la calidad debida, los cuales más adelante tendré la oportunidad de concretizarlos y ponerme al servicio de mi país como Ingeniero de Minas.

DEDICATORIA

Doy gracias a Dios, por estar en cada paso de mi vida, por iluminarme y fortalecerme e iluminarme por poner en mi camino a personas que han sido fundamentales a lo largo de mi carrera.

Agradezco también a mi familia por su comprensión, fortaleza y su apoyo en la culminación de mis estudios.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN.....	x

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema.....	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivo específico	3
1.3. Justificación e importancia	3
1.4. Hipótesis y descripción de variables.....	4
1.4.1. Hipótesis	4
1.4.2. Definición de variables	5

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema.....	7
2.2. Bases teóricas.....	8
2.2.1. Método de explotación	8
2.2.2. Diseño de Perforación y Voladura	15
2.2.3. Restricciones en el Proceso de Voladura de la Mina Toquepala	24
2.3. Definición de términos básicos.....	25
2.3.1. Fragmentación	25
2.3.2. Burden	25
2.3.3. Espaciamiento.....	26
2.3.4. Taladro.....	26

2.3.5.	Explosivo.....	26
2.3.6.	Agentes explosivos	26
2.3.7.	ANFO	26
2.3.8.	Cara libre	26
2.3.9.	Malla	27
2.3.10.	Desplazamiento.....	27
2.3.11.	Voladura de rocas	27
2.3.12.	Factor de carga	27
2.3.13.	Carga Explosiva	27
2.3.14.	Explosivo gasificado	27

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1.	Métodos y alcance de la investigación	28
3.1.1.	Método	28
3.1.2.	Alcance	28
3.2.	Diseño de la investigación.....	29
3.3.	Población y muestra.....	29
3.3.1.	La población.....	29
3.3.2.	Muestra	29

CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Introducción del explosivo gasificado	30
4.1.1.	Logística de implementación de la Tecnología gasificada	31
4.2.	Objetivos del empleo del explosivo gasificado.....	32
4.3.	Definición del explosivo gasificado.....	32
4.3.1.	Nitrato de Amonio Quantex	34
4.3.2.	Slurrex G: Emulsión matriz.....	34
4.3.3.	Solución para gasificar	35
4.3.4.	Camión Fábrica para Mezcla Explosiva Gasificada.....	36
4.3.5.	Controles de calidad del explosivo gasificado	37
4.3.6.	Registros de Velocidad de Detonación de la Mezcla Explosiva.....	39
4.4.	Diseño de voladuras con la mezcla explosiva Quantex	40
4.4.1.	Diseño de Perforación.....	40

4.4.2.	Diseño de Patrones de Voladura.....	41
4.4.3.	Diseño de Columnas Explosivas	41
4.4.4.	Análisis de los Pisos de Banco.....	44
4.4.5.	Indicadores cuantificables de productividad en las operaciones unitarias,-	44
4.4.6.	Medición de los resultados de fragmentación.....	46
4.4.7.	Factor de Carga Explosiva	49
CONCLUSIONES		51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Leyes de mineral.....	9
Tabla 2 Clasificación de las rocas en la Mina Toquepala.....	14
Tabla 3 Propiedades de las rocas en la Mina Toquepala.....	15
Tabla 4, Densidades y porcentajes de absorción Quantex	34
Tabla 5 Comparación de Factores de Carga HA55 y Explosivo Quantex.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista Panorámica de la mina Toquepala.....	9
Figura 2. Diseño de taludes de miana.....	10
Figura 3. Cuerpo mineral: Toquepala.....	13
Figura 4. Segunda etapa de la mecánica de fragmentación.....	17
Figura 5. Parámetros de voladura.....	21
Figura 6. Cara libre: Macizo Rocoso Pre fragmentado.....	22
Figura 7. Collar de taladro con material fragmentado.....	23
Figura 8. Sección de perforación	24
Figura 9. Infraestructura instalada: Silos de Emulsión.....	31
Figura 10. Almacenamiento de Nitrato Quantex.....	32
Figura 11. Tecnología explosiva Quantex.....	33
Figura 12. Composición de la mezcla explosiva Quantex	33
Figura 13. Mezcla Explosiva Quantex.....	34
Figura 14. Emulsión Q	35
Figura 15. Proceso de Gasificación	36
Figura 16. Controles de Densidades.....	38
Figura 17. Mezcla Explosiva Quantex.....	38
Figura 18. Comparaciones de VOD	39
Figura 19. Gases en las voladuras.....	40
Figura 20. Diseños de Columnas Explosivas para roca dura	41
Figura 21. Diseños de Columnas Explosivas para roca suave.....	42
Figura 22. Diseño de Secuencia de Voladura Electrónica.....	42
Figura 23. Resultados Visuales de Fragmentación	43
Figura 24. Forma de la Pila de Fragmentación	43
Figura 25. Pisos nivelados después del minado	44
Figura 26. Material Sobre dimensionado.....	46
Figura 27. Roca volada para análisis de Wip Fra.....	47
Figura 28. Muestreo de fragmentación en mina.....	48
Figura 29. Foto análisis de roca volada: Software Wip Frag	48
Figura 30. Curva Granulométrica con Explosivo Gasificado.....	49

RESUMEN

El presente informe de investigación titulado: “OPTIMIZACION DE LA FRAGMENTACION EN LA MINA TOQUEPALA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE EXPLOSIVO GASIFICADO.” tiene por objetivo general optimizar los costos unitarios de las operaciones de voladuras de la mina mediante la aplicación de explosivo gasificado, mitigando la generación de gases nitrosos y reducir el porcentaje de fragmentación gruesa.

Para la obtención de un buen resultado es muy importante que el diseño de perforación sea el correcto, en términos de tener y conservar los parámetros de voladura como espaciamientos diseñados, profundidad requerida, geometría correcta de diseño, y finalmente la cantidad de taladros, además de la aplicación de la Mezcla Explosiva Gasificada, admite efectuar voladuras masivas, es decir, se ha aumentado la cantidad de taladros, con ello, los resultados granulométricos de segmentación han permitido generar ganancias de productividad en las operaciones posteriores a la voladura, inclusive podemos manifestar que los ordenamientos de chancado y molienda también se han visto afectadas por buenas consecuencias en cuanto a segmentación.

Con la aplicación de la Tecnología Explosiva Quantex en los diseños de voladura de la Mina Toquepala, se mitigo en un 90% la generación de humos naranjas y gases nitrosos, que cuya emanación ocasiona daños al ambiente y al personal que circunda en las operaciones de mina. La Mezcla Explosiva Quantex, tiene un equilibrio adecuado en cuanto al balance de oxígeno y sus componentes y su proceso de fabricación propiamente dicho, haciendo las voladuras más limpias en cuanto a generación de gases.

Palabras Clave: Fragmentación, explosivo, gasificado

ABSTRACT

This research report entitled: "OPTIMIZATION OF FRAGMENTATION IN TOQUEPALA MINE, THROUGH THE APPLICATION OF GASIFICATED EXPLOSIVE." Has the general objective of optimizing the unit costs of blasting operations of the mine through the application of gasified explosive, mitigating the generation of nitrous gases and reduce the percentage of coarse fragmentation.

In order to obtain a good result it is very important that the drilling design is correct, in terms of having and keeping the blasting parameters as designed spacings, required depth, correct geometry of design, and finally the number of drills, in addition to the application of the Gasified Explosive Mixture, allows to carry out massive blasting, that is, the number of holes has been increased, with this, the fragmentation granulometric results have allowed to generate productivity gains in the operations after the blasting operation, including state that crushing and milling operations have also been affected by good results in terms of fragmentation.

With the application of the Quantex Explosive Technology in the blasting designs of the Toquepala Mine, the generation of orange smoke and nitrous gases is mitigated by 90%, whose emanation causes damage to the environment and the personnel surrounding the mine operations.

The Quantex Explosive Mixture has an adequate balance in terms of the balance of oxygen and its components and its manufacturing process itself, making blasting cleaner in terms of gas generation.

Keywords: Fragmentation, explosive, gasified

INTRODUCCIÓN

El presente Informe para Bachillerato denominado “Optimización de la fragmentación en la mina Toquepala, mediante la aplicación de explosivo gasificado”, cuyo objetivo principal es conocer el conjunto de parámetros de diseño de perforación y voladura de rocas.

La voladura de rocas con explosivos data del siglo XVII, cuando se comenzó a emplear la pólvora en minería. Los avances que han marcado un verdadero hito histórico, han sido la invención de la dinamita por Alfred Nobel en 1866, para dar lugar posteriormente a la invención y empleo de explosivos comerciales como el ANFO, los hidrogeles, emulsiones y otros. Hoy en día los fabricantes de explosivos han estado impulsando el acercamiento entre los especialistas en voladura y los investigadores técnicos en diseño y fabricación de estos importantes insumos de la minería.

A todo esto se suma el gran número de accesorios de voladura acompañado de la tecnología desarrollada a cuanto a detonadores electrónicos e instrumentación que nos permiten realizar variados diseños de voladura, lo que en la actualidad es todo un procedimiento de arranque que constituye una auténtica técnica establecida en principios científicos surgidos de la comprensión de las labores ejercidas por los explosivos, los mecanismos de fractura de las rocas y las particularidades geomecánicas de los macizos rocosos.

Delimitando la investigación, la mina desarrolla la explotación de su yacimiento mediante el sistema de explotación a tajo abierto. Tiene una producción mensual de 18 millones de toneladas. El mineral tiene una ley promedio de 0.59 %, llegando así a ser considerada una de las minas más grandes en el Perú junto a Antamina, Cuajone y hoy Cerro Verde

El movimiento, tanto mineral como desmonte está constituido básicamente de cinco etapas o ciclos de minado, los cuales son: perforación, voladura, carguío, acarreo y chancado. Estas operaciones deben efectuarse con el máximo rendimiento y productividad, ya que todas se encuentran relacionadas interdependientemente, de modo que de suscitarse una posible falla, existiría retraso en el proceso productivo, y por lo tanto, el fracaso en el ciclo del minado.

De las cuatro operaciones, las más importantes son la perforación y voladura de rocas, consideradas como actividades originarias y básicas de todo el proceso extractivo, ya que determinan la calidad del mineral que se anhela obtener; por lo que deben llevarse a cabo con todos los actuales adelantos tecnológicos y además, con una constante renovación de técnicas de punta para obtener el más alto rendimiento, productividad y optimización de costos.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Entre las principales operaciones de extracción de minerales esta la voladura, cuyo objetivo es conseguir el fragmentado de las rocas para disminuir los costos de perforación, voladura chancado, etc, además se desea evitar impacto negativos al relieve cercano, la voladura es un importante proceso en la mina por ello es necesario contar con la tecnología y experiencia necesaria por la importancia de este proceso

El obtener en las voladuras materiales por encima de los rangos de celdas de fragmentación o que la voladura no haya desplazado el material generando frentes resistentes para el minado, en muchas oportunidades nos obligan a ejecutar minados selectivos o también realizar voladuras secundarias, cuyas actividades interfieren en el desarrollo de los planes establecidos, que a la postre también tiene su implicancia económica en los costos operativos.

Por otra parte, la voladura es la interacción del explosivo sobre la roca, en ese entender, las condiciones energéticas de los explosivos deben superar todo tipo de resistencia que ofrecen los macizos rocosos, con la capacidad plena de

poder deformarlos aprovechando las condiciones elásticas de las rocas, por lo que se requiere evaluar el performance de nuevas tecnologías explosivas que respecto a las mezclas explosivas tradicionales cuyo agente sensibilizador es el ANFO y que esta hace poco tiempo se venían empleando en las operaciones de voladura de la mina Toquepala.

En ese sentido, dado a que los resultados de fragmentación tienen directa implicancia en toda la operación de minado, se ha visto por conveniente el empleo de explosivo gasificado en las voladuras de la mina Toquepala, debido a que reúne mayores condiciones energéticas que el resto de las mezclas explosivas, y que además reduce considerablemente la generación de gases nitrosos, lo cual constituye un problema ambiental.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema Principal

¿En qué medida el explosivo gasificado optimiza los costos unitarios de las operaciones de la voladura de la mina?

1.1.2.2. Problemas Secundarios

- ¿El explosivo gasificado en las aplicaciones de voladura ayudan a obtener un mejor grado de fragmentación del macizo rocoso de la mina Toquepala?
- ¿El explosivo gasificado disminuye los niveles de gases nitrosos que se generan producto de las operaciones de voladura en la mina Toquepala?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Optimizar los costos unitarios de las operaciones de detonación de la mina por medio de la aplicación de explosivo gasificado, asociado al efecto de la mecánica de rotura teniendo en consideración los conceptos geomecánicos del macizo rocoso, los resultados tendrán implicación directa en las operaciones de chancado, acarreo y carguío, lo cual repercutirá en la reducción de los Costos Globales de Minado.

1.2.2. Objetivo específico

- Analizar la importancia de la aplicación de explosivo gasificado para obtener tamaños de fragmentación idóneos en el macizo rocoso.
- Mitigar la generación de gases nitrosos consecuencia de las operaciones de voladura por uso de explosivo gasificado.
- Minimizar el porcentaje de segmentación gruesa para agilizar las operaciones de chancado, acarreo y carguío para que esta sea más productiva

1.3. Justificación e importancia

La voladura juega un papel muy significativo en la minería porque es la forma en que podemos aperturar labores de acceso hacia un yacimiento económicamente explotable. El diseño de voladuras, las características físicas, químicas y mecánicas de las rocas, así como la estratigrafía y los rasgos organizados del macizo rocoso, juegan un papel importante pues a base de ello sabremos la energía explosiva necesaria para romper dicho macizo, en este escenario, el explosivo gasificado tendrá enorme relevancia en los resultados finales de fragmentación.

El uso de explosivo gasificado en la mina Toquepala en relación a las mezclas explosivas tradicionales y el mismo ANFO, tiene mejores resultados en lo que respecta a la fragmentación, lo que conlleva a su vez a tener los siguientes beneficios para las operaciones:

- Brinda mayor energía y con ello mejor poder de fragmentación.
- Reducción en el costo total de fragmentación de roca de hasta 20%.
- Reducción del Costo Global de Minado
- Mejorar los tiempos de carguío (pala-camión).
- Eliminación de los gases nitrosos y reduciendo la huella de carbono.
- Optimiza el proceso de chancado y molienda en Concentradora.
- Al obtener mejor fragmentación, los componentes de los aceros de los equipos tienen mayor durabilidad (tolvas, cucharones, revestimientos de chancadora, etc.

Asimismo, para justificar el desarrollo del presente Trabajo de Investigación, es el de disponer de experiencia laboral en la mina Toquepala, por lo que justificamos la realización del presente trabajo de investigación, bajo la denominación: “OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN EN LA MINA TOQUEPALA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE EXPLOSIVO GASIFICADO”, lo cual se desarrollará manteniendo la secuencialidad y ordenamiento de la investigación de acuerdo a los conceptos y metodologías empleadas.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis

Para realización del presente informe de investigación, en función a las necesidades del problema, nos hemos planteado las subsiguientes hipótesis.

1.4.1.1. Hipótesis general

Optimización de los costos unitarios de voladura y operación de la mina Toquepala mediante la aplicación de explosivo gasificado, mejorando el grado de fragmentación del macizo rocoso, sin alterar la estabilidad de los taludes y mitigando la generación de gases nitrosos.

1.4.1.2. Hipótesis específicas

- Para el adecuado diseño de perforación y voladura, debemos tener presente las particularidades geomecánicas del macizo rocoso, los conceptos y teorías de la voladura de rocas, las consideraciones técnicas de diseño y un conocimiento adecuado de planeamiento de minado, ello garantizará que las operaciones unitarias siguientes (carguío, acarreo y chancado) se desarrollen con los estándares de productividad, seguridad.
- Para obtener un buen resultado en la fragmentación, es necesario que se realice un correcto diseño de perforación, teniendo en cuenta espacios, diseño y profundidades, geométrica y cantidad de taladros a utilizar el cual será directamente proporcional a la fragmentación

- La investigación y la ejecución de voladuras con explosivo gasificado en los diferentes Sectores Estructurales de la Mina en estudio, ha implicado tener mejoras notables en el proceso de fragmentación, gracias a las secuencias versátiles que podemos aplicar en el diseño, el cual también está controlado y relacionado por la definición de los tiempos entre taladros y filas.

1.4.2. Definición de variables

1.4.2.1. Variables Independientes

Diseño de Voladura en la Mina Toquepala para optimizar la fragmentación, esta implementación, requiere de la aplicación de la Mezcla Explosiva Quantex, que nos permite elaborar todo un procedimiento de trabajo y estudio asociado a las particularidades estructurales y geomecánicas del macizo, para ello es importante conocer lo siguiente:

- Conceptos de mecánica de fragmentación
- Consideraciones técnicas de diseño y diseño de perforación y voladura
- Implementación de La Mezcla Explosiva Quantex
- Evaluación de resultados.

1.4.2.2. Variables dependientes

Conocimiento a plenitud de las propiedades geomecánicas, estructurales y geológicas del macizo rocoso, es importante tener presente que el éxito o fracaso de una voladura, es proporcional al atributo del macizo rocoso, siendo más fundamental que los parámetros del explosivo, de diseño, y consideraciones técnicas de diseño; los parámetros de la roca como: propiedades físicas, estructurales, dinámicas y condiciones geológicas, son los que definitivamente son importantes en un voladura, por lo cual consideramos que de estas variables, dependen el éxito o fracaso de los resultados de la voladura. Es importante determinar:

- Caracterización Geomecánica del macizo rocoso
- Clasificación litológica
- Determinación de contactos litológicos
- Conceptualización de propiedades de la roca
- Velocidad de onda de la roca (Velocidad Sónica)
- Densidad de fracturas del macizo rocoso.

1.4.2.3. Variables Intervinientes

Están relacionadas con los aspectos de los cuales depende la operación propiamente dicha.

- Costo de Inversión.
- Costo Global de Minado
- Costos de Perforación y Disparos
- Equipos involucrados.
- Elemento humano

1.4.2.4. Indicadores de gestión

Son las variables que miden la calidad y seguimiento a la operación, definimos los siguientes indicadores

- Comparación de los resultados (Voladuras con Mezcla Explosiva Convencional y Mezcla Explosiva Quantex)
- Reducción del costo global de minado, se cuantifica el estudio en base a los resultados.
- Evaluación de resultados.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

La Mina Toquepala, Unidad de Producción de Southern Perú Copper Corporation, es un Yacimiento de Pórfidos de Cobre, con más de 55 años de antigüedad de explotación, actualmente, se desarrollan diferentes fases de excavado de expansión y cuenca, se tiene que tener taludes para soportar el peso de la aglomeración rocosa, y donde es importante la productividad del minado, que van desde la Ingeniería, hasta en operaciones unitarias tales como Acarreo, Perforación, Voladura y Carguío. Este conjunto de operaciones deben desarrollarse en forma sincronizada y ordenada, con la seguridad que amerita una operación de calidad y eficacia.

Cuando no se tiene un conveniente diseño de perforación y voladura y el explosivo no es lo bastante energético para romper la roca a tamaños adecuados, los resultados se reflejan consecutivamente en las operaciones de carguío, transporte y chancado, estos se ven afectados debido a que bajan su productividad, aumentando los costos globales de minado. Los problemas de una mala fragmentación son los siguientes:

- Al obtener fragmentos con dimensiones mayores, fuera del estándar de requerimiento por concentradora mina, se tiene que efectuar voladura secundaria,

lo cual refleja un incremento de costo en las operaciones de perforación y voladura.

- La existencia de material de bolonería sobredimensionada, exige verificar un minado selectivo de minera, entonces, la pala tiene que elegir y seleccionar constantemente los minerales de la voladura, este efecto, ayuda a que disminuya la rapidez de excavación y carguío, aumentando los precios de carga y transporte.
- La carga de la pala al volquete, no es seguro ya que esta acción puede crear incidentes y hasta accidentes ya que no existe un equilibrio.
- El carguío de la pala al volquete, no es el adecuado, la distribución de la carga sobre la tolva del volquete, no guarda una geometría de equilibrio, lo cual puede conllevar a un accidente del volquete y la pala.
- En muchas oportunidades, el contar con las limitaciones técnicas de un solo explosivo hace que se presenten todos los problemas antes mencionados, los cuales se han subsanado mediante la aplicación de la Tecnología Explosiva Gasificada de última generación, el cual, reúne bondades técnicas y ambientales cuantificables para superar las diferentes limitaciones de las mezclas explosivas convencionales, ofreciendo soluciones inteligentes acordes a las necesidades de fragmentación de una mina con las diferentes aplicaciones que se pueden dar en una voladura.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Método de explotación

El método utilizado en la mina en estudio es de Tajo Abierto Mecanizado esto se debe a la geología del lugar, este método es más antiguo y utilizado en el mundo, además es de mayor extensión en el Perú.



Figura 1. Vista Panorámica de la mina Toquepala

2.2.1.1. Planeamiento de minado

La mina, utiliza el software Mine Sight, el cual ayuda en el planeamiento ya sea de corto, mediano o largo plazo, utilizando el Sistema de Diseño y Evaluación de Minerales. Se tiene en cuenta las operaciones con reseñas de sondaje y digitalizados, sistematizaciones con compuestos y de modelo, diseño monetario y estimación de un pit.

2.2.1.2. Ley de corte

En la mina la ley de corte de minera cu es de 0.409%, a continuación se muestra las leyes de Cobre y Molibdeno según el espécimen de roca.

Tabla 1 Leyes de mineral

PROTOTIPO DE ROCA		% de Cobre	% de Molibdeno
Diorita propílica	Di-Prop	0,44	0,01
Dacita Porfírica Silicificada	Dp-Qs	0,78	0,03
Dacita con yeso anhidrita	Dp-G/A	0,61	0,03
Brecha angular sericitizada	Bx-Qs	0,90	0,04
Brecha turmalina con yeso anhidrita	BxT-G/A	1,54	0,04
Brecha con yeso anhidrita	Bx-G/A	0,69	0,03
Brecha turmalina con yeso anhidrita	BxT-G/A	1,07	0,08
Pebble brecha silicificada	Px-Sil	0,91	0,02
Pebble brecha silicificada	Px-Sil	0,62	0,03

Fuente: Departamento de Ingeniería Mina – SPCC mina

a) Control de leyes (Ore Control)

En la mina existe un control de leyes, la cual inicia con data de campo para poder separar el material de acuerdo a su valor monetario para así poder tomar una decisión correcta , se realiza las siguientes actividades de ; tipos de taladros de voladuras; elaboración y estudio químico; muestreo topográfico y procesamiento de los taladros de voladura.

2.2.1.3. Programa de producción

Para un conveniente desempeño de los programas de manufactura en la mina; la producción diaria es 710 000TM, 22 horas de trabajo diario, 30 días trabajados mensualmente, adicionalmente se prepara planos semanales, mensuales y anuales; se sigue la productividad y evalúa la velocidad de producción.

2.2.1.4. Diseño de cuantificaciones de banco y tajo

Se utilizo la técnica de “cono Flotante” para el diseño del tajo, utilizando el Mine Sight con el que se determinó los sucesivos cuantificaciones de diseño, como; ángulo de cara de banco: 65° , 15 m de altura, 8,5 m de bernas y 36m de ancho de rampa.

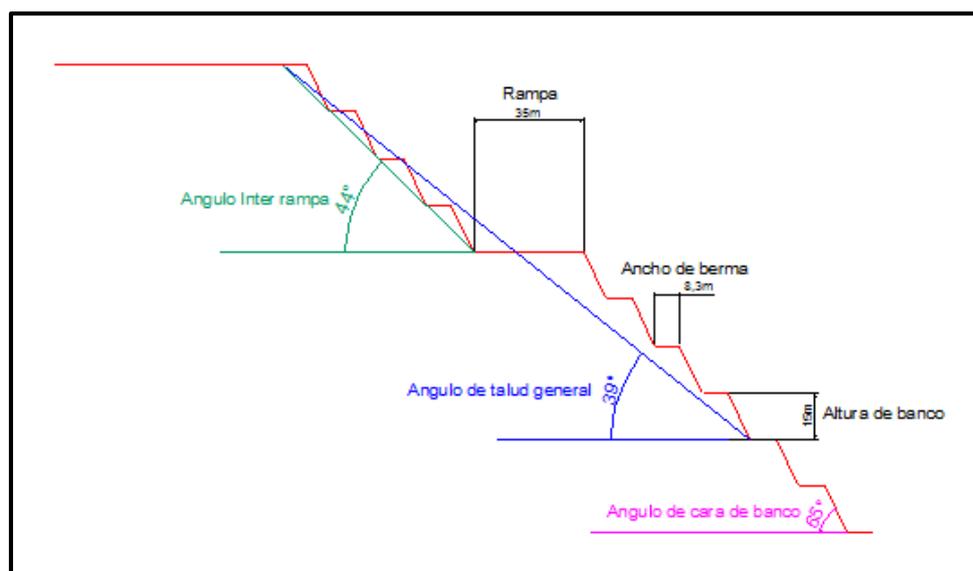


Figura 2, Diseño de taludes de mina

Fuente: Departamento de Ingeniería: SPCC, Mina Toquepala

2.2.1.5. Operaciones unitarias de minado

a) Perforación

Como primer paso del minado, es la taladración de agujeros para poder realizar voladuras, para esto se definen patrones de excavación estructural, la voladura esta liada con la perforación, lo cual tiene que mostrar precisión en requisitos de Burden, espacio y profundidad del taladro, estas medidas reflejan las consecuencias de voladura, los parámetros de perforación son: 11,0 a 12 ¼ " de diámetro de perforación, 6,5m a 12,0m de malla de perforación, 15 metros de longitud de perforación, 1,5 a 2,0m, y sobre perforación

b) Voladura

La voladura es una de las actividades más importantes en la extracción de mineral, su meta inicial es conseguir una apropiada dimensión de roca, y acopio del mineral fragmentado,

Cuando las consecuencias son desfavorables, exigen a la proceso minero a verificar minados selectivos, asimismo la necesidad de verificar voladuras accesorias, las cuales aumentan los precios de minado, Todas las voladuras se ejecutan con un diseño anterior y particular, En la actualidad, el sistema de iniciación de las voladuras en la mina es con Detonadores Electrónicos y como explosivo la Mezcla Explosiva Quantex Gasificada,

c) Carguío

La operación compuesta por una escuadra de Cargadores frontales y Palas de diferentes marcas, modelos y capacidades, éstos equipos han sido adquiridos y seleccionados en función a las dimensiones del tajo, considerando las alturas de banco y las necesidades de tonelaje producto de los planes de minado, tanto las Palas como los Cargadores Frontales, que se encarga de proveer material a las unidades de acarreo, Las Palas que conforman la flota de extracción son eléctricas que consumen 4200 voltios, y los cargadores son propulsados mediante el sistema diésel,

d) Acarreo

Esta maniobra es realizada por unidades de volquetes, que se encargan de transportar el mineral arrojado a distintos destinos, la carga a trasladar debe de ubicarse adecuadamente que releje la cantidad y peso de la carga,

2.2.1.6. Geología y propiedades de las rocas de la mina Toquepala

a) Geología general

La edad medida para el Depósito de Toquepala están alrededor de los cincuenta y ocho a cincuenta y dos millones de años, El establecimiento está ubicado en un terreno donde se dio actividad ígnea, conteniendo una gran diversidad de anomalos explosivos, los que se inspeccionaron hace setenta millones de años (Cretáceo-Terciario).

b) Geología regional

La mina, está ubicada en la región que atañe a la faja sísmica del Sur del Perú; el cual se identifica por haber afrontado una aguda acción eruptiva, cuyos restos son una sucesión de volcanes, prontamente intrusivos rezagados del batolito andino, de constitución ácida a media que trajeron consecuencias a las piedras encajonantes.

c) Geología local

Conformado principalmente por

- Rocas volcánicas; como los pórfidos cuarcíferos quellaveco, las de la serie Toquepala, y la serie alta compuesta por los aglomerados y las riolitas,
- Rocas intrusivas; compuestas por las dioritas, dacitas y latitas,
- Brechas; con alteraciones de turmalina, angular y de guijarros,

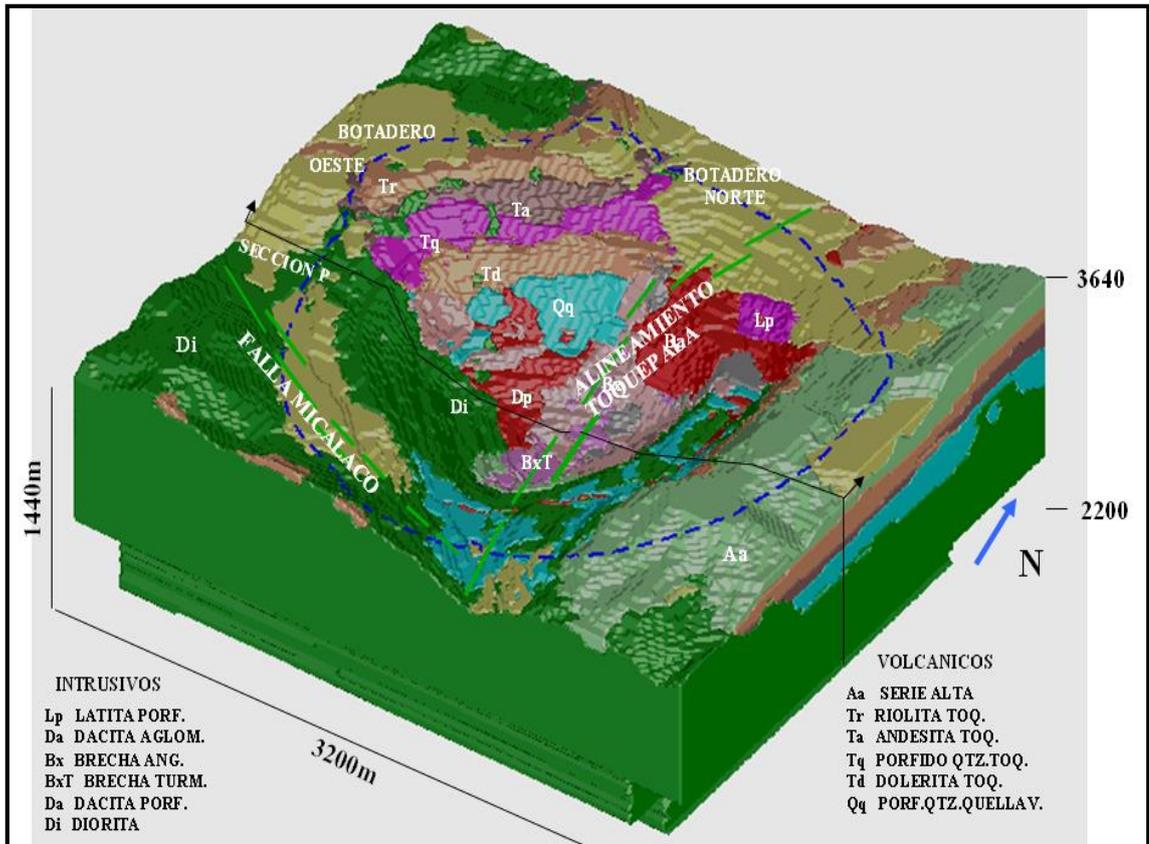


Figura 3. Cuerpo mineral: Toquepala

Fuente: Departamento de Ingeniería: SPCC, Mina Toquepala

b) Clasificación de las Rocas en la Mina Toquepala,

Se clasificaron itológicamente las rocas que se encuentran en la Mina, se efectuó un esquema de simbolización litológico en base a la apariencia de yeso anhidrita, el mismo que muestra una disposición anómalo de su tope,

Tabla 2 Clasificación de las rocas en la Mina Toquepala

TIPOS DE ROCAS EXISTENTES		Símbolo	Perforación	Voladura
Rocas con Yeso	Brecha con yeso anhidrita	Bx-G/A	D	D
	Brecha turmalina con yeso anhidrita	BxT-G/A	D	D
	Diorita con yeso anhidrita	DiBx-G/A	D	D
	Diorita con brecha y yeso anhidrita	Di-G/A	D	D
	Dacita con yeso anhidrita	Dp-G/A	D	D
	Pebble brecha con yeso anhidrita	PxSil-G/A	D	D
Brechas sin Yeso	Brecha angular sericitizada	Bx-Qs	M	S
	Brecha angular silicificada	Bx-Sil	M	S
	Brecha turmalina	BxT	M	M
	Pebble brecha silicificada	Px-Sil	M	S
Rocas Volcánicas	Pórfido cuarífero Quellaveco	Qq	M	M
	Dolerita Toquepala	Td	M	M
	Andesita Toquepala	Ta	S	M
	Andesita Toquepala silicificada	Ta-Sil	M	D
	Riolita Toquepala silicificada	Tr	S	M
	Riolita Toquepala	Tr-Sil	M	M
	Pórfido cuarcífero Toquepala	Tq	M	M
	Alta andesita	Aa	M	M
Intrusivo (a)	Diorita propílica	Di-Prop	M	D
	Diorita sericitizada	Di-Qs	S	S
Intrusivo (b)	Dacita aglomerada	Da	M	D
	Pebble brecha	Px	M	D
	Latita porfírica	Lp	M	D

Leyenda

S: Suave

M: Media

D: Dura

a) Propiedades mecánicas de las rocas

- Resistencia dispuesta a la compresión. -

Precisa la fuerza o impuesto por módulo de superficie bajo la cual una roca fracasará por corte o cizalla. Otros requisitos, es la firmeza a ser excedida hacia alcanzar a la fractura por presión, coexisten varios elementos que influyen a la firmeza a la presión como: textura, tamaño y forma de granos, etc.

- Resistencia dinámica a la tracción

Es el esfuerzo de arrastre forzoso, para lograr la fractura de un modelo, cuando la prontitud de los esfuerzos es elevada, la resistencia del transporte y a la tensión se ven desarrollado a bienes que logran estar entre 05 a 13 veces las firmezas estáticas, estos valores, son designados "resistencias dinámicas" a la compresión y a la tracción.

Tabla 3 Propiedades de las rocas en la Mina Toquepala

TIPOS DE ROCAS EXISTENTES			Resis. Compresión (Mpa)	Resis. Tracción (Mpa)
Rocas con Yeso	Brecha con yeso anhidrita	Bx-G/A	189.25	18.43
	Brecha turmalina con yeso anhidrita	BxT-G/A	185.32	10.53
	Diorita con yeso anhidrita	DiBx-G/A	179.20	8.80
	Diorita con brecha y yeso anhidrita	Di-G/A	178.92	8.32
	Dacita con yeso anhidrita	Dp-G/A	191.32	10.10
	Pebble brecha con yeso anhidrita	PxSil-G/A	181.20	9.62
Brechas sin Yeso	Brecha angular sericitizada	Bx-Qs	125.16	11.89
	Brecha angular silicificada	Bx-Sil	138.96	13.13
	Brecha turmalina	BxT	138.67	17.78
	Pebble brecha silicificada	Px-Sil	95.30	13.18
Rocas Volcánicas	Pórfido cuarífero Quellaveco	Qq	44.79	4.93
	Dolerita Toquepala	Td	61.20	5.50
	Andesita Toquepala	Ta	179.92	12.49
	Andesita Toquepala silicificada	Ta-Sil	114.60	6.10
	Riolita Toquepala silicificada	Tr	72.50	11.32
	Riolita Toquepala	Tr-Sil	136.06	10.14
	Pórfido cuarcífero Toquepala	Tq	129.91	11.91
	Alta andesita	Aa	131.90	13.30
Intrusivo (a)	Diorita propílica	Di-Prop	152.90	11.97
	Diorita sericitizada	Di-Qs	126.50	10.50
Intrusivo (b)	Dacita aglomerada	Da	179.20	11.32
	Pebble brecha	Px	136.90	13.20
	Latita porfirítica	Lp	175.63	12.20

2.2.2. Diseño de Perforación y Voladura

En la ejecución de los diseños de voladura, es preponderante concebir todo lo referente a la teoría de la mecánica de fragmentación, la generación de las ondas de choque producidas por el explosivo en las fases de detonación, y la expansión de los gases; todas estas fases que se integran, hacen posible diseñar los patrones de voladura y las diferentes secuencias de detonación en función a las peculiaridades estructurales de los macizos rocosos presentes en la mina.

2.2.2.1. Onda de choque

En los explosivos, las velocidades de las moléculas iniciales gasificadas son muy grandes que no otorgan su calor por conductividad a la franja inalterada

de la obligación, sino que lo transportan por choque, deformándola y produciendo calor y explosión adiabática con reproducción de nuevos gases. El proceso se repite con un inclinación ondulatorio que conmueve a toda la masa increíble y que se nombra “Onda de Choque”.

2.2.2.2. Proceso de mecánica de fragmentación en el macizo rocoso

El mecanismo de fragmentación, se puede dividir en tres etapas:

a) Primera etapa

Posteriormente de la explosión de un explosivo, la elevada presión derivada supera la resistencia a la compresión de la roca, causar un fenómeno de pulverización y vaporización en el área contigua del taladro. Esta onda de choque transita a una rapidez de que transforma entre los 3000 a 500m/s, instituyendo energías tangenciales que crean aberturas circular, las cuales se agitan dentro de la dominio del taladro.

b) Segunda etapa

La etapa inicial de la onda de choque es auténtica, si alcanza un perfil dispuesto, es reflejado, en consecuencia presión decae velozmente hasta llegar al menos cero, eso da paso a la onda de tracción, la cual va a la roca y siendo este de menor resistencia en comparación a la compresión, pudiendo generar roturas iniciales.

c) Tercera etapa

En la última parte del proceso, existe una presión demasiado alta, se origina la primera grieta la cual va aumentando de dimensión debido a la combinación del esfuerzo de tracción inducida mediante la compresión radial y la expansión de vapores. De esta manera la aglomeración en frente de los barrenas cede y se desplaza hacia el burden, los enormes esfuerzos de compresión se descarga dentro de una roca de la forma que libra su carácter un muelle estrechado que se suelte deliberadamente.

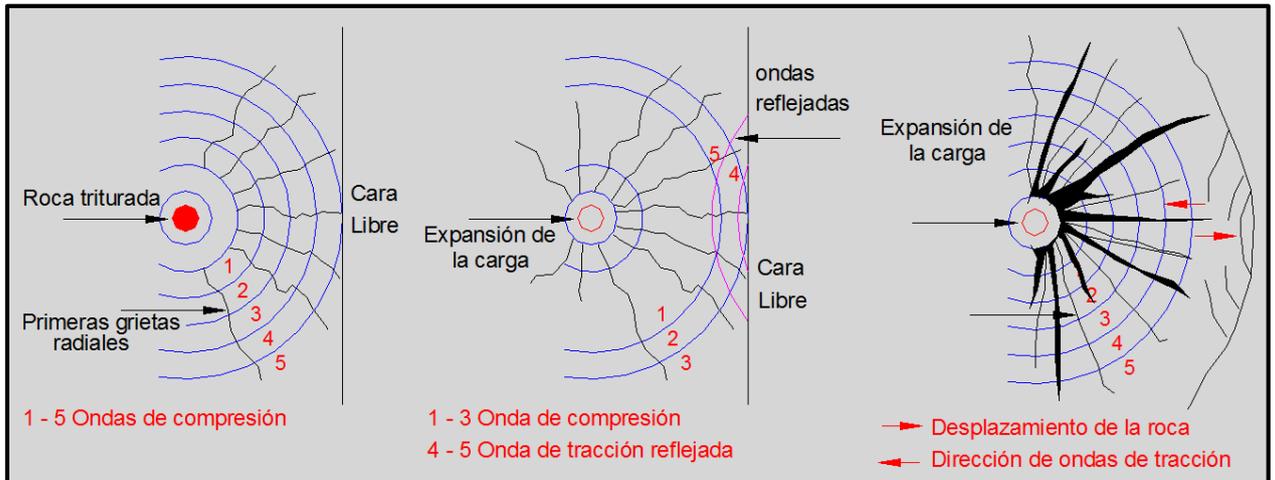


Figura 4, Segunda etapa de la mecánica de fragmentación

2.2.2.3. Velocidad de detonación (VOD)

Se precisa como la rapidez con la que la frecuencia de estallido u onda de choque recorre a través de una roca. Su valor es muestra de la performance del explosivo, Entre los elementos más significativos que inquieta la rapidez de explosión, se pueden marcar a los sucesivos puntos:

- Dominio del área de daño del explosivo.
- Dominio del nivel de aislamiento y de la dimensión de las partículas.
- Dominio de la consistencia del explosivo.
- Energía de aprendizaje (Cebo).

2.2.2.4. Presión de detonación y volumen específico de gases

El proceso de detonación crea una frecuencia de choque, el cual es portadora de la presión distintiva que se informa al medio que lo envuelve y que se designa presión de explosión, al semejante que la rapidez de explosión, la coacción de explosión es una indicación de la destreza de un detonante para dividir la roca, y se obtener a través de las denominadas pruebas acuáticas y en ciertos momentos a través de sensores de presión, uno y otro son de complicada ejecución.

2.2.2.5. Explosivos Industriales para Minería

a) Altos Explosivos, sensibles al fulminante 08

Esta comprendido por la dinamitas, explosivos permisibles, hidrogeles emulsiones sensibilizadas y explosivos especiales,

b) Agentes de voladura no sensibles al fulminante 08

Comprende los Hidrogeles o slurries, emulsiones (matriz), agentes de voladura mixtos (emulsión/ANFO o ANFOs pesados y también los explosivos gasificados (Explosivo Quantex),

Los detonadores químicos industriales para minería se catalogan en dos grupos como la rapidez de su frecuencia de choque:

- Explosivos rápidos y detonantes, con velocidades entre 2000 y 7000 m/s,
- Explosivos lentos y deflagrantes, con menos de 2000 m/s,

Los explosivos para minería que son los químicos son bastos que producen las reacciones químicas exageradamente veloces para redimir efectos gaseosos y energía, Estos vapores bajo elevadas presiones los cuales liberaran fuerzas sobre las muros del barreno, lo que induce que la piedra se quebrante.

2.2.2.6. Clasificación de los explosivos

a) Explosivos químicos

Son aquellas composiciones explosivas cuya emancipación de energía va conducida de una obstrucción química en el que se efectúa la ley de la subsistencia del componente y carácter, Estos son:

Costosos explosivos.- Son aquellos ruidosos impresionables al rapidísimo número 8, los iguales que desobedecen a una prontitud elevada que a la

rapidez del sonido; su prontitud de estallido es la disposición de 6 000 a 10 000 m/s, y su coacción de estallido es alrededor de 106 x 4 PSI.

Explosivos bajos.- Se determinan por su despreciable rango de ignición, unos cuantos cm/s o m/s mínimos que la rapidez del sonido y coacciones mínimas, hasta 3000 PSI.

b) Agentes de voladura

Son mezclas asombrosas que poseen como ingredientes un oxidante y un combustible, y solicitan de un booster para su instrucción, Estos agentes de voladura, no son sensibles al rapidísimo número 8,

2.2.2.7. Agentes explosivos secos

Este conjunto abarca, todos aquellos detonantes que no son sensitivos al explosivo y en cuya constitución no entra el agua, el factor común es el Nitrato de Amonio, a continuación describiré los primordiales Agentes explosivos usados en minería

a) Nitrato de Amonio

El nitrato de amonio es una sal inorgánica cuyas características principales es su color blanco, tiene una temperatura de fusión es 160,6 °C, cuando esta apartado no es un detonante, pues sola logra tal participación cuando se compone con una pequeña suma de combustible y reacciona violentamente con oxígeno. El Nitrato de Amonio logra desemejantes formas, en la elaboración de detonantes donde se usan prills porosos, el cual tiene la propiedad de impregnar y estancar a los combustibles líquidos y es cómodamente manejable sin que se causen grumos y adherencias..

b) ANFO

El ANFO es un explosivo convencional empleado en múltiples minas del mundo, cuya densidad está en el orden de 0,84 g/cm³ y cuya composición está basada en 94% de NA y 6% de Petróleo, y también es un ingrediente clave para la fabricación de ANFOS Pesados,

c) Emulsiones

Las emulsiones están dentro de un conjunto de explosivos, este conserva las peculiaridades de los hidrogeles, este mejora ambas particularidades esenciales como la energía y la resistencia al agua. Las particularidades de estos bienes comenzó a inicios de la década de los sesenta, cuando se pone en claro las características necesarias de un detonante para que se cause el proceso de explosión, esto debido a la combinación de una sustancia oxidante y un aceite mineral.

d) ANFO pesado

El ANFO Pesado, es una composición de ANFO con Emulsión Base, es un aspecto en el campo de los detonantes y presenta unos orificios intersticiales que logran ser ocupados por un detonante líquido como la Emulsión que actúa como una matriz energética.

e) Explosivos Gasificados

Es una solución oxidante acuosa dispersa en una fase continua oleosa, la que se sensibiliza recién en la operación minera, mediante la dosificación de sales oxidantes químicamente balanceadas (gasificante), entregando al taladro una mezcla explosiva de menor densidad, mayor viscosidad, rapidez de detonación, Presión de explosivos y resistencia al líquido que los Heavy ANFOs,

f) Parámetros de Voladura de Banco

Son todas aquellas variables que son controladas a través de los diseños de voladura, en términos generales son las denominadas variables controlables de una voladura, las variables que no se controlan en una voladura son todas aquellas relacionadas a los macizos rocosos donde la mano o la acción del hombre no puede modificarlas,

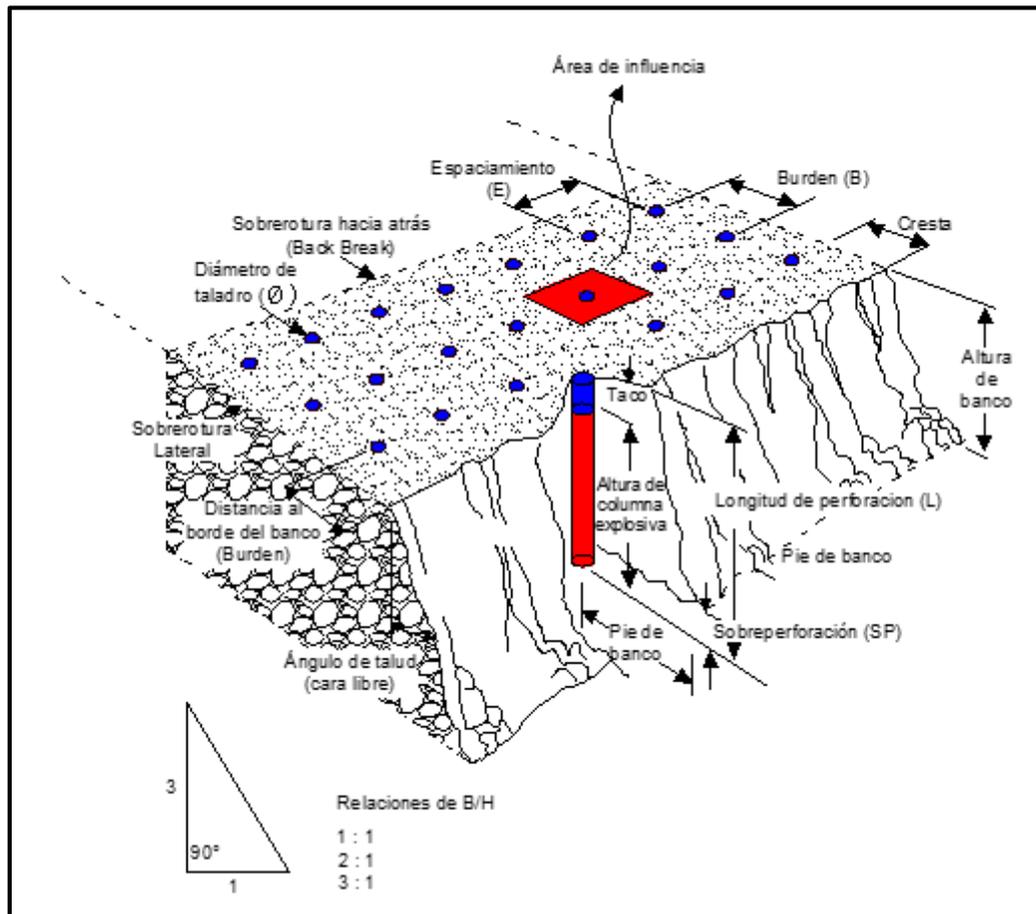


Figura 5, Parámetros de voladura

Fuente: Manual práctico de voladura – EXSA (Nota bibliográfica)

2.2.2.8. Sectores donde se Produce Fragmentación Guesa

Un macizo rocoso es un medio interrumpido, diverso, anisotrópico, y sus particularidades físico/mecánicas transforman de un espacio a otro, esta diferenciación en las particularidades, implícitamente se muestran en interrupciones de pocos metros perturbando los consecuencias en las voladuras cuantiosamente. Ante este suceso, es que el Especialista que delinea las voladuras deberá de tomar en deferencia toda esa diferenciación de permutas litológicos para llegar a lograr una participación de igualdad de al menos 80% en la dimensión de los gravas deseadas.

En el proceso de segmentación, concurren varias secciones predispuestas donde se genera una segmentación sub estándar. Los espacios donde existe elevada tendencia a obtener segmentación fuera de las clases planificadas, las cuales son:

a) En las caras libres

El perfil limpio, por lo corriente está Pre- fraccionada o ya pre- dispuesta por el back break de la explosión preliminar, lo cual crea que los vapores beneficio de la explosión del detonante. En este asunto, cuando está en este estado, el detonante simplemente genera un resultado de cisura o esfuerzo en el macizo rocoso, por lo tanto, es necesario dejar una mínima capa de material con el propósito de compensar el estado antes indicada, además de acceder un conveniente apilamiento del material volado, y de esta cualidad evitar el deslizamiento excesivo del mineral, situación que resulta en el ahuecado de las palas al poseer una pila dilatada y de elevación corta.

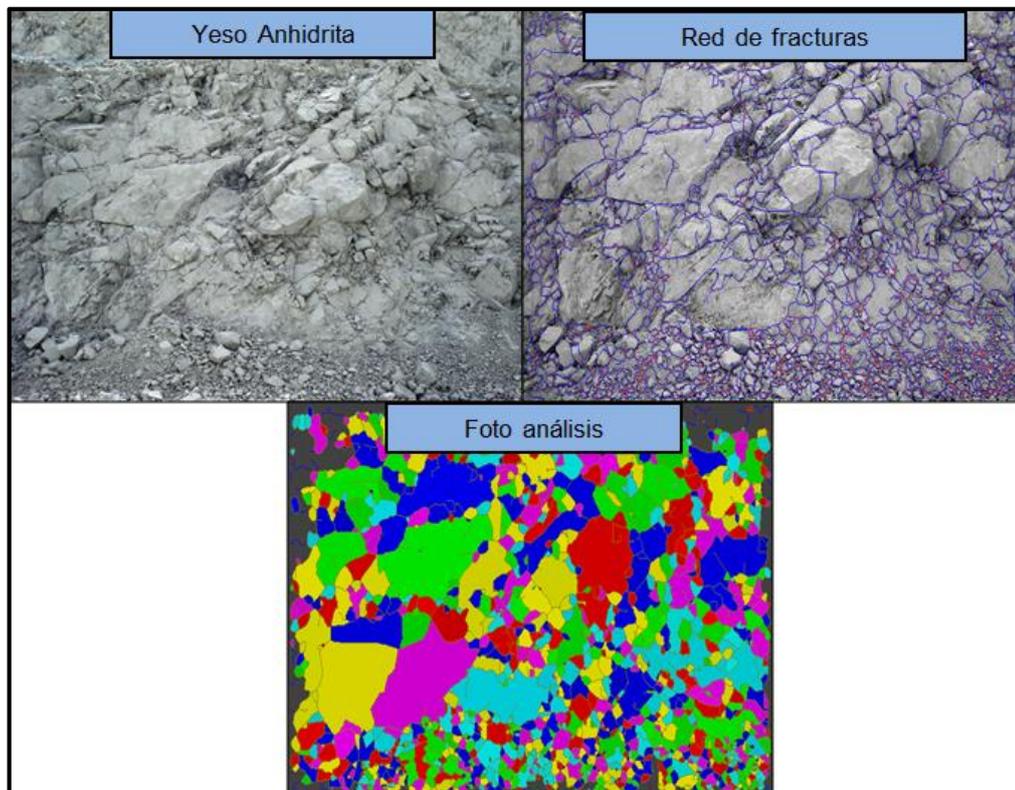


Figura 6, Cara libre: Macizo Rocosó Pre fragmentado

b) En la región del collar del taladro

En esta región, la presencia de material grueso es común por el macizo ya sufrió un shock anterior debido de la explosión preliminar donde se observan zonas de segmentación.



Figura 7, Collar de taladro con material fragmentado

c) diseño de la línea límite de minado,

Es necesario cuidar las paredes de los taludes para lograr un minado continuo, con ello se garantiza cumplir las líneas de planificación, por consecuente las voladuras de inspección debe hacer con elementos de carga convenientes para no crear inestabilidades,

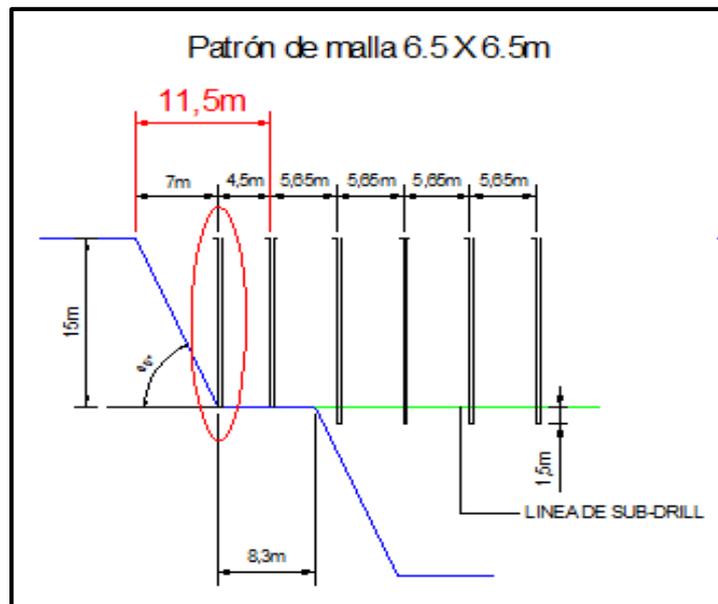


Figura 8, *Sección de perforación*

d) En los contornos de la voladura,

Se emplean tiempos prolongados de los back Breaks para que sean menos dañinos para el macizo rocoso circundante, lo cual se utilizan controles de explosivos y secuencia de tiempo

2.2.3. Restricciones en el Proceso de Voladura de la Mina Toquepala

Nos referimos a todas las restricciones de orden operacional y de diseño que limitan una buena aplicación de voladuras, estas restricciones o condiciones que se presentan en el terreno propiamente dicho hacen que los resultados en cuanto a fragmentación de material y cuidado de las paredes del tajo no sean los planificados y esperados, por lo que es muy importante enfrentarlos para generar acciones correctivas tendientes a mitigar o minimizar estas condiciones, Veamos las más importantes,

- Disparar proyectos de voladura improvisados,
- Presencia de agua,
- Disparos para inicio de nivel,
- Disparos sin cara libre,
- Geometrías de los Proyectos de Voladura,
- Geometrías largas y delgadas,
- Geometrías con número reducido de taladros,

2.2.3.1. Planificación Inadecuada en las Aplicaciones de Voladura,

Muchos de los factores por lo que no se logran resultados óptimos de fragmentación, son factores antrópicos, ya que los trabajadores no son capaces de dar sentido a sus acciones por lo que es importantes que antes de alguna acción se planifique con anticipación

- Planificación inadecuada en las voladuras,

- Ausencia en el seguimiento a las voladuras,
- Definir modelos de las mallas de perforación y voladura,
- Reuniones diarias sobre la planificación de la voladura,
- Elaboración de pie de datos relación al diseño y consecuencias,
- Seguimiento a los consecuencias de las voladuras,

2.2.3.2. Consecuencias de la fragmentación gruesa

La explosión de rocas, es la etapa inicial de conminución del mineral fraccionado, es muy importante la jerarquía el rendir a la mayor participación de la energía química del detonante para causar un conveniente encargo mecánico en la piedra.

Uno de los semblantes para calcular la performance de las explosiones que ejecutamos en la mina, es el aspecto de la segmentación, el cual tiene que estar agrupado a las consecuencias de seguridad, oscilación y permanencia. La segmentación, compone, una de las inconstantes primordiales para el progreso de una buena producción en los trabajos de cargar, acarrear y chancar el mineral, este semblante, esta muy separadamente para esparcir una buena rapidez en las ordenamientos de minado.

- Incremento de los ciclos de minado,
- Consumo acelerado de componentes de los equipos de mina
- Retraso del plan de minado
- Incremento de voladura secundaria
- Incremento global del costo de minado

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Fragmentación

Es la fractura de la roca en el área de la línea de mínima resistencia (Burden) como resultado ejercida por los explosivos.

2.3.2. Burden

El trayecto del taladro a la cara independiente más cercana, encaminado perpendicularmente al eje del taladro.

2.3.3. Espaciamiento

Se define como la trayecto entre taladros de una igual fila perpendicular al burden,

2.3.4. Taladro

Cavidad cilíndrica como resultado de una excavación en la cual, se coloca el detonante de acuerdo a un diseño anterior

2.3.5. Explosivo

Es toda sustancia sólida o líquida, que al recibir un estimulante adecuado, en un infinitésimo de tiempo, se convierte en otras sustancias más estables, generalmente gaseosas; acompañados de una liberación de calor y altas presiones.

2.3.6. Agentes explosivos

Consisten en una composición de combustible y agentes oxidantes, ninguno de los cuales se los considera explosivos, Un agente explosivo consiste de nitratos inorgánicos y combustible de carbón, puede contener otras sustancias no explosivas así como polvo de aluminio o ferrosilicona, con el fin de agrandar su densidad, El aditamento de explosivos y calor de detonación, por ejemplo TNT, a este tipo de mezcla combina la clasificación de agentes explosivos a explosivos, Debido a su insensibilidad los agentes explosivos deben ser inicializados por un explosivo,

2.3.7. ANFO

Mezcla de nitrato de amonio-petróleo diésel, Agente explosivo que no contiene otros ingredientes esenciales fuera de nitrato de amonio "prilled" y el petróleo diesel N° 2.

2.3.8. Cara libre

Superficie de contacto con el ambiente teniendo como referencia un cubo, es preciso para la formación y regreso de las ondas de tensión relejadas que estimulan la segmentación.

2.3.9. Malla

Es la manera geométrica en la que se colocan los taladros de una voladura, teniendo en cuenta fundamentalmente la relación burden y espacio.

2.3.10. Desplazamiento

Consiste en el movimiento de la aglomeración rocosa triturada como resultado de la ejercida por los detonantes hacia una dirección determinada.

2.3.11. Voladura de rocas

Es un proceso tridimensional, en la cual las coacciones generadas por explosivos intrínsecamente de taladros, originan una zona de elevada concentración de energía que producen dos efectos dinámicos: segmentación y desplazamiento.

2.3.12. Factor de carga

Es la cuantía de explosivo en peso que se utiliza para segmentar una tonelada métrica de material de banco, Técnicas de voladura, Procedimiento que conciertan la variedad de etapas a desarrollarse en la fractura de macizos a fin de inclinar geotécnicamente el yacimiento y facilitar la explotación del mineral.

2.3.13. Carga Explosiva

Conjunto de material explosivo manejado en un taladro de explosión, o módulo de voladura.

2.3.14. Explosivo gasificado

Está conformada por la emulsión Quantex, Nitrato de Amonio Quantex y un agente sensibilizante en base a nitrito de sodio, semejante a las proporciones del Heavy ANFO 73 (70% de emulsión y 30% de ANFO), se consideran estas proporciones por ser las más ideales y estables.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Métodos y alcance de la investigación

3.1.1. Método

Los principales métodos que se utilizarán en la presente investigación serán: Análisis, síntesis, descriptivo y estadístico, Por el tipo de investigación, en razón que se buscará conocer los beneficios que se obtiene en los costos de voladura de la mina Toquepala mediante la aplicación de explosivo gasificado

3.1.2. Alcance

El presente plan de investigación esta direccionado a cubrir las expectativas de optimizar la fragmentación de los diferentes tipos de macizos rocosos de la mina Toquepala, por lo tanto, el alcance general tiene la cobertura total en la aplicación del explosivo gasificado a toda la operación de voladura de las diferentes fases de minado de la mina Toquepala, propiedad de Southern Perú Copper Corporation,

3.2. Diseño de la investigación

Por las características de los tipos de datos recopilados, se utilizó un diseño experimental, Se probó la tecnología explosiva en los proyectos de voladura de todas las fases de desarrollo de minado de la mina Toquepala, Las principales técnicas que utilizaremos en la presente investigación serán:

- Evaluación de la fragmentación,
- Dilución del mineral,
- Análisis de los pisos de banco,
- Condiciones ambientales de la voladura,
- Factores de carga por tipo de roca,

3.3. Población y muestra

3.3.1. La población

La población que se estudiará será las voladuras del área de Perforación y Voladura de la mina Toquepala,

3.3.2. Muestra

Nuestra muestra para la población serán los proyectos de voladura a desarrollarse en las fases de minado de la mina Toquepala,

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Introducción del explosivo gasificado

En la actualidad en la Operación Minera de Toquepala, se viene empleando la tecnología explosiva Quantex en todos los macizos rocosos de la mina, producto de haber ejecutado pruebas técnicas con el explosivo en mención, las mismas que han sido sometidas a evaluaciones a través de diferentes mediciones como fragmentación, presencia de humos naranjas, cuidado de paredes, vibraciones y finalmente el costo de la voladura, en todas estas evaluaciones y análisis, los resultados fueron satisfactorios comparado con la mezcla explosiva tradicional que se venía empleando por años,

Para la introducción del producto se ha tenido que implementar de infraestructura como silos de emulsión, asimismo, el preparar los camiones fábrica acorde a la nueva tecnología explosiva, también ha implicado elaborar procedimientos de trabajo seguros a fin de brindar calidad en la operación de fabricación y carguío del producto en el taladro, y finalmente la implementación de la Tecnología Quantex se ha extendido en preparar y capacitar al personal idóneo para la puesta en marcha del producto,

Actualmente el Servicio de Voladura está plenamente capacitado y brinda una operación de voladura con altos estándares de calidad, lo cual se refleja en los buenos resultados de productividad de las operaciones subsiguientes a la voladura como son el carguío, transporte y chancado, El obtener una fragmentación más fina repercute en que las operaciones antes mencionadas con lo cual decrecen los costos globales de minado, por lo que la mina Toquepala opto por el empleo total de la mezcla explosiva Quantex en todas sus voladuras.

4.1.1. Logística de implementación de la Tecnología gasificada

La implementación de la Tecnología Explosiva en las aplicaciones de voladura ha implicado un gran esfuerzo para el personal involucrado, se ha desplegado toda una infraestructura de instalación de silos y almacenes, asimismo, se ha preparado al personal para que se adapte a las características técnicas del producto.



Figura 9, Infraestructura instalada: Silos de Emulsión



Figura 10, Almacenamiento de Nitrato Quantex

4.2. Objetivos del empleo del explosivo gasificado

- Reducir de forma total la generación los gases nitrosos y/o humos naranja en las voladuras de los diferentes sectores de minado de la mina Toquepala,
- Mejorar los resultados granulométricos de fragmentación para incrementar la producción en las operaciones unitarias posteriores a la voladura
- Reducir los costos unitarios y globales de voladura mediante la aplicación de la tecnología Quantex en las operaciones de voladura de la mina Toquepala,

4.3. Definición del explosivo gasificado

Está compuesto por Nitrato de amonio de alta densidad que pasa por un proceso de tratamiento para optimizar su uso como explosivo, Su alta densidad, permite generar el equilibrio en la mezcla explosiva gasificada, El proceso de gasificación sensibiliza a la emulsión bajando su densidad, el nitrato Quantex aporta mayor energía a la mezcla final altamente sensitiva,

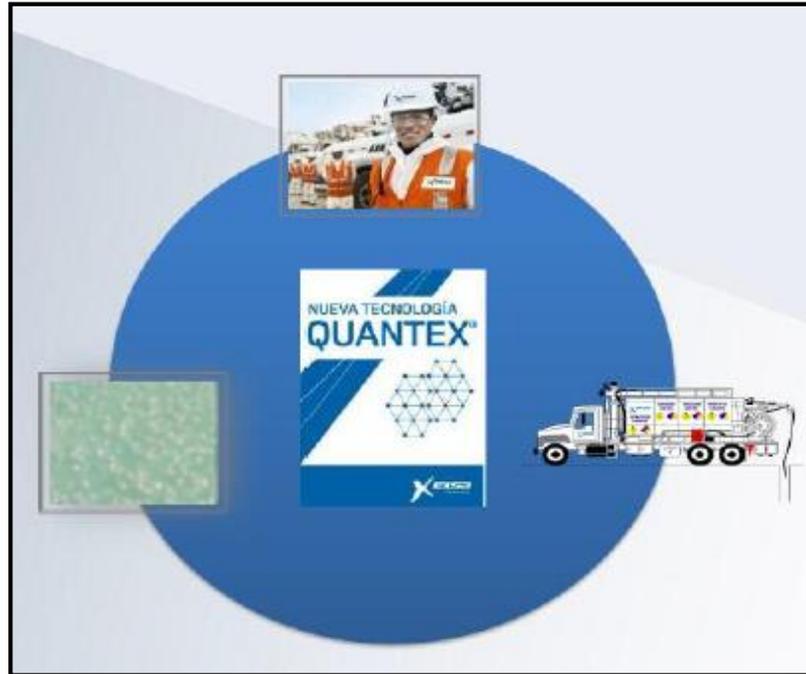


Figura 11. Tecnología explosiva Quantex

El explosivo gasificado está conformada por la emulsión Q, Nitrato de Amonio y un agente sensibilizante en base a nitrito, semejante a las proporciones de mezcla explosiva en base a un ANFO pesado 73 (70% de emulsión y 30% de ANFO), de acuerdo a los estudios realizados las proporciones de la mezcla son las más estables y las que tiene mejor efecto rompedor.



Figura 12. Composición de la mezcla explosiva Quantex



Figura 13. Mezcla Explosiva Quantex

4.3.1. Nitrate de Amonio Quantex

El nitrato de amonio se emplea en una mezcla explosiva gasificante 73 a un menor costo, Cuando se habla del N,A Quantex, se habla de un nitrato de amonio de alta densidad, que aporta energía durante el proceso de detonación por la característica de sus prills, los cuales son más compactos y de mayor volumen que el nitrato poroso convencional, Asimismo, únicamente requiere el 3% de diésel para poder ser usada en la mezcla explosiva Quantex 73.

Tabla 4. Densidades y porcentajes de absorción Quantex

QUANTEX	Densidad
Nitrato de Amonio	0.94 ± 3% g/cc
ANFO	0.98 ± 3% g/cc
Porcentaje de Combustible	3%

4.3.2. Slurrex G: Emulsión matriz

La Emulsión Q (antes denominada Slurrex G) es una emulsión gasificable mediante aditivos químicos, que al estar en contacto con la solución gasificable, permite que dicha mezcla sea sensible a un iniciador de alta potencia

Explosivo	Slurrex G	
Viscosidad	21500 Cp	
Velocidad	20 rpm	
Densidad	1.356 gr/cc	
Temperatura	35°C	

Figura 14. Emulsión Q

Fuente: Reportes EXSA SA - Mina Toquepala

4.3.3. Solución para gasificar

La solución está fundamentada en base a Nitrito de Sodio que al mezclarse con la emulsión produce una reacción química formándose burbujas de nitrógeno que genera un aumento de volumen al que denominamos esponjamiento, reduciendo su densidad, El tamaño y distribución de dichas burbujas determinan la velocidad de detonación del agente, Describimos las siguientes características:

- A medida que progresa la reacción química, disminuye la densidad de la Mezcla Explosiva Quantex,
- Es una solución acuosa de nitrito de sodio, en una concentración adecuada para su estabilidad.
- La coloración sirve de indicador, para observar que la emulsión gasificable está accionando con la solución de nitrito, Es ligeramente más denso que el agua.
- El nitrito de sodio reacciona con el nitrato de amonio que prepara la emulsión, para constituir el gas nitrógeno, La rápida producción de burbujas de nitrógeno, se conoce como causa de gasificación, o “sensitización química”.

- Es una reacción exotérmica, cuya prisa depende vigorosamente de la temperatura, el Ph, la concentración de nitrito, la viscosidad de la emulsión y la homogeneización,
- El resultado de la reacción son las burbujas de nitrógeno que permanecerán embebidas en la masa de emulsión,

En otras palabras, es una sal oxidante en solución que posee una coloración especial para su correcta visualización al integrarse a la emulsión matriz para gasificar,

El porcentaje de solución para gasificar determina la densidad final del ANFO pesado gasificado o emulsión gasificada, es decir existen distintos porcentajes de esta sal en solución para obtener densidades en una rango de 0,90 a 1,24 gr/cc.



Figura 15. Proceso de Gasificación

4.3.4. Camión Fábrica para Mezcla Explosiva Gasificada

En la actualidad, contamos con 05 camiones fábrica, están implementados de forma total para el carguío de la Mezcla Explosiva Gasificada, Estos camiones tienen las siguientes características:

Tiene las siguientes características

- Flujo de ME Quantex 73: **630** kg/min,

- Velocidad de Bomba : 1500 rpm
- Presión de bombeo : 45 psi
- Porcentaje de Solución G : 0,10 - 0,11%
- Flujo de Solución G : 0,8 lt/min
- Flujo de Petroleo + Aceite : 1,6 gl/min
- Porcentaje de Absorción de Petróleo : 3%

4.3.5. Controles de calidad del explosivo gasificado

Antes de la implementación total de la Mezcla Explosiva Quantex en las aplicaciones de voladura en la Mina y hasta el día de hoy, el producto es sometido a diferentes evaluaciones técnicas a fin de garantizar su utilización con todos los estándares de calidad, estas evaluaciones son previas al desarrollo de las voladuras y en otras son posteriores a fin de cuantificar registros de control y de esta forma garantizar los resultados granulométricos y ambientales del producto que es materia de estudio,

4.3.5.1. Densidad de la Mezcla Explosiva

Esta densidad solo se puede medir con precisión en laboratorio, haciendo la mezcla en recipientes y agregando la solución de nitrito de sodio (gasificante), Como ya se mencionó anteriormente la formación de burbujas de aire incrementa el volumen y reduce la densidad del producto en diferentes rangos de tiempo, En resumen:

- En el proceso de carguío con camión, la mezcla ingresa al taladro ya con algún grado de gasificación que se inició en el mezclador estático, por la tanto la muestra de mezcla más inicial que podamos obtener en campo siempre tendrá menor densidad que la inicial,
- Sin embargo esta densidad medida en la boca de la manguera o brazo de descarga puede usarse solo como referencia, es muy susceptible a detalles operativos como tipos de mezclador, longitud de manquera, velocidad de flujo y paradas en el bombeo, etc,



Figura 16. Controles de Densidades

4.3.5.2. Composición del explosivo gasificado

Ya mencionamos en los puntos anteriores, que la Mezcla explosiva Quantex, está conformada por la emulsión Quantex, Nitrato de Amonio Quantex y un agente sensibilizante en base a nitrito de sodio, semejante a las proporciones del Heavy ANFO 73 (70% de emulsión y 30% de ANFO), se consideran estas proporciones por ser las más ideales y estables con las que se garantizan los comportamientos energéticos y ambientales del producto que es materia de estudio, Veamos el siguiente esquema de conformación de la Mezcla Explosiva Quantex,

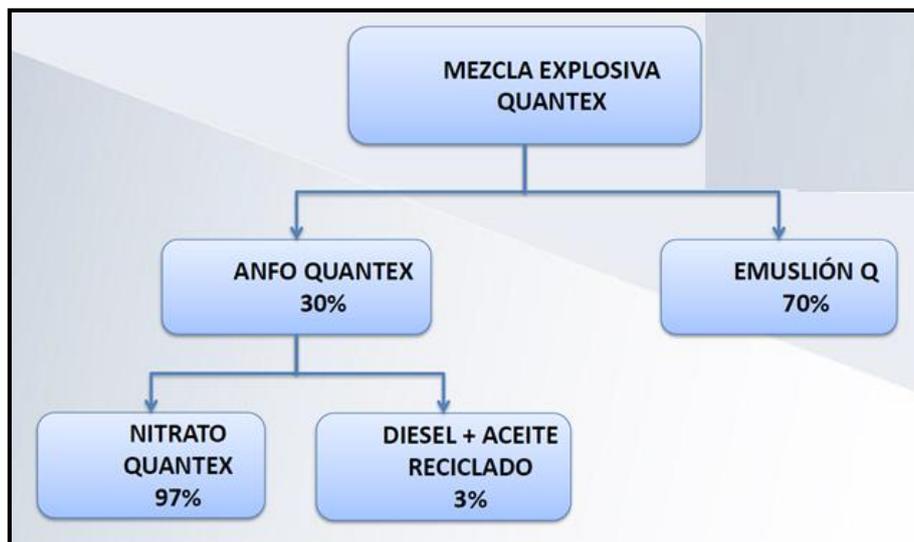


Figura 17. Mezcla Explosiva Quantex

4.3.6. Registros de Velocidad de Detonación de la Mezcla Explosiva

En las mezclas de ANFOs pesados, al aumentar el porcentaje de emulsión tiene un efecto inverso a la sensibilidad de la mezcla, esto es debido al nitrato de amonio, por ello las mezclas de ANFOs pesado tiene dificultad de detonar, no desarrollando elevado VOD a lo largo de la columna explosiva, por otro lado las que presentan elevada emulsión, se utilizan para otros métodos

La siguiente figura muestra la predisposición al acrecentamiento de la VOD con la densidad, Las mezclas basadas en emulsión Quantex, tienen una relación cuasi lineal mientras se mantenga la sensibilidad,

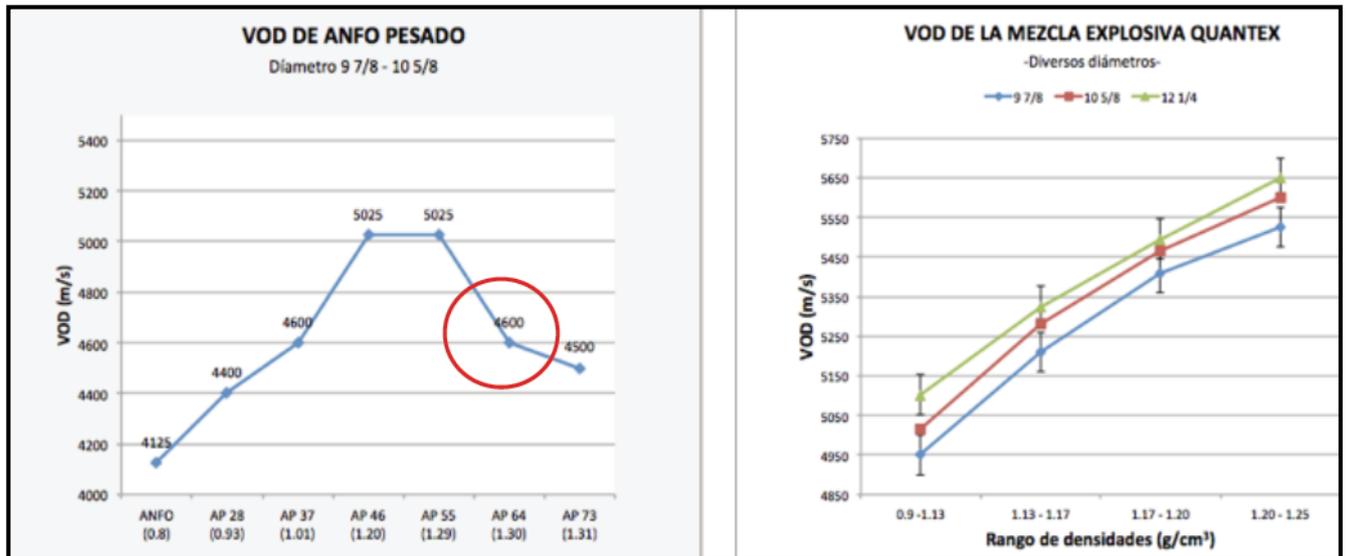


Figura 18. Comparaciones de VOD

4.3.6.1. Gases Nitrosos o Humos Naranjas

La voladura crea cierto cuerpo de vapores y polvos, estos se conservan en el medio durante un periodo prolongado hasta que se disipa naturalmente o forzada, por lo que la revisión de la voladura se realiza luego de la disipación, Con el Explosivo Quantex, se evita la emanación de humos anaranjados,



Figura 19. Gases en las voladuras

4.4. Diseño de voladuras con la mezcla explosiva Quantex

4.4.1. Diseño de Perforación

Para ensayos de voladura con la Mezcla Explosiva Quantex, no se han perturbado en lo absoluto las cuantificaciones de excavación, todos ellos se han sostenido con iguales dimensiones en cuanto a sus parámetros en todos los sectores de la mina Toquepala, Los parámetros de perforación, son ; de

11,0 - 12 ¼ Pulgadas de diámetro de perforación, tiene un patrón triangular equilátero de 6,5m a 9,0m, para la malla de perforación, 15 m de altura de banco y de 1,5 a 2,0m sobre perforación

4.4.2. Diseño de Patrones de Voladura

Con la aplicación de la Tecnología Explosiva Quantex se han modificado los patrones de Factor de Carga en función al esponjamiento del explosivo, con lo cual se redujo esta parámetro y por ende el precio unitario de la voladura, estos semblantes en términos de costo y presupuesto lo estaremos detallando más adelante en el desarrollo del trabajo de investigación,

4.4.3. Diseño de Columnas Explosivas

El determinar la sensibilidad y las bondades del explosivo y la estabilidad que posee la mezcla explosiva en base el Heavy 73, y los resultados de fragmentación obtenidos se ha determinado el diseño por sector de los diferentes diseños de columnas explosivas, las cuales las adjuntamos a continuación con una referencia del antes y el ahora:

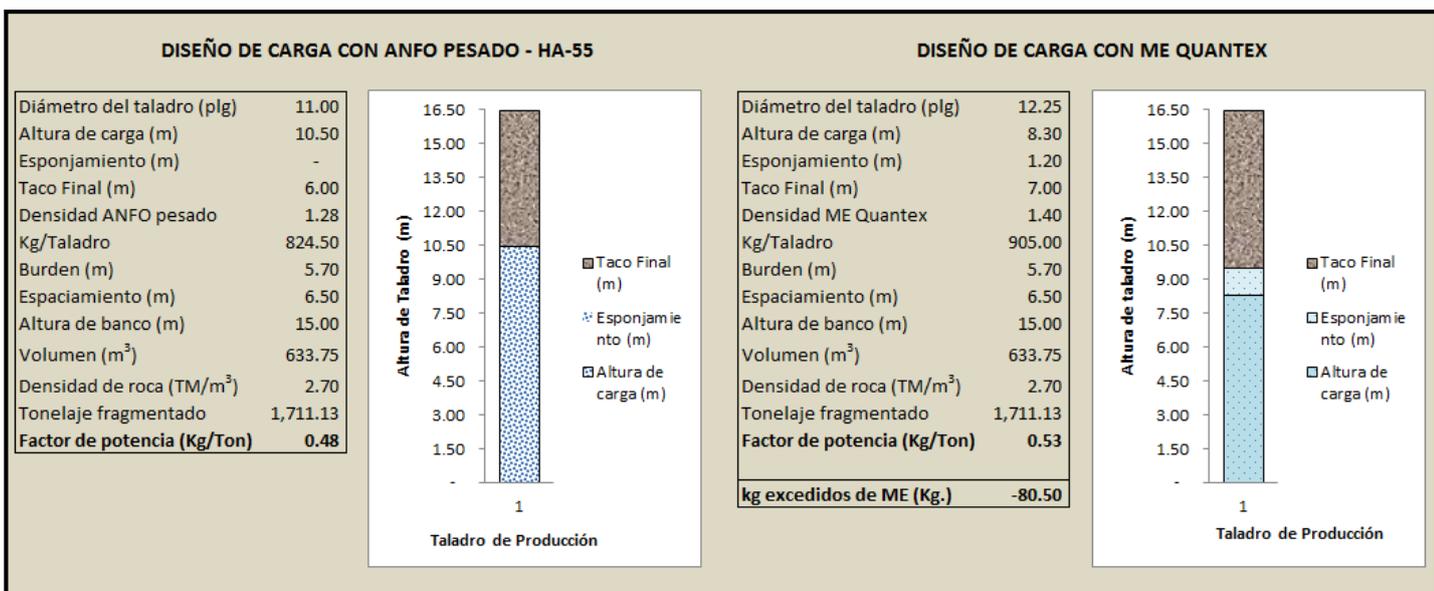


Figura 20. Diseños de Columnas Explosivas para roca dura

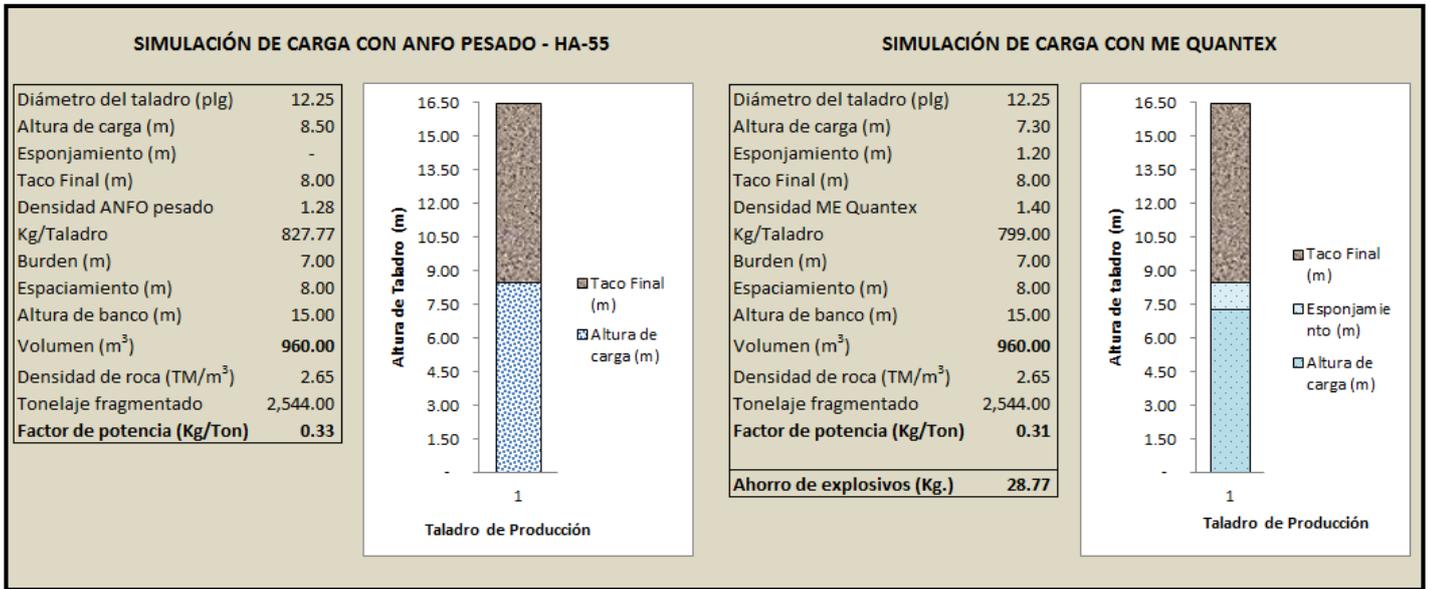


Figura 21. Diseños de Columnas Explosivas para roca suave

4.4.4. Diseño de Secuencia de Detonación

Veamos el siguiente esquema que muestra una serie de voladura:

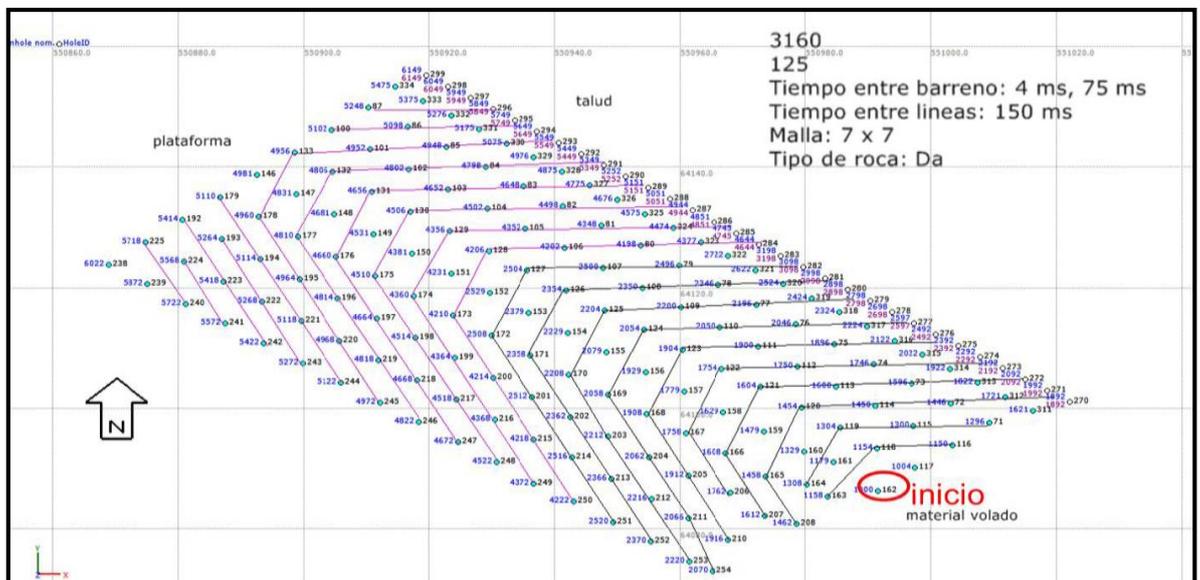


Figura 22. Diseño de Secuencia de Voladura Electrónica



Figura 23. Resultados Visuales de Fragmentación

4.1. Evaluación de los resultados de las voladuras

Esponjamiento y Geometría de la Pila

La disposición de la pila está administrada por; altura de banco, burden, espaciamento los cuales son variables de diseño, elementos de agotamiento de explosivo y sucesiones de encendido y tiempos de demora,



Figura 24. Forma de la Pila de Fragmentación

4.4.5. Análisis de los Pisos de Banco

Prontamente del minado de las palas, las cuales compensan al dejar en el piso de acuerdo a una cota topográfica fundada en la disconformidad de las elevaciones de banco, es significativo que se irradie un piso plano,



Figura 25. Pisos nivelados después del minado

4.4.6. Indicadores cuantificables de productividad en las operaciones unitarias

4.4.6.1. Estadísticas de Fragmentación

La forma más común de medir la fragmentación de los diversos frentes de minado en la Mina Toquepala, es a través de ejecutar estadísticas en función a los tamaños de los fragmentos estableciendo los rangos de medición, para de acuerdo a ello definir los intervalos granulométricos,

Definición del P50 y P80.- Cuando apareció la manera de medir los resultados de segmentación, se tiene como referencia la participación promedio como módulo de medida para los consecuencias granulométricos, es decir el P50, sin embargo, por abajo y encima del 50% existe gran movilidad en el tamaño de los segmentos, por lo que a través del tiempo, se estimó que el excelente acercamiento para calcular la eficacia de la segmentación, es validar la medida

en un participación mayor de aproximación, que en este caso se refiera al parámetro del P80, que es el 80% de material característico que pasa por un determinado tamiz o abertura, Hoy los investigadores quieren plasmar los estudios en función al P90, cuya definición estaría referida al porcentaje del 90%. Aparte de definir los parámetros de P50 y P80, es importante conceptualizar la variable del Índice de Uniformidad que está definido por la precisión de la perforación y que cuyos resultados de granulometría estarán direccionados a la elaboración de un tamaño característico o promedio en función al P80

Se adjunta un cuadro estadístico donde se compara los porcentajes del P80 en función a los últimos años transcurridos, también es importante mencionar que los rangos de fragmentación, están dados en función a las resistencias litológicas de los macizos rocosos,

4.4.6.2. Porcentaje de Fragmentación Gruesa

En la mina, en función a las estadísticas de fragmentación, y los controles granulométricos que deben tener en la Planta de Chancado, hemos definido los siguientes parámetros de medición, lógicamente los resultados deben estar por debajo de los rangos sugerido a continuación: debe existir 80% de orden inferior 30cm, el 10% del material debe exceder el 1 cm; El 80% del material fragmentado debe estar en el orden de 30cm a menos,



Figura 26. Material Sobre dimensionado

4.4.7. Medición de los resultados de fragmentación

El método de óptica digital ayuda a la medida de la segmentación, es un instrumento viable y práctica, además con el desarrollo del software para mostrarse de acuerdo los límites de los segmentación en una pila de material planeado y lograr distinguir un segmento de otro.

El Método Wip Frag empieza con un dibujo de material abrupto y convertirlo en una malla de segmentos, Posteriormente mide los segmentos, realizando un análisis estadístico de la segmento. El software admite cotejar la malla consecuencia con la imagen original pudiéndose corregir insuficiencias manualmente.

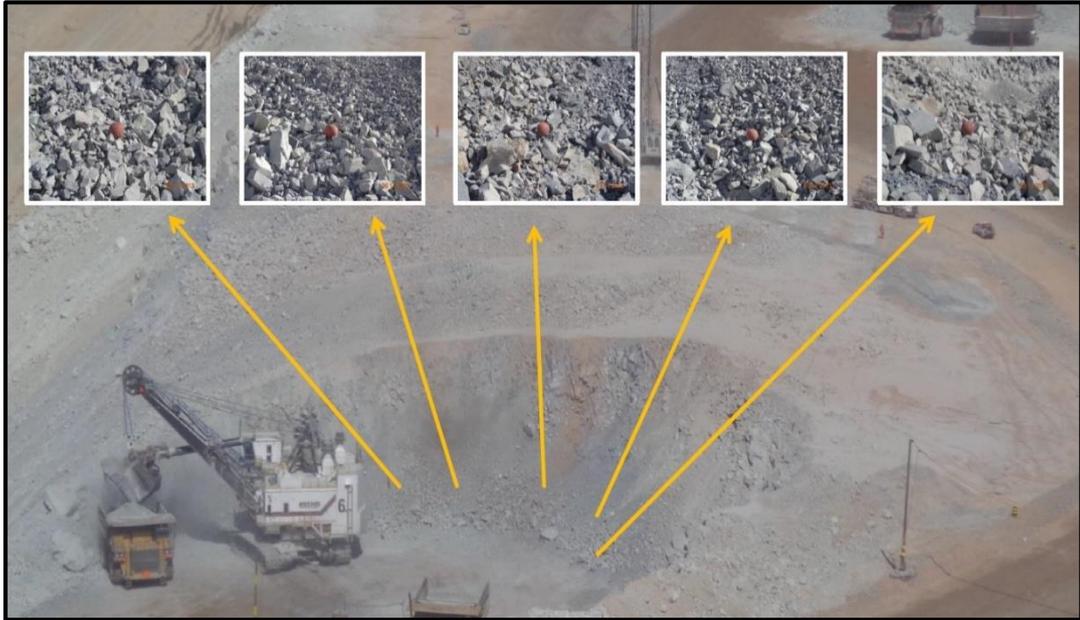


Figura 27. Roca volada para análisis de Wip Fra

Para analizarlo se utiliza una cámara, o videocámara, Las grabaciones son las que ayudaran mejor en la obtención de recursos necesarios como video, eliminar retrasos, y permitiendo mezclar retratos de distintos aproximaciones para optimizar las consecuencias y el valor. La estación del trabajo Wip Frag, asimismo accede la afiliación de imágenes grabadas, entre otras cosas

Además existe el monitoreo real, consta de videocámaras estable encaminadas en tolvas, fajas, etc, Las fotografía son capturadas automaticas en momentos o maniobradas por sensores.



Figura 28, Muestreo de fragmentación en mina

Una vez incrustadas las fotos en el Software, este cataloga cada uno de los fragmentos, para posteriormente, generar la curva granulométrica, Veamos las siguientes figuras,

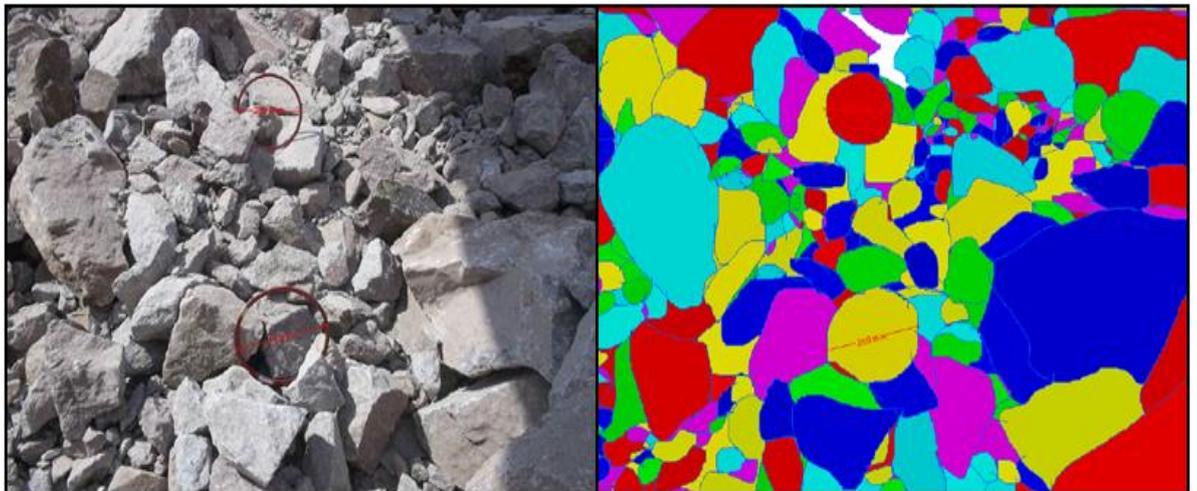


Figura 29, Foto análisis de roca volada: Software Wip Frag

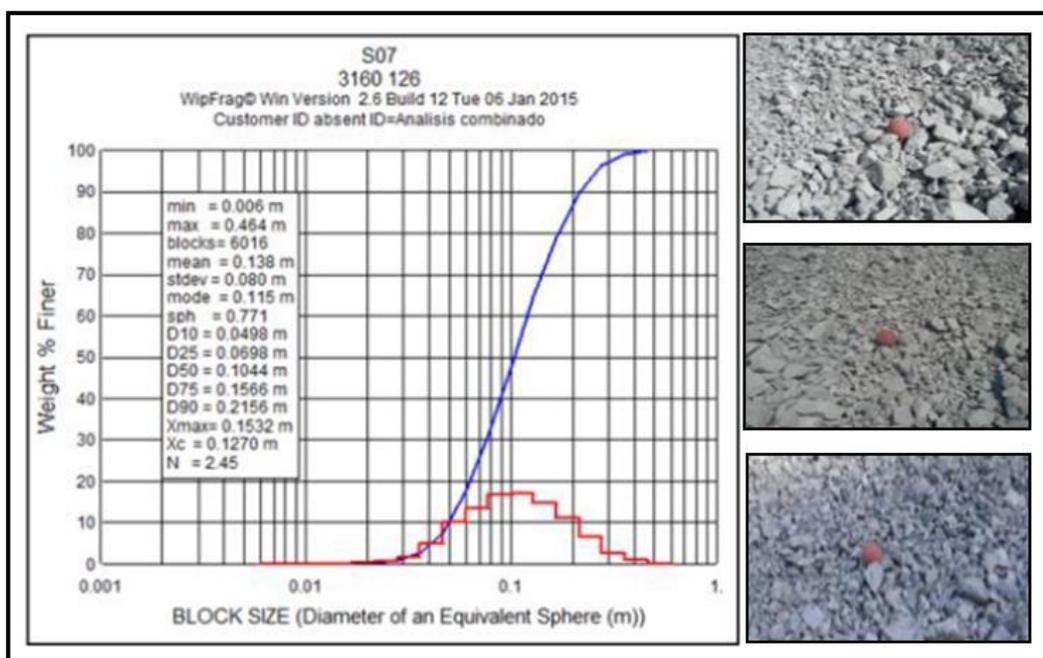


Figura 30. **Curva Granulométrica con Explosivo Gasificado**

Fuente: Elaboración propia: Software Wip Frag

4.4.8. Factor de Carga Explosiva

La energía de la explosión se usa para desarrollar el proceso de segmentación, con el indicio de que el material se triture en la mina por lo que la energía de la explosión se representa un mínimo costo que la energía eléctrica o mecánica, en esas contextos es transcendental aprovechar el mínimo precio en los tecnologías de conminución.

Tabla 5 **Comparación de Factores de Carga HA55 y Explosivo Quantex**

Mezcla Explosiva	Densidad Inicial (gr/cc)	Densidad Final (gr/cc)	Factor de Potencia (Kg/Tn)	Factor de Carga (Kg/m3)	Costo Unitario Explosivo (\$/kg)	Costo Total Explosivo (\$/Tn)	Diferencia Porcentual
HA-55	1.28	1.28	0.48412	1.258712	0.563	0.272	-12.11%
ME Quantex 73	1.4	1.16	0.457014323	1.18823724	0.524	0.239	

Fuente: Elaboración propia:

4.1.1. Chancado Primario y Molienda.

La obtención de una perfecta voladura en cuanto a igualdad de segmentos y consecuencias granulométricos por abajo de la grieta del set de chancado (8 pulgadas aproximadamente), implica mínimo dispendio de energía eléctrica y mecánica en el asunto de chancado, y por ende, los costos unitarios de chancado esencial por tonelada menoscaban, no olvidemos que dentro del coste global de mina, los costos de chancado primario y molienda son los más elevados por el consumo de energía, La etapa posterior al chancado primordial es la molienda, que consiste en reducir los fragmentos a materiales más finos, en las curvas de fragmentación, generalmente los participaciones por debajo del tamaño medio son considerados como finos, es decir, la voladura puede contribuir a generar materiales finos para ayudar en la operación de molienda.

CONCLUSIONES

- PRIMERA** : Para la obtención de un buen resultado es muy importante que el diseño de perforación sea el correcto, en términos de tener y conservar los parámetros de voladura como espaciamentos diseñados, profundidades requeridas, geometría adecuada de diseño, y finalmente el número de taladros, a mayor número de taladros mejores resultados en cuanto fragmentación,
- SEGUNDA** : La aplicación de la Mezcla Explosiva Gasificada, nos ha permitido efectuar voladuras masivas, es decir, se ha incrementado el número de taladros por proyecto de voladura, con ello, los resultados granulométricos de fragmentación han permitido generar ganancias de productividad en las operaciones posteriores a la operación de voladura, inclusive podemos manifestar que las operaciones de chancado y molienda también se han visto afectadas por esos buenos resultados en cuanto a fragmentación,
- TERCERA** : Con la aplicación de la Tecnología Explosiva Quantex en los diseños de voladura de la Mina Toquepala, se han mitigado en un 90% la generación de humos naranjas y gases nitrosos, que cuya emanación ocasionan daños al ambiente y al personal que circunda en las operaciones de mina, La Mezcla Explosiva Quantex, tiene un equilibrio adecuado en cuanto al balance de oxígeno y sus componentes y su proceso de fabricación propiamente dicho, haciendo las voladuras más limpias en cuanto a generación de gases,

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAMAC, Alfredo: Curso de Voladura de Rocas; Publicaciones Universidad Nacional del Altiplano; Puno; 2005,
2. CAMERON K, McKenzie: Tecnología de Voladura de Roca; Publicaciones Universidad Nacional de Ingeniería; Lima; 1998,
3. CAMERON K, McKenzie: Foco en Granulometría de Voladuras; Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo 2006,
4. CAMERON K, McKenzie: Las Limitaciones para alcanzar la excelencia en la tronadura – ASIEX – Chile 2007,
5. DYNNO NOBEL: Optimización de Diseños de Voladura de Producción – Publicaciones Dyno Nobel – Chile 2004,
6. ENAEX SA: Manual de Voladura – Chile 2004,
7. EXSA SA: Manual práctico de voladura; Publicaciones EXSA, SA tercera edición 2009,
8. FLOYD, John L.; Técnicas de Voladura Eficiente en Operaciones Superficiales; Ediciones Dyno Nobel; Lima; 1998,
9. HERRERA Manfredo: Optimización y Predicción de la fragmentación, en base a la exactitud de tiempos en el diseño de voladura: Mina Toquepala – Convención Minera 2009,
10. KATSABANIS, Takis y SILVA, Guillermo: Tecnología de Explosivos y Técnicas de Voladura,- Publicaciones U,N,A,- Facultad de Ingeniería de Minas; Puno; 1996,
11. KONYA C.; Manual de Voladura – 2005,
12. LÓPEZ Jimeno, Carlos; LÓPEZ Jimeno, Emilio; PERNIA Llera, José: Manual de Perforación y Voladura de Rocas; Edic, Instituto Geológico y Minero de España; Madrid; 1987,
13. Southern Perú Copper Corporation: Informes Geológicos de La Mina Toquepala – SPCC,
14. Southern Perú Copper Corporation: Informes Geotécnicos de La Mina Toquepala – SPCC,
15. VARIOS AUTORES; Manual práctico de voladura; Publicaciones EXSA, SA tercera edición 2007,
16. VARIOS AUTORES; Manual Técnico de Explosivos Famesa, tercera edición 2010,

17. VARIOS AUTORES; Manual Técnico de Perforadora Sandvik, Titón 600, primera edición; 2005,
18. VARIOS AUTORES; Manual Técnico de Perforadora Sandvik, Cubex 560, primera edición; 2011,
19. VARIOS AUTORES; Toquepala Slide 15 slope stability studies; Southern Perú Copper Corporation, 2001,