



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN Y COSTOS DE VOLADURA UTILIZANDO EL EXPLOSIVO HEAVY ANFO 64 Y ME QUANTEX 73 EN LA CANTERA DE CALIZA CUADRATURA, CAJAMARCA 2019”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de minas

Autor:

Bach. Grimaldo Guzman Mendoza Campos

Asesor:

M.Sc. Daniel Alejandro Alva Huamán

Cajamarca - Perú

2020

DEDICATORIA

A mis queridos padres por apoyarme incondicionalmente en cada momento durante mi formación profesional y a mis hermanos por sus consejos y apoyo para poder alcanzar mis metas y objetivos.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la existencia y permitirme llegar hasta este momento.

Agradecer profundamente a la casa superior de estudios Universidad Privada del Norte, a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por brindarme sus conocimientos cada día en sus aulas.

A todas las personas que apoyaron con su granito de arena para hacer realidad este trabajo de tesis.

Tabla de contenido

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Realidad problemática.....	8
1.2. Formulación del problema	17
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general.....	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Hipótesis.....	17
1.4.1. Hipótesis general.....	17
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	18
2.1. Tipo de investigación	18
2.2. Población y muestra	18
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	19
2.4. Procedimiento.....	21
CAPÍTULO III. RESULTADOS.....	25
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	32
REFERENCIAS.....	35
ANEXOS.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Formato-Características geotécnicas del macizo rocoso de la cantera Cuadratura.....	20
Tabla 2: Formato-Diseño de carga y costos por taladro con HA64 y ME Quantex 73.....	20
Tabla 3: Características de los explosivos Heavy Anfo y Quantex.....	23
Tabla 4: Resistencia a la compresión simple.....	25
Tabla 5: Características geotécnicas del macizo rocoso del proyecto 3880.....	25
Tabla 6: Diseño de carga y costo por taladro con HA-64 y ME QUANTEX 73 banco 3880.....	26
Tabla 7: Diseño de carga y costo por taladro con HA-64 y ME QUANTEX 73 banco 3900.....	27

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Características principales de diferentes mezclas de Anfo Pesado.....	15
Ilustración 2: Componentes del explosivo Quantex 73.....	15
Ilustración 3: Reacción de gasificación (esponjamiento) de ME quantex 73.....	22
Ilustración 4: Volabilidad del macizo rocoso de ME Quantex 73.....	22
Ilustración 5: Control de esponjamiento y densidades de ME Quantex 73.....	23
Ilustración 6: Mallas de voladura proyecto 3800 en la Cantera Cuaratura.....	26
Ilustración 7: Mallas de voladura del proyecto 3900035 en la cantera Cuadratura.....	27
Ilustración 8: Apilamiento de caliza después de la voladura con HA 64 y ME Quantex.....	28
Ilustración 9: Fragmentación post voladura con HA 64 y ME Quantex.....	29
Ilustración 10: Fragmentación post voladura con HA 64 y ME Quantex.....	29
Ilustración 11: Fragmentación post voladura con HA 64 y ME Quantex.....	29
Ilustración 12: Analisis granulométrico con wipfrag de la voladura.....	30
Ilustración 13: Generación de gases nitrosos con HA 64 y ME Quantex 73.....	30
Ilustración 14: Costos de las mezclas explosivas.....	31

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal optimizar la fragmentación y costos de voladura utilizando el explosivo HA 64 y ME Quantex 73 en la cantera de caliza Cuadratura de la localidad de Hualgayoc en Cajamarca. Luego de realizar las pruebas de voladura en los proyectos de voladura 3880 y 3900 utilizando los dos agentes explosivos, se realizó una comparación entre los datos obtenidos de ambos, lo cual permitió determinar el explosivo más adecuado para el proceso de voladura y que contribuye a la optimización principalmente de los costos generados en el proceso sin afectar la calidad de la fragmentación del material. La caracterización del macizo rocoso de la cantera Cuadratura, obtuvo un valor de 67 identificándose como una roca de clase II – calidad buena, y en el ensayo de compresión uniaxial tuvo como resultado 124.21 Mpa (roca Muy dura). Para esta calidad de macizo rocoso se necesitó una densidad del explosivo ME Quantex 73 hasta 1.10 y 1.15 gr/cc. Se concluye que con estos resultados el diseño de la malla de voladura para el proyecto 3880 es de B x E = 3.7 x 4.3 con taladros de $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$ " y una longitud de carga de 6.5 metros. Para el diseño de la malla de voladura para el proyecto 3900 es de B x E = 6.24 x 7.2 con taladros de $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$ " y una longitud de carga de 6.0 metros. El análisis de la fragmentación obtenida por el ME Quantex 73, indicó un p80 de 114.3 mm (4.5"). Se concluye que el agente explosivo ME Quantex 73 optimiza la fragmentación en el P80 del material volado, ya que su granulometría es menor y con mayor porcentaje de finos que con el HA 64. Se concluye que con el nuevo diseño de carga y con el uso del agente explosivo ME Quantex 73, se obtiene un ahorro de \$ 19.21 por taladro en comparación con el Heavy Anfo en el proyecto de voladura del banco 3880. En el proyecto de voladura del banco 3900 se obtiene un ahorro de 4.03 \$/taladro.

Palabras clave: Quantex 73, Heavy Anfo, Factor de carga, Taladros, Fragmentación P80, Costos de voladura.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En la presente investigación se optimiza la fragmentación y costos de voladura al realizar pruebas de voladura en campo con el explosivo Heavy Anfo 64 y ME Quantex 73 en la cantera de caliza Cuadratura, Cajamarca 2019, a fin de obtener los parámetros operativos que sean lo suficientemente óptimos para mejorar el patrón de voladura, que cumpla con las condiciones propuestas por la Empresa Minera y así obtener una fragmentación adecuada para cumplir con los requerimientos del área de mina para el material de acarreo.

Actualmente los recursos minerales engloban una gran importancia en el crecimiento de la economía peruana, el gran potencial de yacimientos no metálicos como la caliza tiene una gran demanda en las industrias como en las fábricas de cemento en nuestro territorio. En la investigación de Chávez, (2015) da a conocer la importancia de la caliza, menciona que al transcurrir el tiempo este mineral ha ido en crecimiento en las agroindustrias y las distintas inversiones mineras, un ejemplo de ellos es el sector minero y metalúrgico de Cajamarca.

En la investigación de Correa, (2016) menciona que el Perú cuenta con grandes extensiones de roca caliza, por lo tanto, se puede entender la riqueza que posee el país, estas extensiones son aprovechadas por empresas de gran dimensión las cuales se dedican en su mayoría a la fabricación de cemento. Pero existe un problema que afecta considerablemente a su extracción y es que los procesos de extracción en su mayoría son muy convencionales por lo tanto los esquemas que desarrollan para la perforación y voladura no son lo todo satisfactorios, los cuales provocan gastos innecesarios, contaminación al medio ambiente, debilidad en la roca. Se concluye que “El diseño de la voladura en la mina El Tesoro es ejecutada por procedimientos, los cuales consideran

los siguientes aspectos: Avance del disparo, el volumen movido del material, fragmentación y costo total del disparo”. Pero todo el desarrollo de la voladura no siempre se desarrolla con el fin de obtener ganancias que beneficiarán a la empresa que desarrolla dichas operaciones sino también para no perjudicar temas correspondientes al medio ambiente y la población en general.

En la región de Cajamarca existe interés por la extracción de la roca caliza, por lo cual la región es enriquecida geológicamente por esta roca. La caliza es una roca muy abundante, constituye más del 10% del conjunto de rocas sedimentarias de nuestro planeta, lamentablemente su riqueza no es aprovechada al 100% debido a distintos factores al momento de ser explotada.

El proceso de perforación y voladura es la etapa más importante durante la extracción del mineral en distintos tipos de yacimientos, donde incluyen los mayores costos y presupuestos, por lo tanto es preciso estudiar, organizar y controlar cada etapa de perforación y voladura, así como sus variables dependientes. El resultado de una buena fragmentación está en función del diseño de malla, diseño de explosivo (carga) y diseño del amarre del disparo, estructura geológica, tipo de roca, caracterización estructural. En gran parte de las operaciones mineras, la voladura se encarga de obtener una fragmentación óptima del macizo rocoso en términos de adecuación secuencial de minado para que este material pueda ser transportado y procesado de manera eficiente. En el informe de tesis de Mendoza, (2014), identifiqué la mala voladura que se realizaba en Paraíso (unidad minera – Ecuador), debido a que el material fragmentado es inadecuado para lo que requiere la chancadora, la cantidad de material producto de la voladura es inferior o mayor a lo esperado y el avance requerido por disparo no era el ideal era menor de lo esperado. Lo que ocasionó bajo rendimiento en los equipos

(transporte y acarreo), tiros cortados ocasionando voladuras secundarias y el incremento del costo de voladura.

Según Guamán G. y Mendieta G. (2013), en su tesis Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción Las Victorias, en Cuenca – Ecuador; la investigación tiene por objetivo “Realizar la evaluación del macizo rocoso de la cantera las victorias y en sus objetivos específicos menciona describir las características geológicas de la zona objeto de estudio, estudiar la calidad del macizo rocoso Las Victorias, basados en los estudios de los sistemas de clasificación geomecánica: RQD, RMR, Q, SMR Y GSI; se concluye que la calidad del macizo rocoso está controlado por variables litológicas esfuerzos in su meteorización y resistencia a la compresión uniaxial y las múltiples familias de discontinuidades.” También se concluye que: “En todos los métodos analizados se estimó el tamaño medio de fragmentación de roca esperada producto de la voladura, en tal caso se observó que aumentando la cantidad de sustancia explosiva por taladro, el tamaño de fragmentación disminuye para una separación entre taladros constantes, así como también se pudo verificar que a medida que aumenta la separación entre taladros el tamaño de fragmentación será mayor”

En Venezuela, Choqueña, (2017) presentó su tesis para obtener el título de ingeniería de minas titulada “Optimización de la fragmentación de roca mediante las características geo mecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos”. La investigación fue no experimental, utilizó como población los diferentes proyectos de voladura. El objetivo de esta investigación fue optimizar la fragmentación de roca, debido a que encontró bloques con medidas de 80 cm. Tales bloques, después del proceso de voladura, dificultaban el proceso de carguío y acarreo por lo que era necesario optimizar la fragmentación rocosa, por lo que propone la aplicación del

sistema p80 con apoyo del software wip frag 2010, basado en las características geo mecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos. Los resultados de evaluación geo mecánicas indicaron que se trata de una andesita alterada, su RQD fue de 92 %, esta roca es sílice alunita chay, propilítico sílice granular y sílice masiva con RCU de 23 MPA (según Bieniewiski, 1989, el RMR básico es 52 de calidad regular). Para optimizar la fragmentación de roca consideró los siguientes parámetros: prueba de fragmentación con wip frag, 2010 el p80 es 4.03 pulgadas, 3.58 pulgadas y 5.38 pulgadas en macizo rocoso con RMR de 52 en 13 pruebas el promedio de P80 fue de 3.40 pulgadas un tamaño óptimo para el proceso de minado. La conclusión de la investigación indica que en la parte operativa mejoró el dig-rate de los equipos de acarreo en un rango del 5% por lo que la empresa aceptó el uso de doble iniciación en el proceso de voladura de rocas.

Según Mamani (2016), en la construcción de accesos carreteras, minas a tajo abierto, voladura en canteras, construcción de represas y todo tipo de trabajos donde se realice voladura de rocas, es necesario realizar un estudio que abarque variables las cuales puedan ayudarnos a la toma de decisiones, como el explosivo optimo, y el tiempo de operación de minado. El cual tendrá diferentes etapas, este tendrá que incluir costos y presupuestos para un periodo de tiempo determinado detallando algunos aspectos; para organizar y controlar el programa de producción, también a la elaboración de precios unitarios; en la industria minera y de la construcción.

En la investigación de Carhuancho (2011) menciona que “la voladura existe con el fin de fragmentar el macizo rocoso, pero si esta no se desarrolla de manera adecuada la fragmentación no será óptima, por lo tanto, en la obligación de realizar la fragmentación de manera óptima se es necesario realizar voladuras secundarias, estas generan un gran costo al proceso. Por tal motivo es importante realizar estudios previos.

En la tesis de (Alfaro Rene, 2016), tiene como objetivo principal: Determinar el diseño de la malla de perforación y voladura en la cantera sur de caliza para producir roca escollera para generar enrocado, se concluye: el cálculo de los parámetros fue mediante la fórmula Pearse, $B \times E = 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ obteniendo una fragmentación característica que requiere la empresa.

Las propiedades mecánicas de las rocas restringen la efectividad de la fragmentación requerida producido por la voladura en una operación minera. En lo que sigue se presenta las principales propiedades físicas y mecánicas que son empleadas en el modelamiento de voladura de rocas y deben ser estudiadas (Ramírez O. P. 2004, Mecánica de Rocas):

- Litología.
- Propiedades físico-mecánicas (St , Sc , ρ_r).
- Caracterización geomecánica. (RMR, RQD y GSI).
- Parámetros de resistencia de la roca. (cohesión y ángulo de fricción interna Φ_i).
- Constantes elásticas de la roca. (E , μ).
- Propiedades sísmicas (velocidad de propagación: V_p , V_s).

Por tanto, el macizo rocoso y la mezcla explosiva comercial son determinantes para obtener una adecuada fragmentación como resultado de la voladura de rocas.

La detonación es una reacción físico-químico exotérmica caracterizado por la velocidad de reacción del explosivo y la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva que se traduce en presión sobre el área circundante. Entonces, podemos identificar dos energías producto de la reacción del explosivo, la energía de choque y la energía de gas. La energía traducida

en onda de choque, se propaga a través de la columna explosiva con suficiente energía. (Mackenzie, 2008).

Según Konya (1998) señaló que “la presión de choque es una presión transitoria, que viaja a la velocidad de detonación del explosivo. Se estima que esta presión sólo representa del 10% al 15 % de toda la energía de trabajo disponible en un explosivo. La presión de gas equivale del 85% al 90% de la energía útil del explosivo”.

El Anfo con su baja densidad y velocidad de detonación, y su mala resistencia al agua, hacen que sea un explosivo inadecuado para muchas labores. Todo esto motivó la investigación de otros productos, de éstas investigaciones se descubrieron los hidrogeles por el Dr. Melvin Cook (llamado slurries, en inglés lodo). Por primera vez Cook preparó una mezcla explosiva con nitrato amónico, aluminio, agua y goma guar (agente gelificante y entrecruzante), logrando un producto resistente al agua, de elevada densidad y con una velocidad de detonación muy alta. (Manual de voladura Orica, 2014) Estos explosivos llamados hidrogeles se caracterizan principalmente por tener una importante cantidad de agua en su composición, lo que constituye un hecho insólito en las formulaciones utilizadas hasta su aparición. Se forman dispersiones en las que la fase continua está formada por una solución acuosa saturada de nitrato amónico, con o sin otros oxidantes inorgánicos como nitrato sódico, perclorato sódico, etc. La fase dispersa está formada por combustibles sólidos y el resto de los oxidantes sólidos que no han podido disolverse en la solución de oxidantes, además, pueden contener sustancias explosivas como sensibilizantes.

Los Heavy Anfo son una mezcla de emulsiones y Anfo, que según las proporciones varían sus características, con un porcentaje alto de emulsión es resistente al agua, bombeable y tiene alta velocidad de detonación. (Yana, 2012)

Los Anfos pesados son mezclas de emulsión matriz y ANFO en diferentes proporciones, que permiten mejorar la potencia y aumentar la energía del explosivo, En nuestra operación se trabaja con varios tipos de mezcla ya sea por su VOD o por sus características de resistencia al agua.

Los más comunes son:

- HA 30/70 (30% emulsión y 70% de ANFO),
- HA 40/60 (40% emulsión y 60% de ANFO),
- HA 50/50 (50% emulsión y 50% de ANFO) y
- HA 65/35 (65% emulsión y 35% de ANFO), para taladros con agua (Manual de voladura EXSA, 2014)

El ANFO pesado es una combinación de perlas de nitrato de amonio, diésel y suspensión. La ventaja de las mezclas de ANFO pesado es que se pueden hacer y carga fácilmente al barreno. La proporción en las cantidades de suspensión y ANFO puede ser cambiada y obtener ya sea un explosivo con mayor energía o uno que sea resistente al agua. El costo del ANFO pesado aumenta con el porcentaje de suspensión. La ventaja sobre los productos encartuchados es que el barreno se encuentra cargado totalmente y no existen huecos entre el barreno y la carga. Una desventaja es que, ya que el explosivo ocupa el volumen total del barreno, si existe agua, ésta es empujada hacia arriba, lo que significa que se debe utilizar esta mezcla en todo el barreno. En cambio, con productos encartuchados y debido al espacio entre el cartucho y el barreno, se puede cargar producto encartuchado hasta rebasar el nivel del agua y entonces usar ANFO normal a granel de menor precio. (Konya y Albarrán, 1998)

Mezclas Explosivas	Composición (%)		Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	Resistencia al Agua
	Emulsión	ANFO			
HA-37	30	70	1.05 (±0.01)	4800 - 5000	Nula
HA-46	40	60	1.15 (±0.01)	5000 - 5200	Baja
HA-55	50	50	1.27 (±0.01)	5200 - 5400	Buena
HA-64	60	40	1.29 (±0.01)	4500 - 4800	Excelente

Nota:

- Tipo de Emulsión: emulsión matriz para todas las mezclas de la tabla
- VOD: Los rangos de VOD son para taladros de 10 5/8" de diámetro
- HA = Heavy ANFO

Ilustración 1: Características principales de diferentes mezclas de ANFO Pesado.

Fuente: Guzmán & Culqui (2018).

La ME Quantex 73 es la mezcla explosiva compuesta de un 70% de emulsión gasificable; Slurrex Q, potenciada con un 30% de nitrato de amonio Quantex, a la que posteriormente se le agrega una solución gasificante que le brinda la sensibilidad requerida y densidad deseada de acuerdo al diseño de tronadura. La mezcla explosiva QUANTEX 73 está especialmente diseñada para rocas duras.



Ilustración 2: Componentes del explosivo Quantex 73.

Fuente: Ficha técnica Quantex 73 – EXSA.

Los productos principales que se generan en una voladura bajo condiciones ideales son el nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua. Un exceso de oxígeno en un explosivo puede originar la formación de óxidos de nitrógeno (NO y NO₂); mientras que un déficit de oxígeno puede ocasionar la formación de monóxido de carbono (CO); ambos gases son extremadamente tóxicos. (Instituto minero de España, 2012)

No existe ningún explosivo que no produzca gases. Los explosivos comerciales generalmente son mezclas de combustibles sólidos (combustibles) y proveedores de oxígeno (nitratos) activadas con un sensibilizador. Para asegurar la combustión completa, que producirá simultáneamente potencia (energía) máxima, y minimizar la producción de gases nocivos, es necesario que se controle la relación de proveedores de oxígeno a combustibles.

El diseño de voladura se basa en la aplicación de técnicas de cálculo en un medio heterogéneo en el cual los resultados obtenidos pueden influir en gran medida en el desarrollo de la explotación.

El objetivo de una voladura de acuerdo a lo planificado es buscar resultados en fragmentación y desplazamiento además de no afectar a elementos ajenos a la voladura. Para lograr este objetivo y evaluar el correcto rendimiento de una voladura se deben tener en cuenta tres factores fundamentales que son claves en un correcto diseño y control que son una correcta cantidad de energía, correcta distribución de energía y un correcto confinamiento de energía. (Llacma, 2017)

Los gases nitrosos son derivados de diferentes óxidos de nitrógeno se encuentra como mezcla en diferentes concentraciones como producto habitual de las voladuras en los frentes. Estos gases no se separan nunca en esta situación por lo que hay que reconocerlos juntos, aunque los porcentajes varían constantemente. (Condori, 2015).

1.2. Formulación del problema

¿Cómo optimizar la fragmentación de la roca caliza y los costos de voladura utilizando el explosivo Heavy Anfo 64 y ME Quantex 73 en la cantera Cuadratura, Cajamarca 2019?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Optimizar la fragmentación de la roca caliza y costos de voladura utilizando el explosivo Heavy Anfo 64 y ME Quantex 73 en la cantera Cuadratura, Cajamarca 2019.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros de voladura para la malla del banco 3800 proyecto 01, cargados con explosivos HA-64 y ME Quantex 73.
- Evaluar la fragmentación p80 de la caliza por voladura y la generación de gases nitrosos con explosivos HA-64 y ME Quantex 73.
- Realizar un análisis comparativo del costo de voladura generado por los explosivos HA-64 y ME Quantex 73.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Al evaluar los resultados obtenidos del proceso de voladura utilizando el explosivo HA-64 y ME Quantex 73, se elegirá el explosivo con la fragmentación p80 adecuada a menor costo, lo cual permitirá optimizar el proceso de voladura y con ello se incrementará los ahorros en la empresa.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

El presente proyecto corresponde a una investigación de tipo Experimental - Aplicada con diseño cuasi experimental, la cual tiene como objetivo principal optimizar la fragmentación y con ello los costos generados en el proceso de voladura de la caliza en la cantera Cuadratura, al comparar la mejor performance de los explosivos HA 64 y ME Quantex 73, lo cual permitió determinar el explosivo más adecuado para el proceso de voladura y que contribuye a la optimización principalmente de los costos generados en el proceso sin afectar la calidad de la fragmentación del material.

La investigación tiene diseño Cuasi experimental debido a que se realiza una comparación entre 2 tipos de explosivos durante distintos periodos de prueba en un mismo macizo rocoso, es decir la investigación toma datos de un antes y después para al final comparar los resultados obtenidos al implementar un nuevo explosivo en el proceso de voladura.

2.2. Población y muestra

Población

- Taladros detonados con explosivo HA 64 (Banco 3880 y Banco 3900) durante los meses de Marzo a Julio 2019.
- Taladros detonados con explosivo ME Quantex 73 (Banco 3800 y Banco 3900) durante los meses de Marzo a Julio 2019.

Muestra

- 35 taladros detonados utilizando explosivo HA 64 (Banco 3880 y Banco 3900) durante el mes de Mayo 2019.

- 96 taladros detonados utilizando explosivo ME Quantex 73 (Banco 3800 y Banco 3900) durante el mes de Mayo 2019.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1. Observación directa

Se realizó la observación directa en campo, mediante la visita los bancos dónde se venía realizando la voladura en los cuales se pudo notar algunas deficiencias en el proceso que perjudicaban la producción y costos de la empresa, directamente los costos del proceso de voladura generada por el tipo de explosivo que se venía utilizando inicialmente.

2.3.2. Análisis documental

Se investigó antecedentes previos de trabajos de investigación relacionados a las deficiencias y medidas empleadas para optimizar la voladura, principalmente de los costos generados durante este proceso, del mismo modo se revisó informes relacionados al desempeño del explosivo ME Quantex 73 en canteras de caliza para tener referencias de su comportamiento ante la presencia de yacimientos de este tipo.

2.3.3. Recolección de datos en campo

La toma de datos se realizó el día de la voladura, con la finalidad de registrar las características de cada uno de los bancos de voladura y los taladros correspondientes para posteriormente analizar sus costos y los resultados de la fragmentación de la roca. Se utilizaron instrumentos de medición como: balanza electrónica, cronómetro, baso de densidades, etc. Para la toma de datos en campo se elaboraron formatos para ser utilizados como instrumentos.

Tabla 1

Formato – Características geotécnicas del macizo rocos de la cantera Cuadratura

Proyecto:	3800	
Material:		Tipo de roca:
Roca:		Tipo:
Propiedades de la roca intacta		
Dureza de la roca:		RMR
Resistencia compresiva (UCS):		
Módulo de Young:		
Densidad de la roca:		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Formato – Diseño de carga y costos por taladro con HA 64 y ME Quantex 73.

	HA-64	ME QUANTEX
Densidad inicial (g/cm ³)		
Densidad final (g/cm ³)		
Esponjamiento (m/m)		
Longitud de carga (m)		
Longitu inicial (m)		
Carga (q)		
Precio de la mezcla (US\$/kg)		
Costo por taladro (US\$)		
Ahorro por taladro (US\$)		
Ahorro en 96 taladros (U\$)		

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4. Procesamiento de datos

Se realizó el procesamiento de los datos de campo obtenidos para lo cual se utilizó el programa Excel. Mediante cuadros y gráficos se comparó los resultados correspondientes a los explosivos Heavy Anfo y ME Quantex, esto con la finalidad de poder demostrar si lo obtenido era favorable o desfavorable para la optimización del costo generado durante el proceso de voladura.

2.4. Procedimiento

El tipo de investigación que se utilizó en este trabajo es experimental, por lo cual se realizara la toma de datos en campo en 2 diferentes periodos de tiempo (antes y después), viendo la relación de Causa-Efecto. De esta manera se podrá determinar si el uso del explosivo Quantex 73 permite optimizar la fragmentación de la caliza y el costo de voladura.

2.4.1. Primera etapa: Gabinete

Inicialmente se procede a la revisión de antecedentes, estudios previos, realizados respecto al tema, en los diferentes ámbitos, tanto local, nacional como internacional, para lo cual se recurrió a los repositorios virtuales de varias universidades, de la misma forma se recolecto información correspondiente a los 2 tipos de explosivos utilizados en este trabajo de investigación.

2.4.2. Segunda etapa: Campo

Se realizaron diversos procedimientos en campo para determinar la calidad de los explosivos Heavy Anfo 64 y ME Quantex m73. Para identificar la densidad, en el caso de un explosivo que no gasifica, su densidad es constante y basta con tomar una muestra durante la descarga al taladro. Para la gasificación, la ME Quantex se mezcla con una solución de Nitrito de Sodio, este reacciona con la emulsión formando Nitrógeno que queda atrapado en las burbujas dentro de la emulsión. Ver ilustración 3.



Ilustración 3: Reacción de gasificación (esponjamiento) de ME Quantex 73.

Fuente: Fotos tomadas en campo

La formación de burbujas produce un aumento de volumen, que denominamos esponjamiento. A medida que progresa la reacción, disminuye la densidad de la ME Quantex.

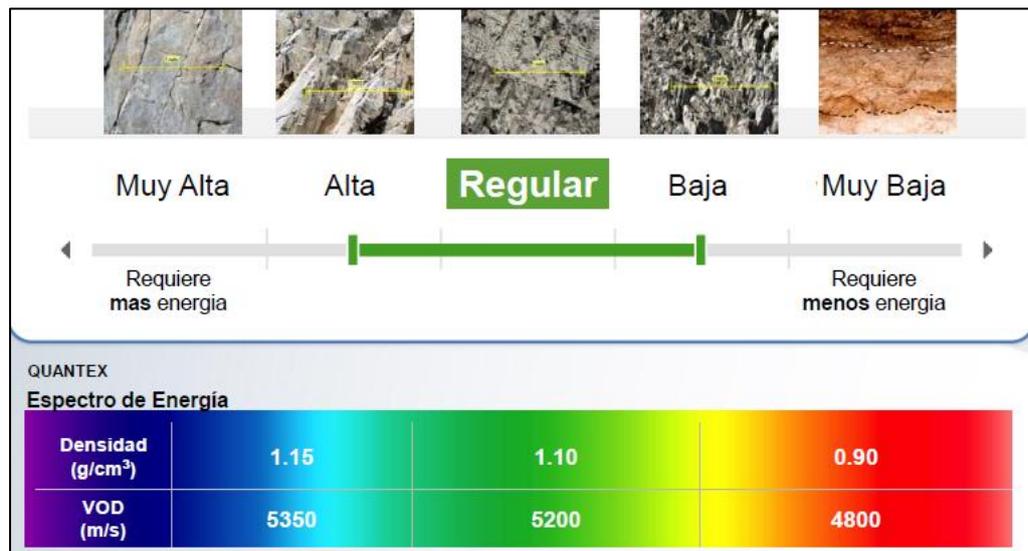


Ilustración 4: Volabilidad del macizo rocosos de ME Quantex 73.

Fuente: Ficha técnica de EXSA

En la ilustración 4 se puede observar que para la calidad de macizo rocoso de la cantera se necesita una densidad del explosivo ME Quantex 73 hasta 1.10 y 1.15 gr/cc, el cuál provocaría una VOD entre 5200 y 5350 m/s.

Se controló el esponjamiento y las densidades del explosivo y se trabajó con densidades finales entre 1.10 y 1.15 gr/cc. Los taladros esponjaban entre 60 y 70 centímetros para las densidades mencionadas.



Ilustración 5: Control de esponjamiento y densidades de ME Quantex 73.

Fuente: Fotos tomadas en campo

Tabla 3

Características de los explosivos Heavy Anfo y Quantex

Parámetros	Unidades	Heavy Anfo 64	ME Quantex 73
Densidad Inicial	g/cm ³	1.3	1.37
Densidad Final	g/cm ³	1.3	1.15
Esponjamiento	m/m	ne.	0.1
Long. Carga (Lc)	m	6.5	6.5
Long. Inicial (Li)	m	ne.	5.9
Carga (q)	Kg	265.5	254.4

Fuente: Datos de campo y ficha técnica de los explosivos EXSA.

La información de los parámetros de la malla fue recopilada del área de voladura.

El número de taladros, detonadores y material total volado fue contabilizado cada día en nuestros formatos y esta información se comparó con los datos proporcionados por el área de voladura.

La fragmentación de la roca se midió mediante el uso del Software Wipfrag que, a través de imágenes digitales adquiridas en terreno, nos permitió analizar en un computador cuál es la distribución del tamaño de la roca fragmentada en cualquier etapa del proceso.

2.4.3. Tercera etapa: Gabinete

Se procesaron y tabularon de forma digital los datos obtenidos en campo, con ayuda del programa Excel, así mismo se elaboraron cuadros comparativos de los valores obtenidos para la fragmentación, costos por taladro, de acuerdo a los dos tipos de explosivos utilizados. Finalmente se realizó el análisis de los costos generados en el proceso de voladura para determinar si mediante la aplicación del ME Quantex 73 se logra optimizar la fragmentación y costos de voladura.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Al desarrollar el sistema de perforación y voladura, fue necesario evaluar distintos procedimientos lo cual ayudo a diseñar la malla de perforación, en donde se realizaron los dos proyectos de voladura.

Características geotécnicas del macizo rocoso de la cantera Cuadratura

Tabla 4

Resistencia a la compresión simple

Descripción	Resistencia a la compresión simple (Mpa)
Extremadamente dura	> 250
Muy dura	100 - 250
Dura	50 -100
Moderadamente dura	25 - 50
Blanda Muy blanda	5 - 25 1 - 5 < 1

Tabla 5

Características geotécnicas del macizo rocoso del proyecto 3880

Proyecto:	3800		
Material:	Mineral	Tipo de roca:	Kársica
Roca:	Caliza	Tipo:	Sedimentario
Propiedades de la roca intacta			
Dureza de la roca:	Muy dura	RMR	67
Resistencia compresiva Mpa	124.21 Mpa		
Módulo de Young:	50.23 Gpa		
Densidad de la roca:	2.51 TM/m ³		

Fuente: Laboratorio de suelos de la Empresa

Las características geomecánicas del macizo rocoso basado en el RMR obtuvo como resultado un valor de 67 identificándose como una roca de clase II – calidad buena, los parámetros hallados de la clasificación geomecánica RMR como el ensayo de compresión uniaxial que tuvo como resultado 124.21 Mpa que se refiere a una resistencia Muy dura,

3.1 Parámetros para la malla de voladura del banco 3800 proyecto 01 cargados con explosivos HA 64 y ME Quantex 73

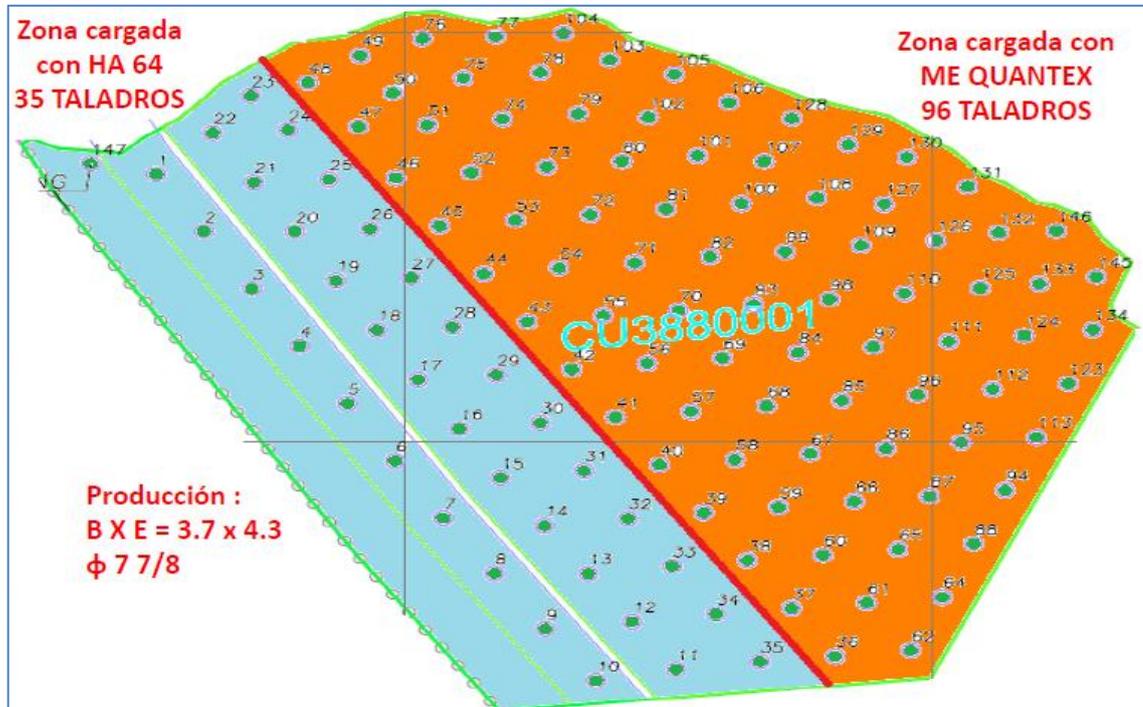


Ilustración 6: Mallas de voladura proyecto 3800 en la Cantera Cuadratura Cargados con explosivos HA 64 y ME Quantex 73

Tabla 6

Diseño de carga y costo por taladro con HA-64 y ME QUANTEX 73

	HA-64	ME QUANTEX	
Densidad inicial (g/cm ³)	1.3	1.37	4.5
Densidad final (g/cm ³)	1.3	1.14	
Esponjamiento (m/m)	ne	0.1	6.5
Longitud de carga (m)	6.5	6.5	
Longitu inicial (m)	ne	5.9	
Carga (q)	265.5	254.4	
Precio de la mezcla (US\$/kg)	0.663	0.614	
Costo por taladro (US\$)	175.91	156.7	
Ahorro por taladro (US\$)		19.21	
Ahorro en 96 taladros (US\$)		1844.16	

De la Ilustración 6 y tabla 6 se observa que se cargaron 96 taladros con ME QUANTEX 73 (densidad 1.14) y 35 taladros con HA-64 (densidad 1.30), en una malla B x E = 3.7 x 4.3 con taladros de $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$ ” y una longitud de carga de 6.5 metros, obteniendo un ahorro de 19.21 \$/taladro, con un ahorro total de US\$ 1844.16 comparándolo con el Heavy Anfo 60/40.

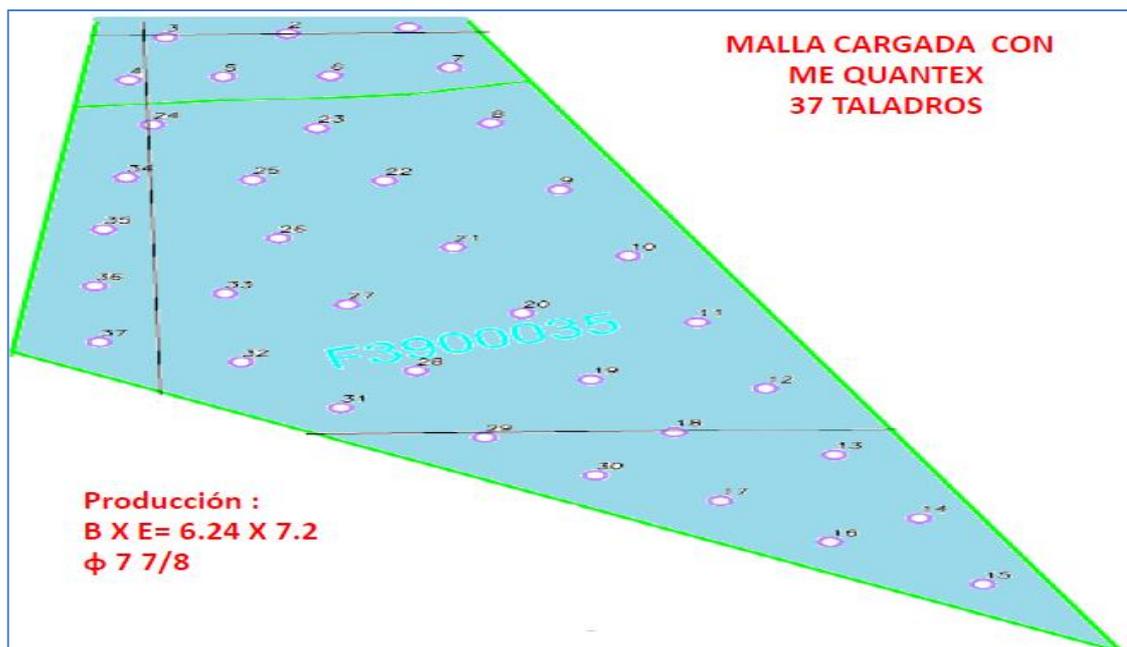


Ilustración 7: Mallas de voladura del proyecto 3900035 en la cantera Cuadratura Cargados con explosivos ME Quantex 73.

Tabla 7

Diseño de carga y costo por taladro con HA-64 y ME QUANTEX

	HA-46	ME QUANTEX
Densidad inicial (g/cm ³)	1.15	1.37
Densidad final (g/cm ³)	1.15	1.12
Esponjamiento (m/m)	ne	0.12
Longitud de carga (m)	6	6
Longitu inicial (m)	ne	5.4
Carga (q)	216.8	230.6
Precio de la mezcla (US\$/kg)	0.674	0.614
Costo por taladro (US\$)	146.13	142.1
Ahorro por taladro (US\$)		4.03
Ahorro en 37 taladros (US\$)		149.11

5

6

Se cargaron 37 taladros con ME QUANTEX 73 (densidad 1.12) en una malla B x E = 6.24 x 7.2 con taladros de $\varnothing = 7\ 7/8$ ” y una longitud de carga de 6.0 metros, obteniendo un ahorro de 4.03 \$/taladro, con un ahorro total de US\$ 149.11 comparándolo con el Heavy Anfo 60/40.

3.2 Fragmentación de la voladura y generación de gases nitrosos con HA 64 y ME Quantex 73



Ilustración 8. Apilamiento de caliza después de la voladura con HA 64 y ME Quantex.

Se observa que el explosivo ME QUANTEX 73 genera menor apilamiento. Esto es debido a que el P80 del material volado es menor y con mayor porcentaje de finos, por ende existe menor cantidad de espacios vacíos entre fragmentos de roca.



Ilustración 9. Fragmentación post voladura con HA 64 y ME Quantex a la izquierda y derecha respectivamente



Ilustración 10. Fragmentación post voladura con HA 46 y ME Quantex 73 a la izquierda y derecha respectivamente



Ilustración 11. Fragmentación post voladura con HA 46 y ME Quantex 73 a la izquierda y derecha respectivamente

De la ilustración 9, 10 y 11, se observa en las fotos de la derecha que la ME QUANTEX 73 genera menor fragmentación.

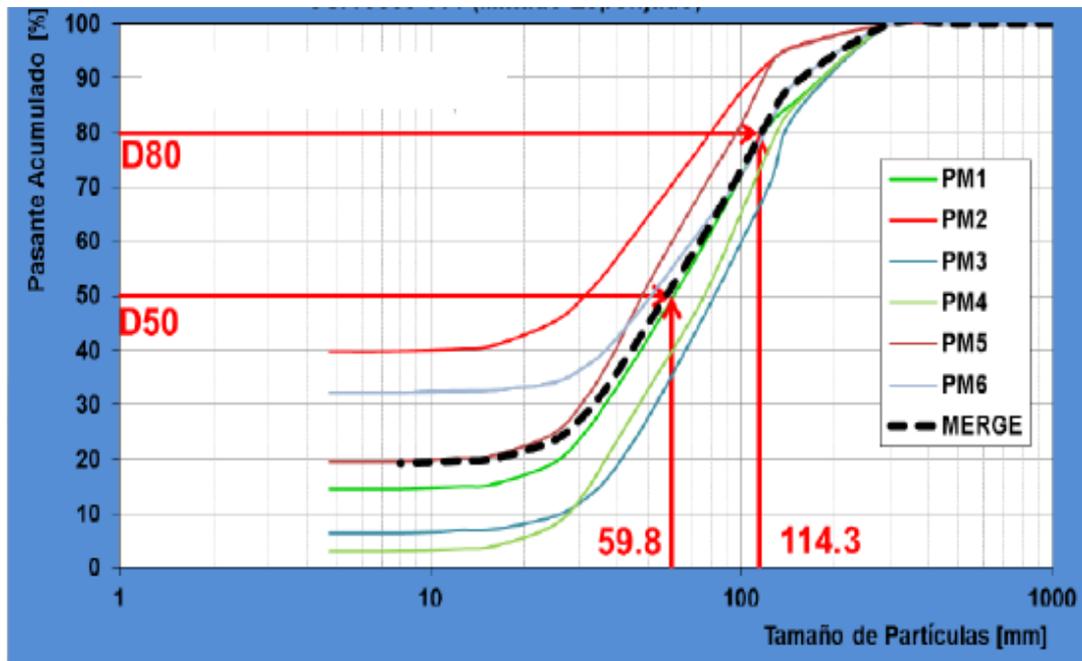


Ilustración 12. Análisis granulométrico con wipfrag de la voladura

Con la ME QUANTEX 73 se obtuvo un D80 de 114.3 mm (4.5”) en el minado de la cantera Cuadratura.



Ilustración 13. Generación de gases nitrosos con HA 46 y ME Quantex 73 a la izquierda y derecha respectivamente

Se observa en la foto de la izquierda que el HA 46 genera gases nitrosos, mientras que con el ME Quantex 73 no se generaron gases nitrosos.

3.3 Costo de la mezcla explosiva HA 64 y ME Quantex 73



Ilustración 14. Costo de las mezclas explosivas

El costo por tonelada de la mezcla explosiva ME Quantex 73 es 614.2 dólares, en comparación con el ANFO, que cuesta 696.6 dólares por tonelada.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

En la tabla 5 se puede observar las características geomecánicas del macizo rocoso de la Cantera Cuadratura en el proyecto 3800 y 3900. Basado en el RMR obtuvo un valor de 67 identificándose como una roca de clase II – calidad buena, los parámetros hallados de la clasificación geomecánica RMR como el ensayo de compresión uniaxial que tuvo como resultado 124.21 Mpa que se refiere a una resistencia Muy dura. Para esta calidad de macizo rocoso se necesita una densidad del explosivo ME Quantex 73 hasta 1.10 y 1.15 gr/cc, el cuál provocaría una VOD entre 5200 y 5350 m/s. Con estos resultados el diseño de la malla de voladura para el proyecto 3880 es de $B \times E = 3.7 \times 4.3$ con taladros de $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$ ” y una longitud de carga de 6.5 metros. Para el diseño de la malla de voladura para el proyecto 3900 es de $B \times E = 6.24 \times 7.2$ con taladros de $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$ ” y una longitud de carga de 6.0 metros. Los resultados fortalecen la investigación de Guamán G. y Mendieta G. (2013), en su tesis Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción Las Victorias, en Cuenca – Ecuador; la investigación tiene por objetivo “Realizar la evaluación del macizo rocoso de la cantera las victorias y en sus objetivos específicos menciona describir las características geológicas de la zona objeto de estudio, estudiar la calidad del macizo rocoso Las Victorias, basados en los estudios de los sistemas de clasificación geomecánica: RQD, RMR, Q, SMR Y GSI; se concluye que la calidad del macizo rocoso está controlado por variables litológicas esfuerzos en su meteorización.

En la fragmentación p80 se observa en las ilustraciones desde la numero 8 hasta la 11, que el explosivo ME QUANTEX 73 genera menor apilamiento. Esto es debido a que el P80 del material volado es menor y con mayor porcentaje de finos, por ende existe

menor cantidad de espacios vacíos entre fragmentos de roca. Con la ME QUANTEX 73 se obtuvo un D80 de 114.3 mm (4.5”) en el minado de la cantera Cuadratura. También se observa en la foto de la izquierda de la ilustración 13, que el HA 46 genera gases nitrosos, mientras que con el ME Quantex 73 no se generaron gases nitrosos. Es decir el Quantex nos permite obtener una mejor fragmentación del material lo cual nos permite apoyar lo descrito por Medina, C. R. (2014), en su Tesis Titulada: “Evaluación Técnico-Económica-Ecológica de los Resultados de las Pruebas Realizadas Usando Emulsiones Gasificadas en Cuajone-Southern Perú”, en sus objetivos indica: llevar a cabo una evaluación económica en US\$/TM disparada usando una emulsión gasificada vs Anfo pesado, y analizar y evaluar la fragmentación obtenida. Los resultados obtenidos son similares a los que logró Choqueña, (2017), “para optimizar la fragmentación de roca consideró los siguientes parámetros: prueba de fragmentación con wip frag, p80 es 4.03 pulgadas, 3.58 pulgadas y 5.38 pulgadas en macizo rocoso con RMR de 52 en 13 pruebas el promedio de P80 fue de 3.40 pulgadas un tamaño óptimo para el proceso de minado”.

De la Ilustración 6 y tabla 6 se observa que con el nuevo diseño de carga se obtiene un ahorro de 19.21 \$/taladro, con un ahorro total de US\$ 1844.16 en 96 taladros, comparándolo con el Heavy Anfo 60/40 en el proyecto de voladura del banco 3880. De la Ilustración 7 y tabla 7 se observa que con el nuevo diseño de carga se obtiene un ahorro de 4.03 \$/taladro, con un ahorro total de US\$ 149.11 en 37 taladros, comparándolo con el Heavy Anfo 60/40 en el proyecto de voladura del banco 3900.

4.2 Conclusiones

Basado en el RMR, la caracterización del macizo rocoso de la cantera Cuadratura en los proyectos 3880 y 3900, obtuvo un valor de 67 identificándose como una roca de clase II – calidad buena, y en el ensayo de compresión uniaxial tuvo como resultado 124.21 Mpa, que se considera a una resistencia Muy dura. Para esta calidad de macizo rocoso se necesita una densidad del explosivo ME Quantex 73 hasta 1.10 y 1.15 gr/cc. Se concluye que con estos resultados el diseño de la malla de voladura para el proyecto 3880 es de $B \times E = 3.7 \times 4.3$ con taladros de $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$ ” y una longitud de carga de 6.5 metros. Para el diseño de la malla de voladura para el proyecto 3900 es de $B \times E = 6.24 \times 7.2$ con taladros de $\varnothing = 7 \frac{7}{8}$ ” y una longitud de carga de 6.0 metros.

El análisis de la fragmentación obtenida por el Heavy Anfo 64 y ME Quantex 73, indicó una mejora en el P80 utilizando el ME Quantex 73 como agente explosivo en el proceso de voladura de la caliza, siendo el p80 de 114.3 mm (4.5”) en el minado de la cantera Cuadratura. Se concluye que el agente explosivo ME Quantex 73 optimiza la fragmentación en el P80 del material volado, ya que su granulometría es menor y con mayor porcentaje de finos que con el HA 64, por ende existe menor cantidad de espacios vacíos entre fragmentos de roca.

Se concluye que con el nuevo diseño de carga y con el uso del agente explosivo ME Quantex 73, se obtiene un ahorro de \$ 19.21 por taladro en comparación con el Heavy Anfo en el proyecto de voladura del banco 3880. En el proyecto de voladura del banco 3900 se obtiene un ahorro de 4.03 \$/taladro.

REFERENCIAS

- Alfaro, Rene (2016). Diseño de malla de perforación y voladura de rocas en la cantera sur para producción de roca escollera en la Cía. minera el Brocal cerro de Pasco. Tesis (Título profesional de ingeniero de minas). Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3477>
- Carhuancho, Erwin (2011). Optimización de la fragmentación aplicando valores de energía en voladura al tajo Vidal, nivel 4190 cantera de caliza Cerro Palo Cemento Andino. Tesis (Título profesional de ingeniero de minas). Huancayo: Universidad nacional del centro del Perú, 2011. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/3161>
- Choqueña Jubel (2017). *Optimización de la fragmentación de la roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos - U. M. Apumayo S.A.C.* Tesis (Título profesional de ingeniero de minas). Universidad Nacional del Altiplano. Disponible en: file:///C:/Users/ACER/Downloads/Choque%C3%B1a_Ccallata_Jose_Jubel.pdf
- Correa, Donny (2016). *Factibilidad económica de la explotación de roca caliza para producir Oxido de calcio en la concesión minera no metálica José Gálvez, Bambamarca, Cajamarca.* Tesis (Título profesional de ingeniero de minas). Cajamarca: Universidad privada del norte, 2016. Disponible en: <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/7578>
- Condori, S. (2015). *“Estandarización del explosivo Me – Quantex, reducción de costos operativos y eliminación de gases contaminantes mediante el análisis*

de parámetros de voladura en mina Cuajone”. (Tesis de pregrado).

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.

EXSA S.A. (2016). “*Tecnología Quantex*”. Recuperado el enero de 2018, de Exsa - soluciones exactas para fragmentación de roca, voladura y explosivos: <http://www.exsasoluciones.pe/exsa-y-la-tecnologia-quantex-en-el-pdac-2016/>

EXSA S.A. (2018). *Manual de voladura EXSA*. Lima. Ficha técnica del Quantex 73, recuperado de:

<https://www.exsa.net/image/pdf/QUANTEX%2073.pdf>

Guamán Vladimir y Mendieta Francisco (2013). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción “Las Victorias”*. Tesina para la obtención del título de Ingeniero Civil. Cuenca – Ecuador.

Konya, C., & Albarrán, E. (1998). “*Diseño de voladuras*”. Cuicatl.

Llacma, O. (2017). “*Evaluación técnico económica con el uso de emulsión gasificada en voladura mina Cuajone*”. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú.

Mamani, I. (2016). *Análisis y optimización de costos de perforación y voladura en la construcción del canal San Antonio de Miña*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

Mendoza, Norma (2014). “*Optimización de la voladura controlada aplicando un modelo matemático en la unidad minera paraíso-ecuador*”. Tesis (Título profesional de ingeniera de minas). Huancayo: Universidad nacional del centro del Perú. Disponible en:

<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/UNCP/1339>

Yana, F. (2012). *“Evaluación del agente explosivo Quantex en los resultados de fragmentación para la reducción de costos de voladura en el Tajo de la Mina Toquepala”*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

ANEXOS

Anexo N° 01: Características técnicas del explosivo Quantex 73

Características técnicas		
Especificaciones técnicas	Unidades	QUANTEX 73
Densidad	gr/cm ³	1.13 +/- 5%
Diámetro crítico	pulg	4.5
Profundidad máxima de carga	m	18
Velocidad de detonación (VOD)*	m/s	4,000 – 6,000
Iniciador recomendado	---	Booster de pentolita B-450g
Emisión de CO ₂	kg CO ₂ / ton. Quantex	0.174
Tiempos de gasificación	min	20 – 30
Presión de detonación	kbar	24.0 – 107.0
Energía absoluta en peso (AWS)**	kJ/kg	3,036
Energía Absoluta en Volumen (ABS)**	J/cm ³	3,214 – 3,575
Potencia relativa efectiva al peso (RWS)***	%	113
Potencia relativa efectiva en volumen (RBS)***	%	170
Tipos de barrenos		Secos / Agua

* VOD sin confinar en diámetro de 6".
 ** Características calculadas empleando Software TERMODET a condiciones ideales de 1 atm.
 ***Característica de potencia relativa efectiva calculada con Software TERMODET a condiciones ideales de 100 MPa, con una densidad del Anfo de 0.8 g/cm³ y una energía efectiva del Anfo de 2362 KJ/Kg

Fuente: Catálogo de productos EXSA 2019.