

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**ESTUDIO TÉCNICO - ECONÓMICO DEL USO DE LA MEZCLA EXPLOSIVA  
QUANTEX 73 EN LA UNIDAD MINERA TOQUEPALA – SPCC**

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. Luis Alberto Iglesias Salas**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO DE MINAS**

TACNA – PERÚ

2016

# UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

ESTUDIO TÉCNICO - ECONÓMICO DEL USO DE LA MEZCLA

EXPLOSIVA QUANTEX 73 EN LA UNIDAD MINERA

TOQUEPALA – SPCC.

Tesis sustentada y aprobada el día martes 02 de agosto de 2016, estando integrado el jurado calificador por:

PRESIDENTE

.....  
Dr. Julio Miguel Fernández Prado

1er. MIEMBRO  
(SECRETARIO)

.....  
Dr. Edgar Faustino Taya Osorio

2do. MIEMBRO

.....  
MSc. Carlos Huisa Ccori

ASESOR

.....  
Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, hermanos y amigos, que con su apoyo incondicional culmino con éxito esta etapa de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento a los catedráticos de la escuela profesional de ingeniería de minas de la Universidad Nacional “Jorge Basadre Grohmann”, quienes aportaron sus conocimientos en el bien de mi formación académica.

Así mismo, a mis amigos, compañeros de trabajo y a la empresa EXSA que me apoyaron con la realización de este proyecto de Tesis.

## **CONTENIDO**

<b>DEDICATORIA</b>	iii
<b>AGRADECIMIENTO</b>	iv
<b>RESUMEN</b>	x
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	
1.1. Descripción de problema	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Justificación de la investigación	6
1.4. Objetivos generales	7
1.5. Objetivos específicos	8
1.6. Alcances	8
1.7. Hipótesis	9
1.8. Operación de variables	9
1.8.1. Variables dependientes	9
1.8.2. Variables independientes	10

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

2.1. Ubicación	11
2.2. Geología regional	13
2.3. Geología local	14
2.4. Mineralogía	16
2.5. Reservas de mineral	18
2.6. Operaciones mineras de la mina Toquepala	19
2.6.1. Descripción	19
2.6.2. Método de explotación	20
2.6.3. Perforación	21
2.6.4. Voladura	23
2.6.5. Carguío	24
2.6.6. Acarreo	25
2.7. Plan de minado	27
2.8. Explosivos	28
2.9. Agentes de voladura	30
2.9.1. Nitrato de amonio	30
2.9.2. Anfo	32
2.9.3. Anfo aluminizado	34
2.9.4. Emulsión	36

2.9.5. Anfo pesado	39
2.9.6. Emulsiones explosivas químicamente gasificadas	41
2.9.7. Mezcla explosiva Quantex 73	47
2.9.7.1. Nitrato de amonio Quantex	49
2.9.7.2 Sensibilización de la emulsión	49
2.9.7.3 Fabricación de la mezcla explosiva Quantex 73	51
2.10. Características de desempeño de los explosivos	53
2.10.1. Velocidad de detonación	54
2.10.2. Densidad	56
2.10.3. Impedancia de detonación	58
2.10.4. Presión de detonación	58

### **CAPÍTULO III**

#### **MARCO METODOLÓGICO**

3.1. Tipo de investigación	59
3.2. Población y muestra	60
3.3. Procedimiento y estrategia	61
3.4. Métodos de medición	63
3.4.1. Velocidad de detonación	63
3.4.2. Densidad	67
3.4.3. Fragmentación	68

3.4.4. Tasa de excavación	70
3.4.5. Cálculo del balance de oxígeno del explosivo	72
3.5. Recursos	73
3.5.1. Recursos humanos	73
3.5.2. Recursos materiales	73
3.5.3. Recursos económicos	73
3.6. Cronograma de trabajo	74

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS TÉCNICOS DE INVESTIGACIÓN**

4.1. Línea base – Anfo pesado a base de emulsión matriz	76
4.1.1. Resultado de densidad y velocidad de detonación	77
4.1.2. Resultado de fragmentación	79
4.1.3. Resultado de la tasa de excavación	80
4.1.4. Resultado del balance de oxígeno del explosivo	81
4.2. Resultados de las pruebas con mezcla explosiva Quantex 73	83
4.2.1. Resultado de densidad y velocidad de detonación	84
4.2.2. Resultado de fragmentación	88
4.2.3. Resultado de la tasa de excavación	89
4.2.4. Resultado del balance de oxígeno del explosivo	91

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

5.1. Análisis de densidad y velocidad de detonación	94
5.2. Análisis de fragmentación	95
5.3. Análisis de la tasa de excavación	97
5.4. Análisis de mitigación de gases nitrosos	99
5.5. Análisis económico	101
5.6. Discusión de resultados	115

<b>CONCLUSIONES</b>	118
---------------------	-----

<b>RECOMENDACIONES</b>	120
------------------------	-----

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	121
-----------------------------------	-----

<b>ANEXOS</b>	123
---------------	-----

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad técnica, económica y operativa de la mezcla explosiva Quantex 73, la cual está compuesta por emulsión gasificable y nitrato de amonio Quantex, anteriormente se trabajó con Anfo pesado, explosivo que tenía el problema de generación de gases nitrosos al medio ambiente.

Con este propósito se realizó pruebas con la mezcla explosiva Quantex 73 para determinar y cuantificar las posibles ventajas que presenta este producto. Antes y durante la voladura se midió diversos parámetros como la densidad, velocidad de detonación y calidad del explosivo. Finalmente, post voladura se analizó la fragmentación del material, presencia de humos y lo más importante el costo por voladura.

Tras realizar las pruebas se hizo el análisis correspondiente y se determinó que el producto tiene ventajas desde el punto de vista operativo y económico. Se logró un ahorro importante hasta del 20 %, mejorando la fragmentación, tasa de excavación de los equipos de minado, además de mitigar la generación de gases nitrosos. En base a estos resultados, se implementó el uso de la mezcla explosiva Quantex 73 en Toquepala.

***Palabras clave:*** Mezcla explosiva Quantex 73, MEQ73.

## INTRODUCCIÓN

En *Southern Perú Copper Corporation* (SPCC) - Toquepala se realiza la extracción de mineral buscando la minimización de los costos operativos y maximizando la producción. En el área de perforación y voladura se realizó pruebas utilizando la mezcla explosiva Quantex 73 para compararlas con el Anfo pesado.

Se realizaron diversas pruebas con una nueva mezcla explosiva, que tiene como principal característica su mayor poder energético, pudiendo sustituir a las mezclas explosivas usadas en esa unidad como es el caso del Anfo pesado. Así mismo, el ingreso de esta nueva tecnología a la operación unitaria de voladura se puede volver una estrategia para la reducción de costos, aprovechando las propiedades del explosivo y modificando las mallas de perforación y voladura, lo cual ocasionará la disminución del factor de carga, y con ello los costos totales reflejados en el indicador dólares por tonelada rota fragmentada.

Este trabajo de tesis se desarrolla en cinco capítulos principales:

Capítulo I, Planteamiento del problema de investigación: Descripción del problema, antecedentes, justificación de la investigación, objetivos

generales, objetivos específicos, alcances, hipótesis, operación de variables.

Capítulo II, Marco teórico: Aspectos generales, explosivos, agentes de voladura y características de desempeño de los explosivos.

Capítulo III, Marco metodológico: Se da a conocer el tipo de método a utilizar y los instrumentos utilizados para la recolección de datos de campo.

Capítulo IV, Resultados técnicos de la investigación: Línea base – Anfo pesado a base de emulsión matriz y resultados de las pruebas con mezcla explosiva Quantex 73.

Capítulo V, Análisis económico y discusión de resultados: análisis técnico – económicos de los resultados obtenidos en campo y su importancia.

Se finaliza con las conclusiones, recomendaciones, referencia bibliográfica y anexos donde se adjunta los procedimientos de mina.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Descripción del problema**

Teniendo en cuenta que la competitividad de los bienes y servicios en el libre mercado cada vez es mayor y las necesidades también son mayores y consumidores buscando un menor precio y oportunidad; bajo esta premisa la industria de los explosivos busca satisfacer las demandas de sus clientes con productos de mejor calidad a un menor precio.

Es por lo cual, las mezclas explosivas comerciales se han modificado en su composición, para ser capaces de trabajar bajo cualquier condición en la que se encuentre el macizo rocoso, y fragmentar el macizo rocoso de igual o mejor manera que otros explosivos.

Bajo este principio se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuáles son las ventajas técnicas, operativas y económicas que aporta utilización de la mezcla explosiva Quantex 73, en comparación con

el Anfo pesado en el proceso de voladura de rocas de la mina Toquepala?

## **1.2. Antecedentes**

Las mezclas explosivas comerciales se han modificado en su composición, es el caso de la emulsión matriz que se ha modificado, agregando un ingrediente dando como resultado la emulsión gasificada, el cual da origen a la mezcla explosiva Quantex 73. Entonces, este explosivo debe ser capaz de trabajar bajo cualquier condición en la que se encuentre el macizo rocoso, y fragmentar el macizo rocoso igual o mejor que el Anfo pesado, con cero gases tóxicos y bajo costos en \$/t fragmentada.

El presente trabajo toma como referencia aplicaciones y trabajos de investigación con el uso de emulsiones gasificadas, tales como:

- Evaluación técnica económica del uso del SANG en mina La Arena (Huangal Cruzado, Cesar), donde se utiliza solo emulsión gasificada SANG para el desarrollo de dicho estudio.

- Evaluación técnico – económico de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas en Cuajone – Southern Perú (Medina, Robert), donde se utiliza emulsiones gasificadas como SlurrexG y SANG para el desarrollo de dicho estudio.
- Análisis de factibilidad para el uso de Anfo pesado a base de emulsión gasificable en minera Yanacocha. (Vilela Sangay, Wilson), donde se utiliza emulsión gasificada SlurrexG con nitrato poroso Cachimayo, para el desarrollo de dicho estudio.

También se puede indicar que actualmente ya se implementó esta tecnología en minas tales como Yanacocha, Cuajone, Constancia, Pucamarca y se viene realizando pruebas en Brocal, la Zanja, Barrick, Shougang y Otros

### **1.3. Justificación de la investigación**

Los cambios que se presentan en el mundo, hacen que toda actividad tenga una necesidad de cambio constante para así obtener mejores resultados y por ende mejor producción. Frente a la incertidumbre que toda empresa tiene por el “qué hacer”, esto se vuelve el reto principal que tienen entre sí las organizaciones. Entonces, tomando esta premisa se sabe, para que una compañía minera tenga utilidades al finalizar cada periodo económico es importante minimizar los costos operacionales en cada operación minera unitaria; tal es así que casi todos los investigadores a nivel mundial ponen mucho énfasis y realizan investigaciones en las operaciones binomiales de perforación y voladura.

Pero, es importante resaltar que estas dos operaciones binomiales son las que dan inicio a la etapa de producción de cualquier complejo minero, donde los resultados de esta, que es la denominada fragmentación, influye en un 99 % en la rentabilidad de la compañía minera, y en especial en las subsiguientes operaciones mineras unitarias (carguío, acarreo, chancadora primaria, chancadora secundaria, etc.). Enfatizando, la fragmentación como

resultado de una voladura de rocas tiene un significativo impacto en la rentabilidad de la mina, para ello se requiere una adecuada fragmentación en el tamaño de la roca para maximizar el desempeño de los procesos posteriores. Si la fragmentación de tamaño de roca fragmentado es modelada y controlada, la operación habrá hecho un avance significativo hacia la mejora de su desempeño.

Sin embargo, en cualquier compañía minera no solo trata de hacer voladura de rocas para obtener producción, si no también hacer voladura de rocas y paralelamente proteger la roca remanente a la labor minera.

#### **1.4. Objetivos generales**

- Demostrar las ventajas, técnicas, operativas y económicas que aporta la utilización de la mezcla explosiva Quantex 73, en comparación con el Anfo pesado en el proceso de voladura de rocas de la mina Toquepala.

### **1.5. Objetivos específicos**

- Estudiar la posibilidad de reemplazar el Anfo pesado por la mezcla explosiva Quantex 73.
- Mitigar la generación de gases nitrosos y por ende mejorar las prácticas medioambientales y de seguridad.
- Obtener una mejor fragmentación utilizando la mezcla explosiva Quantex 73.
- Disminuir el costo del explosivo por metro lineal, por taladro y por tonelada usando la mezcla explosiva Quantex 73.
- Identificar los puntos críticos y establecer procedimientos y controles de calidad en la implementación de la mezcla explosiva Quantex 73.

### **1.6. Alcances**

La metodología aplicada es de fácil aplicación y entendimiento, así como también comprobar con las pruebas de campo realizadas en Toquepala con la mezcla explosiva Quantex 73 sus ventajas técnicas, operativas y económicas, en comparación con el Anfo pesado.

## **1.7. Hipótesis**

Se plantea la hipótesis de que la utilización de la mezcla explosiva Quantex 73 va a mejorar los resultados esperados, añadiendo un valor agregado a la operación en cuanto a la reducción de costos, ventajas operativas, mitigación de gases nitrosos, reducción de la fragmentación de roca.

## **1.8. Operación de variables**

### **1.8.1. Variables dependientes**

Uso de la mezcla explosiva Quantex

Indicadores:

- Factor de potencia.
- Costos.
- Fragmentación.
- Velocidad de excavación.
- Emisión de gases nitrosos.

### **1.8.2. Variables independientes**

Estudio tecnico del uso del explosivo

Indicadores:

- Diseño de carga.
- Monitoreo de densidades.
- Monitoreo de velocidad de detonación.
- Análisis granulométrico.
- Estadísticas.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Ubicación**

El yacimiento se ubica en el sur del Perú, a 68 km de vuelo al norte de la ciudad de Tacna, en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, departamento de Tacna. Ver Figura 01.

La ubicación de la mina Toquepala está dada por las siguientes coordenadas geográficas:

- 17° 13' Latitud Sur.
- 70° 36' Longitud Oeste.

Los depósitos geológicamente similares de Quellaveco y Cuajone se encuentran a 18 y 29 km de Toquepala; Chuquicamata se encuentra a 600 km al sur.

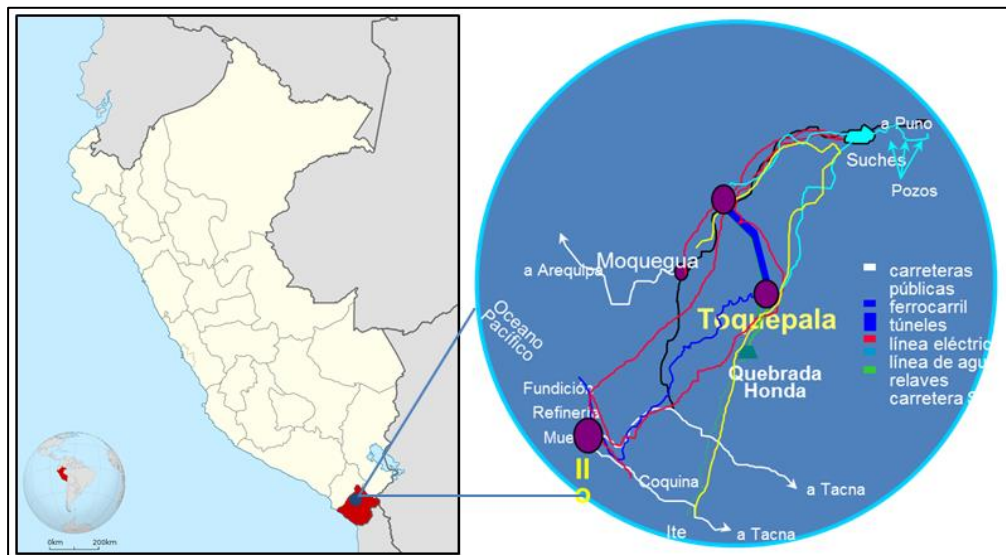


Figura 01. Ubicación Distrito Minero Toquepala.

Fuente: Elaboración propia.

Toquepala es accesible mediante la carretera Panamericana Sur, desde Camiara, situado a la altura del km 1 204, donde parte una carretera afirmada de 76 km hacia la mina. También se cuenta con otra carretera de 73 km que une la ciudad de Moquegua con la mina.

La mina es accesible también por vía aérea, puesto que cuentan con un pequeño aeropuerto en la zona de *Staff*, pero solamente para avionetas de uso de la compañía. Las vías de acceso secundarias están representadas por un ferrocarril industrial de 167 km que une la mina con el puerto de Ilo, y otro que une las

minas de Cuajone y Toquepala.

## **2.2. Geología regional**

El depósito está ubicado en un terreno compuesto de volcánicos mesozoicos y terciarios intrusionados por apófisis dioríticas del batolito andino.

La historia tectónica de la región está comprendida en un lapso geológico entre el cretáceo superior y terciario inferior, cuyos efectos expuestos en los diferentes tipos de rocas que afloran a lo largo de esta faja de yacimientos de cobre porfirítico.

La actividad volcánica del cretáceo superior, que depositó una serie de derrames riolíticos y andesíticos conocidos integralmente como “grupo Toquepala”, sufrió plegamientos, fallamientos y levantamientos en bloques por acción de una compresión más o menos continua que iniciándose con el “plegamiento peruano” de Steiman, alcanza su máximo desarrollo durante el “plegamiento incaico”. Los esfuerzos producidos fueron lo suficientemente intensos como para producir importantes fallas de compresión de

rumbo Norte-Oeste, y afectaron la estructura homoclinal volcánica pre-intrusiva hacia el Sur-Oeste. En general, los eventos tectónicos (orogénesis) que tuvieron lugar en dicho intervalo de tiempo, coinciden con la actual cordillera de los Andes, ubicándose en el flanco occidental.

### **2.3. Geología local**

Toquepala es un depósito mineral de tipo pórfido de cobre, donde la mineralización está constituida por una fina disseminación de sulfuros y el relleno de angostas vetillas y con poca persistencia de fracturas, emplazadas en una secuencia de rocas ígneas de composición química ácidas a intermedias.

La forma cómo esta mineralización ha llegado a su posición actual es el resultado de muchos y muy variados factores que se explicarán más adelante.

Estructuralmente, el depósito está ubicado en una chimenea volcánica del tipo diatrema (chimenea de brecha) donde la mineralización del depósito ha sido posible por la existencia de una

zona de debilitamiento que permitió el paso de las soluciones mineralizadas.

Mineralógicamente, el depósito desde su origen ha sufrido sucesivos cambios químicos y estructurales. La mineralización ha seguido los procesos de evolución comunes a todos los depósitos de este tipo, originando finalmente, la alteración y mineralización supergénica.

El área mineralizada de forma elongada y de 8 km de largo, ha sido un centro de intensa actividad ígnea. Existen varios cuerpos intrusivos de formas irregulares dentro y junto a una gran chimenea ubicada en el centro. El cuerpo mineralizado en forma de hongo consiste de una zona enriquecida de posición tendida, predominante, de calcosina con una continuación a manera de tallo, de mena de calcopirita hipógena en la profundidad, tanto dentro como alrededor de la chimenea. La alteración hidrotermal se generaliza en la zona de mineralización. El cuarzo y la sericita constituyen los principales productos de alteración, y en muchos casos las texturas de la roca original han desaparecido.

Los principales sulfuros, pirita hipógena, calcopirita y calcosina supérgena, se presentan principalmente como rellenos de vacíos en la brecha y como granos pequeños disseminados a través de todas las rocas alteradas. Las venillas de sulfuros son relativamente escasas. Los sulfuros se encuentran más abundantes y la alteración es más intensiva en ciertas unidades de rocas, tales como la diorita y la mayoría de las brechas.

#### **2.4. Mineralogía**

Los procesos de alteración, el emplazamiento intrusivo de las rocas y mineralización en los depósitos porfiríticos de cobre pueden ser generalizados como un desarrollo de origen magmático subvolcánico de un magma rico en metales, donde los fluidos residuales se mezclan con aguas meteóricas durante las últimas etapas de enfriamiento en la formación de un yacimiento.

Los sulfuros se encuentran disseminados en delgadas venillas y como relleno de vesículas o espacios vacíos en las brechas. La abundancia de los sulfuros es en general de:

- Pirita (Py).
- Calcopirita (Cpy).
- Calcosina (Cc).
- Molibdenita (Moly).

La mineralización supérgena o secundaria está dada por metales transportados por aguas meteóricas oxidadas que se mueven hacia abajo y también lateralmente, en contraste con la mineralización hipógena o primaria donde los sulfuros son formados por soluciones hidrotermales ascendentes.

El enriquecimiento supergénico, por lo tanto, consiste de un relativo reemplazamiento de sulfuros primarios por sulfuros secundarios y en una menor extensión por el relleno de los intersticios de óxidos minerales en zonas debajo del nivel freático donde soluciones lixiviadas ácidas y oxigenadas son reducidas y neutralizadas. El enriquecimiento secundario depende de la cantidad de pirita disponible para producir un ambiente de bajo pH, reemplazando calcosina en zonas extensas de pirita-calcopirita.

En Toquepala se desarrolló mejor el enriquecimiento

secundario, presentando las siguientes características mineralógicas:

- Mineralogía simple, con distribución de leyes de cobre uniforme.
- Espesor de mineral, mayores de 300 m.
- La pirita es el sulfuro más abundante, la calcopirita el sulfuro de cobre más abundante y la calcosina es el mineral supérgeno más importante.
- La molibdenita se presenta como subproducto.

## **2.5. Reservas de mineral**

La compañía cuenta con reservas probadas de cobre que alcanzan la cifra de 2 354 millones de toneladas de mineral, con una ley promedio de 0,541 % de Cu y 0,031 % de Mo y unos 9 446 millones de material de desmonte que otorgan una vida útil de 54 años correspondiendo el 80 % a sulfuros primarios y el 20 % a secundarios.

La mina fue diseñada y planeada para trabajar con un *Cut Off*

de 0,233 % de ley de Cobre y 0,031 % Mo durante el tiempo de vida de la misma (Olazabal Javier, 2014).

## **2.6. Operaciones mineras**

### **2.6.1. Descripción**

La mina viene operando desde el año 1957, produciendo concentrado de cobre desde el año 1960. Está en su segundo medio siglo de operaciones, con nuevas reservas y un proyecto de ampliación minero – metalúrgico que llegará a procesar 120 000 toneladas de mineral por día.

Actualmente, la mina Toquepala produce 65 000 toneladas métricas de mineral por día, con ley aproximada de 0,66 % de Cu, lo que hace aproximadamente 25 millones de toneladas métricas al año. La mina está dividida en 6 *pushbacks* o fases de minado hasta alcanzar el límite final del *pit*. Actualmente, se encuentra en explotación las fases 3; 4 y 5.

Toquepala es una mina que diariamente extrae más de

550 000 t/día de las cuales 65 000 son mineral. En Toquepala operan 28 camiones Komatsu 930E de 310 t, 18 camiones de 218 t Komatsu 830E, 5 camiones CAT 793C de 231 t, 13 camiones CAT 793D de 231 t, 9 camiones 797F de 364 t. En total son 73 volquetes la flota que cuenta la compañía. En Toquepala emplean 8 palas en total. Asimismo, cuenta con 11 perforadoras para taladros de producción y 4 perforadoras para pre-corte (Olazabal Javier, 2014).

#### **2.6.2. Método de Explotación**

En Toquepala se tiene bancos con 15 metros de altura uniendo los niveles por medio de rampas con gradientes entre 8 % y 10 % y carreteras (incluyendo rampas) con un ancho hasta 40 m.

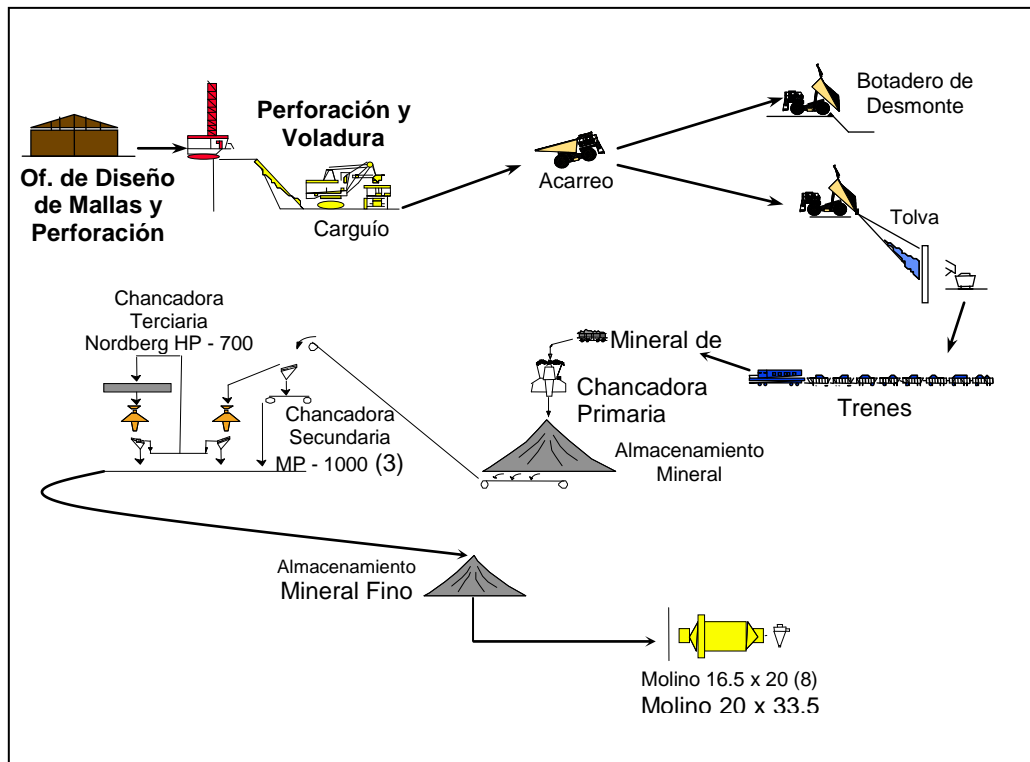


Figura 02. Diagrama de flujo de la operación en Toquepala.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.6.3. Perforación

La perforación es la primera operación minera que se efectúa en la preparación de una voladura, sin una perforación adecuada y ordenada la voladura sería deficiente, lo que conllevaría a una baja eficiencia en el carguío del material impactando directamente en la producción de la mina.

En el caso del tajo abierto de Toquepala se lleva a cabo una perforación del tipo rotativa con triconos, ésta es efectuada por grandes equipos de perforación capaces de ejercer elevados empujes sobre la broca, es decir, la perforación es realizada mediante el método de rotación – trituración en donde la energía es transmitida hasta la broca a través de barras de acero las que puestas en rotación fuerzan al broca contra la roca siendo los botones de carburo de tungsteno prensados contra la roca para finalmente obtener una trituración similar a la de percusión.

De manera general es importante efectuar esta operación con la mayor exactitud del caso, en lo que respecta a profundidad, exactitud en las coordenadas, paralelismo y perpendicularidad, puesto que todo esto repercutirá en la obtención de una fragmentación requerida y control en las paredes finales del tajo (Olazabal Javier, 2014).

Equipos de perforación:

- Tres perforadoras eléctricas P&H 100XP.

- Dos perforadoras eléctricas P&H 120.
- Tres perforadoras eléctricas Bucyrus 49R-III.
- Tres perforadoras eléctricas Bucyrus 49HR.
- Una perforadora DTH Titon 600 para pre-corte.
- Dos perforadoras DR 580 para pre-corte.
- Una perforadora DR 560 para pre-corte.

#### **2.6.4. Voladura**

La voladura es la más importante de las actividades del ciclo de minado, la mina Toquepala es un yacimiento de pórfidos de cobre que tiene una antigüedad de más de 40 años, lo cual hace que en la actualidad estén trabajando en niveles más profundos donde se debe tener cuidado con parámetros de vibración y obtener paredes estables que soporten la carga portante de los niveles superiores para llevar una operación de minado dentro de los estándares de seguridad, calidad y productividad.

En la perforación primaria se llevan a cabo dos tipos de voladura: voladura primaria de producción y voladura para

paredes finales, donde en esta última el carguío de explosivo se realiza de forma controlada y en menor proporción que en voladura de producción a fin de no dañar las paredes del tajo, para los disparos primarios se emplean dos tipos de explosivos: Anfo y Anfo pesado en proporciones variables.

Entre los principales factores que incluyen en los resultados de una voladura se encuentran: las propiedades de los explosivos a usar (densidad, velocidad de detonación, etc.), la distribución y secuencia de iniciación, geometría del disparo y desde luego las propiedades del macizo rocoso.

#### **2.6.5. Carguío**

Es la actividad de mayor importancia en el ciclo de minado. El carguío consiste en el recojo del material ya fragmentado para depositarlo seguidamente en los volquetes quienes lo conducen a distintos destinos si se trata de mineral para planta de chancado mineral para lixiviación o desmonte.

Equipos de carguío:

- Dos palas P&H 4100 de 60 yd<sup>3</sup>
- Dos palas P&H 4100 de 56 yd<sup>3</sup>
- Una pala Bucyrus 495B1 de 56 yd<sup>3</sup>
- Tres palas Bucyrus 495HR de 73 yd<sup>3</sup>
- Un cargador frontal CAT 994F de 23 yd<sup>3</sup>
- Un cargador Le Tourneau L1850
- Un cargador Le Tourneau L2350

#### **2.6.6. Acarreo**

Es el sistema de transporte con el uso de volquetes de acarreo de distintas capacidades.

El sistema de acarreo es directo de la pala al camión y estas a los diferentes botaderos, tolvas de mineral o tolvas de mineral lixiviable.

No existe el sistema pala camión directo a concentradora por que esta se encuentra a 5 km de la misma, esta distancia

no es aconsejable para el óptimo aprovechamiento económico de los camiones, solo se puede usar en distancias menores 3,5 km únicamente.

Referente a las rampas de tránsito de los camiones, estas no exceden al 8 % dentro de la mina, y aun menor las rampas de acceso a las carreteras que constituyen el recorrido regular de los camiones cuando se encuentran acarreado (Olazabal Javier, 2014).

Equipos de acarreo:

- 28 Volquetes Komatsu 930E1, E3 y E4 de 290 t
- 5 Volquetes Caterpillar 793C de 218 t
- 13 Volquetes Caterpillar 793D de 218 t
- 8 Volquetes Caterpillar 797F de 363 t
- 18 Volquetes Komatsu 830 de 218 t

## 2.7. Plan de minado

Según Olazabal Javier (2014), a continuación se expone el plan de minado para los cinco próximos años de la mina. Para alcanzar este plan se debe mover aproximadamente 590 000 toneladas por día. La mina tiene una vida útil de 54 años con las reservas actuales, asimismo y a nivel de minado tiene proyectado una producción de 590 000 toneladas por día con leyes que fluctúan alrededor de 0,6 % de Cu de mineral para planta y ley de 0,129 % de Cu para la planta lixiviable.

Tabla 01. Plan de Minado 2014 - 2017.

	UM	2014	2015	2016	2017
Mineral	t	20 055 000	19 681 000	41 274 000	41 312 000
Ley de Cu en mineral	%	0,601	0,604	0,608	0,659
Lixiviable	t	42 617 379	70 604 138	72 347 856	61 756 835
Ley de Cu en lixiviable	%	0,129	0,176	0,189	0,166
Desmonte	t	152 043 826	154 714 762	131 378 087	141 931 105
Total material minado	t	214 716 205	244 999 900	244 999 943	244 999 940

Fuente: SPCC Toquepala, 2015.

### Fases de minado

Este es el actual modelo de mina que se viene trabajando. Ahí

se puede observar las diferentes fases de minado que se tiene. Actualmente se está trabajando las fases 3; 4 y 5.

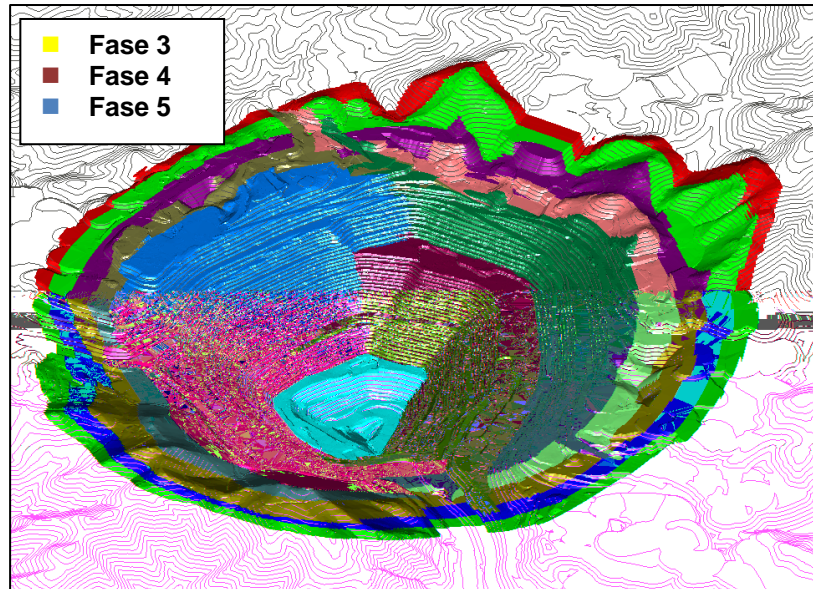


Figura 03. Plan de minado Toquepala.

Fuente: SPCC Toquepala, 2015.

## 2.8. Explosivos

Los explosivos son sustancias o mezclas químicas, con la propiedad de cambiar a un estado más estable, mediante una reacción química exotérmica en un instante de tiempo, liberando toda la energía que contienen en forma de gases, sonido y calor de una manera violenta.

Parte de esta energía liberada es utilizada en la fragmentación de roca, especialmente la producción de gases a gran presión y temperatura. En la industria minera, la voladura es el método más productivo para la excavación en roca dura (López Jimeno, 2003).

Existe una variedad de clasificaciones para los explosivos en base a sus distintas características o aplicaciones. Para esta investigación se presenta en el siguiente diagrama una clasificación de los explosivos de uso industrial, los cuales son aplicados en minería.

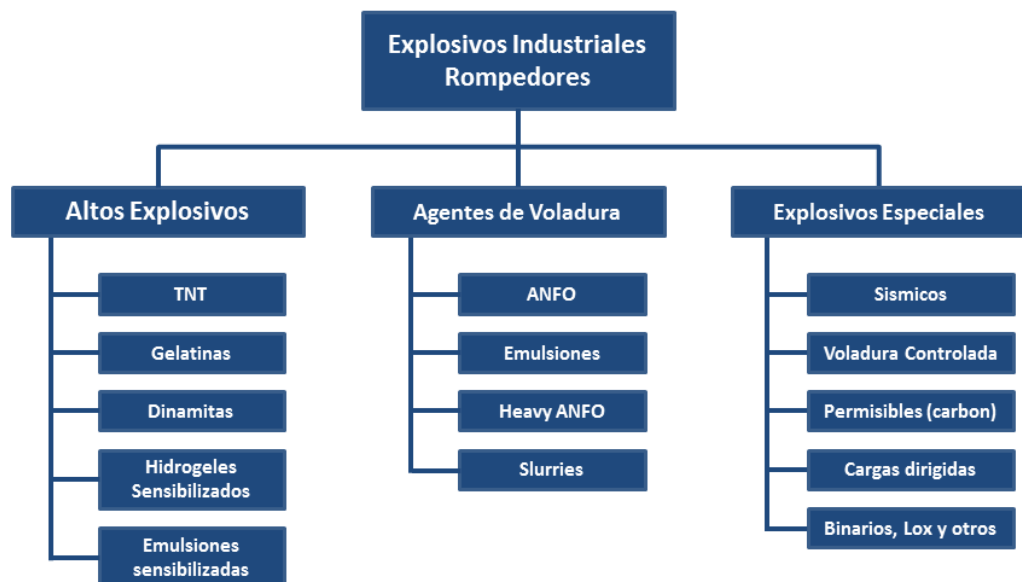


Figura 04. Clasificación general de los explosivos industriales.

Fuente: Manual Práctico de Voladura EXSA.

Debido al tema de la presente investigación, se describirá en detalle únicamente los agentes de voladura que están involucrados y son objeto de estudio, los cuales a su vez son más extensamente utilizados hoy en día en la minería a tajo abierto en todo el mundo.

## **2.9. Agentes de voladura**

López Jimeno (2003) describe que los agentes de voladura son aquellos explosivos no sensibles al fulminante N<sup>o</sup> 8, por lo que necesitan un cebo reforzado, primer o *Booster* para iniciar su detonación. Estos explosivos a diferencia de los primarios que tienen alta energía y sensibilidad, se caracterizan por desarrollar un mayor trabajo útil, en el estricto sentido de arranque y fragmentación de roca. Es así que se tienen los siguientes agentes de voladura que se utilizan en minería de tajo abierto por su gran poder rompedor y bajo costo.

### **2.9.1. Nitrato de amonio**

El nitrato amónico ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) es una sal inorgánica de color blanco cuya temperatura de fusión es 160,6 °C

aisladamente, no es un explosivo, pues sólo adquiere tal propiedad cuando se mezcla con una pequeña cantidad de un combustible y reacciona violentamente con él aportando oxígeno. El aire que contiene el 21 % de oxígeno, mientras que el nitrato de amonio posee el 60 % de oxígeno.

La densidad del nitrato de amonio poroso o a granel es aproximadamente 0,8 g/cc, mientras que las densidades de las partículas del nitrato de amonio no poroso se acercan a la de los cristales (1,72 g/cc), pero con valores algo inferiores (1,40 - 1,45 g/cc) debido a la micro porosidad.

En cuanto al tamaño de las partículas suele variar entre 1 y 3 mm.

La solubilidad del nitrato de amonio en el agua es grande y varía con la temperatura:

- A 10 °C el 60,0 % solubilidad.
- A 20 °C el 65,4 % solubilidad.
- A 30 °C el 70,0 % solubilidad.

- A 40 °C el 73,9 % solubilidad.

Por eso es que el Anfo no se utiliza en barrenos húmedos.

### 2.9.2. Anfo

El Anfo es una mezcla explosiva industrial cuya aplicación se ha extendido por todo el mundo, debido a su seguridad en la manipulación, bajo costo y alto rendimiento energético. Anfo, por sus siglas en inglés hace referencia a *Ammonium Nitrate/Fuel Oil*, los componentes que se mezclan para formar el agente explosivo. Su composición es de 94 % nitrato de amonio y 6 % combustible. El nitrato de amonio es una sal inorgánica, no explosiva, siendo de aplicación en minería aquella que se fabrica como partículas esféricas o *prills* porosos, en consecuencia es crítica su capacidad de absorción y retención.

Hoy en día, teniendo un balance de oxígeno correcto, el Anfo es la fuente de mayor energía explosiva más barata del mercado (Konya & Albarrán, 1998). Sin embargo, la principal

desventaja del Anfo es su nula resistencia al agua. Esto se debe a que el agua absorbe gran cantidad de energía para su vaporización y rebaja la potencia del explosivo. Además, el nitrato es soluble en agua, perdiendo todas sus características al estar en contacto con esta. Igualmente el nitrato es higroscópico, es decir, absorbe la humedad del medio ambiente, por lo que su almacenamiento debe ser en lugares apropiados.

Las propiedades explosivas del Anfo están ligadas a su densidad. A medida que ésta aumenta, también aumenta su velocidad de detonación. Sin embargo, este aumento de densidad dificulta su iniciación, volviéndose inerte a una densidad por encima de 1,20 g/cc, no pudiendo detonar o solamente en el área inmediata al iniciador (López Jimeno, 2003). Por este motivo, es imperante tener un nitrato de amonio grado explosivo (poroso) para tener la densidad ideal.

El diámetro de diseño de taladro también es un parámetro fundamental en la velocidad de detonación, lo cual se ve representado en el siguiente gráfico, teniendo una proporción

directa.

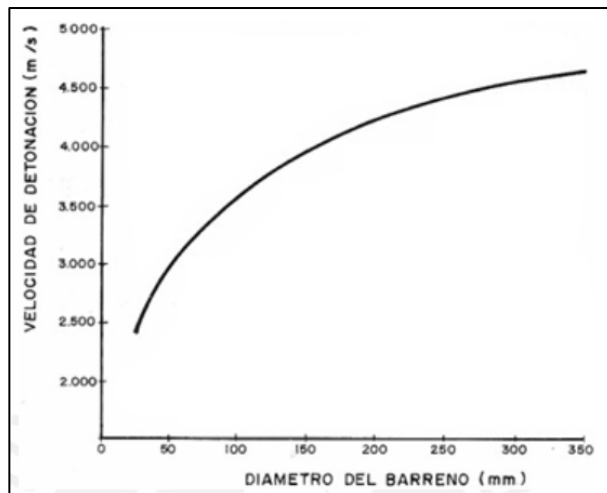


Figura 05. Influencia del diámetro del taladro en la velocidad de detonación.

Fuente: Manual P&V López Jimeno, 2003.

### 2.9.3. Anfo aluminizado

Debido a que el Anfo tiene una baja densidad, también lo es su energía, velocidad de detonación, poder rompedor y demás características. Para elevar esta energía y poder aplicar el explosivo en rocas más competentes, se le puede agregar aluminio en forma de polvo o granalla, por lo general entre 5 % a 10 % en peso, obteniendo una mezcla llamada Anfo aluminizado, también conocido como Alanfo.

El aluminio es un combustible altamente energético que incrementa la liberación de energía, en forma de presión y temperatura de detonación. Hay una menor producción de gases debido a que la reacción del aluminio forma como productos óxidos sólidos. Sin embargo, hay una mayor presión y temperatura, aspectos críticos para la fragmentación de la roca (Ames & León, 2007). En el siguiente gráfico se aprecia el efecto de una carga de Anfo aluminizado frente a una carga de únicamente Anfo, en base a la energía desarrollada.

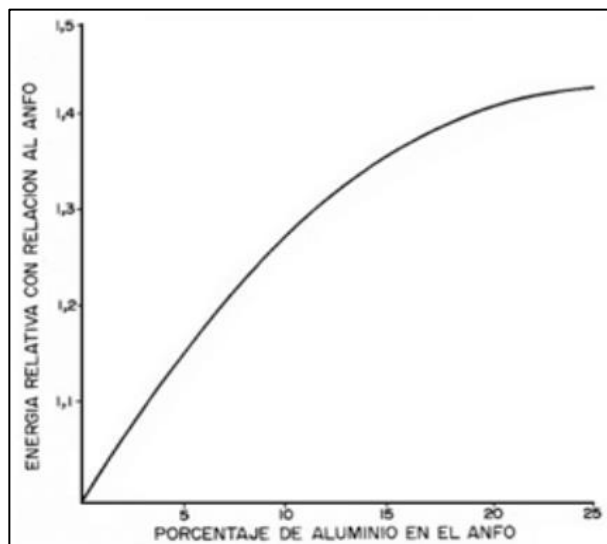


Figura 06. Efecto de la adición de aluminio sobre la energía.

Fuente: Manual P&V López Jimeno, 2003.

#### **2.9.4. Emulsión**

Las emulsiones explosivas son agentes de voladura del tipo denominado “agua en aceite” en las que la fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado, comúnmente diésel 2.

El tamaño de los componentes de esta mezcla (oxidante y combustible) tiene influencia directa en la velocidad de detonación y en general en el performance del explosivo. Según López Jimeno (2003), “el desarrollo de los explosivos ha llevado aparejado una reducción progresiva del tamaño de las partículas, pasando desde los sólidos a las soluciones salinas con sólidos y, por último, a las microgotas de una emulsión explosiva”. Esto se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 02. Dimensiones de los oxidantes en los explosivos y su efecto en la velocidad de detonación para un diámetro dado de taladro

Explosivo	Tamaño (mm)	Estado	VOD (km/s)
Anfo	2,0	Sólido	3,2
Dinamita	0,2	Sólido	4,0
Hidrogel	0,2	Sólido/Líquido	3,3
Emulsión	0,001	Líquido	5,0 – 6,0

Fuente: Bampfield & Morrey, 1984.

La emulsión pura no es un agente de voladura, debido a que no es sensible ni siquiera al *Booster* porque su densidad es muy alta. Para sensibilizarla, se puede utilizar un mecanismo físico como la generación de burbujas de gas, las cuales al ser comprimidas adiabáticamente se comportan como puntos calientes o *hot spots*, favoreciendo tanto la iniciación como la propagación de la detonación. Estos agentes gasificantes pueden ser poliestireno expandido o microesferas de vidrio (López Jimeno, 2003). A la vez, se puede aplicar la sensibilización química a través de un agente gasificante.

### Características de la emulsión matriz:

- Apariencia: Pasta fluida.
- Densidad: 1,30 – 1,35 g/cc.
- Color y olor: color amarillento; olor a hidrocarburo.
- pH: 4,0 – 7,0.
- Viscosidad: 38 000 Cp.
- Resistente al agua.

### Composición química:

Tabla 03. Composición química y balance de oxígeno de la emulsión.

SUSTANCIA	FÓRMULA	Balance de Oxígeno
Nitrato de amonio	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	20 %
Nitrato de sodio	$\text{NaNO}_3$	47,1 %
Agua	$\text{H}_2\text{O}$	0 %
Combustible (D2)	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	-348,2 %
Emulsificante (Span-80)	$\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6$	-239,3 %
Otras sales	---	---

Fuente: Elaboración propia.

### 2.9.5. Anfo pesado

El Anfo pesado es la mezcla de dos agentes explosivos, el Anfo y la emulsión en diferentes proporciones, donde la emulsión envuelve los *prills* de Anfo, formando una matriz energética con propiedades específicas, como se muestra en la siguiente figura.

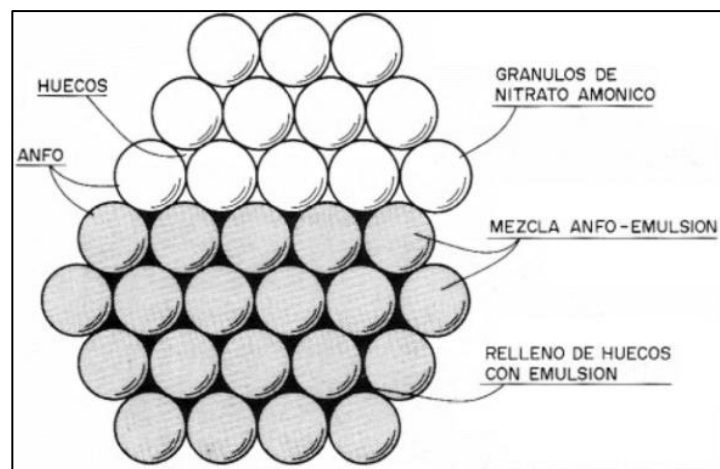


Figura 07. Estructura del Anfo pesado.

Fuente: Manual P&V López Jimeno, 2003.

Existen diversas mezclas de Anfo pesado, teniendo las principales en la siguiente tabla, incluyendo su capacidad de resistencia al agua, densidad, así como su VOD.

Tabla 04. Características principales de diferentes mezclas de Anfo pesado

Mezclas Explosivas	Composición (%)		Densidad (gr/cc)	VOD (m/s)	Resistencia al Agua
	Emulsión	Anfo			
HA-37	30	70	1,05 ( $\pm 0,01$ )	4 800 – 5 000	Nula
HA -46	40	60	1,15 ( $\pm 0,01$ )	5 000 – 5 200	Baja
HA-55	50	50	1,27 ( $\pm 0,01$ )	5 200 – 5 400	Buena
HA-64	60	40	1,29 ( $\pm 0,01$ )	4 500 – 4 800	Excelente

Nota:

- Tipo de emulsión: emulsión matriz para todas las mezclas de la tabla.
- VOD: Los rangos de VOD son para taladros de 12 1/4" de diámetro
- HA = *Heavy Anfo*

Fuente: Asistencia Técnica EXSA

En la siguiente figura se muestra el efecto que tienen, en cuanto a Potencia Relativa en Volumen (Anfo = 100), diferentes mezclas de Anfo pesado en función al porcentaje de emulsión. Se aprecia que se llega a un nivel (40 % emulsión, densidad ~ 1,30 g/cc) en donde la potencia deja de aumentar e inclusive disminuye ligeramente. Esto ocurre debido a que a mayor porcentaje de emulsión, mayor es la separación entre partículas de Anfo, y son estos elementos quienes actúan como puntos calientes y propagadores de la onda de choque.

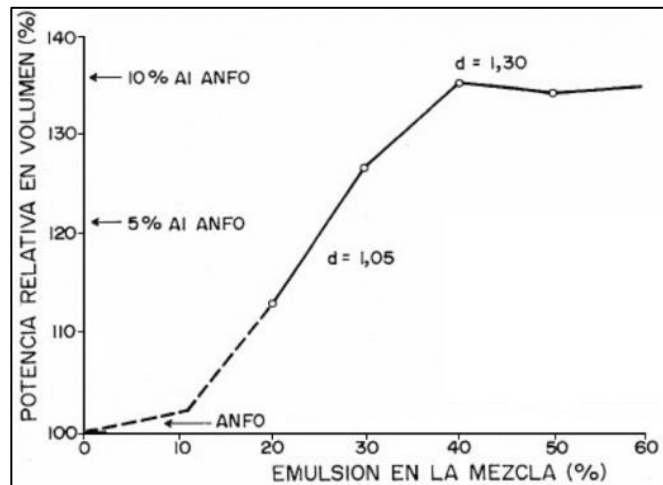


Figura 08. Variación de la potencia y densidad de un Anfo pesado en base al porcentaje de emulsión.

Fuente: Manual P&V López Jimeno, 2003.

### 2.9.6. Emulsiones explosivas químicamente gasificadas

Hasta tiempos muy recientes, la mayoría de las emulsiones explosivas a granel eran sensibilizadas usando micro esferas de vidrio. Pero, se debe mencionar que una reciente modificación en la tecnología de las emulsiones a granel es usando un sensibilizador químico para producir gas; luego conseguir sensibilizar la emulsión.

### Características de la emulsión G:

- Apariencia: Pasta fluida.
- Densidad: 1,28 – 1,40 g/cc.
- Color y olor: color amarillento; olor a hidrocarburo.
- pH: 3,0 – 6,0.
- Viscosidad: 36 800 Cp.
- Resistente al agua.

### Composición química:

Tabla 05. Composición química y balance de oxígeno de emulsión G.

SUSTANCIA	FÓRMULA	Balance de Oxígeno
Nitrato de amonio	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	20 %
Nitrato de sodio	$\text{NaNO}_3$	47,1 %
Ácido Acético	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	-106,7 %
Tiourea	$\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$	-145,5 %
Ácido Nítrico	$\text{NH}_3$	63,5 %
Agua	$\text{H}_2\text{O}$	0 %
Combustible (D2)	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	-348,2 %
Emulsificante (Span-80)	$\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6$	-239,3 %
Otras sales	---	---

Fuente: Elaboración propia.

La sensibilización de la emulsión mediante la generación de burbujas de gas por la adición de un agente gasificante, siendo en este caso el nitrito de sodio ( $\text{NaNO}_2$ ). Esta sustancia química reacciona con el nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), generando pequeñas burbujas de gas nitrógeno. A continuación se muestra la reacción química que ocurre.

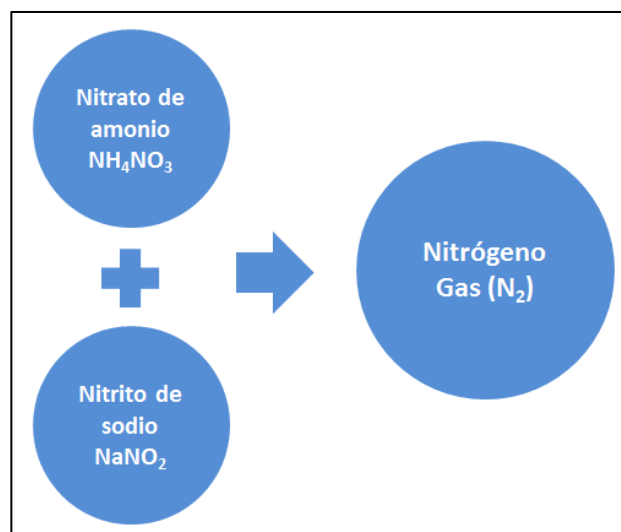
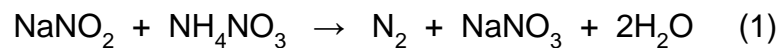


Figura 09. Sensibilización química por la generación de gas de nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia.

La reacción (1) se lleva a cabo de manera muy lenta y con

la finalidad de acelerar el proceso de gasificación se agrega ácido acético, el cual se encarga de romper algunas microgotas de emulsión y liberar al nitrato de amonio en su interior para que reaccione con el nitrito de sodio. También es necesario agregar el catalizador tiourea, el cual se encarga de acelerar aún más el proceso de gasificación.

La adición del ácido acético le da un carácter ácido a la emulsión. Asimismo, la cantidad de adición, junto con la tiourea, se determina durante las pruebas del explosivo, debido a que son solamente catalizadores y no intervienen en la reacción de formación del gas nitrógeno.

Debido a que la emulsión gasificada contiene burbujas finamente dispersas, en el volumen de las burbujas dependerá de la presión hidrostática. Por lo tanto, en el fondo del taladro; donde la presión debido a la columna explosiva será alta, el volumen de las burbujas será reducido, y entonces, el volumen relativo de gas a emulsión será también reducido.

Por lo tanto, la densidad de una emulsión gasificada es más alta en la columna explosiva del fondo del taladro, y tiene una densidad menor en la parte superior de la columna explosiva.

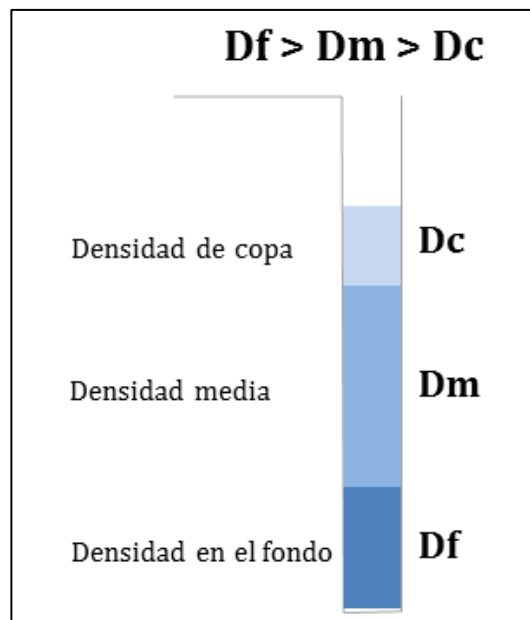


Figura 10. Variación de la densidad de columna de la emulsión gasificada

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se muestra el rango de la diferencia de densidades para una columna explosiva de una altura de carga de 20 metros en un taladro de gran diámetro, y esta carga

explosiva no tiene taco y con una densidad de copa de 1,10 g/cc.

Esta figura muestra la variación de la densidad de la columna explosiva con la variación de la altura; en este caso no se ha tomado en cuenta la influencia del taco.

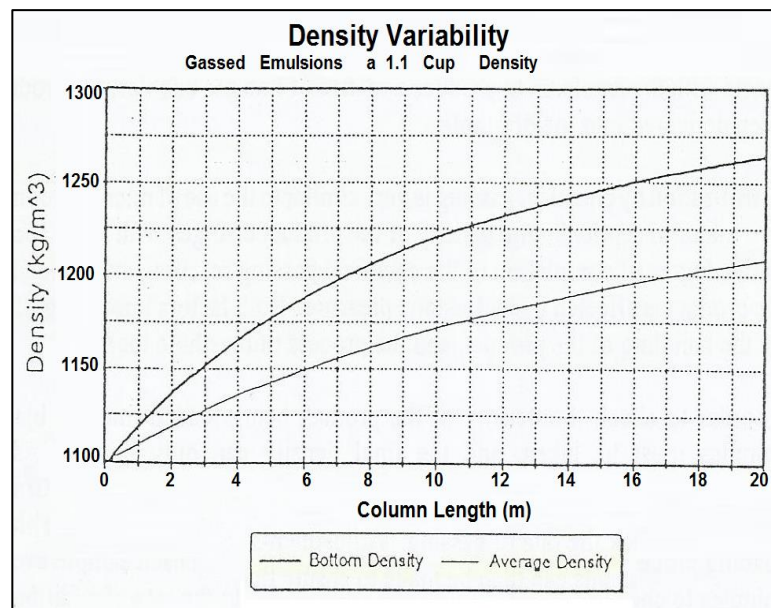


Figura 11. Variación de la densidad vs la longitud de columna explosiva para una emulsión gasificada con la densidad de copa de 1,1 g/cc.

Fuente: Medina, Robert 2014-UNI.

Se debe mencionar que esto es muy importante cuando se está usando una emulsión explosiva gasificada, para asegurar que la densidad de la columna explosiva en la parte inferior del taladro es menor que la densidad crítica de la emulsión; para un diámetro de taladro que se está usando.

Si la densidad de la columna explosiva incrementa demasiado, la velocidad de detonación disminuye; requiriendo el uso de *Boosters* que produzcan mayor presión de detonación; y podrían producir gases del color anaranjado indicando una reacción incompleta.

#### **2.9.7. Mezcla explosiva Quantex 73**

La mezcla explosiva Quantex 73 (MEQ73) está conformada por la emulsión gasificada con Anfo Quantex, estos en un porcentaje 70 % y 30 % respectivamente y adicionalmente un agente sensibilizador (nitrito de sodio).

La densidad de esta mezcla explosiva Quantex 73 es modificable, el cual nos permite obtener mejores o similares

resultados que las mezclas de Anfo pesado y es resistente al agua.

A continuación, se muestra la gasificación que ocurre en un taladro cargado con MEQ73 a base de emulsión gasificable, frente a otro cargado con Anfo pesado (HA) a base de emulsión matriz, cuya carga lineal no varía debido a que su densidad es constante.

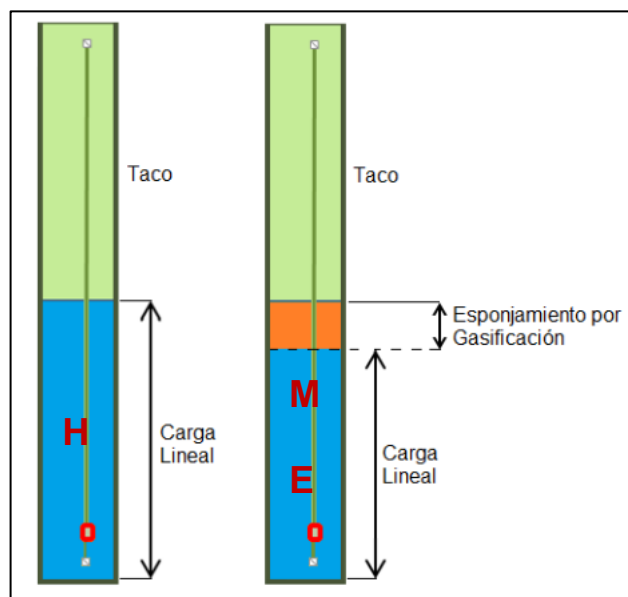


Figura 12. Diseño de carga de taladros con Anfo pesado y mezcla explosiva Quantex 73.

Fuente: Elaboración propia.

### **2.9.7.1. Nitrato de amonio Quantex**

El nitrato de amonio Quantex es 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.

Características del nitrato de amonio Quantex:

- Prilles esféricos y sólidos.
- Densidad: 1,04 g/cc  $\pm$  3 %.
- Humedad: 0,5 % (máximo).
- Punto de fusión: 169°C.
- Porcentaje de absorción de petróleo: Este producto funciona con una absorción de solo el 3 % de petróleo.

### **2.9.7.2. Sensibilización de la emulsión**

Para lograr la sensibilización de la emulsión se

debe añadir la solución gasificante, nitrito de sodio o solución L-8, para lo cual se debe tener en cuenta la velocidad de flujo del producto que se inyecta al taladro.

La siguiente tabla muestra el porcentaje de nitrito de sodio que es agregado a la mezcla explosiva Quantex 73 para lograr la densidad final deseada, partiendo de una densidad inicial de 1,38 g/cc. Cabe indicar que el tiempo que dura el proceso de gasificación de un taladro es de 15 - 25 minutos, por lo que se tiene que esperar este tiempo antes de tapar el taladro.

Tabla 06. Flujo de nitrito de sodio para gasificar MEQ73 según el flujo de descarga de la mezcla explosiva.

<b>Camión MACK</b>	<b>Flujo de Descarga (kg/min)</b>	<b>Nitrito de Sodio (%)</b>	<b>Flujo de Nitrito (LPM)</b>
Sistema Vaciable	800	0,13	1 a 1,2
Sistema Bombeable	270	0,12	0,4 a 0,6

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

### 2.9.7.3. Fabricación de la mezcla explosiva Quantex 73

El proceso de fabricación de la mezcla explosiva Quantex 73 se muestra en el siguiente gráfico, donde se observa que la nitrificación ocurre en la etapa final de la mezcla, justo antes de descargar en el taladro.

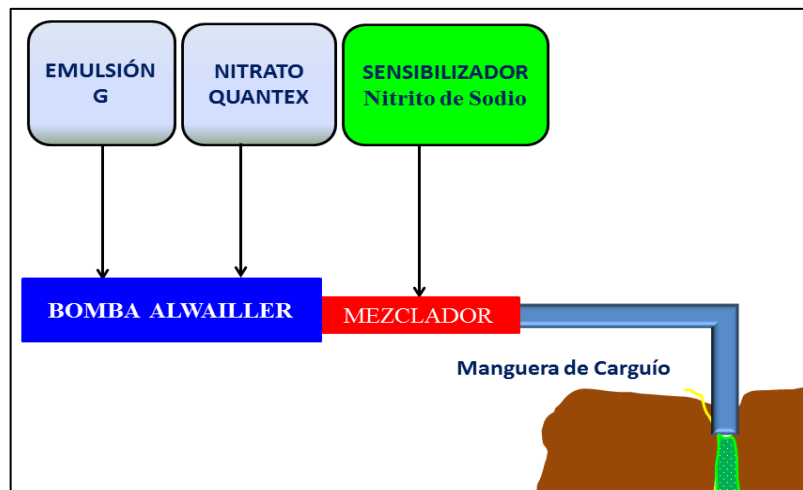


Figura 13. Proceso de gasificación de la MEQ73.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.



Figura 14. Camión – fábrica descargando MEQ73.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.



Figura 15. Calidad de la MEQ73 fabricada *in-situ*.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

## 2.10. Características de desempeño de los explosivos

Por objeto del presente estudio, las características que serán desarrolladas son aquellas que han podido ser medidas en la operación y afectan directamente la calidad de la fragmentación, lo que a su vez se relaciona con la productividad de los equipos de minado, los cuales no pueden ser afectados de manera negativa.

En este sentido, es importante mencionar que los agentes de voladura descritos previamente son fabricados y sensibilizados *in-situ* por medio de camiones fábrica, por lo que su calidad está ligada a la calibración de los equipos, calidad de componentes y capacidad del operador. Asimismo, los explosivos pueden ser afectados directamente por el medio ambiente que contiene los taladros, como flujos de agua, acidez del agua, fracturamiento de la roca, altas temperaturas, etc. En estos casos no se puede asumir al explosivo como puro con características uniformes debido a que su performance, sensibilidad y otras características propias pueden ser afectadas (Ames & León, 2007).

Ames & León (2007) describen el Poder Rompedor o Brisance

como la capacidad para fracturar y el efecto destructivo ejercido sobre la roca, por resultado de la descomposición instantánea del explosivo. A su vez, considera que esto es proporcional a la densidad de carga y velocidad de detonación. Estos son los factores analizados en el presente estudio.

#### **2.10.1. Velocidad de detonación**

López Jimeno (2003) describe la velocidad de detonación (VOD) como: “la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía” (pág. 142). La liberación de energía mencionada, en forma de sonido, calor y gases en un instante de tiempo, es la que se aprovecha para la fragmentación de la roca.

El trabajo útil que puede brindar cada explosivo, también entendido como efecto triturador, está ligado a la onda de choque durante la detonación, y ésta a su vez a la densidad y velocidad de detonación. Por este motivo, se puede utilizar la velocidad de detonación para determinar la eficiencia de una

reacción explosiva (Konya & Albarrán, 1998). De tener un valor menor a lo especificado, significa que el explosivo no está cumpliendo las especificaciones técnicas y por ende su performance está siendo afectado.

Debido a ello se considera la velocidad de detonación un factor crítico que determinará el rendimiento de un explosivo y que a su vez posee un método de medición sencillo. Por otro lado, hay diversos factores que afectan la velocidad de detonación como la densidad de carga, diámetro, confinamiento, iniciación y tiempo de espera dentro del taladro (López Jimeno, 2003).

En la siguiente tabla se detalla valores aproximados de velocidad de detonación para diferentes agentes de voladura.

Tabla 07. Velocidades de detonación para diferentes agentes de voladura

Agente de Voladura	VOD (m/s) para taladros de diámetro:		
	32 mm	76 mm	229 mm
Emulsión a granel	4 000 – 4 600	3 400 – 4 900	3 700 – 5 800
Anfo cargado neumáticamente	2 100 – 3 000	3 700 – 4 300	4 300 – 4 600
Anfo vaciado	1 800 – 2 100	3 000 – 3 400	4 300 – 4 600
Anfo encartuchado	-	3 000 – 3 700	4 300 – 4 600
Anfo pesado	-	-	3 400 – 5 800

Fuente: Konya & Albarrán, 1998.

### 2.10.2. Densidad

La densidad es un parámetro crítico en los explosivos, debido a que de éste dependen muchas importantes características como resistencia al agua, velocidad de detonación, poder rompedor, entre otras. Además, los explosivos se compran, almacenan y utilizan en base a su peso (Konya & Albarrán, 1998). Por tal motivo, la cantidad de explosivo que se diseña para cada taladro está basada en la densidad y por ende sus características para las cuales se diseñó dependen de la calidad del carguío.

La calidad para los agentes de voladura es un factor

crítico debido a que si la densidad es muy baja, la columna explosiva se vuelve muy sensible y puede ser iniciada por el cordón detonante, antes de que el *Booster* inicie la detonación desde el fondo del taladro. Por otro lado, si la densidad es muy alta, el agente de voladura pierde la sensibilidad al *Booster* y no inicia (López Jimeno, 2003).

En la siguiente tabla se muestran algunas densidades referenciales para agentes de voladura, las cuales varían entre 0,8 y 1,6 g/cc. Similarmente a la velocidad de detonación, a mayor densidad incrementa el poder rompedor del explosivo.

Tabla 08. Densidades para diferentes agentes de voladura.

<b>Tipo</b>	<b>Densidad (g/cc)</b>
Emulsión a granel	1,1 – 1,6
Anfo cargado neumáticamente	0,8 – 1,0
Anfo vaciado	0,8 – 0,9
Anfo encartuchado	1,1 – 1,2
Anfo pesado	1,1 – 1,4

Fuente: Konya & Albarrán, 1998.

### **2.10.3. Impedancia de detonación**

Está definida por el producto de la densidad del explosivo y su velocidad de detonación, la impedancia de detonación, conjuntamente con la impedancia característica de la roca, indican la capacidad relativa del explosivo para transmitir energía a dicho medio, así se ha determinado que cuando la razón entre ambas es igual a uno, se tiene mayor transferencia de energía (López Jimeno, 2003).

### **2.10.4. Presión de detonación**

Es una indicadora de la habilidad de un explosivo para fragmentar la roca, la misma que está dada por la presión inmediatamente por detrás del frente de detonación, en el llamado plano de Chapman – Joule (López Jimeno, 2003).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

La metodología empleada para la ejecución de este trabajo se planificó considerando como tema principal la reducción de costos en voladura y como tema secundario la eliminación de gases nitrosos.

Para ello esta investigación consiste en efectuar una serie de pruebas para evaluar y comparar los resultados económicos obtenidos usando la mezcla explosiva Quantex 73 en comparación con el Anfo pesado en sus diferentes mezclas (HA-28, HA-37, HA-46, HA-45/55, HA-55 y HA-64)

#### **3.1. Tipo de investigación**

- a) El tipo de investigación es aplicada, muestreo y experimental.
- b) El diseño es de tipo descriptivo, correlacional – causal.

### **3.2. Población y muestra**

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en SPCC Toquepala desde el 09 de diciembre de 2014 hasta el 09 de enero de 2015, donde se tuvo un consumo de 1 200 toneladas de emulsión G, 540 toneladas de nitrato de amonio Quantex y 05 toneladas de solución gasificante.

Las pruebas se ejecutaron en las zonas más críticas de la mina en cuanto a las estructuras geológicas, zonas altamente competentes como lo es en la fase 4, Micalaco y fase 3, haciendo un total de 13 disparos.

A continuación se muestra en la Tabla 09 el resumen de voladuras.

Tabla 09. Resumen de voladuras

<b>Fecha de Voladura</b>	<b>Proyecto</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
2014-12-09	3490-116	1ª Voladura, se cargaron 25 taladros solo de prueba de calibración de camión.
2014-12-12	3130-517	2ª Voladura, solo se cargaron 50 taladros de prueba.
2014-12-15	3160-109	3ª Voladura, se cargaron 137 taladros con MEQ73 de un total de 250, el resto fue cargado con SANG.
2014-12-16	3175-117	4ª Voladura, se cargó casi en su totalidad con MEQ73, solo 15 taladros fueron cargados con HA-55.
2014-12-17	3220-157	5ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2014-12-21	3160-124	6ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2014-12-23	3160-125	7ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2014-12-24	3220-167	8ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2014-12-25	3160-110	9ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2014-12-27	2845-061	10ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2014-12-31	3160-126	11ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2015-01-04	3160-127	12ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.
2015-01-09	3160-112	13ª Voladura, proyecto cargado en su totalidad con MEQ73.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

### 3.3. Procedimiento y estrategia

El procedimiento de investigación bajo el cual se planteó el presente estudio es la herramienta de mejora DMAIC, la cual se basa en una mejora continua a partir de la recolección de datos. Este proceso DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar por sus siglas en inglés) ha definido la estructura de la investigación.

Primero se definió el problema identificando un punto débil o a mejorar. Posteriormente se dio la medición, donde se elaboró una línea base con información histórica y se realizaron pruebas en campo con el nuevo producto en estudio. A continuación, se analizaron los resultados obtenidos y finalmente, tras haber decidido qué mejoras se realizarían, se procedió a tomar las medidas de control necesarias para que el estudio perdure en el tiempo dando los resultados esperados y propuestos.

A continuación se presenta la formulación del procedimiento y estrategia del trabajo, el cual se realizó en coordinación con el área de perforación y voladura

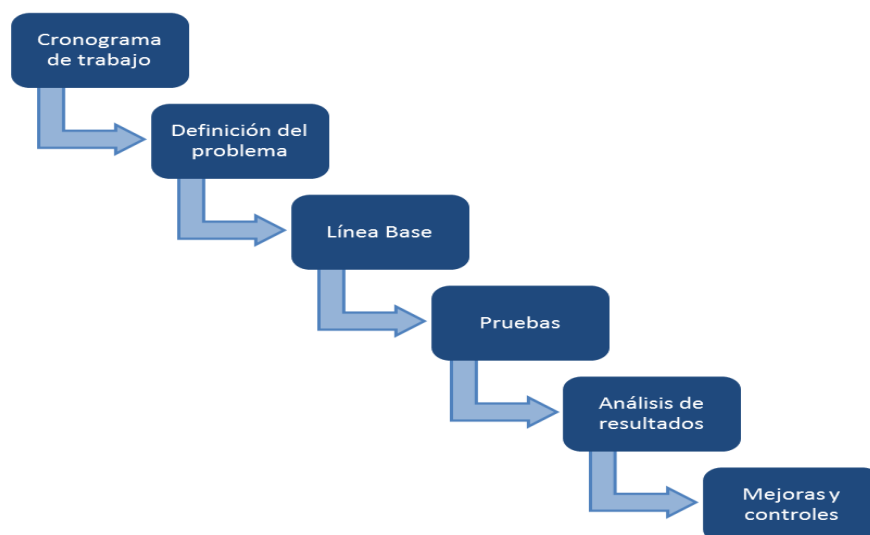


Figura 16. Plan de trabajo.

Fuente: Elaboración propia.

### **3.4. Métodos de medición**

Se establecieron cuatro parámetros de medición que fueron comparados con los recopilados de la línea base, y con ello se determinó la calidad del explosivo y de la voladura en general.

- Velocidad de detonación (VOD).
- Densidad.
- Fragmentación.
- Taza de excavación (*Dig-Rate*).
- Cálculo del balance de oxígeno del explosivo.

Cada parámetro ha tenido un procedimiento de medición específico para que los ensayos sean representativos y fiables. A continuación se describe el proceso que se siguió para cada prueba, los equipos utilizados y otros recursos que se requirieron.

#### **3.4.1. Velocidad de detonación**

Se utilizó el equipo MicroTrap para medir la velocidad de detonación (VOD) en taladros. Este permite medir la VOD de

un taladro por proyecto de voladura por el método de corto circuito. Es posible medir dos o más taladros, pero da la posibilidad de cortes y fallas en la medición.

El método consiste en medir la disminución de la resistencia de un circuito, a medida que el frente de detonación consume un cable resistivo. Esto se logra mediante la instalación de un cable de resistencia continuo (cable resistivo) cuya resistencia lineal es conocida (para este caso 10,8 ohm/m). El cable se adhiere al *Booster* o iniciador (Figura 18) y se extiende a lo largo de la columna explosiva. A medida que el frente de detonación del explosivo consume el cable resistivo, la resistencia del corto circuito disminuirá en proporción a la reducción del largo del cable. De esta manera el MicroTrap registra la disminución resultante del ohmiaje en comparación con el tiempo. El software convierte los datos registrados en un gráfico de distancia versus tiempo, como se muestra en la Figura 19. La gradiente de este gráfico es la velocidad de detonación.

En taladros con agua pese a que se hermetiza el corto

circuito, mínimas filtraciones de agua dañan la medición y no es posible obtener la velocidad de detonación.

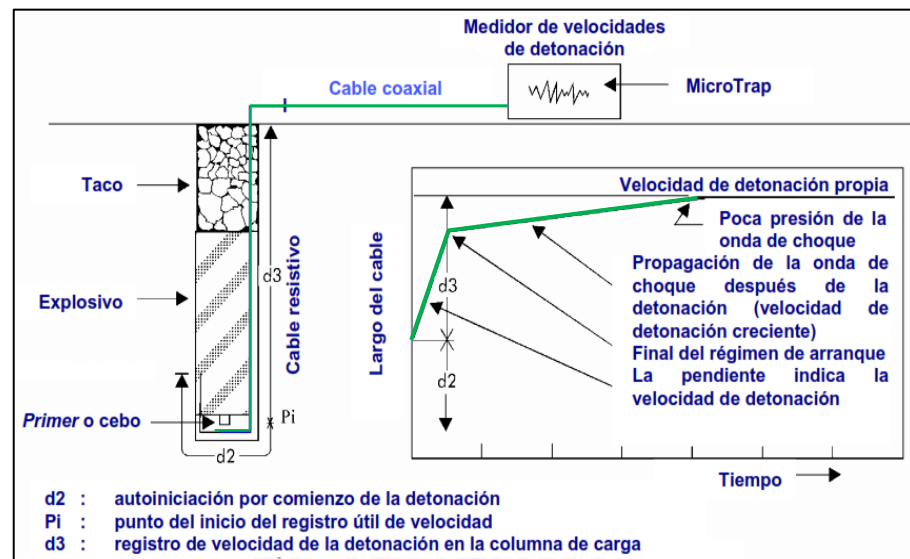


Figura 17. Método de medición de velocidad de detonación.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

La Figura 17 muestra un esquema general del método de medición, donde el cable resistivo (en corto circuito) se coloca junto al *Booster* y posteriormente se conecta al cable coaxial, el cual finalmente se conecta con el MicroTrap. En la Figura 18 se aprecia la unión del cable resistivo (color verde) al *Booster*, el cual posteriormente se coloca en la base del taladro.



Figura 18. Instalación de cable resistivo junto al *Booster* y tubo de choque.

Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico se muestra el resultado brindado por el MicroTrap de una prueba de medición de VOD.

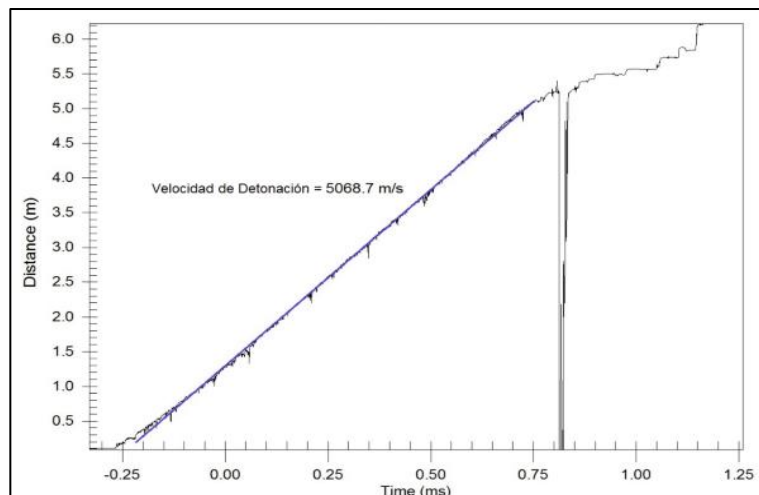


Figura 19. Resultados de una medición de VOD.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

### 3.4.2. Densidad

Esta propiedad se determinó midiendo la masa dentro de un volumen conocido. 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 el caso de la mezcla explosiva Quantex, es importante medir la densidad inicial y la final (tras 20 minutos de esponjamiento). Primero, se toma una muestra en el vaso volumétrico directamente de la manga de descarga, rápidamente se limpia el material que quede fuera del depósito y se pesa. Se controla veinte minutos, se elimina el material que rebalsa el vaso volumétrico (producto de la gasificación) y se vuelve a pesar. Se toma la densidad cada 5 minutos para cuantificar el proceso de esponjamiento (Figura 29).

A continuación se presentan los materiales necesarios para realizar la medición, los cuales forman parte de un *kit* obligatorio que debe tener cada camión – fábrica:

- Balanza.
- Vaso volumétrico de 1 litro.
- Trapos y espátula para limpieza.

### **3.4.3. Fragmentación**

Se utilizó el software WipFrag, el cual en base a una fotografía del material y un punto de referencia dentro de la misma (Figura 20), es capaz de determinar la fragmentación, brindando el pasante 80 (P80) como se muestra en la Figura 21.

Por otro lado, es importante indicar que mediante este método no fue posible determinar la fragmentación de material fino, apelmazado y lodos. En esta situación se registraba la fragmentación de manera cualitativa y se le daba mayor relevancia a la tasa de excavación (*Dig-Rate*).



Figura 20. Fotos para análisis de fragmentación.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

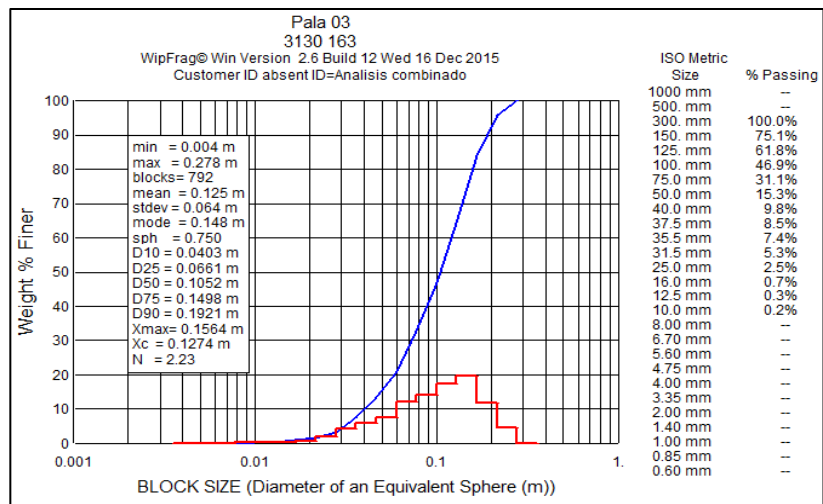


Figura 21. Resultados de análisis de fragmentación.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

#### **3.4.4. Tasa de excavación**

Para evaluar la tasa de excavación (*Dig-Rate*) de los equipos de carguío, se debe tener en cuenta que un factor influyente son los elementos externos al minado, como son: las condiciones climáticas, disponibilidad de equipos, calidad de material volado, condiciones de seguridad, entre otros.

En este sentido, comparar un *Dig-Rate* histórico, de un tipo de material y condición específica, no hubiera sido adecuado. Para el caso del presente estudio se decidió evaluar la productividad de los equipos, no solo con data histórica, sino con las tasas de excavación que alcanzaron los equipos durante el momento de las pruebas con mezcla explosiva Quantex 73.

Para tener una data que posteriormente pueda ser comparable con los resultados de la tasa de excavación de una voladura con MEQ73, se obtuvieron las tasas de excavación de polígonos adyacentes a los polígonos volados con el nuevo explosivo en etapa de prueba. Aparte de la cercanía de los

proyectos de voladura, se consideró que ambos tengan el mismo diseño de malla (espaciamiento y burden), de carga y principalmente que sea el mismo material. Esto se logró gracias a que el software de la compañía permite cargar las mallas de perforación, los polígonos y los geosegmentos respectivos de cada banco, como se puede apreciar en la siguiente figura.

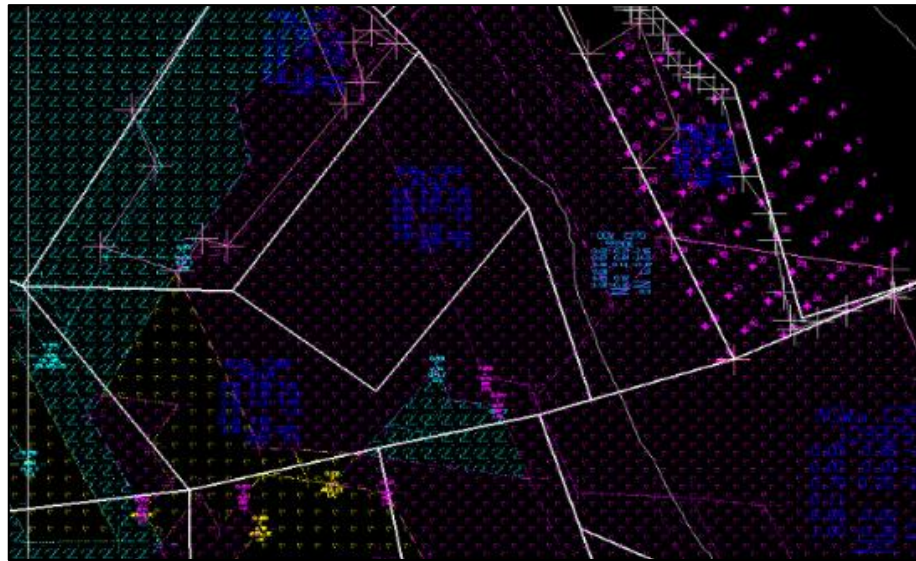


Figura 22. Banco donde se muestran los polígonos y mallas.

Fuente: SPCC Toquepala, 2015.

De esta forma, puede asumir que se están dando las mismas condiciones para el minado, tanto de proyectos detonados con Anfo pesado a base de emulsión matriz, como aquellos cargados con MEQ73 a base de emulsión gasificable.

La información en cuanto a la tasa de excavación fue solicitada al área de operaciones mina, quienes brindaron data histórica la cual fue depurada y resumida para los polígonos cargados con los explosivos en estudio.

La tasa de excavación o *Dig-Rate* se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tasa de excavación } \left( \frac{t}{h} \right) = \frac{\text{tonelaje nominal}}{\text{tiempo de carguio}} \quad (2)$$

Cabe mencionar que este valor depende directamente de la densidad y cohesión del material, calidad de la voladura, habilidad del operador, entre otros factores que afectan la tasa de excavación de los equipos.

#### **3.4.5. Cálculo del balance de oxígeno del explosivo**

Se realizó el cálculo del balance de oxígeno de las diferentes mezclas, adicional a esto se utilizó una cámara fotográfica y/o filmadora para así poder evidenciar la presencia de humos naranjas, en caso se evidencie dichos humos

naranjas se realizará la investigación para determinar las causas básicas y posibles, y luego establecer controles para evitar la emisión de humos naranjas.

### **3.5. Recursos**

#### **3.5.1. Recursos humanos**

- Investigador: Luis Alberto Iglesias Salas.
- Asesor: Dr. Dante Morales Cabrera.

#### **3.5.2. Recursos materiales**

Representado por los materiales, equipos y softwares de asistencia técnica proporcionados por EXSA S.A.

#### **3.5.3. Recursos económicos**

El presupuesto para la recolección y otras tareas investigativas será ofertada por el investigador.

### 3.6. Cronograma de trabajo

Tabla 10. Muestra las actividades que se llevarán a cabo para elaborar esta tesis.

ACTIVIDADES	MESES			
	I	II	III	IV
I	x			
II		x		
III			x	
IV				x

Fuente: Elaboración propia.

- I. Se hará una revisión de toda la información concerniente al tema de la presente tesis, inclusive si hubieran nuevas formulaciones de mezclas y/o modificaciones de mezclas explosivas comerciales a la fecha.
- II. Se analizará e interpretará los resultados de los disparos de la mezcla explosiva Quantex 73 y se compara estos resultados con el Anfo pesado.
- III. Se harán los controles y monitoreos de los disparos respectivos, en términos de fragmentación y gases tóxicos.

**IV.** interpretación, análisis, evaluación y discusión de resultados.

- Si hubiera algún impacto negativo inducido por la voladura de rocas con la mezcla explosiva comercial denominada emulsión gasificada, se tomarán las medidas de control, mitigación y prevención.
- Conclusiones y recomendaciones
- Bibliografía.
- La clasificación de la información, organización y elaboración de la tesis, etc.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS TÉCNICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Los resultados del performance de los explosivos se han dividido en dos secciones. Primero se tiene la línea base, que consistió en la recolección de información respecto a eventos pasados y actuales de Anfo pesado a base de emulsión matriz en todas sus mezclas utilizadas en la operación (37; 46; 55; 64). La segunda parte consistió en los resultados de las pruebas del nuevo producto: mezcla explosiva Quantex 73.

#### **4.1. Línea base - Anfo pesado a base de emulsión matriz**

Utilizando la información histórica que tiene el área de Perforación y Voladura, se tiene una fuente de datos con información que será utilizada para elaborar la línea base, cuya medición se hizo aplicando los métodos descritos anteriormente.

#### 4.1.1. Resultados de densidad y velocidad de detonación

Debido a que el Anfo pesados a base de emulsión matriz no se gasifica, estos no varían de densidad, la cual es constante en todo momento. Por tal motivo no se indica si es final o inicial. Estos resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultado de pruebas para Anfo pesado a base de emulsión matriz de densidad y VOD para taladros con diámetro de 12 1/4”:

<b>ANFO PESADO</b>	<b>DENSIDAD (g/cc)</b>	<b>VOD (m/s)</b>
HA-37	1,05	4 800
HA-46	1,16	4 900
HA-45/55	1,21	5 100
HA-55	1,28	5 200
HA-64	1,30	4 700

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

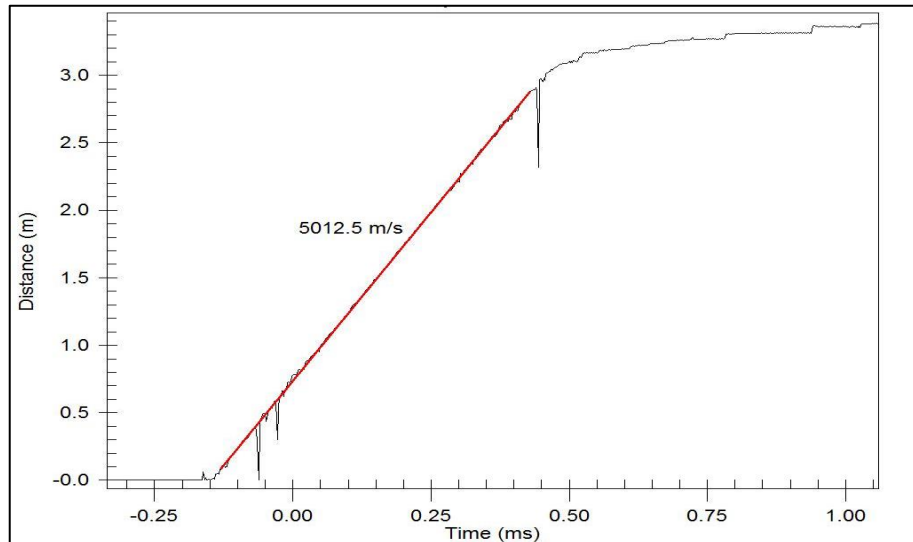


Figura 23. Velocidad de detonación del HA-46.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

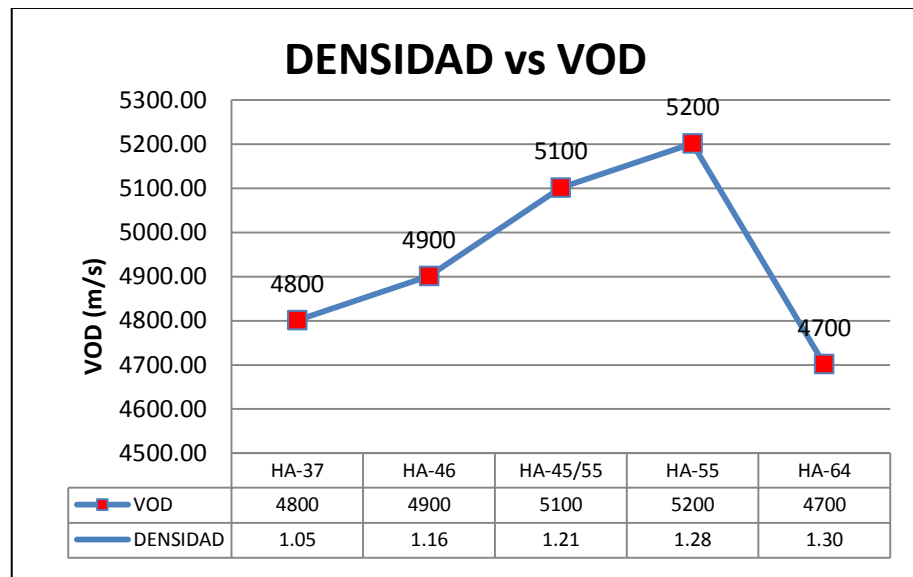


Figura 24. Análisis comparativo del Anfo pesado.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Resultados de fragmentación

Durante el estudio, se encontró información histórica del análisis de fragmentación, usando el software WipFrag el cual realiza un foto-análisis en base a un punto referencial. Se realizaron diversos análisis.



Figura 25. Fotografía tomada del frente de minado para analizar.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

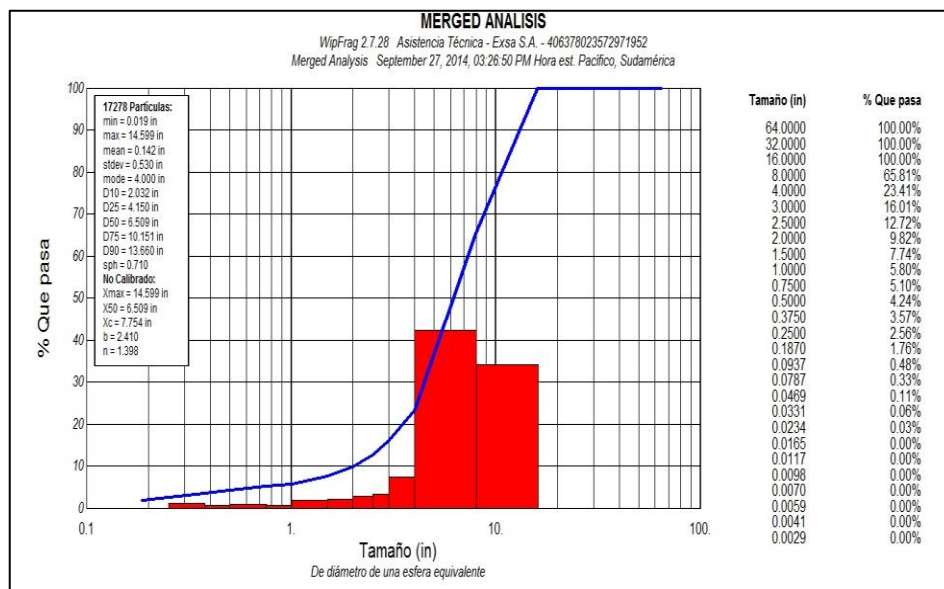


Figura: 26. Análisis fragmentación del frente de minado.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Para obtener una base de datos confiable y real del análisis de fragmentación se utilizó el software Split Shovel Online, el cual está instalado en las palas y calcula la producción diaria y realiza constantemente el análisis de fragmentación (P80). En cual se explica en la Figura 27.

#### 4.1.3. Resultados de la tasa de excavación

Los resultados de la tasa excavación de los equipos de minado se realizó con el software Split Shovel Online, los

cuales fueron detonados con Anfo pesado, y explica en la Figura 27, en el cual la tasa excavación está por debajo los 7 000 t/h en promedio.

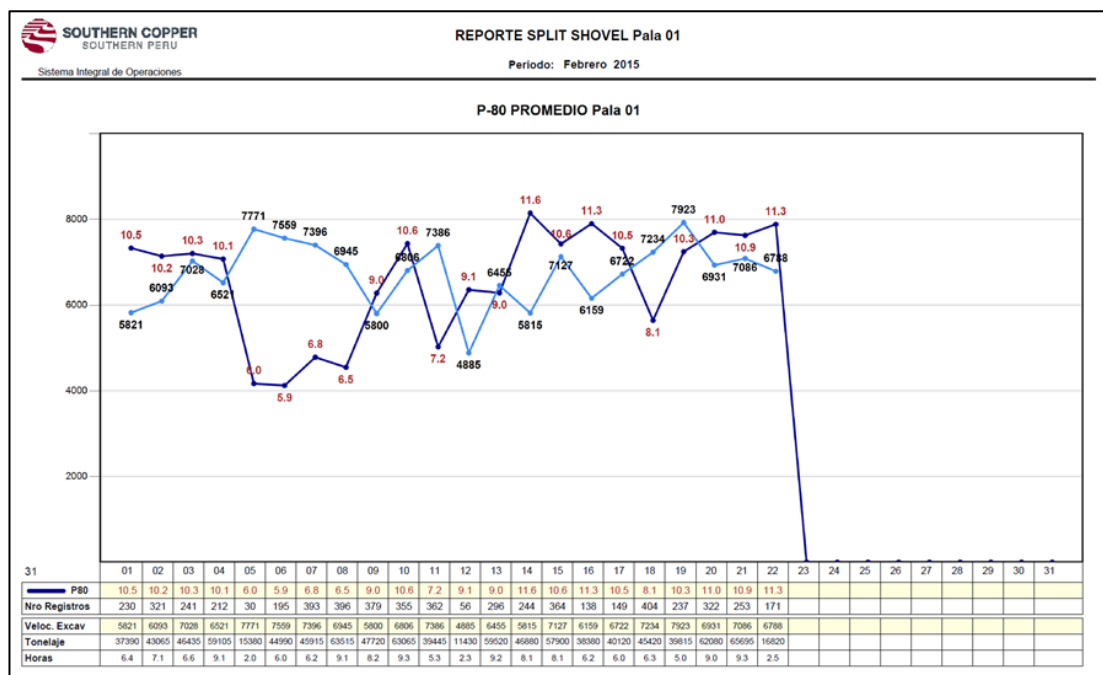


Figura 27. Velocidad de excavación vs P80 de la pala 01 – Febrero.

Fuente: SPCC Toquepala, 2015.

#### 4.1.4. Resultados del balance de oxígeno del explosivo

Se realizó el balance de oxígeno de las diferentes mezclas de Anfo pesado el cual se muestra en la Tabla 12. En el cual se observa que es un balance de oxígeno negativo.

Tabla 12. Balance de Oxígeno de las mezclas de Anfo pesado.

Agente	B.O. de cada agente (%)	B.O. de cada mezcla de ANFO PESADO (%)				
		HA-28	HA-37	HA-46	HA-55	HA-64
Nitrato de Amonio	+20					
Diésel 2	-336,85					
Emulsión Matriz	-0,537	<b>-1,236</b>	<b>-1,149</b>	<b>-1,061</b>	<b>-0,974</b>	<b>-0,887</b>

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Con el uso del Anfo pesado se evidenciaron gases nitrosos o humos naranjas, los cuales atentan con la seguridad y el medio ambiente.



Figura 28. Emisión de gases nitrosos con Anfo pesado.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

#### **4.2. Resultado de pruebas con mezcla explosiva Quantex 73**

Con la línea base establecida, se procedió a realizar las pruebas con la nueva emulsión gasificable para determinar sus cualidades y características como componentes de la mezcla explosiva Quantex 73 (MEQ73).

Este nuevo agente explosivo se comparará con las mezclas de Anfo pesado a base de emulsión matriz que se utilizaba en la operación. Por lo tanto, se ha tenido que establecer un mecanismo de comparación de estas distintas mezclas explosivas que son la base y diferencia principal entre estos dos explosivos a estudiar, mediante pruebas de laboratorio y en campo realizadas en Toquepala, se ha preparado las distintas densidades a las cuales se puede llevar la MEQ73, también se indica las velocidades de detonación.

Cabe recordar que la variación de la densidad final del mezcla explosiva Quantex 73, depende de la cantidad del agente gasificante que es inyectado durante la descarga.

#### 4.2.1. Resultados de densidad y velocidad de detonación

Para hallar la densidad de la MEQ73 con precisión, esta se midió en laboratorio, haciendo la mezcla en recipientes y agregando la solución de nitrito de sodio, y nos da los siguientes resultados en la Tabla 13.

Tabla 13. Densidad final de la MEQ73 agregando nitrito de sodio.

<b>DENSIDAD DE MEQ73 (g/cc)</b>	<b>DENSIDAD FINAL (g/cc)</b>	<b>NITRITO (%)</b>
1,38	1,21	0,10
	1,17	0,12
	1,15	0,14
	1,12	0,16
	1,09	0,20
	1,00	0,30

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

También se calculó el tiempo de gasificación de la MEQ73, que también se halló en laboratorio y en campo.

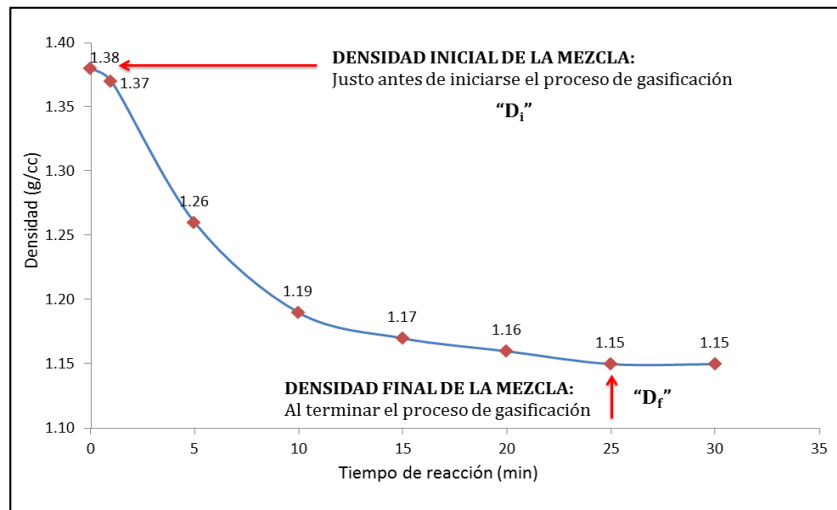


Figura 29. Tiempo de gasificación de la MEQ73.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Para determinar la velocidad de detonación de la MEQ73, se realizó múltiples pruebas y con diferentes densidades finales para determinar una data base, el cual se explica en la Tabla 14.

Tabla 14. Velocidad de detonación de la MEQ73 según la densidad final

DENSIDAD DE MEQ73 (g/cc)	DENSIDAD FINAL (g/cc)	VOD (m/s)
1,38	1,21	5 793
	1,17	5 600
	1,15	5 453
	1,12	5 350
	1,09	5 172
	1,00	4 954

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

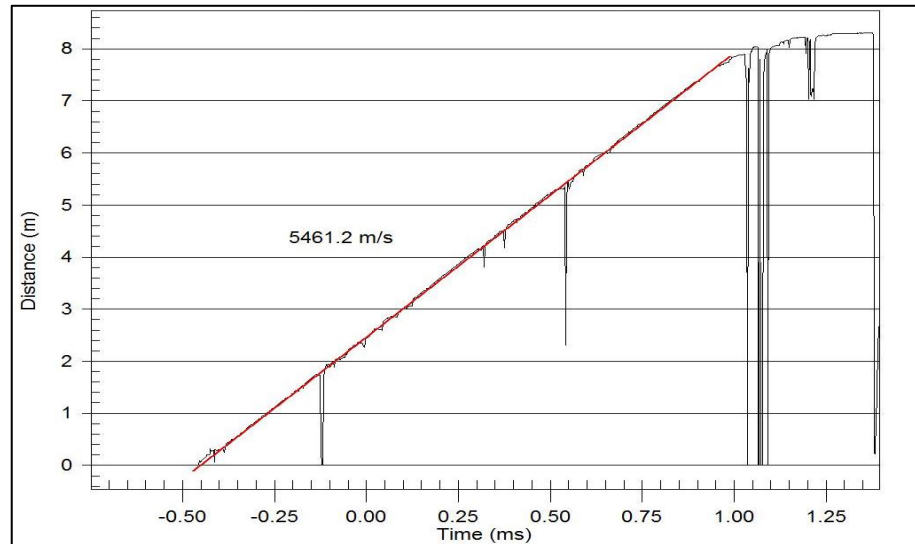


Figura 30. Velocidad de detonación de la MEQ73 con densidad 1,15 g/cc.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Adicional a esto también se determinó la longitud de esponjamiento en el taladro según la densidad final de la MEQ73 utilizada, el cual se comparó con el porcentaje de nitrito de sodio añadido y su velocidad de detonación, el cual se explica en la Tabla 15.

Tabla 15. Resumen comparativo de la MEQ73

DENSIDAD DE MEQ73 (g/cc)	DENSIDAD FINAL (g/cc)	NITRITO (%)	ESPONJ. (cm)	VOD (m/s)
1,38	1,21	0,10	0,40	5 800
	1,17	0,12	0,55	5 600
	1,15	0,14	0,70	5 450
	1,12	0,16	0,80	5 350
	1,09	0,20	0,90	5 200
	1,00	0,30	1,20	4 950

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Nota: La relación de densidad vs esponjamiento en la Tabla 15 es para columnas de carga de 6 a 9 metros de longitud.

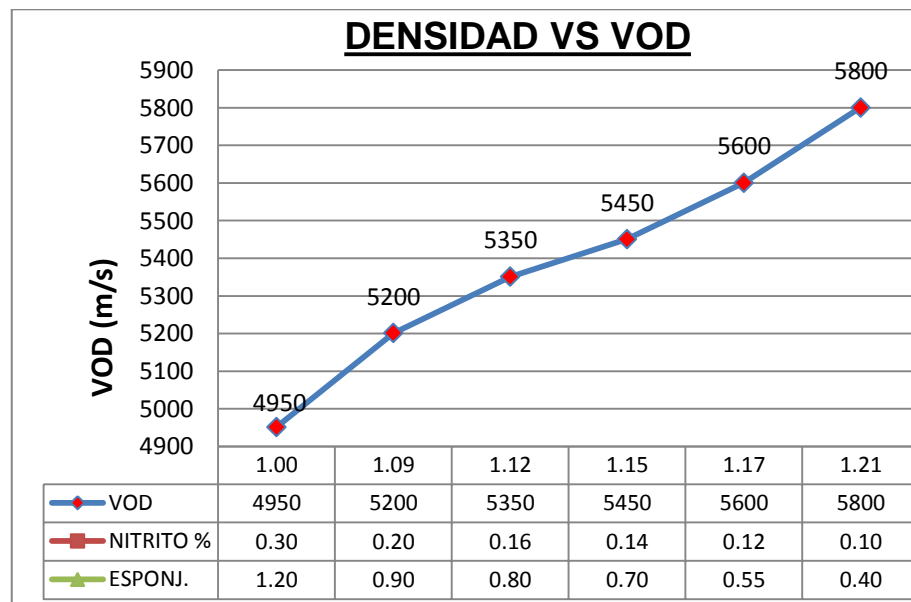


Figura 31. Resumen comparativo de la MEQ73 según la densidad final, VOD, porcentaje de nitrito de sodio y esponjamiento.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

#### 4.2.2. Resultados de fragmentación

Después de la voladura, se realizó el análisis de fragmentación, usando el software WipFrag el cual realiza un foto-análisis en base a un punto referencial. Se realizaron diversos análisis y así obtener una base de datos confiable.



Figura 32. Fotografía del frente de minado para el análisis de fragmentación.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

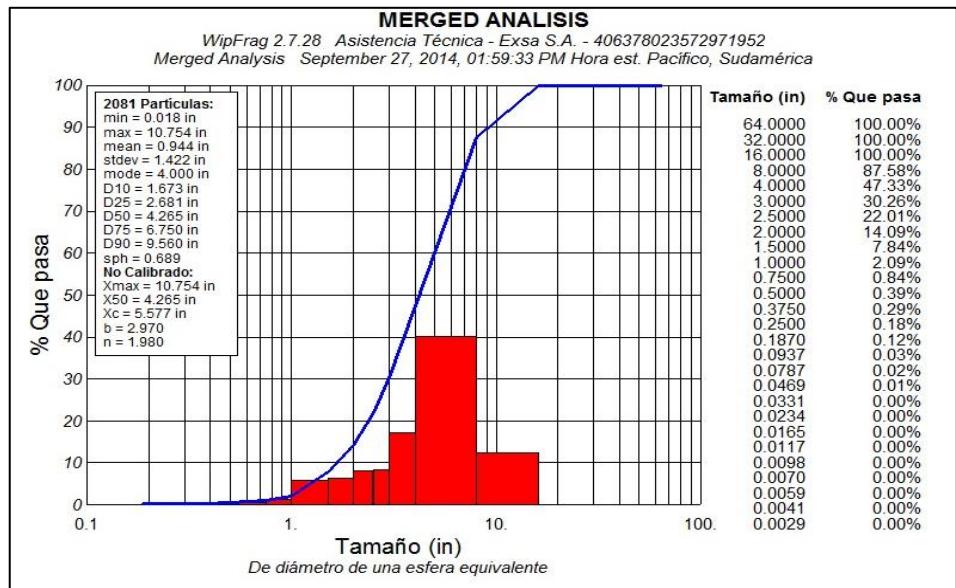


Figura 33. Análisis de fragmentación.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Para obtener una base de datos confiable y real del análisis de fragmentación se utilizó el software Split Shovel Online, el cual está instalado en las palas y calcula la producción diaria y realiza constantemente el análisis de fragmentación (P80). En cual se explica en la Figura 34.

#### 4.2.3. Resultados de la tasa excavación

El análisis de la tasa excavación se realizó con el software Split Shovel Online, el cual nos dio mejores resultados

utilizando la MEQ73 que con el Anfo pesado, el cual se explica en la Figura 34, en el cual la tasa excavación está sobre los 7 000 t/h en promedio.

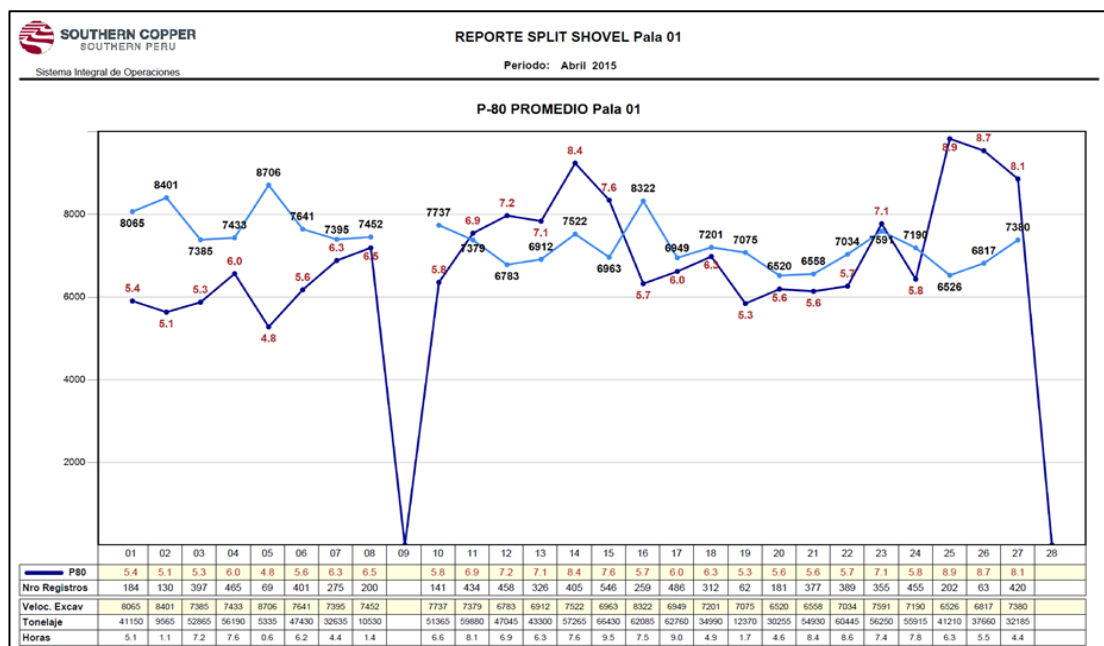


Figura 34. Velocidad de excavación vs P80 de la pala 01 – Abril.

Fuente: SPCC Toquepala, 2015.

La tasa excavación ideal de las palas no siempre se cumple por factores externos como clima, condiciones de suelo, apoyo auxiliar a la pala, calidad de voladura, etc. Pese a esto, se observa que en algunos casos la productividad de los equipos es mucho mayor a la tasa excavación ideal, lo que da buenos indicios del poder rompedor de la mezcla explosiva

Quantex 73.

#### 4.1.4. Resultados del balance de oxígeno del explosivo

Se realizó el balance de oxígeno de la MEQ73 en cual se muestra en la Tabla 16. En el cual se observa que es un balance de oxígeno negativo.

Tabla 16. Balance de Oxígeno de la MEQ73

<b>Agente</b>	<b>B.O. de cada agente (%)</b>	<b>B.O. de la MEQ73 (%)</b>
<b>Nitrato de Amonio</b>	+20	
<b>Diésel 2</b>	-336,85	<b>-2,15</b>
<b>Emulsión G</b>	-7,056	

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Con el uso de la mezcla explosiva Quantex 73 no se evidenciaron gases nitrosos o humos naranjas.



Figura 35. No se generó gases nitrosos.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta sección se discuten las diferencias y similitudes que se encontraron en el desempeño de los explosivos en evaluación. Se analizó la información recopilada en la línea base y en la etapa de pruebas donde se experimentó con el nuevo explosivo a base de emulsión gasificable. Los puntos centrales de comparación son: velocidad de detonación, densidad, fragmentación, tasa excavación y análisis ecológico.

También se ha realizado un análisis económico donde se compara la mezcla explosiva Quantex 73 llevado a diferentes densidades finales versus las diferentes mezclas de Anfo pesado a base de emulsión matriz, según los costos de combustible, nitratos y emulsiones.

De esta manera se logra hacer un análisis integral, tanto del lado técnico y operativo como del económico, llegando a conclusiones importantes las cuales serán discutidas más adelante.

## 5.1. Análisis de densidad y velocidad de detonación

La velocidad de detonación está ligada a la densidad del explosivo, como se describió en el marco teórico. Asimismo, debido a que las pruebas de densidad corresponden al mismo taladro donde se midió la velocidad de detonación, se ha analizado estas dos características de manera conjunta. Estos resultados obtenidos en la línea base (Tabla 11) y las pruebas realizadas para la mezcla explosiva Quantex 73 (Tabla 14), se muestran en la Figura 36.

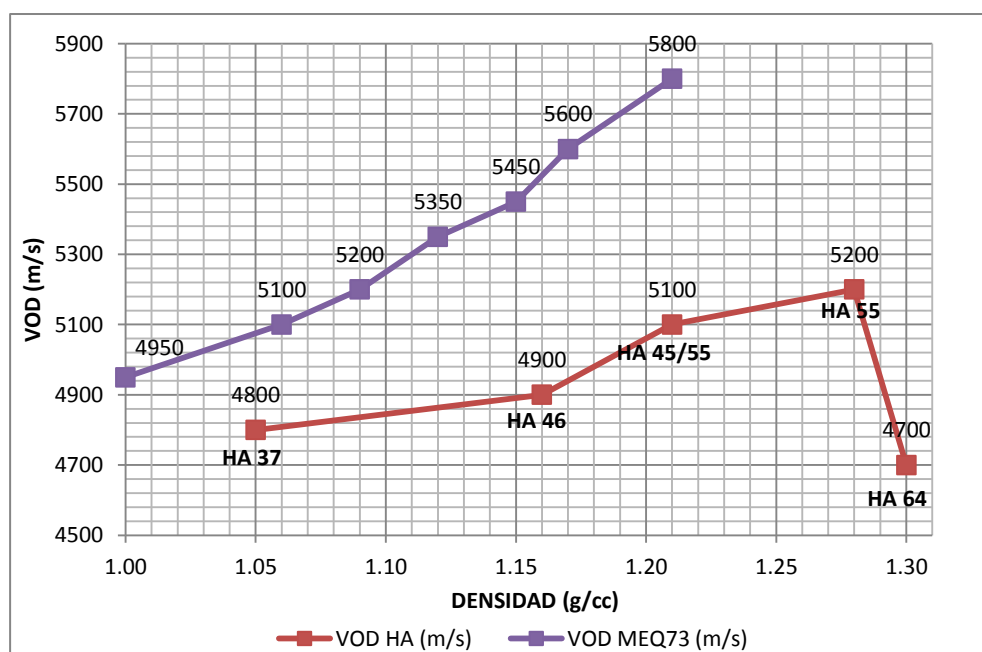


Figura 36. Comparación de VOD y densidad del Anfo pesado y MEQ73.

Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior de la Figura 36 se muestran los resultados de las pruebas para la MEQ73 y en la parte inferior las pruebas para el Anfo pesado. Se observa que la MEQ73 en sus diferentes densidades tiene mejor desempeño en VOD, superando ampliamente a las mezclas de Anfo pesado.

## **5.2. Análisis de fragmentación**

Se tomó como referencia los resultados obtenidos del software Split online, que muestra la fragmentación del material volado en la pala N° 04, que es donde se han obtenido los valores más representativos en comparación con el HA-55, utilizada semanas antes hasta el uso de la mezcla explosiva Quantex 73. Se muestra en la Figura 37.

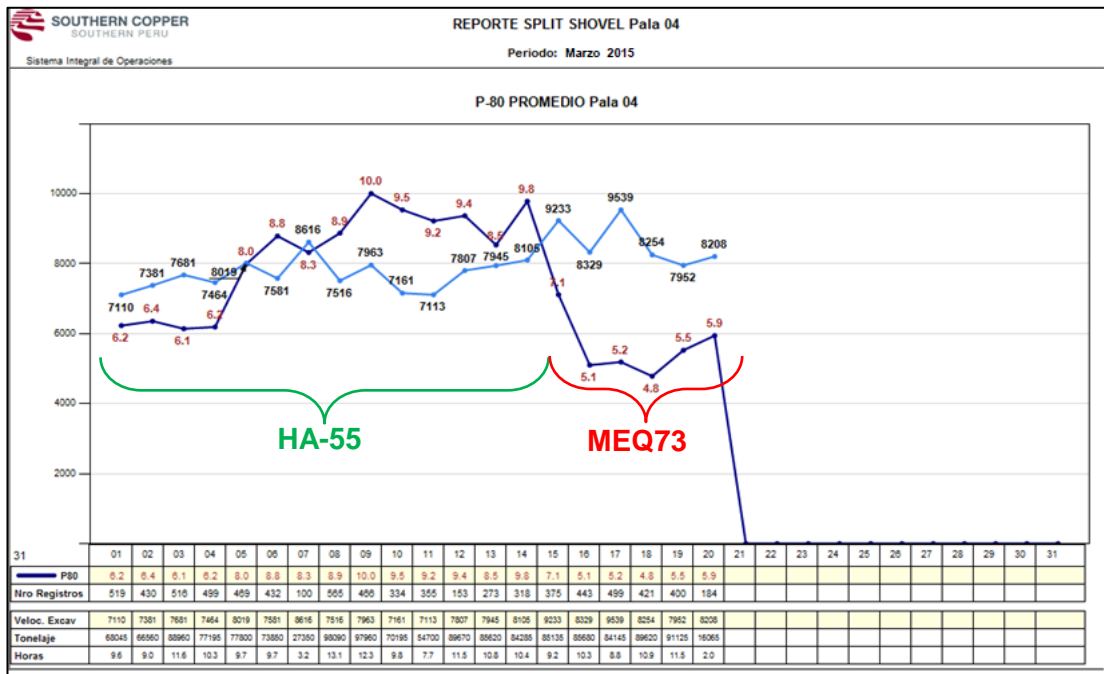


Figura 37. Velocidad de excavación vs P80 de la pala 04 – Marzo.

Fuente: SPCC Toquepala, 2015.

Se observa que en la Figura 37 hay una disminución del P80 con MEQ73 en el rango de [4,8 – 7,1] pulgadas, y en las áreas disparadas con HA-55 se tiene un rango de [6,1 – 10,0] pulgadas.

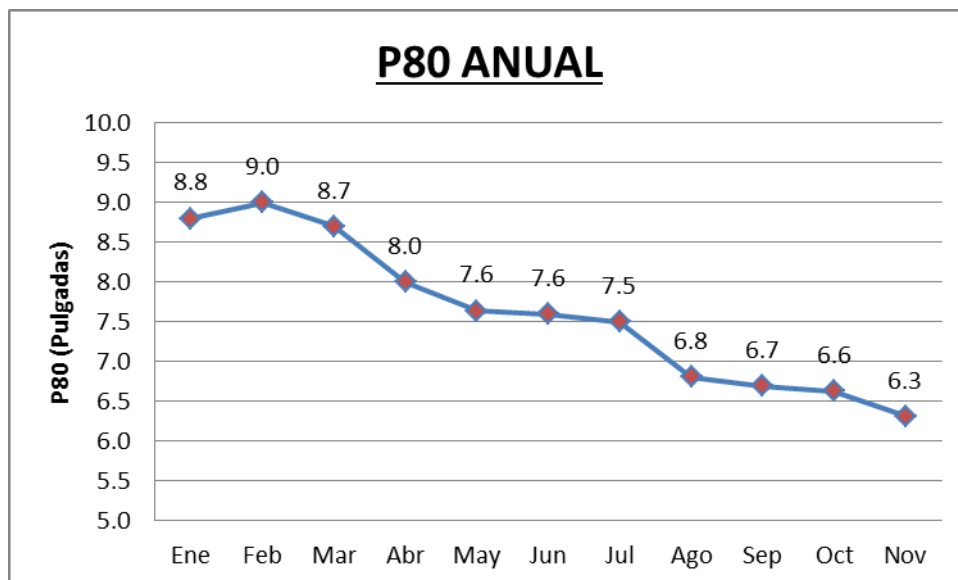


Figura 38. Análisis del P80 promedio acumulado en el año 2015.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

En la Figura 38 hay una disminución del P80 desde el mes de abril que se implementó la MEQ73. Por lo tanto, con el uso de la MEQ73 se obtuvo una disminución de la fragmentación en un 26 %.

### 5.3. Análisis de la tasa de excavación

La tasa de excavación o “*Dig-Rate*” muestra que los resultados han sido satisfactorios en cuanto a la fragmentación de la roca, ya que se han obtenido resultados por encima de los 7 000 t/h en el caso de las palas (Figura 27 y Figura 34), en el cual hubo un

incremento del 4,8 % de la tasa de excavación.

En la Figura 37, también se observa un incremento de la tasa de excavación en comparación con el HA-55, llegando a un máximo de 9 539 t/h en la pala 04

Motivo por el cual se incrementó la producción mensual, el cual se muestra en la Figura 39. Este incremento de la producción se debe a la implementación al 100 % de la MEQ73 que se realizó en SPCC Toquepala a partir de la quincena del mes de marzo de 2015 hasta la fecha.

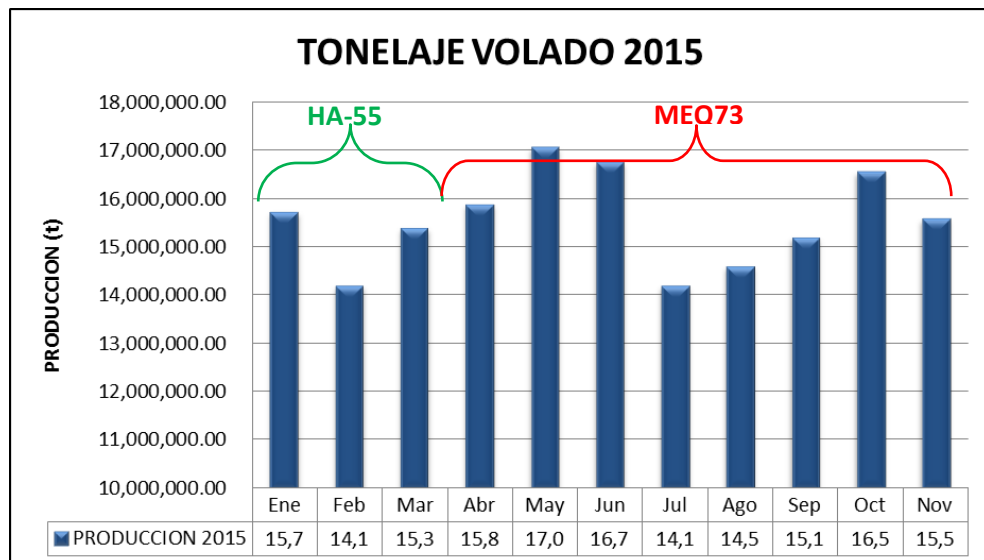


Figura 39: Tonelaje volado en el periodo 2015.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

#### 5.4. Análisis de mitigación de gases nitrosos

Los explosivos como el Anfo pesado que se venían utilizando no tenían el balance de oxígeno adecuado, por tal motivo, se generaban los humos naranjas, por otro lado, la mezcla explosiva Quantex 73 está formada a base de emulsión gasificada, el cual al sensibilizarse con el nitrito de sodio genera burbujas de gas de nitrógeno, por lo tanto, tiene el balance de oxígeno adecuado (menor que el Anfo pesado), el cual se observa en la Tabla 17, y de tal manera se mitigó la generación de humos naranjas con la mezcla explosiva Quantex 73. El cual se observa en las Figura 28 y Figura 35.

Tabla 17. Balance de oxígeno de las diferentes mezclas.

<b>Balance de Oxígeno (%)</b>					
HA-28	HA-37	HA-46	HA-55	HA-64	MEQ73
<b>-1,236</b>	<b>-1,149</b>	<b>-1,061</b>	<b>-0,974</b>	<b>-0,887</b>	<b>-2,15</b>

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

En la Tabla 17 se observa que la MEQ73 tiene un balance de oxígeno negativo menor a las mezclas de Anfo pesado, debido a esto es menos probable la generación de gases nitrosos.

En la Figura 40 se observa que hasta antes del mes de marzo de 2015 que se utilizaba el Anfo Pesado se evidenciaba la generación de gases nitrosos entre el 45 % y 58 %; en el periodo de pruebas de la MEQ73 en el mes de diciembre de 2014 se observa una disminución de gases nitrosos hasta el 28 %; y a partir de abril que se utiliza la MEQ73 en su totalidad se obtuvo una disminución considerable de hasta el 1 % en generación de gases nitrosos.

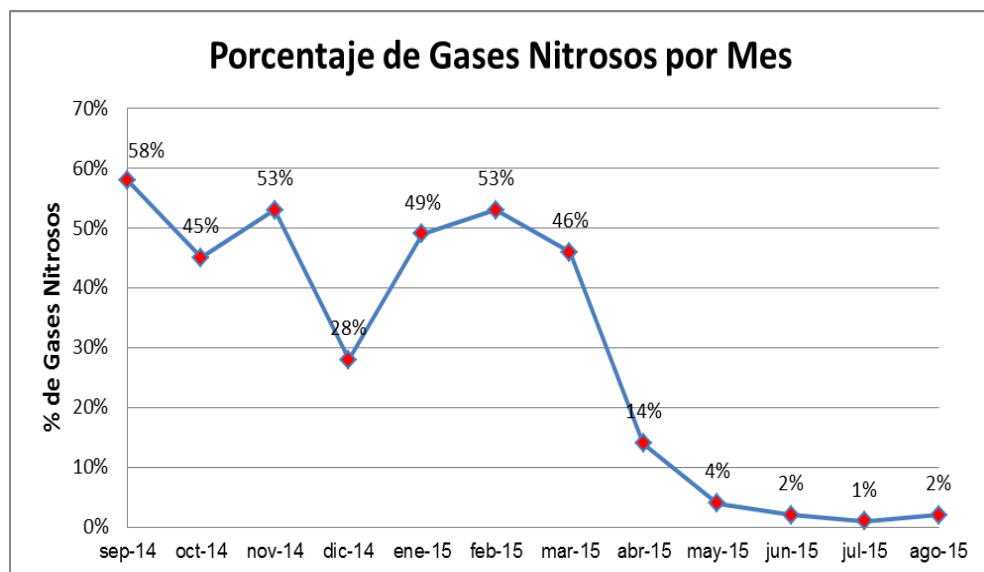


Figura 40. Porcentaje de gases nitrosos por mes periodo 2014 - 2015.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

## 5.5. Análisis económico

Tras realizar el análisis técnico - operativo y comparar las dos diferentes mezclas, a continuación se estudiará las ventajas económicas que puede brindar la mezcla explosiva Quantex 73 a la operación. Este análisis se ha realizado asumiendo condiciones ideales, en base a los precios de las materias primas (diésel, nitrato de amonio, emulsión), densidad, grado de esponjamiento de la mezcla, dimensiones del taladro, burden, espaciamiento, altura de banco, y entre otros factores, para poder comparar ambos explosivos desde un punto de vista económico.

En este análisis se ha podido determinar el costo por kilogramo, costo por taladro, costo por tonelada volada y factor de potencia para cada explosivo.

Para realizar la proyección de costos entre la mezcla HA-55 y la MEQ73 se tomó como referencia los diseños de carga para cada mezcla explosiva, así como los precios de los agentes de voladura que se tienen en SPCC Toquepala, el cual se describe en la Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 18. Precio unitario de los agentes de voladura.

<b>AGENTES DE VOLADURA</b>	<b>PRECIO</b>	<b>UND</b>
Nitrato Cachimayo	0,600	\$/kg
Nitrato Quantex	0,570	\$/kg
Emulsión Matriz	0,505 06	\$/kg
Emulsión G	0,505 06	\$/kg
Petróleo + Aceite	1,651 10	\$/kg
Nitrito de Sodio	0,00	\$/kg

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Nota: El precio del Nitrito de Sodio es 0,00 \$/kg, ya que por contrato dicho costo está incluido en la compra de la emulsión G y el nitrato de amonio Quantex.

### **Análisis comparativo por taladro cargado:**

Tabla 19. Parámetros de una voladura primaria.

<b>PARÁMETROS DE VOLADURA</b>		
Diámetro de taladro	12 1/4	pulg
Burden	7,00	m
Espaciamiento	7,00	m
Altura de banco	15,00	m
Sobre perforación	1,50	m
Longitud de Taladro	16,50	m
Taco	8,50	m
Carga	8,00	m
Densidad de roca	2,6	g/cc
Volumen a romper	735	m <sup>3</sup>
Tonelaje a romper	1 911	t

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

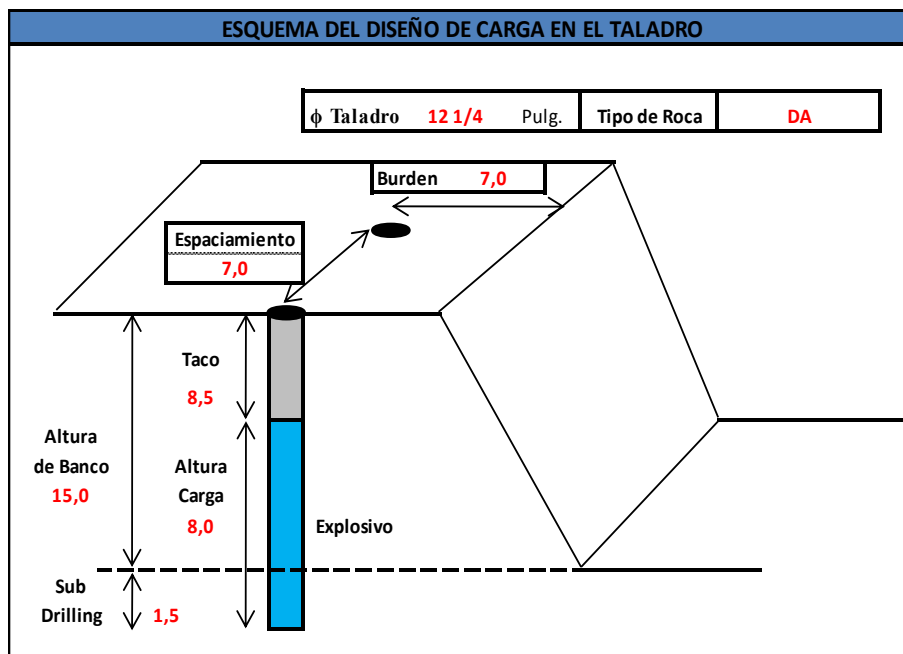


Figura 41. Diseño de Carga.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Se analizaron varios escenarios detallados en la Tabla 20, donde se comparan las diferentes mezclas de Anfo pesado versus la mezcla explosiva Quantex 73 llevado a diferentes densidades. Este análisis detallado se realizó considerando los parámetros de voladura descritos en la Tabla 19 y los costos unitarios de los agentes de voladura de la Tabla 18.

Tabla 20. Comparación económica entre MEQ73 llevado a diferentes densidades versus distintas mezclas de Anfo pesado (HA), considerando 8 metros de longitud de carga explosiva.

EXPLOSIVO	DENSIDAD DE MEZCLA (g/cc)	DENSIDAD FINAL (g/cc)	NITRITO %	ESPONJ (m)	VOD (m/s)	Longitud de Carga (m)	CARGA (kg)	FP (kg/t)	FC (kg/m <sup>3</sup> )	Costo Unitario (\$/kg)	Costo por taladro (\$/tal)	Costo por tonelada (\$/t)
MEQ 73	1,38	1,00	0,30	1,20	4 950	6,80	714,0	0,373 6	0,971 4	0,534 3	381,4	0,199 6
		1,06	0,25	1,05	5 100	6,95	729,7	0,381 8	0,992 8	0,534 3	389,9	0,204 0
		1,09	0,20	0,90	5 200	7,10	745,4	0,390 1	1,014 2	0,534 3	398,3	0,208 4
		1,12	0,16	0,80	5 350	7,20	755,9	0,395 6	1,028 5	0,534 3	403,9	0,211 3
		1,15	0,14	0,70	5 450	7,30	766,4	0,401 1	1,042 8	0,534 3	409,5	0,214 3
		1,17	0,12	0,55	5 600	7,45	782,2	0,409 3	1,064 2	0,534 3	417,9	0,218 7
		1,21	0,10	0,40	5 800	7,60	797,9	0,417 6	1,085 6	0,534 3	426,3	0,223 1
HA 37	1,05	1,05	-	-	4 800	8,00	639,1	0,334 4	0,869 5	0,615 7	393,5	0,205 9
HA 46	1,16	1,16	-	-	4 900	8,00	706,0	0,369 5	0,960 6	0,599 9	423,5	0,221 6
HA 45/55	1,21	1,21	-	-	5 100	8,00	736,5	0,385 4	1,002 0	0,592 0	436,0	0,228 1
HA 55	1,28	1,28	-	-	5 200	8,00	779,1	0,407 7	1,060 0	0,584 1	455,0	0,238 1
HA 64	1,30	1,30	-	-	4 700	8,00	791,2	0,414 1	1,076 5	0,568 3	449,6	0,235 3

Fuente: Elaboración propia.

El análisis descrito en la Tabla 20 brinda resultados interesantes en cuanto a costos, densidad del explosivo, VOD, los cuales se muestran en la Figura 42.

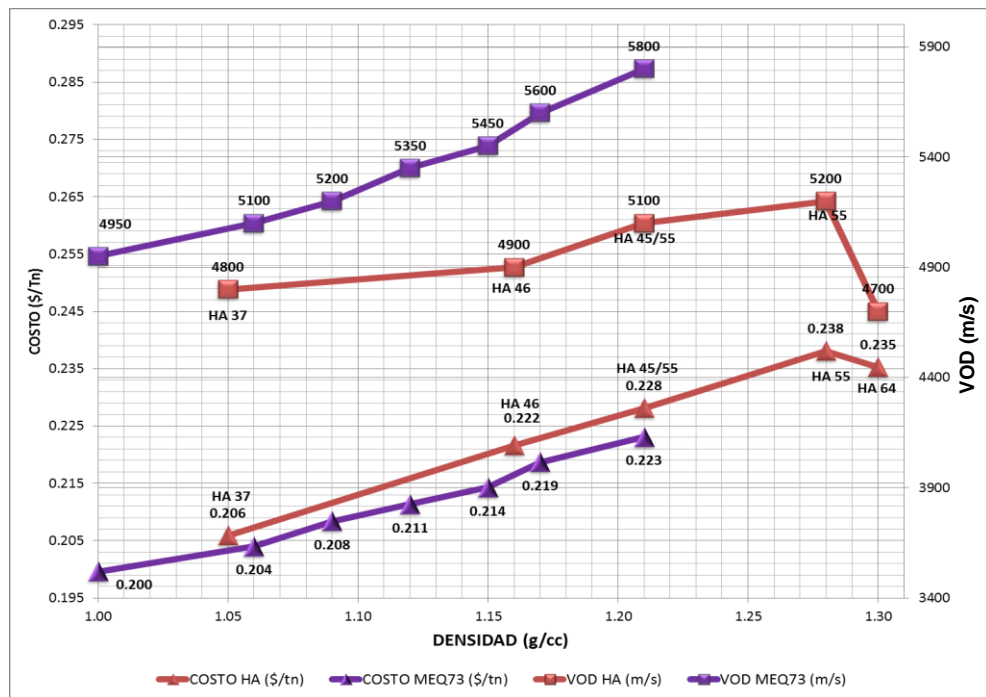


Figura 42. Análisis costo-beneficio entre el Anfo pesado y MEQ73.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 42 se observa que la MEQ73 es más barato en costo por taladro, en costo por tonelada rota y tiene mejores resultados de VOD en todos los casos, comparados con las mezclas de Anfo pesado.

Haciendo una comparación entre el HA-55 y la MEQ73 con densidad 1,15 g/cc, los cuales son los que más se utilizan en mina se tiene los siguientes resultados en la Tabla 21.

Tabla 21. Análisis comparativo HA-55 y MEQ73, densidad 1,15 g/cc.

Explosivo	Densidad Mezcla (g/cc)	Densidad Final (g/cc)	VOD (m/s)	Carga (kg)	FP (kg/t)	FC (kg/m <sup>3</sup> )	Costo Unitario (\$/kg)	Costo / taladro (\$/tal)	Costo / tonelada (\$/t)
HA 55	1,28	1,28	5 200	779,1	0,407 7	1,060 0	0,584 1	455,0	0,238 1
MEQ 73	1,38	1,15	5 450	766,4	0,401 1	1,042 8	0,534 3	409,5	0,214 3
<b>Diferencia</b>				12,6	0,006 6	0,017 2	0,049 8	45,5	0,023 8
<b>ANALISIS</b>	<b>Diferencia Porcentual</b>			-1,62	-1,62	-1,62	-8,52	-10,01	-10,01

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la Tabla 21 se tiene que el factor de potencia con HA-55 es de 0,407 7 kg/t y para la MEQ73 es de 0,401 1 kg/t, se tiene una diferencia del 1,62 % menos que el HA-55, considerando los precios unitarios del explosivo, se tiene un ahorro de 45,5 \$/tal, de esta forma se obtiene una diferencia del 10 % de ahorro utilizando la mezcla explosiva Quantex 73.

## **Análisis comparativo por proyecto de voladura**

En el proyecto 3160 – 109 se cargó un total de 250 taladros, de los cuales 137 taladros se cargaron con MEQ73 con una densidad final de 1,15 g/cc; y los 113 taladros restantes se cargaron con HA-55 con una densidad de 1,28 g/cc. Se toma en consideración los costos anteriormente descritos en la Tabla 18.

A continuación se describen los parámetros y diseños para este proyecto de voladura.

Tabla 22. Parámetros de una voladura primaria Proy. 3160 - 109.

<b>PARÁMETROS DE VOLADURA</b>		
Diámetro de taladro	12 1/4	pulg
Burden	7,00	m
Espaciamiento	7,00	m
Altura de banco	15,00	m
Sobre perforación	1,50	m
Longitud de Taladro	16,50	m
Taco	8,50	m
Carga	8,00	m
Densidad de roca	2,6	g/cc
Numero de taladros	250	Tal
Volumen a romper	183 750	m <sup>3</sup>
Tonelaje a romper	477 750	t

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

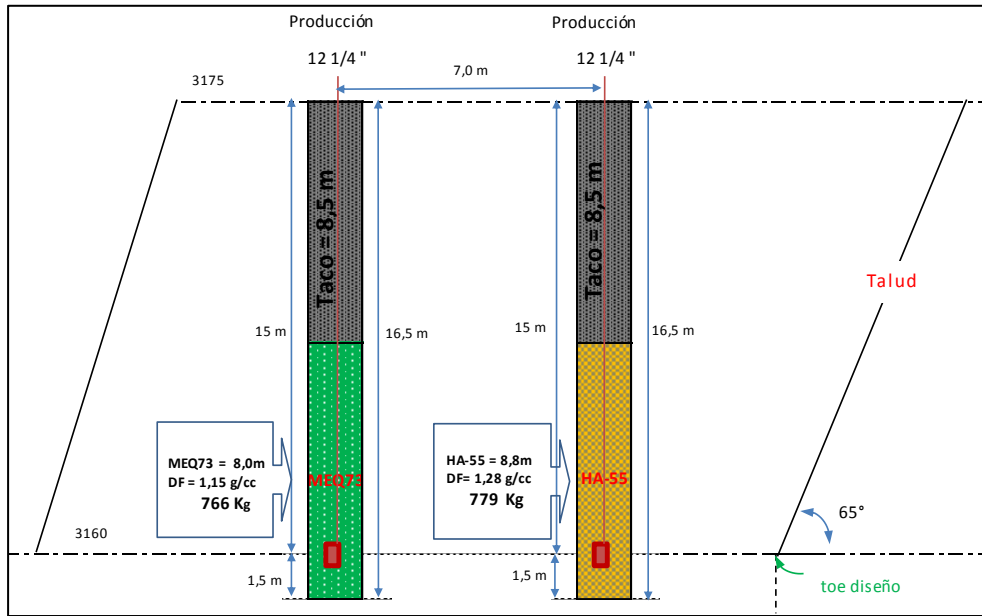


Figura 43. Diseño de carga del proyecto 3160 – 109.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

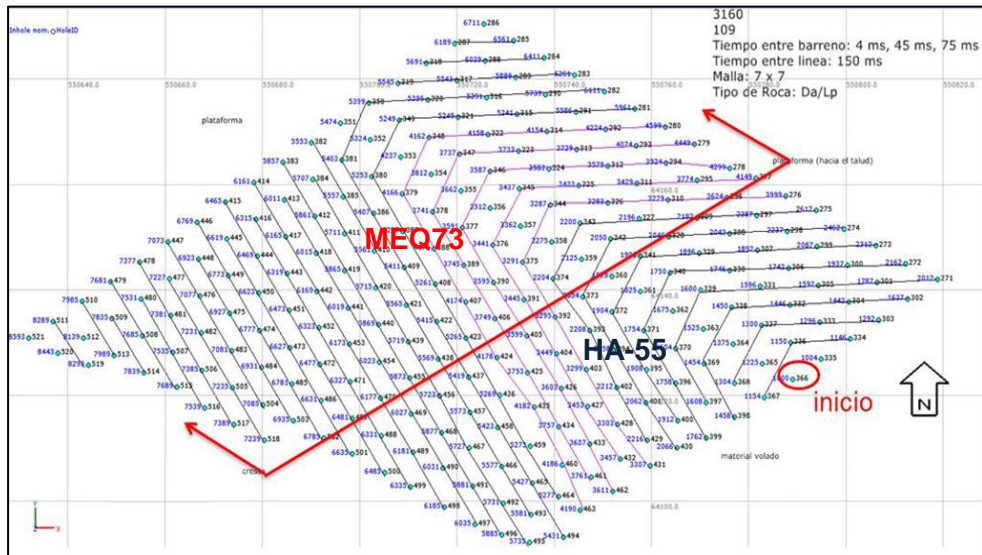


Figura 44. Diseño de amarre del proyecto 3160 – 109.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

Tomando en consideración estos parámetros y en relación a la Tabla 20, se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 23. Consumos y costos de los agentes de voladura.

AGENTE		MEQ73	HA-55
		137 Taladros	113 Taladros
<b>NITRATO</b>	CONSUMO (kg)	30 556	41 377
	COSTO (\$)	17 417	24 826
<b>EMULSIÓN</b>	CONSUMO (kg)	73 502	44 018
	COSTO (\$)	37 123	22 232
<b>D2</b>	CONSUMO (kg)	945	2 641
	COSTO (\$)	1 560	4 361
<b>TOTAL</b>	EXPLOSIVO (kg)	105 003	88 036
	COSTO (\$)	56 100	51 418

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Resumen comparativo entre MEQ73 y HA-55.

	MEQ73	HA-55	Diferencia
Taladros Cargados	137	113	
Tonelaje	261 807	215 943	
Explosivo Utilizado (kg)	105 003	88 036	16 968
FP (kg/t)	0,401	0,408	-0,007
COSTO (\$)	56 100	51 418	4 682
Costo/Tonelada(\$/t)	0,214 3	0,238 1	-0,0238

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos, se tiene que el costo por tonelada fragmentada con HA-55 es de 0,238 \$/t y para la MEQ73

es de 0,214 \$/t, por lo tanto se tiene una diferencia del 10 % de ahorro utilizando la MEQ73.

### Análisis comparativo mensual durante el año 2015

Desde el mes de abril de 2015 se realizó la implementación en su totalidad de la MEQ73 en reemplazo del Anfo pesado, a partir de esa fecha se observó una disminución tanto en los consumos como en los costos de los agentes de voladura (Tabla 25), así mismo, disminuyó el factor de potencia promedio en relación al tonelaje volado durante el año 2015 (Tabla 26)

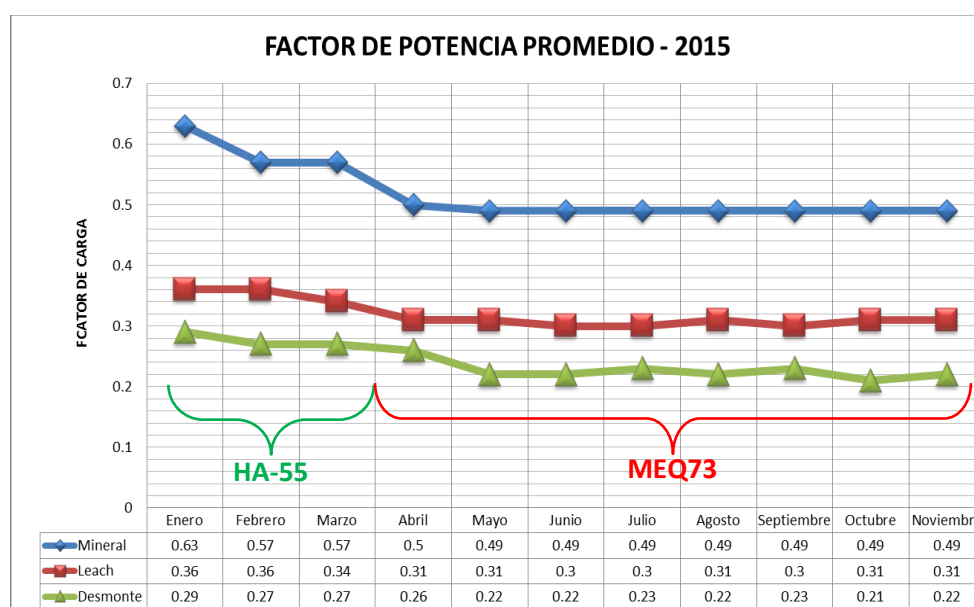


Figura 45. Factor de potencia promedio anual 2015.

Fuente: Asistencia Técnica – EXSA.

En la Figura 45 se observa el factor de potencia promedio que se utilizó durante el año 2015 en las distintas zonas de la mina Toquepala, en el cual se aprecia una disminución del mismo a partir del mes de abril, siendo a partir de esa fecha que se realizó la implementación al 100 % de la MEQ73 en reemplazo del Anfo pesado.

En la Tabla 26 se recopilaron los resultados de material volado, consumo de explosivos y costos de los mismos durante el año 2015, en el cual se evidencia una disminución de costos a partir del mes de abril, mes en el que se realizó la implementación al 100 % de la mezcla explosiva Quantex 73, considerando los costos de los agentes de voladura en la Tabla 18.

Tabla 25. Consumo y costos mensuales de los agentes de voladura.

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
<b>AGENTE</b>		<b>ANFO PESADO</b>					<b>MEZCLA EXPLOSIVA QUANTEX 73</b>					
NITRATO	CONSUMO (t)	2 145	2 707	2 703	1 863	1 767	1 007	1 471	1 162	1 630	1 575	1 721
	COSTO (\$)	1 287 000	1 624 200	1 621 800	1 061 910	1 007 190	573 990	838 470	662 340	929 100	897 750	980 970
EMULSIÓN	CONSUMO (t)	3 236	2 930	2 984	3 876	4 251	3 573	3 538	4 015	3 815	3 674	4 015
	COSTO (\$)	1 634 374	1 479 826	1 507 099	1 957 613	2 147 010	1 804 579	1 786 902	2 027 816	1 926 804	1 855 590	2 027 816
D2	CONSUMO (t)	128,7	162,4	162,2	55,9	53,0	30,2	44,1	34,9	48,9	47,3	51,6
	COSTO (\$)	212 497	268 172	267 775	92 280	87 525	49 880	72 863	57 557	80 739	78 014	85 246
TOTAL	EXPLOSIVO(t)	5 510	5 799	5 849	5 795	6 071	4 610	5 053	5 212	5 494	5 296	5 788
	COSTO (\$)	3 133 871	3 372 197	3 396 674	3 111 803	3 241 725	2 428 449	2 698 235	2 747 713	2 936 643	2 831 355	3 094 032

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resumen de material volado, consumos, factor de potencia y costos mensuales.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
MAT. VOLADO (t)	15 703 121	14 174 144	15 373 630	15 858 243	17 048 027	16 746 675	14 174 605	14 578 503	15 179 864	16 547 080	15 561 778
EXPLOSIVO (t)	5 510	5 799	5 849	5 795	6 071	4 610	5 053	5 212	5 494	5 296	5 788
FP (kg/t)	0,351	0,409	0,380	0,365	0,356	0,275	0,356	0,358	0,362	0,320	0,372
COSTO (\$)	3 133 871	3 372 197	3 396 674	3 111 803	3 241 725	2 428 449	2 698 235	2 747 713	2 936 643	2 831 355	3 094 032
Costo/Tonelada(\$/t)	0,199 6	0,237 9	0,220 9	0,196 2	0,190 2	0,145 0	0,190 4	0,188 5	0,193 5	0,171 1	0,198 8

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 27 al realizar una comparación entre el mes de febrero en el cual se venía utilizando el Anfo pesado y el mes de julio en el que se utilizó la MEQ73, se observa que para casi el mismo material volado se consumió menos explosivo, disminución del factor de potencia y por ende un ahorro del 20 % equivalente a 673 962 \$.

Tabla 27. Resumen comparativo entre el mes de febrero y julio.

	FEB	JUL	DIFERENCIA
MAT. VOLADO (t)	14 174 144	14 174 605	---
EXPLOSIVO UTILIZADO (t)	5 799	5 053	746
FP (kg/t)	0,409	0,356	0,053
COSTO (\$)	3 372 197	2 698 235	673 962
Costo/Tonelada(\$/t)	0,237 9	0,190 4	0,047 6

Fuente: Elaboración propia.

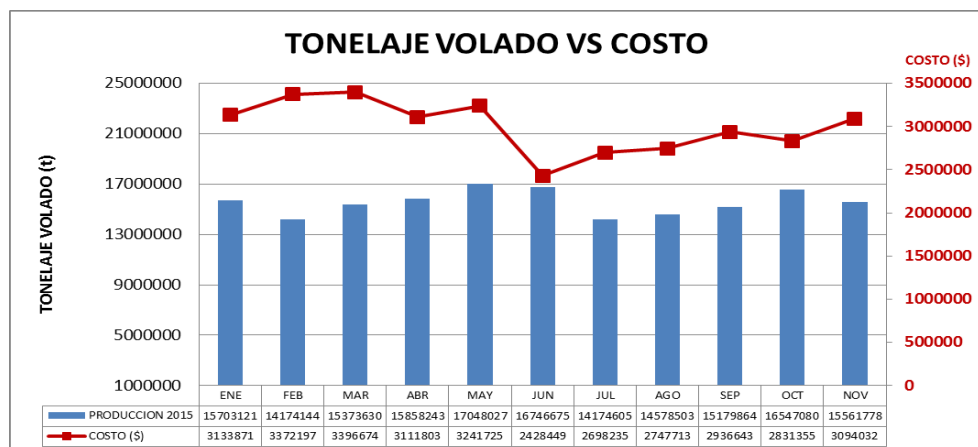


Figura 46. Tonelaje volado vs costo del explosivo.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 46 se observa que a partir del mes de abril hay una disminución de costos, así como también, a partir del mes de junio.

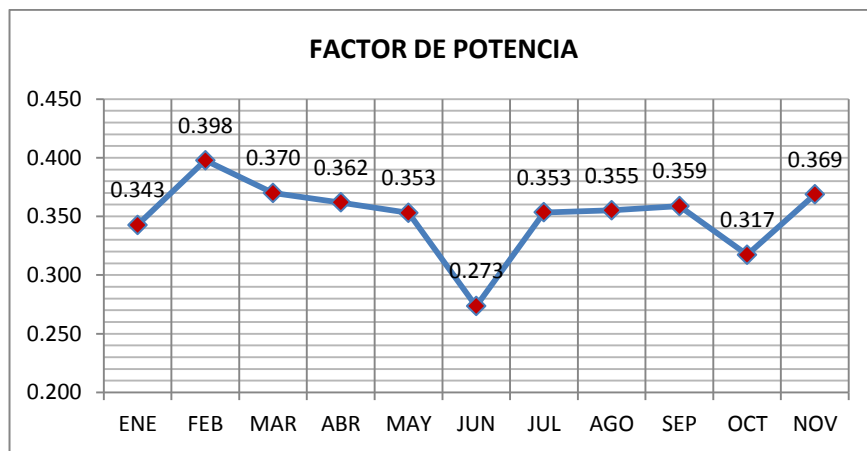


Figura 47. Factor de potencia promedio anual 2015.

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 47 se observa que a partir del uso de la mezcla explosiva Quantex 73 hay una disminución del factor de potencia en toda la mina.

## 5.6. Discusión de resultados

En la Figura 36 se muestra que la MEQ73 en sus diferentes densidades tiene un mejor desempeño de velocidad de detonación que las mezclas de Anfo pesado.

En la Figura 38 se muestra una disminución de la fragmentación hasta un 26 % del P80 desde que se implementó el uso de la MEQ73.

Tras realizar un análisis comparativo entre la Figura 27 y Figura 34 la tasa de excavación muestra un incremento del 4,8 %, el cual se denota en la producción mensual en la Figura 39.

En la Figura 40 se muestra el porcentaje de gases nitrosos, los cuales se mitigaron considerablemente desde el uso de la MEQ73, esto también se debe a que el porcentaje de balance de oxígeno de la MEQ73 es menor a la de las mezclas de Anfo pesado, las cuales generaban gases nitrosos.

En la Tabla 20 se muestra la comparación económica del Anfo pesado y la MEQ73, siendo esta última económicamente más barato que el Anfo pesado. Realizando un análisis comparativo en un proyecto de voladura entre la MEQ73 con densidad final de 1,15 g/cc y el HA-55 con densidad 1,28 g/cc (Tabla 24), se obtiene una diferencia del 10 % de ahorro utilizando la MEQ73, la cual tiene un costo por tonelada fragmentada de 0,214 \$/t y siendo mayor con HA-55 con 0,238 \$/t.

Luego de la implementación del uso de la MEQ73 se realizó un seguimiento mensual del costo por tonelada fragmentada durante el año 2015 (Tabla 26), se observó una disminución del factor de potencia y por ende se obtuvo hasta un 20 % de ahorro.

En comparación con otros trabajos de investigación como referencia con esta tesis, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Comparando la “Evaluación Técnica Económica del uso del SANG en mina La Arena” (Huangal Cruzado, Cesar). Donde se comparó HA-45/55 y emulsión gasificada SANG de FAMESA para el desarrollo de este estudio, en el cual se obtuvo una

disminución de fragmentación del 20 %, un ahorro del 0,02 \$/t y no hubo generación de gases nitrosos. En comparación con el presente trabajo de investigación que se compara HA-55 y MEQ73, en el que se obtuvo una disminución de fragmentación del 26 %, un ahorro del 0,024 \$/t y tampoco se generaron gases nitrosos, también se realizó el balance de oxígeno de las diferentes mezclas explosivas y tasa de excavación.

- Comparando la “Evaluación Técnico – Económico de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas en Cuajone – Southern Perú” (Medina, Robert). Donde se comparó HA-45/55 y emulsiones gasificadas como SlurrexG y SANG para el desarrollo de dicho estudio, en el cual se obtuvo una disminución de fragmentación del 25 %, un ahorro del 0,043 \$/t equivalente al 17 % y no hubo generación de gases nitrosos. En comparación con el presente trabajo de investigación que se compara HA-55 y MEQ73, en el que se obtuvo una disminución de fragmentación del 26 %, un ahorro del 0,024 \$/t equivalente al 10 %, tampoco se generaron gases nitrosos, también se realizó el balance de oxígeno de las diferentes mezclas explosivas y tasa de excavación.

## CONCLUSIONES

1. Se demostró que el uso de la mezcla explosiva Quantex 73 logró mejores resultados tanto operativas, medioambiental, de seguridad y económicos que el Anfo pesado en el proceso de voladura.
2. SPCC Toquepala tras el estudio de factibilidad, decidió implementar la utilización de la mezcla explosiva Quantex 73 a base de emulsión gasificable, para el reemplazo de las mezclas de Anfo pesado a base de emulsión matriz.
3. Se mitigó significativamente la generación de humos nitrosos, los cuales generaban demoras operativas y significaban un riesgo para los trabajadores, por lo cual, se mejoró las prácticas medioambientales y de seguridad.
4. Los análisis de fragmentación demuestran que se obtuvo una reducción en la fragmentación de hasta el 26 %, dando como resultado un mejor rendimiento en el minado de la pala.

5. Con el uso de la mezcla explosiva Quantex 73 se obtuvo una disminución de costos del 10 % hasta el 20 % en comparación al Anfo pesado.
6. Tras la implementación del uso de la mezcla explosiva Quantex 73 en la mina Toquepala se identificó los puntos críticos y se estableció los procedimientos de trabajo seguro y controles de calidad de dicha mezcla.
7. También se determinó un incremento en la tasa de excavación del 4,8 %, en comparación al Anfo pesado que se venía utilizando.

## RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se sugieren en base a lo aprendido y observado durante la investigación son las siguientes:


1. Para el uso de la mezcla explosiva Quantex 73 se deben realizar monitoreos constantemente como el control de densidad final, el cual debe de estar en un rango de 1,00 g/cc a 1,20 g/cc, también controlar la inyección de nitrito de sodio, tiempo de esponjamiento y longitud de esponjamiento del explosivo.
2. Se recomienda realizar semanalmente el control de calidad de los agentes de voladura y establecer la calibración de los camiones fábrica cuarto veces al mes.
3. Se debe conocer el comportamiento geomecánico y geotécnico del macizo rocoso para tener mayores y mejores criterios en la determinación de nuestros parámetros de voladura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ames, V., & León, G. (2007). Tecnología de Explosivos (Segunda ed.). Lima.
2. Bampffield, H. A., & Morrey, W. B. (1984). Emulsion explosives. CIM Third Coal Operators' Conference. Fernie, British Columbia, Canada, September, Paper No. 3.
3. Condori Castro, Samuel (2015) uso de emulsion gasificable – ME Quantex para reducir costos de voladura en mina Cuajone. – UNSA
4. EXSA. (s.f.). Manual Práctico de Voladura. Edición Especial.
5. Konya, C., & Albarrán, E. (1998). Diseño De Voladuras. México D.F.: Ediciones Cuicatl.
6. López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003). Manual de perforación y voladura de rocas. Madrid: IGME.


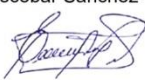
7. Medina, Robert (2014) Evaluación técnico – económico de los resultados de las pruebas realizadas usando emulsiones gasificadas en Cuajone – Southern Perú. – UNI
8. Morhard, R. C. (1987). Explosives and rock blasting. Dallas, TX: Atlas Power Company.
9. Olazabal Mora, Javier Octavio (2014) Factibilidad del cambio de sistema de control de mina en la unidad minera Toquepala. – PUCP
10. Segarra, P., Sanchidrián, J. A., López, L. M., & Querol, E. (2010). On the prediction of mucking rates in metal ore blasting. Journal of Mining Science, Vol. 46, No. 2.
11. Vilela Sangay, Wilson Paul (2014). Análisis de factibilidad para el uso de ANFO pesado a base de emulsion gasificable en minera Yanacocha. – PUCP.

# **ANEXOS**


	<b>ANEXO 1 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 1 de 10</b>

## EXSA SIVE TOQUEPALA

# PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA

ELABORADO POR:	REVISADO POR:
Jorge Rodríguez Montes 	Marcelino Castillo Quesada Jair Escobar Sánchez 
Ing. de Seguridad <b>Fecha:</b> 15-07-2015	Ings. Residentes de Área <b>Fecha:</b> 16-07-2015

APROBADO POR:		
Justo Mamani Ccallata Raphael Almedo Medrano 	Richard Sotomayor O. 	Jorge Alva Fernández 
<b>Representante de los Trabajadores.</b> <b>Fecha:</b> 17-07-2015	<b>Representante de la Empresa</b> <b>Fecha:</b> 17-07-2015	<b>Jefe de Servicios a la Minería y Construcción</b> <b>Fecha:</b> 20-07-2015

	<b>ANEXO 1 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 2 de 10</b>

#### 1. PERSONAL Y RESPONSABILIDADES

- 1.1. **Supervisores:** Son los responsables de verificar el cumplimiento del presente PETS y asegurarse que las condiciones de trabajo sean las adecuadas.
- 1.2. **Colaboradores:** Son todos aquellos trabajadores que se encuentran entrenados, capacitados y cuentan con el carnet de SUCAMEC para el carguío de taladros. Para el caso de los conductores y operadores deberán de contar con la autorización interna de conducción de vehículos y/o equipos de código 1-P y practicar en todo momento el manejo defensivo.
- 1.3. **Controladores de campo:** Son los responsables de controlar y verificar al inicio y durante el carguío de taladros las mezclas y densidades adecuadas según diseño establecido para lo cual utilizan el formato SVE-F-021 (Medición de Densidades).

#### 2. EQUIPOS DE PROTECCION PERSONAL

- 2.1. EPP: Zapatos punta de acero, chaleco naranja con cintas reflectivas, lentes de seguridad, casco
- 2.2. Protector de oídos (según evaluación del IPERC diario)
- 2.3. Respirador con filtros para polvo (según evaluación del IPERC diario)
- 2.4. Guantes de neopreno y/o nitrilo, cuero
- 2.5. Arnés y línea de vida simple en labores sobre 1.80 m.
- 2.6. Bloqueador Solar

#### 3. EQUIPO / HERRAMIENTAS / MATERIALES

- 3.1. Conos y tacos de Seguridad: son dispositivos de seguridad que se utilizan para delimitar el área asignada a un vehículo y/o equipo (conos de seguridad) y bloquear el vehículo o equipo (tacos).
- 3.2. Radio Handy: dispositivo de comunicación que utilizan los conductores, operadores de vehículos y equipos y la supervisión durante el carguío de taladros y el tránsito en mina con la finalidad de mantener una comunicación efectiva de las actividades y anticipar el acercamiento y/o solicitar autorización de pase a los equipos gigantes.
- 3.3. Camioneta Pick UP 4x4: vehículo utilizado para el transporte de personal durante el tránsito en mina. También se cuenta con camionetas Pick Up 4x4 acondicionadas para el transporte de accesorios y explosivos.
- 3.4. Camión Mezclador: camión acondicionado con compartimientos separados para el transporte de agentes de voladura y utilizado para el carguío de taladros.
- 3.5. Wincha de lona de 50 metros: herramienta de medida utilizada por el operador de carguío para determinar la longitud de taco que se requiere durante el carguío de taladros según diseño de carguío establecido.
- 3.6. Balanza digital de plataforma con una capacidad nominal de 10 Kg. (Precisión 0.1 gr y calibrada): equipo de medición de peso de la sustancia destinada a la medición de su densidad en el campo.
- 3.7. Recipiente Cilíndrico de 1,000 cm<sup>3</sup>: recipiente que contiene a la sustancia destinada a la medición de su densidad en campo.
- 3.8. Espátula: accesorio de limpieza utilizado durante la medición de densidades.
- 3.9. Trapo industrial: elemento textil utilizado para la limpieza durante la medición de densidades en campo.


#### 4. PROCEDIMIENTO

##### 4.1. Reunión de Seguridad Diaria

- 4.1.1. Antes de iniciar con la jornada de trabajo todo el personal participa de la reunión de seguridad del día y establece sus nombres, apellidos y firma correspondiente en el registro de participantes.

##### 4.2. Coordinaciones Previas y Verificación Inicial

- 4.2.1. El Jefe de Perforación y Voladura de la minera (B-1) o el encargado en su reemplazo (B-2), coordina un día antes en la reunión de voladura con las áreas involucradas (Geología,

	<b>ANEXO 1</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
	<b>SIVE TOQUEPALA</b>	<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA</b>	<b>VALIDO DESDE:</b>
	<b>EXPLOSIVA</b>	<b>20/07/2015</b>
		<b>Página 3 de 10</b>

Geotecnia, Ingeniería) de la minera los proyectos que serán primados y comunica al residente de EXSA dicho primado y posterior carguío de proyecto y/o el avance de otros proyectos. Para tal efecto se utiliza el formato Reporte de Voladura Diaria de Southern.

4.2.2. Así mismo, en dicha reunión de voladura el residente de EXSA solicita al responsable del área de Perforación y Voladura B-1 la autorización de ingreso a mina para el carguío de taladros en el proyecto designado.

4.2.3. El responsable del área de Geotecnia de la minera confirma en la reunión diaria de voladura la estabilidad de los taludes en el proyecto asignado para el carguío de taladros y autoriza el ingreso de personal de EXSA para el carguío de taladros. Para tal efecto se utiliza el formato Reporte de Voladura Diaria de Southern.

**4.3. Pre uso de equipos**

4.3.1. El personal responsable y autorizado para la operación del camión mezclador deberá realizar la inspección visual diaria del equipo (vuelta del gallo) antes de la operación y tránsito en mina y luego proceder al llenado del check list en donde registra todas las observaciones detectadas. Si el camión mezclador no se encuentra en condiciones de seguridad adecuadas comunique de inmediato al supervisor para su verificación por el personal de mantenimiento.

**4.4. Zona de carguío**

4.4.1. Todo el personal involucrado en la tarea realiza el IPERC continuo diario, caso contrario no podrán iniciar la tarea.

4.4.2. Llegando al proyecto designado para el carguío de taladros, el operador del camión mezclador solicitará permiso para ingreso a la malla de carguío al líder de grupo, así mismo tendrá que ser guiado en todo momento por el operador de carguío (personal de piso) dentro de la malla.

4.4.3. Si no tiene espacio de carguío, o por algún motivo deba estacionarse, deberá hacerlo fuera de la malla en retroceso y en zona segura, considerar a 10 metros del talud y listo para salir por cualquier emergencia.

4.4.4. Para ingresar o salir del proyecto, solicitar el permiso correspondiente a los equipos de perforación u otros si los hubiera haciendo uso de la radio y espere la confirmación respectiva por parte del operador de dicho equipo; así mismo transite conservando una distancia adecuada y segura a otros vehículos y/o equipos.

4.4.5. Así mismo, al ingresar a la zona de carguío de taladros en taludes cercanos se debe verificar constantemente la presencia de material inestable y/o rocas colgadas comunicando de inmediato al supervisor de EXSA, el mismo que comunicará al Jefe de Perforación y Voladura B-1 quien coordinará con el área de Geotecnia de la minera Southern y se proceda a realizar la evaluación correspondiente y de ser necesario se restrinja o prohíba el acercamiento de personal y equipos por dicha zona.


4.4.6. Al estacionarse el operador del camión mezclador utiliza sus elementos de bloqueo (caja de cambios trabada a velocidad adecuada, freno de parqueo, retirar la llave de contacto, coloque tacos y conos).

**4.5. Carguío de Taladros**


4.5.1. Una vez ubicados en el proyecto designado para el carguío de taladros y antes de comenzar la tarea, el Supervisor EXSA inspeccionará el área para identificar los peligros. Cuando se trabaje a menos de 10 m del pie del talud (taladros de pre-corte) se coordinará para la ubicación de un vigía durante todo este proceso con la finalidad de anticipar posibles deslizamientos y/o desprendimientos de material o rocas sueltas.

4.5.2. El operador del camión mezclador verificará la ubicación del equipo y con el apoyo del operador de carguío (personal de piso) ubicará su equipo a una distancia de acercamiento segura mínima de 10 metros de otros equipos (camión mezclador o minicargador) tal que les permita realizar maniobras seguras dentro de la malla al momento de realizar el carguío de taladros.


4.5.3. El supervisor de EXSA o líder de grupo establece el sector de estacionamiento para vehículos y/ o equipos involucrados en una zona contigua al proyecto de tal manera que no interfieran con la tarea.

	<b>ANEXO 1 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 4 de 10</b>


- 4.5.4. Para el carguío de taladros el operador del camión mezclador mantiene la radio musical apagada, estando en todo momento atento a las comunicaciones radiales por frecuencia mina (canal 1).
- 4.5.5. El operador del camión mezclador revisará el plano de carguío y diseño de carga establecido, verificará la densidad de la mezcla explosiva antes de cargar el primer taladro. Para ello deberán contar con el equipo necesario para esta operación. Esta densidad será tomada aleatoriamente por el Supervisor EXSA, para constatar la densidad correcta.
- 4.5.6. En cada viaje o antes de iniciar el proceso de carguío, el operador del camión mezclador verterá los kilos necesarios fuera del primer taladro para verificar que la dosificación de la mezcla sea la requerida. El material vertido luego se echara sobre 1 metro del taco inerte del taladro para evitar ensuciar el proyecto.
- 4.5.7. Cargue el brazo de descarga aproximadamente con 70 a 100 Kg de explosivo, dependiendo de las longitudes del brazo, resetear el totalizador de explosivos y proceda al carguío del taladro.
- 4.5.8. Está terminantemente prohibido que el personal transite por debajo del brazo de descarga del camión mezclador, podría desprenderse y causar lesiones graves.
- 4.5.9. La secuencia de carguío de taladros debe ser ordenada (carguío por filas), por ningún motivo el operador del camión mezclador cargará taladros sin la presencia y apoyo del operador de carguío (personal de piso). Tampoco está permitido que un operador de carguío (personal de piso) realice el winchado a dos camiones en simultaneo.
- 4.5.10. El operador de carguío (personal de piso) medirá la longitud de taco con la wincha, según el diseño de carga establecido, e indicará si se requiere aumentar la carga en el taladro cargado.
- 4.5.11. El operador del camión mezclador deberá tener en consideración de la dosificación del petróleo (FO) cuando se fabrique la mezcla explosiva, reportar el % de paso analizado en el primer viaje aproximadamente en el segundo taladro de iniciado el carguío. Como medida adicional se podrá usar colorantes especiales (waxoline) para poder distinguir físicamente la homogeneidad de la mezcla. En el caso de emplear mezcla aceite reciclado / petróleo este mantendrá un color característico (color gris)
- 4.5.12. El operador del camión mezclador deberá tener en consideración de la dosificación del nitrato de sodio, cuando se fabrique la mezcla explosiva, reportar el % de paso analizado en el primer viaje aproximadamente en el segundo taladro de iniciado el carguío.
- 4.5.13. Para "soplar" o limpiar el brazo de descarga, cierre la llave de los inyectores para evitar derrames o contaminaciones en el piso.
- 4.5.14. Todo movimiento del camión mezclador dentro de la malla debe ser guiado por el operador de carguío (personal de piso), de lo contrario abstenerse a realizar maniobras que pueden ser riesgosas, esto se tendrá en cuenta hasta que se retire del proyecto.
- 4.5.15. El camión mezclador nunca debe pasar sobre taladros cargados sin tapar, o taladros sin carga, NO pise los exsaneles o accesorios de voladura, salvo lo autorice el operador de carguío (personal de piso) quien guiará y enterrará los exsaneles para protegerlos y evitar que sean pisados y deteriorados.
- 4.5.16. Las mangas plásticas de los brazos de descarga que dejen de emplearse por desgaste, deberán de ser eliminadas por contener restos de explosivos, cortándolas en pedazos pequeños y depositándolos en los taladros, antes de que estos sean tapados. NUNCA dejar sobre los taladros.
- 4.5.17. Todo taladro cargado deberá ser anotado en el reporte de carguío respectivo y verificado en el plano de la malla, individualizando el número de taladro que corresponda, altura, si tiene agua, cantidades de mezcla empleadas, número de boosters, exsaneles y cualquier observación que se presente en la malla.
- 4.5.18. Si el operador del camión mezclador observa zonas de carguío de riesgo (cerca de crestas, taludes, etc.) comunique de inmediato al supervisor y/o prevencionista para el apoyo necesario.

	<b>ANEXO 1 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 5 de 10</b>

- 4.5.19. Todo exceso de carga en los taladros se registrará para los controles administrativos.
- 4.6. **Carguío de Taladros con Agua**
- 4.6.1. La manguera de descarga deberá estar marcada cada cierta distancia, con pintura de color, o cinta aislante, no con amarres (pueden jalar la línea descendente del exsanel).
- 4.6.2. Cargar el brazo de descarga con el explosivo determinado, verterlo de manera vacuable a un taladro hasta obtener la dosificación adecuada.
- 4.6.3. Lubricar la manguera de descarga con agua antes de iniciar el carguío. Añadir el porcentaje de nitrato adecuado para la mezcla explosiva Quantex.
- 4.6.4. Ubicar el brazo de descarga en su descanso para iniciar el proceso de bombeo, además que se verifique la dosificación por gravedad en un taladro seco antes de iniciar el proceso.
- 4.6.5. Cargar agua a la Tina y bombear más aire para limpiar y lubricar la manguera de descarga.
- 4.6.6. Regular el paso de rotación del carrete para que se enrolle automáticamente a una velocidad que permita el tiempo adecuado de reposo del explosivo y que desplace el agua evitando atraparla en su interior (afecta la energía y rendimiento del explosivo).
- 4.6.7. Revise siempre los controles de seguridad, relojes de presión, presión en la manguera, sellos, mandos, etc.
- 4.6.8. Recuerde no exceder los 150 PSI de presión, puede romper el sello de seguridad.
- 4.6.9. Posicionar la manguera de descarga al fondo del taladro y subirla medio metro del fondo para iniciar el bombeo del explosivo.
- 4.6.10. La dosificación explosiva e inyección de agua a la mezcla debe ser de ½ hasta 2.0 galones por minuto, considerándola como lubricante entre la mezcla y la manguera. NUNCA exceda las presiones de bombeo establecidas por el fabricante.
- 4.6.11. NUNCA trabaje las bombas en vacío, esta práctica inadecuada eleva la temperatura y es muy peligroso.
- 4.6.12. Al finalizar calcule el espacio de altura del taladro adecuada para completar con la carga de soplado de la manguera y evitar derrames en el terreno, limpie con agua y aire hasta estar seguro de una limpieza eficiente.
- 4.6.13. Finalizada la labor "limpie" el sistema de bombeo y manguera de descarga para evitar obstrucciones.
- 4.6.14. La tina siempre debe estar con agua para diluir la carga "seca" que pudiera caer del brazo de descarga.
- 4.7. **Consideraciones Generales**
- 4.7.1. Solamente podrán participar en el carguío de taladros con explosivos para voladura el personal que cuente con el carnet de SUCAMEC **vigente**.
- 4.7.2. Antes de iniciar el carguío de taladros, el personal debe verificar la delimitación del área o proyecto de voladura a cargar con cintas de seguridad que indiquen "CUIDADO EXPLOSIVOS" o "PELIGRO NO ENTRE", simultáneamente colocar letreros que indiquen "AREA CARGADA CON EXPLOSIVOS", "SOLO PERSONAL AUTORIZADO", con la finalidad de evitar el ingreso al área de carguío de personal o equipo no autorizado.
- 4.7.3. Toda persona que no cuente con el carnet de SUCAMEC y que por razones operativas o de soporte necesita ingresar a la zona delimitada para carguío (Ingeniería, Geología, Geotecnia, etc.), deberá ingresar solo con la autorización del Jefe de Perforación y Disparos de la minera (B-1) o el encargado en su reemplazo (B-2) y conocimiento del supervisor de EXSA.
- 4.7.4. Limpiar el filtro de mezcla (combustible) mínimo dos veces por guardia, reportar estado en la hoja de carguío, registrar en la bitácora de cambio de guardia.
- 4.7.5. Limpiar el filtro de mezcla (nitrato) mínimo una vez por día, reportar estado en la hoja de carguío, registrar en la bitácora de cambio de guardia.
- 4.7.6. El control principal de la altura de carga es por kilos, el winchero realiza medida de control referencial que indica la carga en el taladro y si subió adecuadamente lo previsto.

	<b>ANEXO 1</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
	<b>SIVE TOQUEPALA</b>	<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA</b>	<b>VALIDO DESDE:</b>
	<b>EXPLOSIVA</b>	<b>20/07/2015</b>
		<b>Página 6 de 10</b>

- 4.7.7. Para traslado del camión mezclador entre taladros, la manga estará en posición segura evitando derramar explosivo, y siempre con el apoyo y guía del operador de carguío (personal de piso).
- 4.7.8. Taladros donde se detecte anomalías (oquedades o espacios internos), se procederá según el caso a tapar con algún elemento de forma segura y se considerará volver a primar y cargar luego de solucionar ese inconveniente (cantidad coordinada con el Jefe de Perforación y Disparos de la minera (B-1) o el encargado en su reemplazo (B-2)), se registrará en el reporte de carguío.
- 4.7.9. Solamente se procede a cargar los taladros con indicación de kilos de explosivo, si no tiene dicha indicación se obvia el carguío y se comunica al supervisor inmediatamente.
- 4.7.10. Nunca realice el carguío de taladros hasta que quede vacío los compartimientos del camión, puede derramar combustible por el auger vertical (medio ambiente) o cavitarse las bombas.
- 4.7.11. Para traslados cortos no son necesarios desencrochar o desactivar el PTO, NUNCA realice cambios de velocidad con el camión encrochado (PTO activado); así mismo NUNCA sobre pase las 1200 RPM.
- 4.7.12. Distancias largas (mayores a 30 m.), considerar trasladarse con el brazo de descarga en su descanso, evitar fatiga del brazo vertical y desactivar el PTO.
- 4.7.13. Durante toda la labor de carguío de taladros el operador del camión mezclador permanecerá dentro de su cabina, **excepto** cuando realice labores de vibración de tolvas de nitrato quantex, carguío bombeable desde mandos externos, inspección breve por falla inesperada. Para esta actividad deberá evaluar nivel de piso, aplicar freno de emergencia y de ser necesario tacos.
- 4.7.14. En zonas donde la pendiente es pronunciada, para realizar lo indicado en el ítem anterior deberá obligatoriamente colocar tacos para bloquear el movimiento inesperado del camión mezclador.
- 4.7.15. Por ningún otro motivo abandonará el camión mezclador con el motor en marcha, salvo excepciones de seguridad que pongan en riesgo la integridad del equipo y personal (incendio, emergencias).
- 4.7.16. En proyectos que por razones operativas se está terminando de perforar y es necesario avanzar con el carguío de taladros, se debe conservar una distancia mínima de 20 metros a la Perforadora y estar limitada con cintas de seguridad.
- 4.7.17. Para verificar cantidades en las tolvas (compartimientos) de los camiones usar arnés (sobre 1.80 m de altura), colocar la línea de vida una vez posicionado sobre la plataforma superior del camión, subir o bajar haciendo uso de tres puntos de apoyo y de manera frontal.
- 4.7.18. Si los taladros que se perforan son deleznable y existe riesgo de taparse por inestabilidad de las paredes por la presencia de agua, se deberá cargar tan pronto se retira la perforadora, en este caso habrá una excepción de distancia mínima, por situación especial presentada, se coordina antes con el supervisor de EXSA o se solicita un vigía para realizar esta labor.
- 4.7.19. De realizarse algún mantenimiento correctivo al camión, retire el equipo fuera de la zona de carguío y coloque/use los elementos de protección ambiental necesarios (bandeja, bolsas, trapos absorbentes, etc.), no contamine el piso u otro sector.
- 4.7.20. Al finalizar el carguío, debe limpiar los brazos de descarga adecuadamente y también la manguera del bombeable si se usó.
- 4.7.21. Desencrochar el PTO, realice pruebas para asegurarse que se desactivo tal dispositivo.
- 4.7.22. Antes de salir del proyecto revise los neumáticos, puede haber piedra entre ellas, de darse el caso solicite ayuda al mecánico para retirar dicho elemento, evite dañar las mismas.
- 4.7.23. Al finalizar la jornada y de acuerdo al factor climático, el camión mezclador debe quedar con todas las materias primas abastecidas y las tolvas (compartimientos) cerradas por cualquier eventualidad del clima.

	<b>ANEXO 1 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 7 de 10</b>

4.7.24. Los derrames, levantar con cuidado y verter al taladro sobre la carga explosiva (taladros completamente cargados). Nunca debe quedar explosivo o partes de el sobre el terreno.

4.7.25. Todo daño al sello de ruptura de las bombas debe ser reportado como incidente con daño material.

**4.8. Desobturación de agentes de voladura (auger, mangueras)**

**4.8.1. Desobturación por la parte superior de las tolvas (compartimientos) del Agente:**

- Solicite apoyo, comunique y coordine con el supervisor de EXSA
- Asegure el vehículo, si está solo (apague el vehículo, aplique freno de emergencia y coloque cuñas); si tiene apoyo de otro colaborador, permanezca en la cabina con freno de parqueo activado, desencroche el sistema del módulo y coordine acciones.
- Mientras este el personal sobre la tolva del camión, preferentemente no accionar el sistema de carguío de taladros, de ser necesario coordine la labor.
- Obligatorio uso de arnés y línea de vida insertada a la baranda de seguridad y/o línea de anclaje en la parte superior del camión
- Use tubo de material anti chispa para la actividad
- Posiciónese corporalmente seguro para evitar daños personales.
- Trate de evitar llegar al eje principal con el tubo para evitar atascamiento.

**4.8.2. Desobturación por compuerta del eje principal:**

- Solicite apoyo, comunique y coordine con el supervisor de EXSA
- Lidera la labor el operador del camión mezclador
- Asegure el vehículo con freno de emergencia activado y tacos
- Libere la carga de los brazos vertical y de descarga
- Considere la labor manual desde los mandos externos o de la cabina
- Abra el seguro y levante la tapa
- Observe la rotación del eje principal o alimentador
- De ser necesario la limpieza de la zona, utilice un elemento de madera.
- Nunca introduzca la mano
- Finalizada la labor: cierre la tapa, coloque seguro y limpie la zona.

**5. RESTRICCIONES**

5.1.1. Solamente personal entrenado, capacitado y autorizado con el código 1-P realiza la operación del camión mezclador.

5.1.2. Está terminantemente prohibido que el personal transite por debajo del brazo de descarga del camión mezclador, podría desprenderse y causar lesiones graves.

5.1.3. En climas adversos (lluvia, vientos fuertes y neblina densa), comunique de inmediato al supervisor de EXSA y paralice dicha tarea.

5.1.4. Detenga toda actividad si algún: equipo, vehículo, herramienta presenta condiciones sub estándares que ponga en riesgo la integridad personal o de los equipos/vehículos.

5.1.5. Verificar los elementos de seguridad de las bombas; no realice labores si están en condiciones sub- estándares.


5.1.6. No usar celular durante la conducción de vehículos, paralice toda acción y haga uso del equipo.

5.1.7. Si siente fatiga y somnolencia, comunicar al supervisor.

5.1.8. Comunicar al supervisor cualquier malestar corporal, NO auto medicarse y tener en cuenta siempre las prescripciones médicas y/o medicamentos no recomendados por las áreas responsables de EXSA y empresa mandante.

5.1.9. No iniciar, ni utilizar fuego.


5.1.10. Radio musical apagada durante este proceso.

	<b>ANEXO 1</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
	<b>SIVE TOQUEPALA</b>	<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 8 de 10</b>



**6. ANEXOS:**


**6.1.1. Reporte Medición de Densidades:**



	<b>MEDICIÓN DE DENSIDADES</b>	<b>SVE-F-021</b> Edición 02
<p>Peso de vaso: _____ Fecha: _____  Volumen de vaso: _____  Camión mezclador: _____ Hora: _____  Operador: _____ Proyecto: _____</p>		
Tiempo de gasificación (min)	Muestras	Observaciones
	1      2      3      4      Promedio	
1		
5		
10		
15		
30		
Densidad final		
<p>Peso de vaso: _____ Fecha: _____  Volumen de vaso: _____  Camión mezclador: _____ Hora: _____  Operador: _____ Proyecto: _____</p>		
Tiempo de gasificación (min)	Muestras	Observaciones
	1      2      3      4      Promedio	
1		
5		
10		
15		
30		
Densidad final		

	<b>ANEXO 1 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 9 de 10</b>


6.1.2. Reporte de Voladura Diaria:

		<b>REPORTE DE VOLADURA DIARIA</b>								
Fecha _____		Lugar _____		Hora: _____						
PROGRAMACION DE DISPAROS							DISPONIBILIDAD DE EQUIPO			
Fecha	Nivel	Tipo		Pala	Pef.	Obs	Equipo EXSA			
		Elec.	Piro				OK	B.O		
							Camiones Vaceables			
							Camiones Bombeables			
							Bod Cats			
TALADROS POR CARGAR										
Perforadoras							Tal. Agua	Tal. Seco		
TALADROS DE PRECORTE										
Perforadora	Taladros por Guardia		Total Tal. Perforados	Tal. Cargados	Tal. Tapados	Taladro por Cargar	Obs			
	Día	Noche								
Perforadora N° 14										
Perforadora N° 6										
Perforadora N° 10										
CONDICIONES DE SEGURIDAD Y OPERACIONES ANTES DEL CARGUO										
PERF.										
PERF.										
PERF.										
PERF.										
PERF.										
<b>Comentarios:</b>										
Operaciones:										
Geología:										
Geotecnia:										
Ingeniería:										
Perf y Vol.:										
EXSA:										
ORICA:										
Acuerdos:										

	<b>ANEXO 1</b>	<b>TOQ-PETS-016</b>
	<b>SIVE TOQUEPALA</b>	<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / CARGUÍO DE TALADROS CON MEZCLA EXPLOSIVA</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 10 de 10</b>



ELABORADO POR:	REVISADO POR:
Jorge Rodríguez Montes 	Marcelino Castillo Quesada Jair Escobar Sánchez 
Ing. de Seguridad Fecha: 15-07-2015	Ings. Residentes de Área Fecha: 16-07-2015

APROBADO POR:		
Justo Mamani Ccallata Raphael Almedo Medrano 	Richard Sotomayor O. 	Jorge Alva Fernández 
Representante de los Trabajadores. Fecha: 17-07-2015	Representante de la Empresa Fecha: 17-07-2015	Jefe de Servicios a la Minería y Construcción Fecha: 20-07-2015


	<b>ANEXO 2</b> <b>SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-004</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / MEDICIÓN DE DENSIDADES EN CAMPO</b>	<b>VALIDO DESDE:</b> <b>20/07/2015</b>
		<b>Página 1 de 6</b>

# EXSA SIVE TOQUEPALA

## MEDICIÓN DE DENSIDADES EN CAMPO

ELABORADO POR:	REVISADO POR:
Jorge Rodríguez Montes 	Marcelino Castillo Quesada Jair Escobar Sánchez 
Ing. de Seguridad <b>Fecha: 15-07-2015</b>	Ings. Residentes de Área <b>Fecha: 16-07-2015</b>

APROBADO POR:		
Justo Mamani Ccallata Raphael Almedo Medrano 	Richard Sotomayor O. 	Jorge Alva Fernández 
<b>Representante de los Trabajadores.</b> <b>Fecha: 17-07-2015</b>	<b>Representante de la Empresa</b> <b>Fecha: 17-07-2015</b>	<b>Jefe de Servicios a la Minería y Construcción</b> <b>Fecha: 20-07-2015</b>

	<b>ANEXO 2 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-004</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / MEDICIÓN DE DENSIDADES EN CAMPO</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 2 de 6</b>

#### 1. PERSONAL Y RESPONSABILIDADES

- 1.1. **Ing. de Asistencia Técnica:** Es el encargado de coordinar con los operadores de camión mezclador la medición de densidades en campo (densidad real de emulsión). En su ausencia el controlador de campo también puede realizar dicha tarea.
- 1.2. **Controladores de campo:** Son los responsables de controlar y verificar al inicio y durante el carguío de taladros las mezclas y densidades adecuadas según diseño establecido para lo cual utilizan el formato SVE-F-021 (Medición de Densidades).
- 1.3. **Operador de camión mezclador:** Es el encargado de operar el camión mezclador durante la medición de densidades.

#### 2. EQUIPOS DE PROTECCION PERSONAL


- 2.1. EPP: Zapatos punta de acero, chaleco naranja con cintas reflectivas, lentes de seguridad, casco
- 2.2. Protector de oídos (según la evaluación del IPERC diario)
- 2.3. Respirador con filtros para polvo (según la evaluación del IPERC diario)
- 2.4. Guantes: neopreno, latex, nitrilo
- 2.5. Bloqueador Solar

#### 3. EQUIPO / HERRAMIENTAS / MATERIALES

- 3.1. Balanza digital de plataforma con una capacidad nominal de 10 Kg. (Precisión 0.1 gr y calibrada): equipo de medición de peso de la sustancia destinada a la medición de su densidad en el campo.
- 3.2. Recipiente Cilíndrico de 1,000 cm<sup>3</sup>: recipiente que contiene a la sustancia destinada a la medición de su densidad en campo.
- 3.3. Espátula: accesorio de limpieza utilizado durante la medición de densidades.
- 3.4. Trapo industrial: elemento textil utilizado para la limpieza durante la medición de densidades en campo.
- 3.5. Calculadora y Cronómetro: equipos electrónicos de escritorio utilizados durante la medición de densidades en campo.

#### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1. **Reunión de Seguridad Diaria**
  - 4.1.1. Antes de iniciar con la jornada de trabajo todo el personal participa de la reunión de seguridad del día y establece sus nombres, apellidos y firma correspondiente en el registro de participantes.
- 4.2. **Coordinaciones Previas a la tarea**
  - 4.2.1. Coordinar con el residente EXSA – 1 o jefe de grupo EXSA – 3, la disponibilidad individual de los camiones mezcladores para realizar la medición de densidades, la tarea debe de realizarse de preferencia en el primer viaje de cada camión.
  - 4.2.2. Todo el personal involucrado en la tarea realiza el IPERC continuo diario, caso contrario no podrán iniciar la tarea.
  - 4.2.3. El responsable de la tarea solicita autorización de ingreso a mina al Jefe de Perforación y Voladura B-1 de la minera y al supervisor EXSA - 1 para realizar la medición de densidades de la mezcla.
  - 4.2.4. El controlador de campo debe inspeccionar las condiciones de terreno, inspeccionar el kit de densidades y buen estado de todas las herramientas y materiales.
  - 4.2.5. El controlador de campo debe desplazarse con el kit de densidades dentro de la malla con el debido cuidado.
  - 4.2.6. El controlador de campo debe estar informado de la densidad requerida por el diseño de carga: densidad de copa.
  - 4.2.7. Transitar respetando el radio de trabajo de los equipos.
  - 4.2.8. Verificar los taludes durante el tránsito en la mina.
  - 4.2.9. Si en la evaluación de taludes se determina inestabilidad y/o presencia de material colgado, de inmediato se comunica al residente de EXSA, quien es el responsable de solicitar al Jefe de Perforación y Voladura B-1 de la minera para que coordine con el área

	<b>ANEXO 2 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-004</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / MEDICIÓN DE DENSIDADES EN CAMPO</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 3 de 6</b>

de Geotecnia de la minera y se realice una evaluación de los taludes luego de la cual autoriza el tránsito en dicha zona.

4.2.10. Se coordina con los operadores de los camiones mezcladores la ubicación en un lugar seguro para obtener muestras para el respectivo control y medición de densidades.

**4.3. Pre Uso de Equipos y Herramientas**

4.3.1. Inspección de todos los instrumentos a utilizarse antes de emprender la tarea (verifique que la balanza se encuentre calibrada), estos deben estar en perfectas condiciones y limpios.

4.3.2. Radio Handy.

**4.4. Preparación para el Control de densidad de la mezcla:**

4.4.1. El controlador de campo deberá ubicarse y posicionarse adecuadamente (manteniendo contacto visual con el operador del camión o winchero) para obtener la muestra y sostener firmemente el recipiente (vaso).

4.4.2. El controlador de campo debe ubicar el kit de densidades cerca al camión mezclador, manteniendo siempre la distancia segura y respetando la distancia entre otros equipos.

4.4.3. Nivelar y prender la balanza, comprobar estado de las baterías.

4.4.4. Comprobar peso de los vasos y grabar tara en la memoria de la balanza.

4.4.5. Preparar vasos, regla y espátula. Tener trapo de limpieza a la mano.

**4.5. Medición de Densidades en Campo**

4.5.1. El controlador de campo, con vaso y regla en la mano deberá ubicarse en el primer taladro de prueba. La ubicación de los equipos de medición deben estar fuera del radio de giro de los camiones mezcladores y equipos de tapado, señalizado con un (01) cono de seguridad como mínimo.

4.5.2. Obtener en el vaso una muestra de la mezcla directamente de la descarga vaciable o bombeable durante el carguío del primer taladro de prueba.

4.5.3. Razar con la regla y limpiar el exceso de muestra fuera del vaso.

4.5.4. Pesar el vaso con la muestra y registrar el tiempo y peso en una tabla en formato de control.

4.5.5. Repetir el paso anterior cada 5 minutos, antes de cada pesaje deberá razar y limpiar el vaso.

4.5.6. Completar la tabla con 4 pesajes cada 5 minutos.

4.5.7. Verificar el cese de reacción y esponjamiento en el vaso.

4.5.8. Realizar último pesaje que corresponde a la densidad final en copa.

4.5.9. Anotar densidad de copa en el formato y reportar al operador del camión mezclador y operador de carguío.

**4.6. Regulación de la densidad de mezcla:**

4.6.1. Si la densidad medida no es la establecida por diseño, se debe detener el proceso de carguío y regular la inyección de nitrito.

4.6.2. Repetir los pasos del 4.5.4 al 4.5.9 hasta conseguir la densidad de copa requerida por diseño.

4.6.3. Comunicar al operador de carguío que se ha conseguido la densidad requerida y se puede continuar con el proceso.

**4.7. Control de la densidad de mezcla:**


4.7.1. Observar constantemente el aspecto y textura de la mezcla. También observar si hay pico de presión o cambios en la velocidad de descarga.

4.7.2. Si se detecta visualmente, cambios en la mezcla deberá repetirse el proceso de regulación de densidad (pasos del 4.6.1. al 4.6.3.)

4.7.3. CUIDADO, el operador de camión mezclador y operadores de carguío no deberán de perder de vista el estado de la mezcla, evaluar su color y textura para comunicar al controlador de campo si existe alguna anomalía.

4.7.4. ES OBLIGATORIO realizar la medición de densidad al inicio de carguío por cada reabastecimiento del camión mezclador de explosivos.

4.7.5. ES OBLIGATORIO realizar la medición de densidad al reiniciar el carguío después de paradas prolongadas del proceso.

	<b>ANEXO 2 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-004</b>
		<b>EDICIÓN 03</b>
	<b>PETS / MEDICIÓN DE DENSIDADES EN CAMPO</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>
		<b>Página 4 de 6</b>

- 4.7.6. ES RECOMENDABLE realizar dos mediciones de densidad por cada reabastecimiento del camión, pero el control de mezcla debe ser constante.
- 4.7.7. ES PERMITIDO no medir la densidad cuando la mezcla no presente variaciones en su color y/o textura o cuando el operador de carguío comprueba que el sistema tiene un comportamiento estable. Pero el operador de carguío debe continuar con el control visual constante de la mezcla.

**4.8. Limpieza y cuidado del kit de densidades:**

- 4.8.1. Mantener limpio y ordenado en todo momento el kit de densidades.
- 4.8.2. Reemplazar las baterías de la balanza cuando indique menos del 25% de carga.
- 4.8.3. Si la batería es interna recargar cuando se tenga un 50% de nivel de carga.
- 4.8.4. Mantener limpia la pantalla de la balanza.
- 4.8.5. NO ESTA PERMITIDO desarmar la balanza.
- 4.8.6. CUIDADO de no dejar caer los vasos calibrados, los daños de abolladuras pueden descartar completamente para su uso.
- 4.8.7. Mantener todo el kit de densidades en su respectiva caja protectora.
- 4.8.8. Los datos obtenidos serán registrados en el formato SVE - F - 021(Medición de Densidades).

**5. MEDIO AMBIENTE**


- 5.1. Por ser material peligroso, el personal involucrado en la tarea debe estar entrenado y capacitado.
- 5.2. Se entregará a los asistentes técnicos copias de: hojas MSDS, plan de contingencias y emergencias de la empresa.
- 5.3. Disponer los residuos generados en el proceso según corresponda: si es agente trasladar las muestras al taladro cargado (considerar muestras como parte del taco) y verter sobre la carga explosiva, de ser materia prima devolver a su lugar de origen o a los silos según sea el tipo de material analizado.

**6. EMERGENCIAS: MECÁNICAS, AMBIENTALES, SALUD Y SEGURIDAD**

- 6.1. Cualquier malestar corporal o de salud, comunique al supervisor inmediato.
- 6.2. Aplicar planes de emergencias


**7. RESTRICCIONES**


- 7.1. El personal tendrá que ser capacitado y contará con el carnet de SUCAMEC para la manipulación de explosivos.
- 7.2. Respetar el área de trabajo del camión y otros equipos en campo.
- 7.3. En el área de análisis solo ingresará personal autorizado.
- 7.4. Está prohibido que el personal transite por debajo del brazo de descarga del camión mezclador, tampoco podrán ubicarse en puntos ciegos.
- 7.5. No iniciar ni utilizar fuego.
- 7.6. Se restringe el uso del celular durante el desarrollo de esta tarea.



	<b>ANEXO 2 SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-004</b>	
		<b>EDICIÓN 03</b>	
	<b>PETS / MEDICIÓN DE DENSIDADES EN CAMPO</b>	<b>VALIDO DESDE: 20/07/2015</b>	
		<b>Página 5 de 6</b>	


**8. ANEXOS**

8.1. Formato SVE - F – 021 (Medición de Densidades)

	<b>MEDICIÓN DE DENSIDADES</b>	<b>SVE-F-021</b> <b>Edición 02</b>
<p>Peso de vaso: _____ Fecha: _____  Volumen de vaso: _____  Camión mezclador: _____ Hora: _____  Operador: _____ Proyecto: _____</p>		
Tiempo de gasificación (min)	Muestras	Observaciones
	1      2      3      4      Promedio	
1		
5		
10		
15		
30		
Densidad final		
<p>Peso de vaso: _____ Fecha: _____  Volumen de vaso: _____  Camión mezclador: _____ Hora: _____  Operador: _____ Proyecto: _____</p>		
Tiempo de gasificación (min)	Muestras	Observaciones
	1      2      3      4      Promedio	
1		
5		
10		
15		
30		
Densidad final		

	<b>ANEXO 2</b> <b>SIVE TOQUEPALA</b>	<b>TOQ-PETS-004</b>	
		<b>EDICIÓN 03</b>	
	<b>PETS / MEDICIÓN DE DENSIDADES EN CAMPO</b>	<b>VALIDO DESDE:</b> <b>20/07/2015</b>	
		<b>Página 6 de 6</b>	

ELABORADO POR:	REVISADO POR:
Jorge Rodríguez Montes 	Marcelino Castillo Quesada Jair Escobar Sánchez 
Ing. de Seguridad <b>Fecha:</b> 15-07-2015	Ings. Residentes de Área <b>Fecha:</b> 16-07-2015

APROBADO POR:		
Justo Mamani Ccallata Raphael Almedo Medrano 	Richard Sotomayor O. 	Jorge Alva Fernández 
<b>Representante de los Trabajadores.</b> <b>Fecha:</b> 17-07-2015	<b>Representante de la Empresa</b> <b>Fecha:</b> 17-07-2015	<b>Jefe de Servicios a la Minería y Construcción</b> <b>Fecha:</b> 20-07-2015