

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE VOLADURA
IMPLEMENTANDO EMULSIÓN GASIFICABLE
EN MINA DE HIERRO**

TESIS

Presentada por:

Bach. Paulo Sergio Alcázar Valdivia

Para optar por el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

TESIS

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE VOLADURA
IMPLEMENTANDO EMULSIÓN GASIFICABLE
EN MINA DE HIERRO**


Tesis sustentada, y aprobada el 21 de Noviembre del 2016, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE:




Dr. Julio Miguel Fernández Prado

1er MIEMBRO:



Dr. Julio Vargas Paniagua

2do MIEMBRO:



Msc. Carlos Huisa Ccori

ASESOR:



Dr. Dante Ulises Morales Cabrera

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres Gilberto Alcázar y Doris Valdivia por su esfuerzo constante y a mi abuela Rosalía Sotillo por sus consejos, que me fortalecieron y me impulsan a luchar por conseguir mis metas.

AGRADECIMIENTO

A los funcionarios de la empresa minera de hierro, por su apoyo durante el estudio realizado.

A las empresas de voladura, en especial a Orica Mining Services Perú ya que sus estudios previos en la unidad me sirvieron para poder sustentar mi trabajo de investigación.

A la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por su apoyo en mi formación profesional, su compromiso y contribución en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción del problema.....	4
1.1.1 Antecedentes del problema	4
1.1.2 Problemática de la investigación.....	4
1.2. Formulación del problema.....	5
1.3. Justificación e importancia de la investigación	6
1.4. Alcances y limitaciones	6
1.5. Objetivos de la investigación.....	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2 Objetivos específicos	7

1.6. Hipótesis	8
1.6.1. Hipótesis general	8
1.6.2 Hipótesis específicas	8

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio	9
2.2 Bases teóricas	11
2.2.1 Los explosivos de voladura de rocas	11
2.2.2 Proceso de detonación de explosivos.....	13
2.2.3 Energía disponible en los explosivos	15
2.2.4 Propiedades de los explosivos.....	15
2.2.5 Agentes de voladura	18
2.2.6 Voladura en banco.....	32
2.2.7 Optimización económica del proceso global de minado.....	44
2.3 Definición de términos.....	48
2.3.1 Combustión	48
2.3.2 Deflagración	48
2.3.3 Detonación	48
2.3.4 Energía de tensión (ET).....	49
2.3.5 Energía de burbuja o gas (EB).....	49
2.3.6 Densidad	50

2.3.7 Velocidad de Detonación	51
-------------------------------------	----

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación.....	54
3.1.1 Densidad	55
3.1.2 Velocidad de detonación.....	57
3.1.3 Fragmentación.....	59
3.1.4 Indicadores de la planta.....	60
3.2 Población y muestra.....	60
3.3 Operacionalización de variables.....	62
3.3.1 Variables independientes.....	62
3.3.2 Variables dependientes	62
3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos	63
3.5 Procesamiento y análisis de datos	64
3.5.1 Validación y edición	64
3.5.2 Codificación	64
3.5.3 Introducción de datos	65
3.5.4 Tabulación y análisis estadísticos	65

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados	67
----------------------	----

4.1.1	Línea base – Anfo pesado 55 en base a emulsión matriz.....	69
4.1.2	Resultado de las pruebas realizadas con anfo pesado 73 gasificado	82
4.1.3	Análisis de resultados	92
4.2	Discusión	102
4.2.1	Análisis económico	102
4.3	Implementación y control	124
4.3.1	Análisis costo beneficio.....	124
4.3.2	Gestión de stakeholders	128
4.3.3	Control.....	129
4.3.4	Aseguramiento de la calidad.....	129
4.3.5	Evaluación de resultados – Calidad.....	131
	CONCLUSIONES	132
	RECOMENDACIONES.....	133
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
	ANEXOS	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Tamaño de partículas de explosivos.	21
Tabla 2	Agentes explosivos usados en voladura en banco con sus propiedades principales.	25
Tabla 3	Flujo de nitrito de sodio para gasificar el anfo pesado 73 según el flujo de descarga de la mezcla explosiva.	29
Tabla 4	Clasificación de tipos de roca por el RQD.	40
Tabla 5	Consumo de energía y costos en minería.	45
Tabla 6	Densidades para diferentes agentes de voladura.	51
Tabla 7	Valores de velocidad de detonación para agentes de voladura.	53
Tabla 8	Resultados de disparos realizados con emulsión matriz: densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno suave (CG/FG).	71
Tabla 9	Resultados de disparos realizados con emulsión matriz: densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno duro (R).	75
Tabla 10	Porcentaje de demoras en planta vs material.	79
Tabla 11	Porcentaje de consumo de energía vs material.	81

Tabla 12	Resultados de disparos realizados con emulsión gasificada, densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno suave (CG/FG).	83
Tabla 13	Resultados de disparos realizados con emulsión gasificada, densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno duro (R).	88
Tabla 14	Resultados promedio de fragmentación de CG/FG.	93
Tabla 15	Resultados de velocidad de detonación.	94
Tabla 16	Resultado promedio de fragmentación R.	95
Tabla 17	Resultados de velocidad de detonación.	96
Tabla 18	Parámetros de diseño.	104
Tabla 19	Costos unitarios.	104
Tabla 20	Costo materias primas.	105
Tabla 21	Costo de Anfo.	105
Tabla 22	Costo de mezclas explosivas anfo pesado 55.	106
Tabla 23	Costo de mezclas explosivas anfo pesado 73 gasificado.	106
Tabla 24	Parámetros de diseño.	107
Tabla 25	Comparación de anfo pesado 73 gasificado y anfo pesado 55.	108
Tabla 26	Análisis económico realizado para 1 000 000 toneladas producidas.	115

Tabla 27	Costo total.	116
Tabla 28	Parámetros de diseño.	118
Tabla 29	Comparación de anfo pesado 73 gasificado y anfo pesado 55 gasificado para mineral de hierro suave.	118
Tabla 30	Comparación de anfo pesado 73 gasificado y anfo pesado 55 gasificado para mineral de hierro duro.	120
Tabla 31	Costos unitarios, valorización para 1 000 000 toneladas requeridas.	122
Tabla 32	Comparación de costo total para 1 000 000 toneladas requeridas.	122
Tabla 33	Costo por taladro CG/FG.	126
Tabla 34	Costo por taladro R.	127
Tabla 35	Plan de manejo y supervisión de los Stakeholders.	128
Tabla 36	Actividades para mejoramiento de procesos.	130
Tabla 37	Actividades y medidas de control.	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo de una detonación	14
Figura 2. Prills de nitrato de amonio y una bolsa de una tonelada.	19
Figura 3. Consistencia cremosa de la emulsión matriz.	22
Figura 4. Emulsión matriz, ocupando los espacios vacíos entre los prills de nitrato.	23
Figura 5. Características de carga y resistencia de agua de los diferentes tipos de anfo pesado.	24
Figura 6. Diseños de carga con anfo pesado 55 matriz vs anfo pesado 73 gasificado.	26
Figura 7. Sensibilización química por la generación de burbujas de nitrógeno.	28
Figura 8. Rango de densidades de carguío de porcentaje de nitrito de sodio.	30
Figura 9. Proceso de gasificación del anfo pesado 73.	31
Figura 10. Calidad de mezcla.	32
Figura 11. Vista general de una cribadora móvil, una cargadora y las pilas de material.	42
Figura 12. Toma de fotografías en la pila volada.	44

Figura 13. Distribución de costos de energía en minería.	46
Figura 14. Costos resultantes de acuerdo al rediseño de voladura.	47
Figura 15. Costo global de acuerdo al rediseño de la voladura.	47
Figura 16. Proceso de gasificación.	57
Figura 17. Proceso de medición de velocidad de detonación.	58
Figura 18. Velocidad de detonación de Anfo pesado 55 con emulsion matriz.	59
Figura 19. Toma de densidad.	72
Figura 20. Velocidad de detonación anfo pesado 55 con emulsión matriz.	73
Figura 21. Fragmentación.	74
Figura 22. Distribución de fragmentación.	74
Figura 23. Toma de densidad.	76
Figura 24. Velocidad de detonación anfo pesado 55 con emulsión matriz.	77
Figura 25. Fragmentación.	78
Figura 26. Distribución de fragmentación.	78
Figura 27. Porcentaje de demoras en planta vs material.	80
Figura 28. Porcentaje de consumo de energía vs material.	81
Figura 29. Materiales para determinación de densidad	85
Figura 30. Velocidad de detonación anfo pesado 73 gasificado.	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.	139
Anexo 2. Procedimiento para la determinación de densidades.	140
Anexo 3. Descarga de nitrato.	147
Anexo 4. Fotografías para análisis de fragmentación.	148
Anexo 5. Variación del volumen de la mezcla explosiva en el taladro por gasificación.	149

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la viabilidad técnica, económica y operativa de un nuevo tipo de emulsión. Se elaboró línea base para luego poder trazar los objetivos y empezar con las pruebas. Después de desarrollar las pruebas se realizó el análisis correspondiente y se determinó que el producto tiene ventajas desde el punto de vista económico y operativo. Ventajas económicas el precio de introducción que presenta este nuevo producto y por su mayor energía específica a emulsiones anteriores ha permitido incrementar parámetros en malla de perforación generando ahorro económico para la compañía minera, El uso del Anfo pesado 73 en base a emulsión gasificable demostró ser más eficiente en términos operativos y económicos sobre el Anfo pesado 55 en base a emulsión matriz, para terreno suave (CG, FG), se incrementó los parámetros de perforación de 4,8 x 5,5 m. a 5,0 x 5,8 m. (malla triangular), consiguiendo un ahorro para terreno suave de \$ 40 093 por cada 1 000 000 toneladas producidas, para una producción anual de 12 000 000 toneladas se tendrá un ahorro anual de \$ 481 116.

Palabras Clave: Optimización, emulsión gasificable, hierro.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the technical, economic and operational feasibility of a new type of emulsion. The baseline was elaborated so that the objectives could be traced and the tests started. After the tests were carried out, the corresponding analysis was carried out and the product was found to have advantages from an economic and operational point of view. Economic advantages The introduction price of this new product and its greater specific energy to previous emulsions allowed to increase parameters in drilling mesh generating economic savings for the mining company. The use of the heavy Anfo 73 based on gasifiable emulsion proved to be more efficient in operational and economic terms on the Anfo heavy 55 based emulsion matrix, for soft ground (CG, FG), increased drilling parameters of 4.8 x 5.5 m. at 5.0 x 5.8 m. (triangular mesh), achieving savings for soft ground of \$ 40 093 per 1 000 000 tonnes produced, for an annual output of 12 000 000 tonnes will have an annual saving of \$ 481 116.

Keywords: Optimization, gasifiable emulsion, iron.

INTRODUCCIÓN

La voladura es un proceso clave dentro de cualquier faena minera, por lo cual se hace necesario su entendimiento global para minimizar los costos de las operaciones posteriores: carguío, transporte, chancado y molienda (Quiroga, 2013).

Tradicionalmente el proceso minero es clasificado dentro de dos grupos: mina y planta, los que están gestionados con centros de costos separados, dada una “supuesta” independencia. Cada proceso tiene un presupuesto y producción asignada, y su gestión se enfatiza en maximizar la producción a un mínimo costo. Así la eficiencia de cada subproceso es considerada satisfactoria, con tal de que ellos estén dentro del presupuesto y se encuentren dentro de los objetivos de producción. Sin embargo, en los últimos años se ha demostrado la gran influencia que posee la voladura en los procesos en planta, ya que un descontrol de la granulometría del mineral, produce frecuentes pérdidas de tonelaje y genera productos fuera de especificación o con menor valor agregado.

Asimismo, para graficar el impacto de esta actividad, Magín Torres, ingeniero de Procesos de Altair Minería y académico del departamento ingeniería de minas de la Universidad de Chile precisa que “en términos de porcentaje del costo total de planta, los procesos de chancado y molienda representan hasta el 70 % del gasto energético, equivalentes al 50 % del gasto total del costo de planta”, debido al mayor consumo de energía específico, siendo efectivo un nuevo enfoque hacia operaciones unitarias más eficientemente energéticas, como es el caso de la voladura. Además que el material fino resultante está directamente relacionado al rendimiento de los circuitos de chancado y molienda, ya que pasa sin implicar gasto de energía. Es por eso, que un aumento en el factor de carga en nuevos diseños de voladura, predispone al mineral a un menor tiempo de proceso, y por ende a un menor costo de tratamiento, el cual justifica ampliamente, el mayor uso de explosivo a un menor costo global, si a esto le incluimos el avance de la tecnología en la aparición de las emulsiones gasificables, que nos permitirán incrementar la columna de carga sin necesidad de aumentar nuestro factor de carga ni el costo del proceso sino más bien poder reducirlo en cantidades considerables.

Ya que la dureza y tamaño de fragmento del mineral que alimenta a chancadora, son factores claves en la optimización del proceso global, la presente tesis se enfocará en la mejora de los resultados post voladura

con el uso de Anfo pesado a base de emulsión gasificable, que nos permitirán incrementar nuestra columna de carga mediante la gasificación del explosivo para la zona dura mineral de hierro refractario y aumentar la malla de perforación en nuestra zona suave.

Por tal motivo la presente tesis está dividida en:

-CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: Donde se describirá los antecedentes del tema de investigación y la problemática objeto de estudio. También se expondrán los objetivos a cumplir y se formulará la hipótesis a comprobar.

-CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO: Que contiene los aspectos teóricos que he compilado de la bibliografía analizada sobre el tema, los cuales han sido debidamente organizados.

-CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO: Donde describo la metodología utilizada para la presente investigación, para lograr de manera precisa cada objetivo específico e incluye los procedimientos para la recolección, organización, procesamiento y análisis de datos.

-CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN: describiré la idea principal, los resultados y descubrimientos producto del análisis de datos realizados.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

No se obtienen los resultados esperados post voladura, el proceso tiene demoras operativas.

1.1.1 Antecedentes del problema

Se tiene un diseño para el abastecimiento del nitrato de amonio antiguo cuya capacidad sólo es de 10 t.

Se realiza un diseño de carguío similar para roca competente y fracturada.

1.1.2 Problemática de la investigación

Proponer una mezcla de anfo pesado que otorgue mejores resultados post voladura sin que signifique un gran incremento en los costos del área de voladura.

La variable más resaltante es el consumo específico (CE), que consiste en la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1 m³ o 1 t. de roca. Este parámetro no constituye la mejor y única herramienta para diseñar las voladuras, fundamentalmente porque la distribución espacial de las cargas de explosivo dentro del macizo rocoso tiene una mayor influencia sobre los resultados de las voladuras. Los (CE) altos, además de proporcionar una buena fragmentación, desplazamiento y esponjamiento de la roca, dan lugar a menores problemas de repiés y ayudan a alcanzar el punto óptimo de los costos totales de operación, es decir de perforación, voladura, carga, transporte y trituración.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo mejorar la fragmentación para incrementar la producción de la planta y disminuir su consumo de energía, sin realizar un gran incremento de nuestros costos de perforación y voladura?

1.3. Justificación e importancia de la investigación

El estudio de investigación realizado en la siguiente tesis se justifica por:

- Determinar el diseño de voladura óptimo para mejorar el tamaño de fragmento mineral de hierro refractario, que maximice el rendimiento de la molienda de mineral, y por ende mejore el costo global de minado y tratamiento en tajo abierto.
- Justificación económica y operativa del uso de anfo pesado 73 en base a emulsión gasificable en reemplazo del anfo pesado 55 en base a emulsión matriz que es el explosivo usado en la actualidad.

1.4. Alcances y limitaciones

El trabajo de investigación es una oportunidad de mejora identificada para el área de perforación y voladura de la empresa minera, la cual le genera un ahorro económico y un mejor proceso productivo en mina. Se ha tenido limitaciones en cuanto a información de procesamiento en planta, así como restricciones para poder mostrar datos de procesamiento.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Determinar las ventajas técnicas, operativas y económicas que se conseguirán con la utilización de la emulsión gasificable en comparación con la emulsión matriz como componente en la fabricación de anfo pesado en el proceso de voladura.

1.5.2 Objetivos específicos

- Optimizar las operaciones de perforación y voladura en los resultados de la fragmentación.
- Incrementar la malla de perforación para optimizar los costos de perforación y voladura
- Demostrar una mayor eficiencia del anfo pesado 73 en base a emulsión gasificable sobre el anfo pesado 55 en base a emulsión matriz.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La utilización de anfo pesado 73 en base a emulsión gasificable de anfo pesado 55 es factible que mejore la fragmentación, por ende los costos de voladura en una mina de hierro.

1.6.2 Hipótesis específicas

- Las operaciones de perforación y voladura se optimizan al realizar el cambio de explosivo a uno con mayor energía por kilo de explosivo, esto mejora los resultados de la fragmentación.
- Tener un explosivo más energético nos permite incrementar la malla de perforación y nos generara un ahorro en los costos de perforación y voladura.
- El anfo pesado 73 gasificado otorga mayor energía y desarrolla una mejor velocidad de detonacion dando mejores resultados que el anfo pesado 55.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

Alcalá, Flores, y Beltrán (2012) mencionan que la mayoría de los minerales se encuentran diseminados e íntimamente ligados con la ganga, y que por este motivo tienen que ser liberados antes de ser separados. Esto se consigue con el proceso de conminución, donde el mineral en bruto es paulatinamente reducido, hasta que las partículas de mineral limpio puedan ser separadas por los métodos disponibles.

Establecen que la primera etapa de la conminución se lleva a cabo dentro de la mina misma, mediante el arranque por voladura, el cual facilita el manipuleo del material desde los frentes de carguío hasta las plantas de beneficio. Después de la extracción, el mineral se somete a una preparación mecánica, siendo chancado y molido, hasta quedar en tamaños

microscópicos, para luego ser separado de la ganga y posteriormente concentrado.

Indican que las operaciones de preparación mecánica en las plantas de concentración se caracterizan por su elevado consumo de energía en comparación de los demás procesos involucrados en la extracción. Desde el punto de vista de la utilización de la energía, los equipos de planta como chancadoras y molinos, no son considerados de buena eficiencia, debido a las pérdidas de energía en las conversiones y transmisiones. Siendo caso distinto, el de la voladura, que usa la energía química de los explosivos, con una gran eficiencia para fragmentar la roca en una primera instancia.

Concluyen que en los últimos años, en la minería a tajo abierto, se ha dirigido esfuerzos en mejorar el aprovechamiento de la energía de los explosivos, además de su bajo precio en comparación con la energía eléctrica, usada en la mayoría de equipos de chancado y molienda.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Los explosivos de voladura de rocas

López, López, y García (2003) indican que el propósito de la voladura es arrancar, fracturar y esponjar el macizo rocoso in-situ, a un tamaño de fragmentación tal, para que sea eficientemente manejado en los procesos de carga, transporte y tratamiento.

Mencionan que los explosivos no son otra cosa que una mezcla de sustancias químicas, unas combustibles y otras oxidantes, que iniciadas debidamente, dan lugar a una reacción exotérmica muy rápida que genera una serie de productos gaseosos a alta temperatura, químicamente más estables y que ocupan un mayor volumen.

Señalan que el arranque de rocas mediante explosivos consiste en disponer de una energía concentrada químicamente, situada en el lugar apropiado y en cantidad suficiente; de forma que liberada de un modo controlado, pueda lograr la fragmentación del material rocoso.

Establecen que el factor tiempo de explosión es tan sumamente importante que aun teniendo los explosivos comerciales un poder calorífico pequeño (la trilita 1,12 kcal/kg) comparado con otras sustancias combustibles (Antracita por ejemplo 7000,00 kcal/kg), la velocidad de reacción de un explosivo es tal que al detonar sobre una plancha de metal puede producir un orificio en ella, pues no da tiempo a que la energía desarrollada se distribuya hacia el ambiente. Los gases producidos acumulan el calor generado, dilatándose hasta un volumen que puede ser unas 10 000 veces mayor que el del barreno donde se aloja el explosivo, quebrando y partiendo la roca que lo contiene.

Concluyen que los explosivos a diferencia de otras sustancias con más valor calorífico, poseen una mayor potencia de trabajo.

Mencionan que los explosivos, según las condiciones a que estén sometidos, pueden ofrecer un comportamiento distinto del propio de su carácter explosivo. Los procesos de su descomposición son: la combustión propiamente dicha, la deflagración y por último, la detonación. Tanto la naturaleza

de la propia sustancia como la forma de iniciación y condiciones externas gobiernan el desarrollo de la descomposición.

2.2.2 Proceso de detonación de explosivos

Según López (2003), indica que una vez iniciado el explosivo, la onda de choque transporta la energía necesaria para activar las moléculas de la masa del explosivo alrededor del foco inicial, provocando así una reacción en cadena. A la vez que se produce esta onda, la masa de explosivo que ha reaccionado produce una gran cantidad de gases a una elevada temperatura. La presión secundaria actúa sobre el resto de la masa sin detonar y su efecto se suma al de la onda de presión primaria, pasando de un proceso de deflagración a otro de detonación.

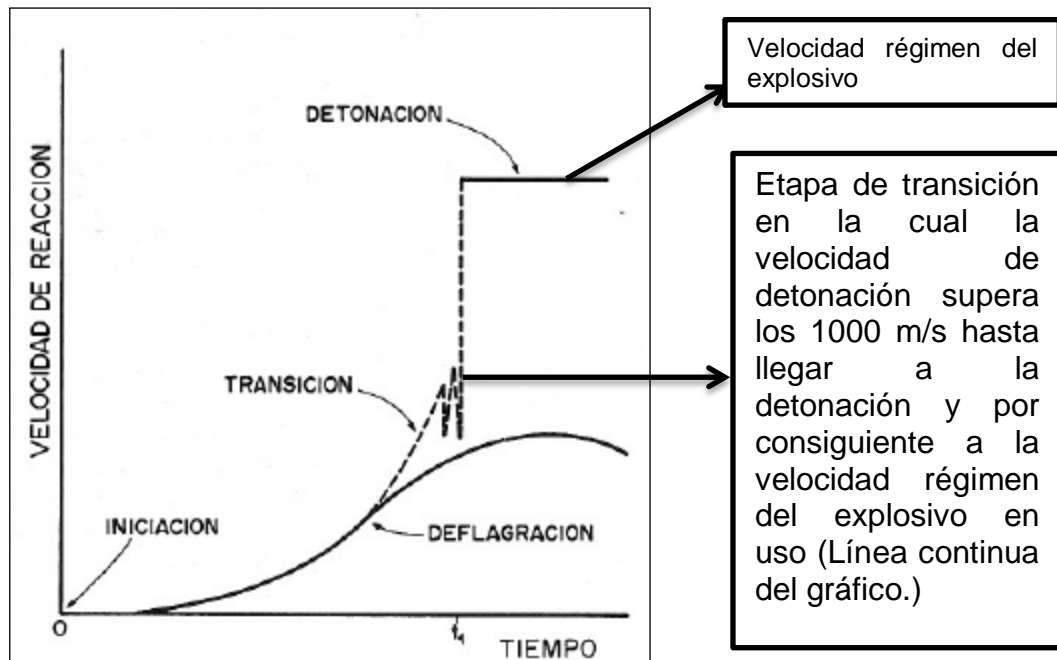


Figura 1. Desarrollo de una detonación

Fuente: López, 2003.

Watanabe (2014) menciona que los aspectos críticos para pasar de una deflagración a detonación vendría hacer:

- **Inyección de solución de nitrito de sodio:** puesto que es el encargado de sensibilizar a la emulsión. Para conseguir una sensibilización adecuada de los explosivos cuando éstos no contienen sensibilizantes químicos, sólidos o líquidos, se precisa un mecanismo físico como el de las burbujas de gas, que al ser comprimidas adiabáticamente producen el fenómeno de

"Puntos Calientes" que favorecen tanto la iniciación como la propagación de la detonación.

- **Fabricación del anfo:** el anfo presenta unos huecos intersticiales que pueden ser ocupados por un explosivo líquido como la emulsión que actúa como una matriz.

2.2.3 Energía disponible en los explosivos

Según Enaex (2000) el proceso de detonación rompe la roca a través de dos energías liberadas en dos sub-procesos distintos. La energía contenida en los explosivos se divide en energía de tensión y de burbuja en cierta proporción, de acuerdo a sus características propias del explosivo.

2.2.4 Propiedades de los explosivos

Los explosivos poseen propiedades que los definen y clasifican de acuerdo a su potencia, energía, resistencia al agua, etc. Dentro de las propiedades más importantes tenemos:

a) *Potencia y energía*

La potencia es una de las propiedades más importantes, ya que define la energía disponible para producir efectos mecánicos. La potencia de un explosivo se suele expresar como potencia relativa por peso (Relative Weight Strength-RWS) y potencia relativa por volumen (Relative Bulk Strength- RBS).

b) *Velocidad de detonación*

Es 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. Los factores que afectan a la velocidad de detonación son: la densidad de la carga, el diámetro, el confinamiento y la iniciación. A una mayor densidad, se obtiene una mayor velocidad de detonación y un mayor poder rompedor. Se suele usar en rocas duras explosivos con altas velocidades de detonación.

c) *Diámetro crítico*

Las cargas de explosivo con forma cilíndrica tienen un diámetro por debajo del cual la onda de detonación no se propaga o si lo hace es con una velocidad muy por debajo a la de régimen. A dicha dimensión se la denomina «Diámetro crítico».

d) *Densidad*

La densidad de la mayoría de los explosivos varía entre 0,80 y 1,60 g/cm³. A una mayor densidad, existe un efecto rompedor más intenso ya que proporciona una mayor energía a una misma longitud de carga.

e) *Presión de detonación*

La presión de detonación de un explosivo está en función de la densidad y del cuadrado de la velocidad de detonación. Está relacionada al poder rompedor para roca intacta y competente.

2.2.5 Agentes de voladura

Los agentes de voladura son aquellos explosivos no sensibles al fulminante N^o 8, por lo que necesitan un cebo reforzado o primer-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:

a) **ANFO**

Es un agente explosivo conformado por nitrato amónico (NH_4NO_3), el cual no es un explosivo en sí, pues solo adquiere tal propiedad cuando se mezcla con una pequeña cantidad de un combustible (6 % del peso total) ya sea diesel o aceites reciclados. El nitrato de amonio consta de partículas esféricas o prills porosos de menos un 1mm de diámetro (Figura 2), los cuales absorben y retienen el combustible. Dentro de sus

principales características en la aplicación en la voladura en banco tenemos:

- Su costo es más económico que los demás explosivos.
- Posee buena energía de burbuja y es usada para rocas suaves con gran eficiencia.
- No se puede aplicar en taladros con agua, pues esta absorbe una gran cantidad de calor para su vaporización y rebaja considerablemente la potencia.



Figura 2. Prills de nitrato de amonio y una bolsa de una tonelada.

Fuente: Manual Enaex , 2000.

b) Emulsiones

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 (2003), el proceso de los explosivos ha llevado a una reducción gradual 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 Tabla 1.

Tabla 1

Tamaño de partículas de explosivos.

Explosivo	Tamaño (nm)	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.

Según López (2003) 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.

A la vez, se puede aplicar la sensibilización química a través de un agente gasificante.



Figura 3. Consistencia cremosa de la emulsión matriz.

Fuente. Orica, 2009.

c) Agentes mixtos (anfós pesados)

Son mezclas de emulsión y anfo en diferentes proporciones, que permiten:

- Bajar el costo y potencia de una emulsión pura, para voladura en rocas difíciles, secas o húmedas.
- Darle resistencia al agua al anfo, al saturar con emulsión los espacios libres entre los prills o perlas del nitrato.

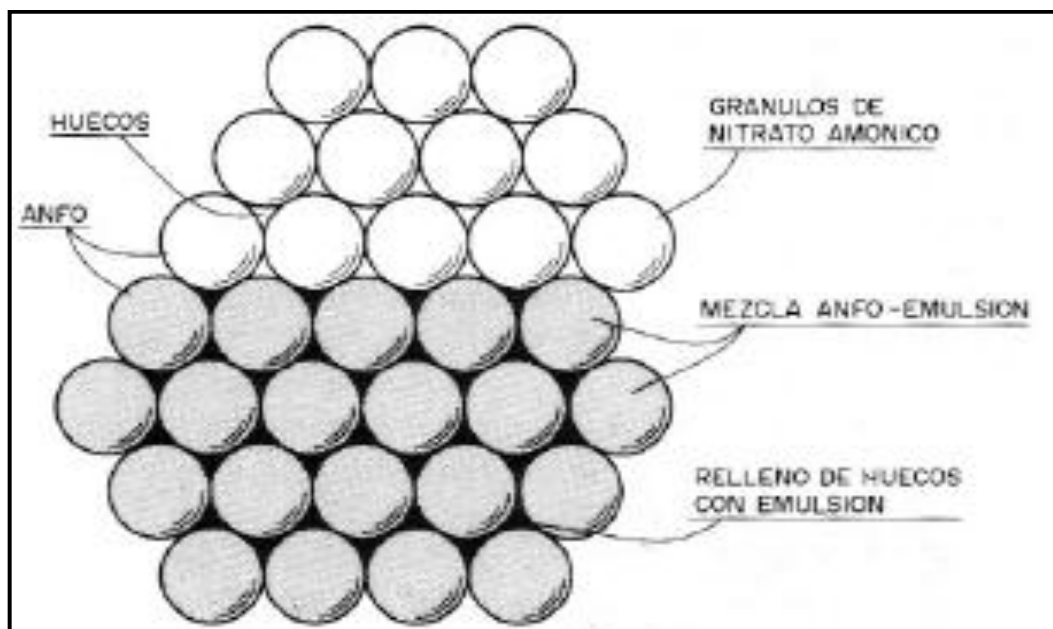


Figura 4. Emulsión matriz, ocupando los espacios vacíos entre los prills de nitrato.

Fuente: López Jimeno, 2003.

Estos anfos pesados se pueden preparar en diferentes relaciones de acuerdo a los requerimientos de la voladura y la presencia de agua, entre 10 % a 90 % de emulsión y la diferencia anfo, siendo los ratios más difundidos 30/70, 50/50 y 60/40. Normalmente las mezclas con menos de 50 % de emulsión no son resistentes al agua pero se incrementa notablemente la potencia del explosivo, y las mayores de 50 % emulsión son progresivamente más resistentes al agua. En la Figura 5 se puede

ver el cambio del comportamiento de las diferentes mezclas de Anfo pesado.

La mezcla se prepara in situ en camiones mezcladores-cargadores los cuales pueden dar la proporción exacta de acuerdo a las necesidades de la roca, Figura 5. Sus principales características se muestran en la Tabla 2.

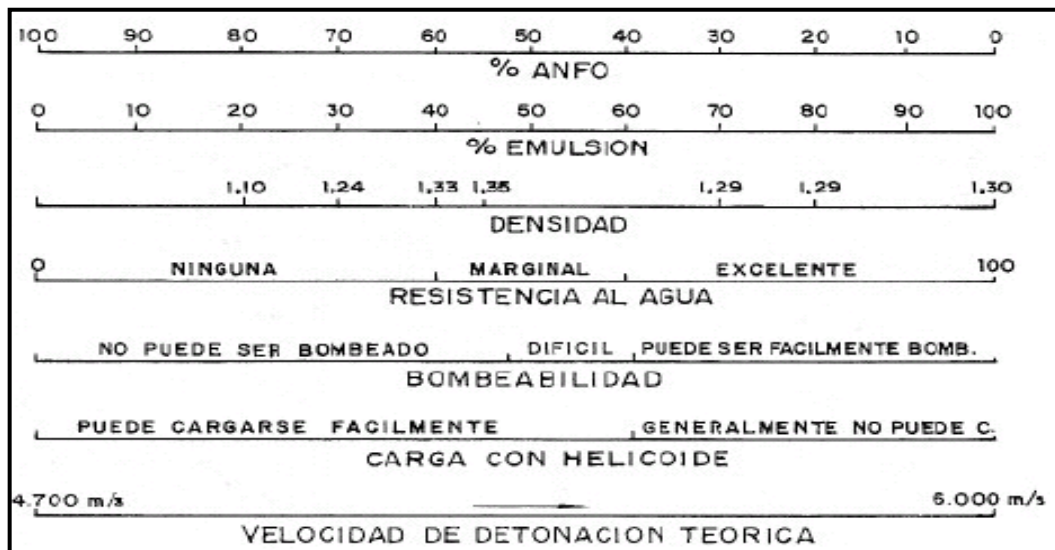


Figura 5. Características de carga y resistencia de agua de los diferentes tipos de anfo pesado.

Fuente: López, 2003.

Tabla 2

Agentes explosivos usados en voladura en banco con sus propiedades principales.

Explosivo	Den g/cc	VOD (m/s)
ANFO	0,80 (+-0,02)	3 800-4 400
Anfo pesado 28 %	0,97 (+-0,02)	4 000-4 600
Anfo pesado 37 %	1,07 (+-0,02)	4 400-5 000
Anfo pesado 46 %	1,19 (+-0,02)	4 600-5 200
Anfo pesado 55 %	1,28 (+-0,02)	4 800-5 400
Anfo pesado 64 %	1,31 (+-0,02)	4 400-5 200
Anfo pesado 73 %	1,33 (+-0,02)	4 300-5 100
Emulsión	1,34 (+-0,02)	4 200-5 000

Fuente: Asistencia técnica Orica, 2009.

d) Anfo pesado gasificado

El proceso de gasificación del anfo pesado consiste en formar pequeñas burbujas en la matriz. Ello permite variar su densidad y sus demás características, según la cantidad del agente gasificante que se dosifique.

Esta investigación se enfoca en un anfo pesado 73 gasificable (70 % emulsión, 30 % anfo), llevado a diferentes densidades con tal de conseguir (tanto en costos como fragmentación) resultados similares o mejores a los obtenidos con

las mezclas explosivas utilizadas hasta la fecha:
anfos pesados a base de emulsión matriz.

A continuación, se muestra la gasificación que ocurre en un taladro cargado con anfo pesado 73 a base de emulsión gasificable, frente a otro cargado con anfo pesado a base de emulsión matriz, cuya carga lineal no varía debido a que su densidad es constante.

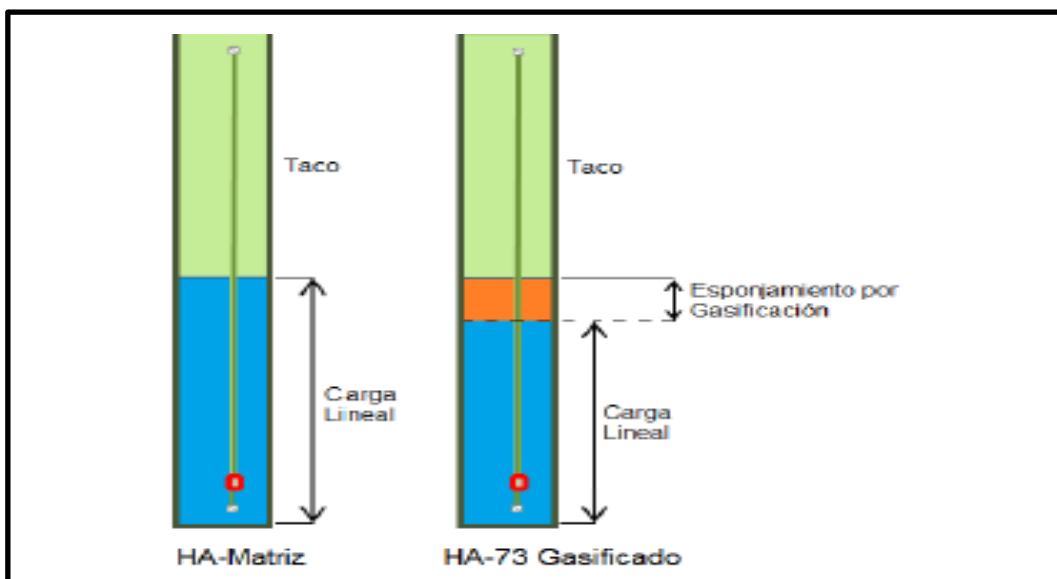


Figura 6. Diseños de carga con anfo pesado 55 matriz vs anfo pesado 73 gasificado.

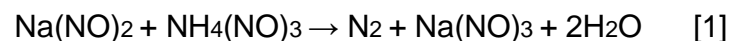
Fuente: Elaboración propia.

La emulsión que compone el anfo pesado gasificable es básicamente la emulsión matriz, con la adición de ciertos catalizadores que

producen la gasificación. Estos le dan propiedades específicas, como alterando su pH, haciéndola una emulsión ácida.

- **Sensibilización de la emulsión**

Este estudio se enfoca en la sensibilización de la mezcla mediante la generación de burbujas de aire por la adición de un agente gasificante, siendo en este caso el nitrito de sodio (NaNO₂). Esta sustancia química reacciona con el nitrato de amonio (NH₄NO₃), generando pequeñas burbujas de gas nitrógeno. A continuación se muestra la reacción química que ocurre.



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.

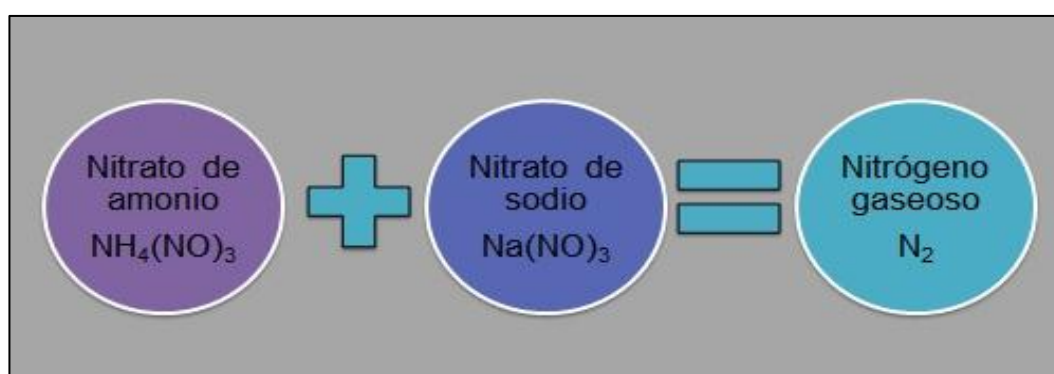


Figura 7. Sensibilización química por la generación de burbujas de nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia.

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.

La Tabla 3 muestra el porcentaje de nitrito de sodio agregado a la mezcla de anfo pesado 73 gasificable para lograr la densidad final deseada,

partiendo de una densidad inicial de 1,35 g/cc. El tiempo que dura el proceso de gasificación de un taladro es de 20-30 minutos, por lo que se tiene que esperar este tiempo antes de tapar el taladro.

Tabla 3

Flujo de nitrato de sodio para gasificar el anfo pesado 73 según el flujo de descarga de la mezcla explosiva.

Densidad final (g/cc)	Nitrato de sodio %	Flujo de explosivo (kg/min)			
		400	350	300	250
		Contenido de emulsión 70 %			
		280	245	210	175
		Flujo de nitrato de sodio (kg/min)			
1,20	0,22	0,616	0,539	0,462	0,385
1,15	0,3	0,84	0,735	0,63	0,525
1,10	0,37	1,036	0,9065	0,777	0,6475
1,05	0,45	1,26	1,1025	0,945	0,7875
1,00	0,52	1,456	1,274	1,092	0,91
0,95	0,6	1,68	1,47	1,26	1,05

Fuente: Orica, 2009.

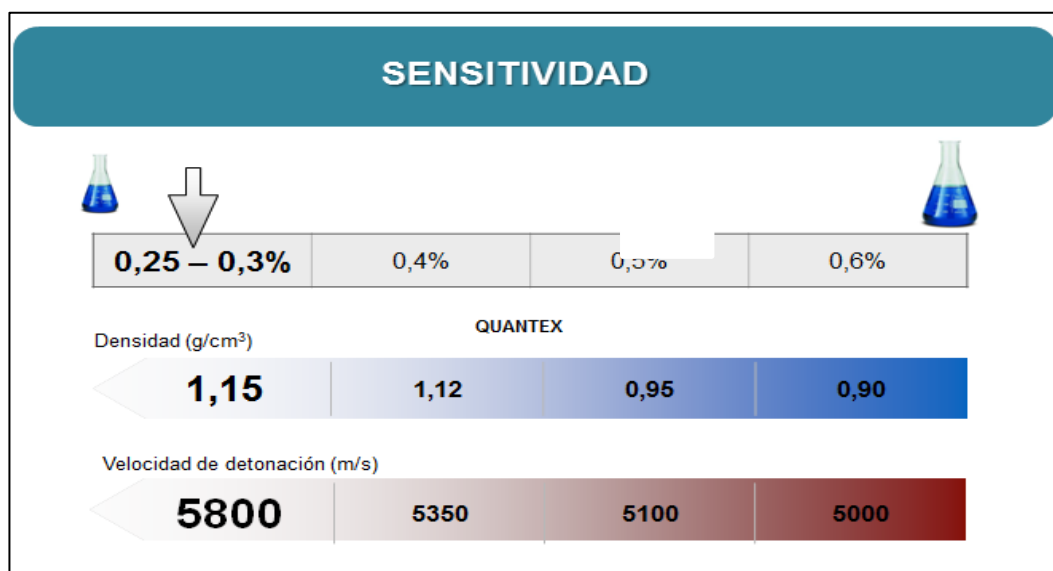


Figura 8. Rango de densidades de carguío de porcentaje de nitrato de sodio.

Fuente: Asistencia técnica Exsa. 2001.

Como se puede apreciar en este gráfico es que obtendremos una mayor velocidad de detonación a una mayor densidad final son directamente proporcionales, por esta razón que para el presente estudio usaremos un % de inyección de nitrato de sodio de 0,3 %.

- **Fabricación del anfo pesado 73 gasificable**

El proceso de fabricación del anfo pesado 73 gasificable 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.

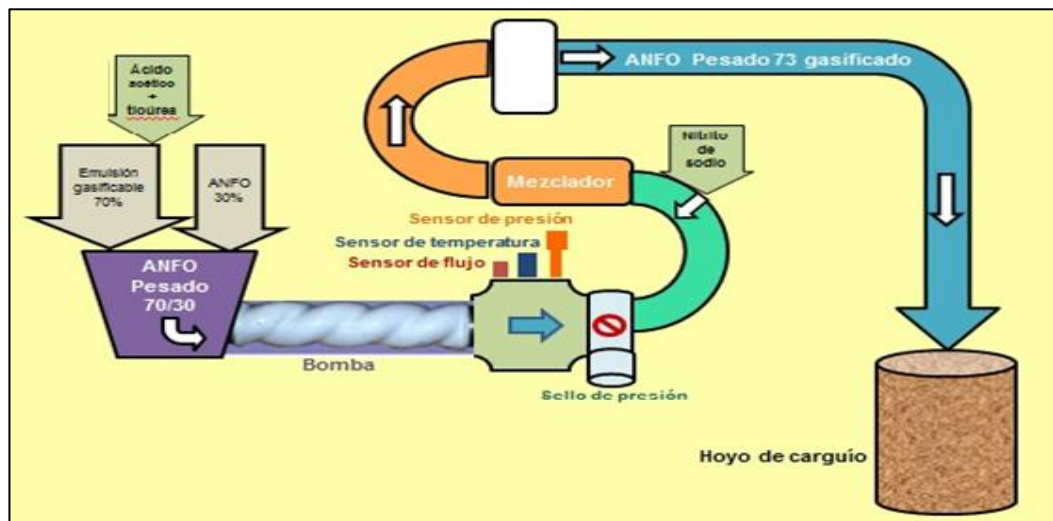


Figura 9. Proceso de gasificación del anfo pesado 73.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se puede clasificar de manera cualitativa la calidad del proceso de fabricación in situ, lo cual depende de la calibración de los equipos (camión-fábrica), capacidad del operador y la calidad de los componentes. Se muestran tres diferentes calidades de mezclas de anfo pesado 73; teniendo a la izquierda una mezcla deficiente donde se puede ver la separación de las fases

inmiscibles, mientras que a la derecha se aprecia una mezcla homogénea en óptimas condiciones.



Figura 10 : Calidad de mezcla.

Fuente: Orica, 2009.

2.2.6 Voladura en banco

a) *Mecanismos de la rotura de rocas*

Durante la detonación de una carga de explosivo en el interior de la roca, las condiciones que se presentan están caracterizadas por dos fases de acción:

- **1ra fase:** Se produce un fuerte impacto debido a la onda de choque, vinculada a la energía de tensión (ET), durante un corto espacio de tiempo.
- **2da fase:** Actúan los gases producidos detrás de la zona de reacción que a alta presión y

temperatura son portadores de la energía termodinámica o de burbuja (EB).

a. Trituración de la roca

En los primeros instantes de la detonación, la presión en el frente de la onda de choque se expande de forma cilíndrica, alcanzando valores que superan ampliamente la resistencia dinámica a la compresión de la roca provocando la destrucción de su estructura inter-cristalina e inter-granular.

b. Agrietamiento radial

Durante la propagación de la onda de choque, la roca circundante al barreno es sometida a una intensa compresión radial que induce componentes de tracción en los planos tangenciales del frente de dicha onda. Cuando las tensiones superan la resistencia dinámica a tracción de la roca se inicia la formación de una densa zona de grietas radiales

alrededor de la zona triturada que rodea al barreno.

c. Reflexión de la onda de choque

Cuando la onda de choque alcanza una superficie libre se generan dos ondas, una de tracción y otra de cizallamiento. Esto sucederá cuando las grietas radiales no se hayan propagado más que una distancia equivalente a un tercio de la que existe, desde la carga a esa superficie libre.

d. Extensión y apertura de las grietas radiales

Después del paso de la onda de choque, la presión de los gases provoca un campo de tensiones cuasi-estático alrededor del barreno. Durante o después de la formación de las grietas radiales los gases comienzan a expandirse y penetrar en las fracturas.

e. Fracturación por liberación de carga

Antes de que la onda de choque alcance el frente libre efectivo, la energía total transferida a la roca por la compresión inicial varía entre el 60 y el 70 % de la energía de la voladura. Después del paso de la onda de compresión, se produce un estado de equilibrio cuasi-estático seguido de una caída súbita de presión en el barreno, debida al escape de los gases a través del retacado, de las fracturas radiales y al desplazamiento de la roca. La energía de tensión almacenada se libera muy rápidamente, generándose sollicitaciones de tracción y cizallamiento que provocan la rotura del macizo.

f. Rotura por flexión

Durante y después de los mecanismos de agrietamiento radial y descostramiento: la presión ejercida por

los gases de explosión sobre el material situado frente a la columna de explosivo hace que la roca actúe como una viga doblemente empotrada en el fondo del barreno y en la zona del retacado, produciéndose la deformación y el agrietamiento de la misma por los fenómenos de flexión.

g. Rotura por colisión

López, López, y García (2003) indican los fragmentos de roca creados por los mecanismos anteriores y acelerados por los gases son proyectados hacia la superficie libre, colisionando entre sí y dando lugar a una fragmentación adicional.

b) Variable de diseño en las voladuras

a. Variables controlables

Son aquellas que se pueden modificar para nuestro beneficio; siendo la altura de banco, burden, diámetro de perforación, densidad de explosivo, etc.

En la Figura 12 se representa una voladura en banco donde se ilustran las diferentes variables de diseño y las expresiones más frecuentes en el argot de los trabajos de arranque con explosivos. La variable más resaltante es el consumo específico (CE), que consiste en la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1 m^3 o 1 t de roca. Este parámetro no constituye la mejor y única herramienta para diseñar las voladuras, fundamentalmente porque la distribución espacial de las cargas de explosivo dentro del macizo rocoso tiene una mayor influencia sobre los resultados de las voladuras. Los CE altos, además de proporcionar una buena fragmentación, desplazamiento y esponjamiento de la roca, dan lugar a menores problemas de repiés y ayudan a alcanzar el punto óptimo de los costes

totales de operación, es decir de perforación, voladura, carga, transporte y trituración.

b. Variables no controlables

Como lo son las propiedades intrínsecas al macizo rocoso, como densidad, módulo de young, porosidad, resistencia. La fragmentación de rocas mediante voladura, consiste en una muy rápida desintegración de la roca, en contraste con el chancado y molienda que es un proceso largo y pesado. Existe una gran diferencia entre las propiedades de la roca intacta, que priman en la preparación mecánica para el tratamiento del mineral y las propiedades del macizo rocoso que son las que más influencia tienen en la voladura. Las propiedades para la roca intacta son la densidad, resistencia a la compresión uniaxial (UCS unconfined compresión strengh) y a la tracción, porosidad y fricción interna. Para el macizo rocoso las principales propiedades son: Litología, estructura de fracturas existentes (RQD- rock quality designation), y la presencia de agua. En la práctica,

la estructura del macizo rocoso es considerada como la propiedad con más influencia en la voladura.

c) *Caracterización de los macizos rocosos para el diseño de voladuras*

López, López, y García (2003) mencionan que para poder realizar el diseño de voladura se debe conocer las características del tipo de macizo rocoso. Debido a la gran variabilidad de sus propiedades se le agrupa según sus propiedades más representativas.

Mencionan a partir de los testigos recuperados en los sondeos se puede aplicar una de las clasificaciones más extendidas, conocidas por RQD. (Rock Quality Designation, Deere 1968) que se define como el porcentaje de la longitud de testigo recuperado en trozos mayores de 10 cm. respecto de la longitud de sondeo.

Tabla 4

Clasificación de tipos de roca por el RQD.

RQD	Calidad de Roca
0-25	Muy Mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Excelente

Fuente: Deere, 1963.

Mencionan que además, sobre esos testigos puede realizarse el ensayo geomecánico de resistencia bajo carga puntual bien sea en posición diametral o axial, para estimar la resistencia a la compresión uniaxial UCS (uniaxial compressive strength).

d) Evaluación de los resultados de la voladura

Deere (1963), establece que una vez ejecutada una voladura, es necesario proceder a analizar los resultados obtenidos, ya que su interpretación permitirá introducir modificaciones sucesivas en los parámetros de diseño, constituyendo ésta una etapa básica dentro del proceso de optimización.

Los aspectos a evaluar son los siguientes:

- Fragmentación y esponjamiento de la pila de escombros.
- Geometría de la pila, altura y desplazamiento.
- Estado del macizo residual y piso del banco.
- Presencia de bolos en la pila de material.
- Vibraciones, proyecciones y onda aérea producidas en la voladura.

Deere (1963), sostiene que el aspecto más importante en la optimización del proceso global de minado es la fragmentación lograda, la cual está relacionada con un mayor rendimiento de la etapa de procesamiento de minerales.

a. Fragmentación y esponjamiento de la pila de escombros

La distribución granulométrica del material, constituye la herramienta básica dentro del proceso de

optimización de las voladuras, ya que es el único medio de comparación de la fragmentación obtenida cuando se procede a realizar un estudio de sensibilidad de los parámetros de diseño.

Se obtiene mediante tamizajes en peso en campo y laboratorio. Sin embargo los recientes avances en informática han permitido la aplicación del análisis de imágenes, para deducir una curva de distribución granulométrica de la pila de material, a partir de fotografías digitales.



Figura 11. Vista general de una cribadora móvil, una cargadora y las pilas de material.
Fuente: Bergman, 2005.

b. Sistema de análisis digital de imágenes

Los métodos modernos de análisis de imágenes utilizan un software para cuantificar con imágenes en dos dimensiones aspectos geométricos, tales como el área, número, perímetro, forma, tamaño y orientación. Son varias las dificultades que aún hoy no están totalmente resueltas, como por ejemplo una definición de contornos precisa, la corrección de los errores debidos al solape entre fragmentos o la exactitud para indicar la cantidad de finos. Uno de los programas usados es el Wip frag y el Shot plus.



Figura 12. Toma de fotografías en la pila volada.

Fuente: Lizárraga, 2006.

2.2.7 Optimización económica del proceso global de minado

El objetivo principal del arranque con explosivos consiste en que éste se lleve a cabo cumpliendo con las especificaciones técnico-operativas previstas ya que esta constituye la primera operación básica en el proceso extractivo condicionando ampliamente los resultados de los subsistemas posteriores, tanto en rendimientos como en costos. Así pues, su resultado debe estudiarse con una óptica global del conjunto, relacionándola con las distintas

variables que corresponden al resto de las operaciones subsiguientes.

Según un resumen de los costos en minas de todo el globo (Tabla 5), se observa que el consumo de energía por tonelada de mineral es mayor casi siempre en las etapas de chancado y molienda (Figura 13). Y por ende son los procesos más costosos.

Tabla 5
Consumo de energía y costos en minería.

Proceso de Producción	Tipo de energía	Consumo de energía	Costo (€/t)
Perforación	Eléctrica	0,04-0,43kw h/t	0,0025-0,027
Voladura	Química (ANFO)	0,15-1,50 kg/t	0,06-0,60
Carga	Eléctrica	0,15-1,20kW h/t	0,009-0,076
Transporte			
-Veh. Diesel	Térmica	0,16-0,21l/t	0,034-0,044
-Veh. Eléctrico	Eléctrica	0,32-0,45 kW h/t	0,020-0,028
Chancado y molienda	Eléctrica	12,89-33,30 kW h/t	0,812-2,098

Fuente: Cochilco, 2016.

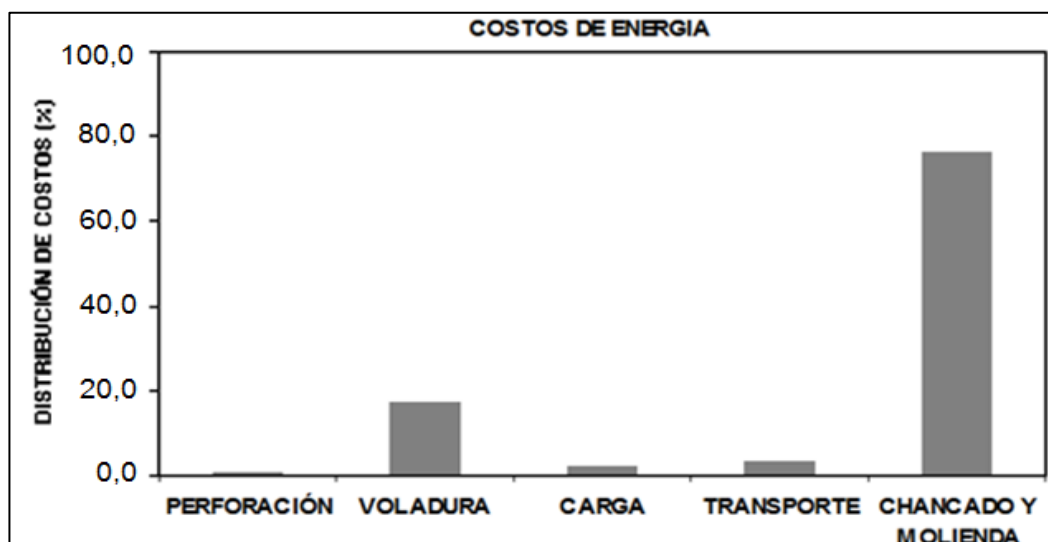


Figura 13. Distribución de costos de energía en minería.

Fuente: Fuersteneau, 1997.

En la investigación realizado por Fuersteneau (1997), indica que se pudo cuantificar los efectos producidos en los procesos subsiguientes relacionado a cambios en el diseño de voladura. Los parámetros analizados fueron el burden, el espaciamiento y la longitud de carga. Las conclusiones del estudio llegaron a una posible reducción de más de un 10 % de ahorro de energía en chancado y molienda, con un explosivo con mejor velocidad de detonación y en algunos sectores incrementarse la longitud de carga en el mismo porcentaje. Adicionalmente se puede conseguir un ahorro al incrementarse la malla de perforación en las zonas en las cuales las características de la roca lo permitan.

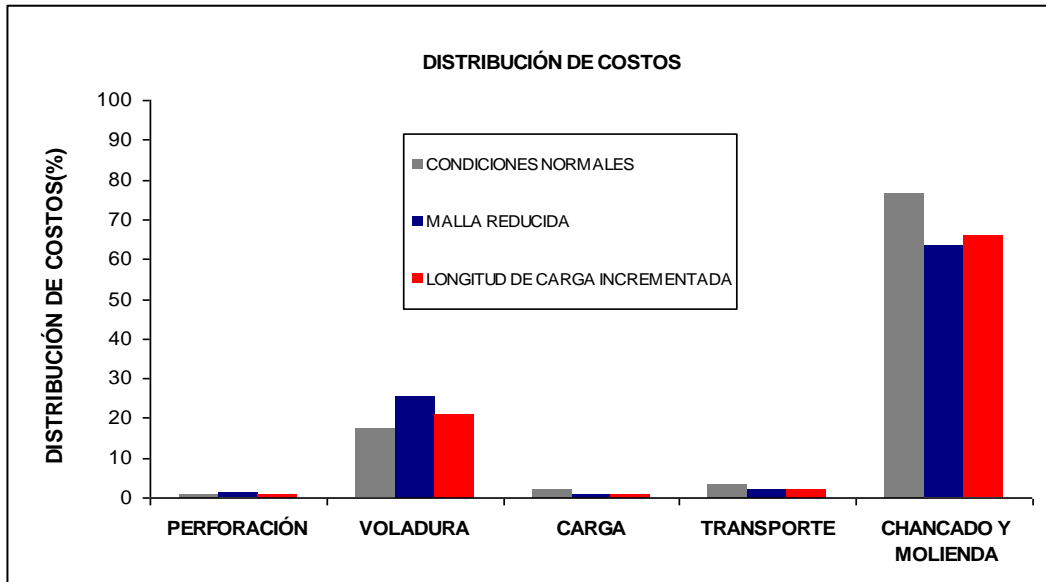


Figura 14. Costos resultantes de acuerdo al rediseño de voladura.

Fuente: Fuersteneau, 1997.

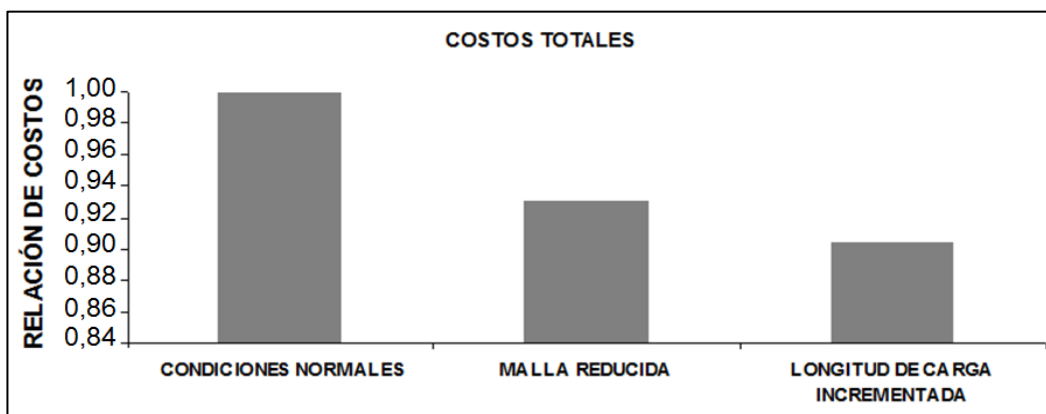


Figura 15. Costo global de acuerdo al rediseño de la voladura.

Fuente: Fuersteneau, 1997.

2.3 Definición de términos

2.3.1 Combustión

Puede definirse como toda reacción química capaz de desprender calor, pudiendo ser o no percibido por nuestros sentidos.

2.3.2 Deflagración

Es un proceso exotérmico en el que la transmisión de la reacción de descomposición se basa principalmente en la conductividad térmica. Es un fenómeno superficial en el que el frente de deflagración se propaga por el explosivo en capas paralelas a una velocidad baja no supera los 1 000 m/s.

2.3.3 Detonación

Es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción (velocidad de detonación "VOD") y formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva. La velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor por

conductividad, sino que lo transmiten por choque deformándola y produciendo su calentamiento. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva, el cual se denomina onda de choque. La velocidad con la que viaja la onda de choque se denomina Velocidad de detonación.

2.3.4 Energía de tensión (ET)

Desarrollado por el fuerte impacto debido a la onda de choque, durante un corto espacio de tiempo. Es el principal responsable de la trituración y creación de micro-fracturas en la roca. Está directamente relacionada a la velocidad de detonación y a la densidad del explosivo.

2.3.5 Energía de burbuja o gas (EB)

Desarrollada por la alta presión y temperatura de los gases producidos detrás de la zona de reacción. Es la que origina el quebramiento de la roca por la acción expansiva de los gases. Se considera que el mayor porcentaje de la rotura de la roca es producida por la energía de gas o de burbuja.

2.3.6 Densidad

Konya, Albarrán (1998), sostienen que 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.

Indican que los explosivos se compran, almacenan y utilizan en base a su peso. 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.

López (2003), menciona si la densidad es muy alta, el agente de voladura pierde la sensibilidad al booster y no inicia.

En la Tabla 6 se muestran algunas densidades referenciales para agentes de voladura, las cuales varían entre 0,80 y 1,60 g/cc.

Tabla 6
Densidades para diferentes agentes de voladura.

Explosivo	Den (g/cc)
Emulsión a granel	1,1-1,6
Anfo cargado Neumaticamente	0,8-1,0
Anfo vaciado	0,8-0,9
Anfo Encartuchao	1,1-1,2
Anfo pesado	1,1-1,4

Fuente: Konya y Albarrán, 1998.

2.3.7 Velocidad de Detonación

López (2003), describe a la velocidad de detonación como aquella a la que la onda de detonación se irradia a través del explosivo y, por ende, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. 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.

Explica que 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.

Konya y Albarrán (1998) concluyen que se puede utilizar la velocidad de detonación para determinar la eficiencia de una reacción explosiva.

López (2003), indican que 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.

En la Tabla 7, se detalla valores aproximados de velocidad de detonación para diferentes agentes de voladura.

Tabla 7

Valores de velocidad de detonación para 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	4 300 – 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 y Albarran, 1998.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación

Investigación de tipo experimental con elaboración de línea base para el monitoreo y comparación de los resultados.

Se han tenido dos campos de investigación de terreno suave y terreno duro.

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.

- ❖ Densidad
- ❖ Velocidad de detonación (VOD)
- ❖ Fragmentación
- ❖ Indicadores de la Planta

3.1.1 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 del anfo pesado gasificado, es importante medir la densidad inicial y la final (después de 30 minutos de esponjamiento).

Primero, se toma una muestra en el vaso volumétrico directamente de la manga de descarga, rápidamente se corta con la espátula al ras del vaso y se limpia el material que quede fuera del depósito y se pesa (es muy importante realizar el corte de manera inmediata puesto que el proceso de gasificación empezó en la manga de descarga del camión fábrica).

Se controla treinta minutos, se elimina el material que rebalsa el vaso volumétrico (producto de la gasificación) y se vuelve a pesar. Se recomienda medir la densidad cada 5 minutos para cuantificar el proceso de esponjamiento.

Los materiales necesarios para realizar la medición, que forman parte de un kit obligatorio que tiene que tener cada camión-fábrica son:

- Balanza y vaso volumétrico de 1 litro de preferencia
- Trapos y espátula para limpieza
- Termómetro (Es importante contar con un termómetro puesto que la temperatura de la emulsión tiene incidencia directa en la gasificación, con emulsión de elevada temperatura mayor a 20°C el proceso de gasificación se acelera debiendo dosificar la dosis de Nitrito de Sodio).

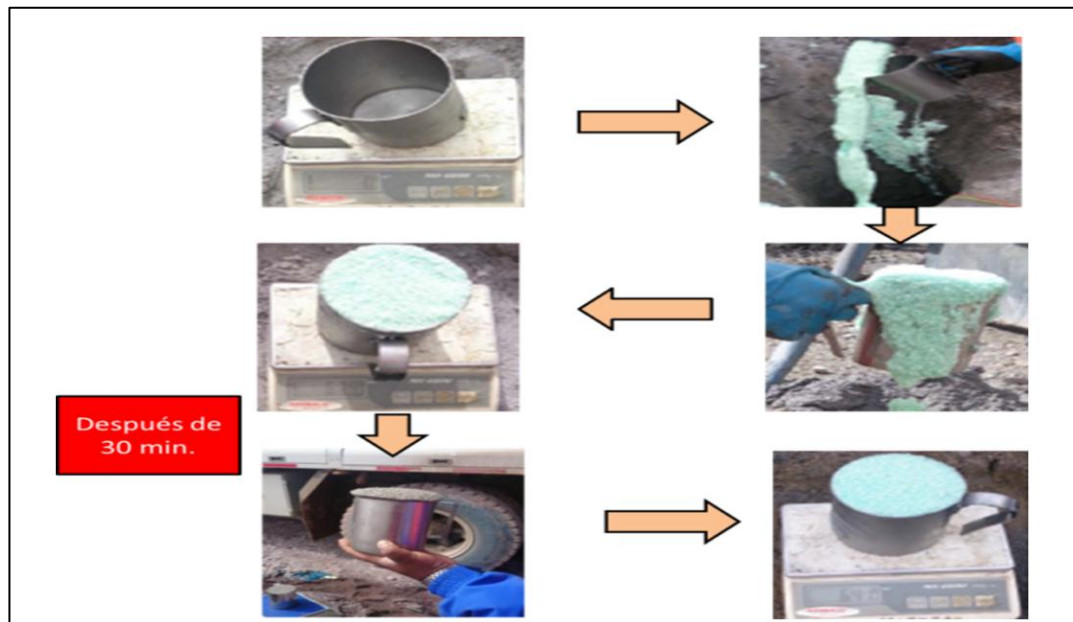


Figura 16. Proceso de gasificación.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Velocidad de detonación

Se utilizó el equipo data trap para medir la velocidad de detonación (VOD) en taladros. Este permite medir la velocidad de detonación de un taladro por proyecto de voladura por el método de corto circuito.

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 10,80 ohm/m). El cable se adhiere al booster o iniciador 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 la data trap registra la disminución resultante del voltaje en comparación con el tiempo. El software convierte los datos registrados en un gráfico de distancia versus tiempo, como se muestra en la Figura 17. La gradiente de este gráfico es la velocidad de detonación.

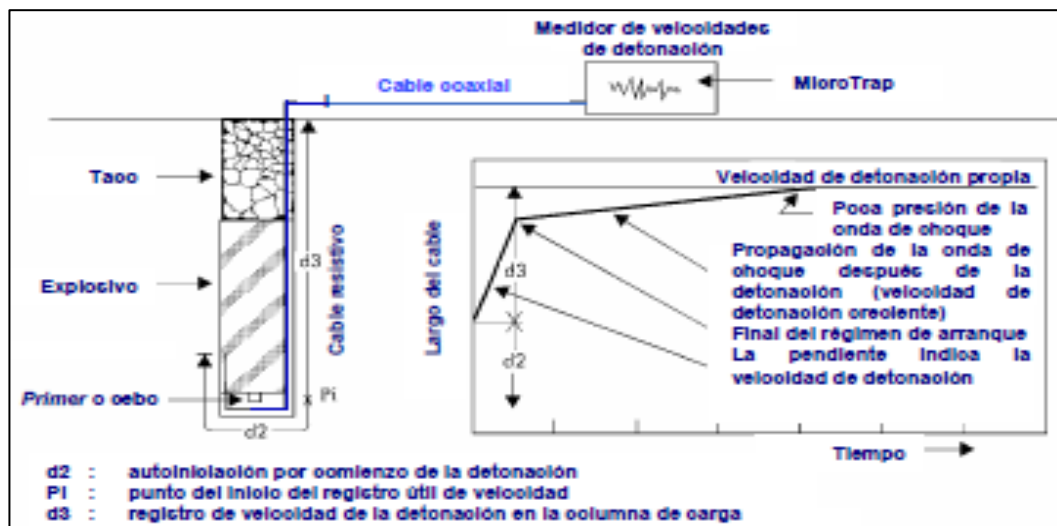


Figura 17. Proceso de medición de velocidad de detonación.

Fuente: Manual práctico de voladura EXSA, 2001.

A continuación un registro de velocidad de detonación perteneciente a la línea base.

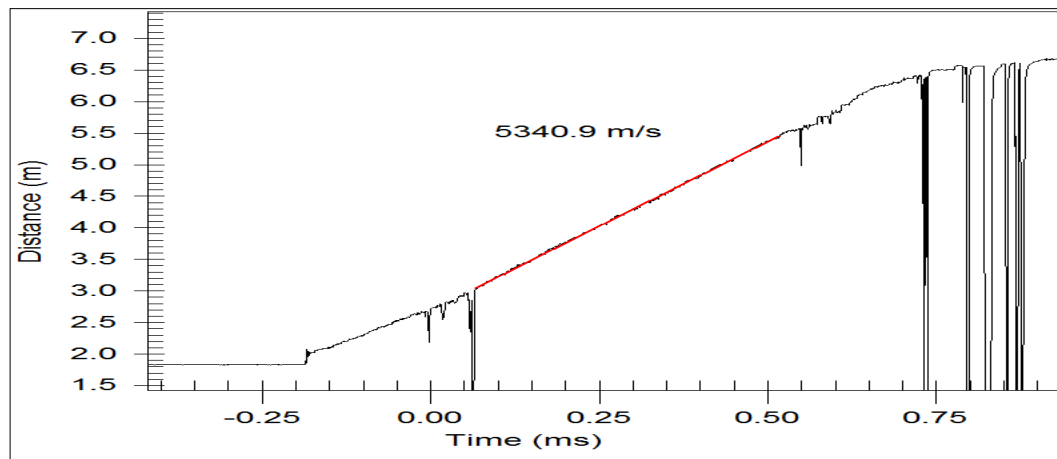


Figura 18. Velocidad de detonación de Anfo pesado 55 con emulsión matriz.

Fuente: Orica, 2009.

El resultado de velocidad de detonación se encuentra dentro del rango establecido para dicha mezcla (4800-5400) con lo cual se demuestra que el explosivo se está desarrollando de una manera adecuada.

3.1.3 Fragmentación

Se utilizó el software power sieve, el cual en base a una fotografía del material y una referencia, es capaz de determinar la fragmentación, brindando el pasante 80.

Los datos obtenidos son de suma importancia puesto que tendremos dos resultados, los que se venían dando que serán mostrados en la línea base y los que se obtendrán con las pruebas, una mejora en la fragmentación significa ahorro de costos en planta y que el proceso de voladura ha mejorado. Es un indicador de alta relevancia.

3.1.4 Indicadores de la planta

Para poder realizar una medición de las mejoras obtenidas en planta con las pruebas realizadas se trabajó con el acumulado de paradas de planta por material y con su consumo de energía para 10 000 toneladas procesadas.

Por motivos de confidencialidad los datos exactos no podrán ser revelados, para este caso trabajaremos con porcentajes y serán los gráficos de barras que nos evidenciarán las mejoras obtenidas.

3.2 Población y muestra

Para la creación de la línea base se escogieron los disparos más representativos de cada sector y se elaboró un promedio.

Criterios usados:

- Registros de velocidad de detonación (m/s)
- Densidad (g/cc)
- Fragmentación por proyecto.

Para mineral de hierro CG/FG clasificado como suave tenemos como línea base que se está trabajando con una densidad promedio de 1,28; una velocidad de detonación promedio de 5 119,80 m/s y se obtuvo como resultado una fragmentación promedio de 17,88 cm.

Para mineral de hierro refractario clasificado como duro tenemos como línea base que se está trabajando con una densidad promedio de 1,28; una velocidad de detonación promedio de 5 141,20 m/s y se obtuvo como resultado una fragmentación promedio de 37,82 cm.

Para las pruebas se realizaron 05 pruebas por tipo de material, bajo las mismas condiciones.

3.3 Operacionalización de variables

3.3.1 Variables independientes

- Diseño de voladura (factor de carga, burden, espaciamiento, altura de banco, altura de carga, sobreperforación, longitud de taco, densidad del explosivo y secuencia de iniciación).
- Características geotécnicas de la roca (densidad de roca, RQD, UCS, módulo de Young, y el espaciamiento, dirección y buzamiento de familias de juntas y fallas).
- Características del explosivo: Anfo pesado 73 gasificado.
- En planta: potencia máxima disponible de los circuitos de chancado y molienda, disponibilidad por mantenimiento.

3.3.2 Variables dependientes

- En la perforación y voladura: tamaño medio de fragmento X_{50} , tamaño de fragmento al P80 y P20, índice de uniformidad n , tamaño máximo de fragmento $X_{máx}$, velocidad de detonación y densidad del explosivo.

- En chancado y molienda: P80 del producto de los circuitos de chancado y molienda, porcentaje de carga recirculante, P80 en el ciclón O/F del circuito de molienda, rendimiento y potencia del circuito de molienda, costo total de chancado y molienda.

3.4 Técnicas e instrumentos para recolección de datos

Investigación cuantitativa con recolección de datos primarios del área de perforación y voladura y los tomados de forma experimental a partir del inicio de la investigación.

Según Muñoz y Quintero (2001), indica cómo desarrollar competencias investigativas en la educación.

Para la recolección de datos se utilizó el siguiente criterio.

- Para la creación de la línea base se escogieron los disparos más representativos de cada sector y se elaboró un promedio.

El criterio para la selección de los disparos ha sido que se tengan registrados los resultados de velocidad de detonación, densidad y fragmentación por proyecto.

- Se usó los siguientes instrumentos.

Base histórica del área de voladura de los disparos realizados así como de las pruebas realizadas por las empresas especialistas en voladura.

Simulaciones con los posibles cambios.

3.5 Procesamiento y análisis de datos

3.5.1 Validación y edición

Con la línea base creada en base a los datos históricos del área de voladura se procedió a eliminar los datos que no cumplían con lo establecido: dato de densidad, fragmentación y registro de velocidad de detonación.

3.5.2 Codificación

Se procedió a codificar los resultados de los datos históricos para enlazarlos con las propuestas de los resultados esperados.

En el terreno de hierro roca suave se dividió en 02 grupos para las pruebas. La primera parte de las pruebas serán con los mismos parámetros una vez analizado los

resultados se procederá a cambiar los parámetros en busca de un ahorro económico más significativo.

El terreno de hierro duro se realizará las pruebas con los mismos parámetros.

3.5.3 Introducción de datos

Los datos serán introducidos y manejados en libros Excel. Es importante mencionar que para obtener los resultados finales serán procesados en software disponibles.

3.5.4 Tabulación y análisis estadísticos

Se estableció como resultados esperado una mejora considerable en los resultados post voladura, pero con un nuevo diseño de carga y parámetros de perforación se buscara obtener un ahorro considerable en el área.

- Para mineral de hierro CG/FG clasificado como suave, se realizaron 2 grupos de pruebas, una manteniendo los mismo parámetros de perforación burden y espaciamiento logrando

reducir el P80 = 17,88 cm. a 14,15 cm. Se logró una disminución del P80 en 4,12 cm.

- Para material de hierro dura (R): Se estableció como resultado esperado específicamente mejorar los resultados post voladura.

Para mineral de hierro R clasificado como duro, tenemos una densidad inicial promedio de $1,33 \text{ g/cm}^3$ y una densidad final de $1,16 \text{ g/cm}^3$, la velocidad de detonación promedio fue $5\,566,67 \text{ m/s}$ y una fragmentación promedio de 27,36 cm.

- Adicional en el proceso operativo de abastecimiento de los camiones fábrica encargados del transporte de agentes de voladura, se estableció optimizar su proceso disminuyendo las demoras operativas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

Para poder mostrar un resultado y decir si es bueno o malo se necesita tener una línea base, para nuestro presente estudio se realizó en base a la recolección de información de voladuras efectuadas con anfo pesado a base de emulsión matriz en su mezcla de anfo pesado 55, que es la mezcla que se utiliza en la operación. Una vez realizadas las pruebas con anfo pesado 73 en base a emulsión gasificable se procedió a cuantificar sus resultados, para poder compararlos con los de nuestra línea base.

Tenemos que tener en cuenta que en el yacimiento donde se efectuaron las pruebas, tenemos el mineral de hierro que es clasificado según sus características como:

- **CG-FG-R:** Es el mineral primario (magnetita), que en el proceso de molienda se clasifica como:
 - Molienda gruesa: CG (Coarse grade), contiene menos del 8 % de azufre, producto que no pasa por procesos de separación. Chancado primario de 5 – 10,16 cm.
 - Molienda fina: FG (Fine grade), contiene más del 8 % de azufre. Chancado primario de 3,4925 cm. a 5,08 cm.
 - Molienda fina refractaria: R (Refractario) contiene más del 8 % de azufre, además de impurezas, la más resaltante pirrotita. Chancado primario de 3,49 cm. a 5,08 cm.

La molienda es una de las etapas de tratamiento del mineral, donde la roca mineralizada se muele, y según el requerimiento metalúrgico se obtiene rocas de determinados tamaños.

El material refractario es clasificado así, por ser un material que tolera altas temperaturas, sin entrar en descomposición ni modificar sus propiedades.

Según la clasificación geomecánica de la mina y los resultados post voladuras, el departamento de geomecánica y geología agrupó estos materiales en dos grupos:

- CG – FG: Material de hierro suave
- R : Material de hierro duro

Por un tema de confidencialidad no se nos permite mostrar la investigación geotécnica que realizó la mina, para realizar esta clasificación.

Pero la clasificación concuerda con los resultados obtenidos post – voladura, en donde la fragmentación para el mineral de hierro refractario es la más alta y donde se presentan mayores problemas.

4.1.1 Línea base – Anfo pesado 55 en base a emulsión matriz

Antes de proceder a realizar las pruebas con el nuevo producto se procedió a recoger la información histórica de los resultados obtenidos en las voladuras primarias en la mina, estos resultados fueron extraídos de informes de las empresas especializadas en voladura como son Famesa,

Exsa y Orica, que periódicamente asisten a la empresa minera para realizar los trabajos de asistencia técnica, información propia levantada en los últimos meses antes de la prueba y de la información histórica del área de perforación y voladura.

El presente estudio se realizó en dos sectores de la mina; uno clasificado como material suave (CG/FG), en el cual el objetivo era mantener los resultados de fragmentación o mejorarlos demostrando una reducción en costos, y el segundo clasificado como material duro (R) el cual el objetivo principal es mejorar la fragmentación, sobre todo en la zona del taco sin incrementar los costos o justificando su incremento con ahorros de energía y disminución de paradas en planta.

a) *Fragmentación, densidad y velocidad de detonación*

Para la creación de la línea base se escogieron los disparos más representativos de cada sector y se elaboró un promedio.

El criterio para la selección de los disparos ha sido que se tengan registrados los resultados de velocidad de detonación, densidad y fragmentación por proyecto.

Tabla 8

Resultados de disparos realizados con emulsión matriz: densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno suave (CG/FG).

Tabla para Terreno Suave (CG/FG)				
Tipo de Anfo pesado	Densidad (g/cc)	Velocidad de detonación (m/s)		Fragmentación P 80 (cm.)
		Teórico	Final	
Anfo pesado 55				
Disparo 1	1,280		5 131,0	19,71
Disparo 2	1,285		5 165,8	16,26
Disparo 3	1,291		5 310,0	21,82
Disparo 4	1,280		5 340,9	17,93
Disparo 5	1,275	4 800 –	5 124,0	15,88
Disparo 6	1,290		5 090,0	18,87
Disparo 7	1,277	5 400	4 875,6	15,88
Disparo 8	1,280		4 854,4	13,82
Disparo 9	1,280		5 104,0	18,90
Disparo 10	1,284		5 202,3	19,10
Promedio	1,282 2		5 119,8	17,89

Fuente: Elaboración propia.

Para mineral de Hierro CG/FG clasificado como suave, tenemos como línea base que se está trabajando con una densidad promedio de 1,30; una velocidad de detonación promedio de 5

119,80 m/s y se obtuvo como resultado una fragmentación promedio de 17,8816 cm.

Se presentará un registro representativo:

Disparo 4:

- **Densidad** : 1,28 g/cm³



Figura 19. Toma de densidad.

Fuente: Elaboración propia.

Para la toma de densidades se utiliza un vaso calibrado de peso y volumen conocido.

- **Velocidad de detonación (VOD) :**
5 340,90 m/s.

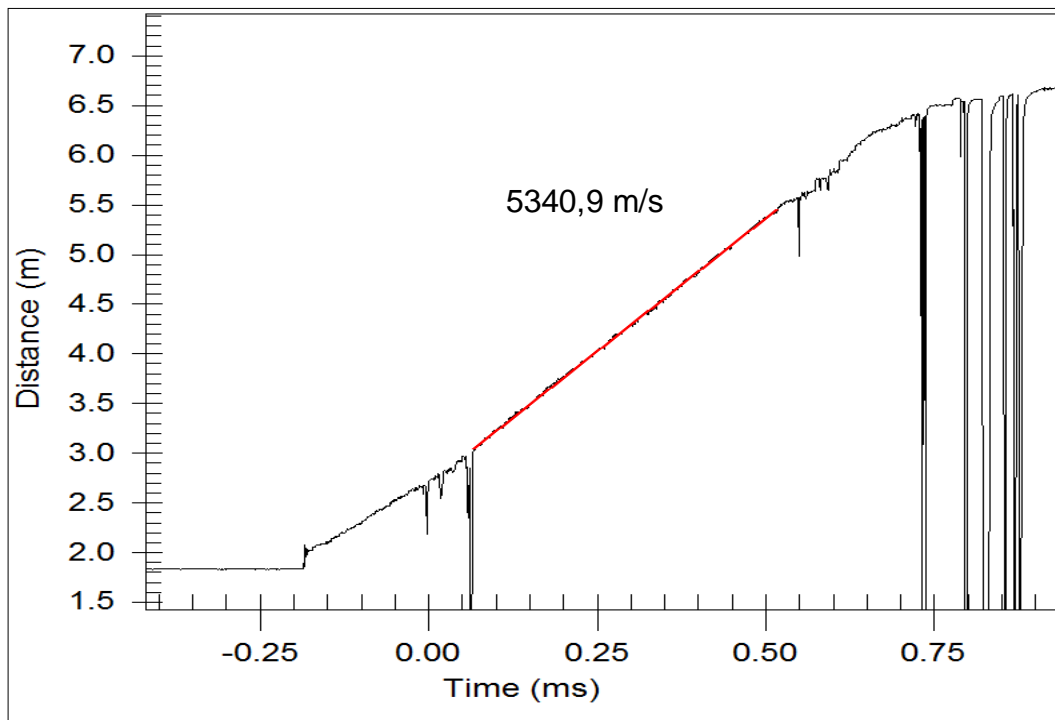


Figura 20. Velocidad de detonación Anfo pesado 55 con emulsión matriz.

Fuente: Orica, 2009.

El resultado de velocidad de detonación se encuentra dentro del rango establecido para dicha mezcla (4800-5400) con lo cual se demuestra que el explosivo se está desarrollando de una manera adecuada.

- Fragmentación : 17,93 cm.



Figura 21. Fragmentación.

Fuente: Elaboración propia.

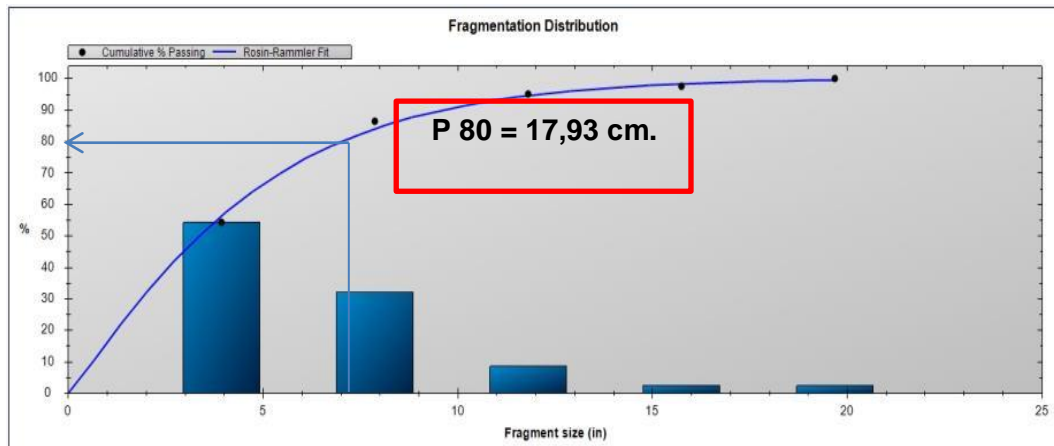


Figura 22. Distribución de fragmentación.

Fuente: Análisis software Power sieve – Orica.

Para el análisis de fragmentación se usó una escala de 19 cm de diámetro (pelota), es el resultado de un análisis de 6 días del frente de minado equivalentes a 36 imágenes analizadas.

Tabla 9

Resultados de disparos realizados con emulsión matriz: densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno duro (R).

Tabla para Terreno Duro (R)				
Tipo de anfo pesado	Densidad (g/cc)	Velocidad de detonación (m/s)		Fragmentación P 80 (cm.)
		Teórico	Final	
Anfo pesado 55				
Disparo 1	1,278		5 100,0	40,64
Disparo 2	1,260		4 985,3	34,49
Disparo 3	1,285		5 005,2	35,81
Disparo 4	1,290		5 052,2	37,59
Disparo 5	1,282		5 180,0	36,96
Disparo 6	1,279	4 800 – 5 400	5 206,0	36,07
Disparo 7	1,280		5 132,2	35,81
Disparo 8	1,280		5 431,1	45,21
Disparo 9	1,284		5 200,0	38,10
Disparo 10	1,288		5 120,0	37,59
Promedio	1,2806		5 141,2	37,83

Fuente: Elaboración propia

Para mineral de Hierro Refractario clasificado como duro, tenemos como línea base que se está trabajando con una densidad promedio de 1,28; una velocidad de detonación promedio de 5 141,20 m/s y se obtuvo como resultado una fragmentación promedio de 37,82 cm.

Se presentará un registro representativo:

Disparo 8:

- **Densidad : 1,28 g/cm³**



Figura 23. Toma de densidad.

Fuente: Elaboración propia.

Para la toma de densidades se utiliza un vaso calibrado de peso y volumen conocido.

- **Velocidad de detonación (VOD):**
5 431,10 m/s.

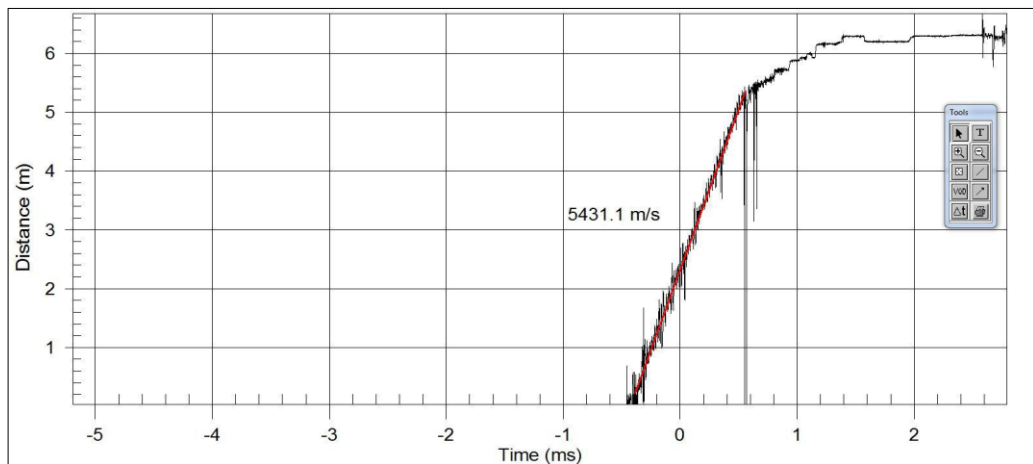


Figura 24. Velocidad de detonación año pesado 55 con emulsión matriz.

Fuente: Orica, 2009.

El resultado de velocidad de detonación se encuentra dentro del rango establecido para dicha mezcla (4800-5400), con lo cual se demuestra que el explosivo se está desarrollando de una manera adecuada.

- Fragmentación : 45,42 cm.



Figura 25. Fragmentación.

Fuente: Elaboración propia.

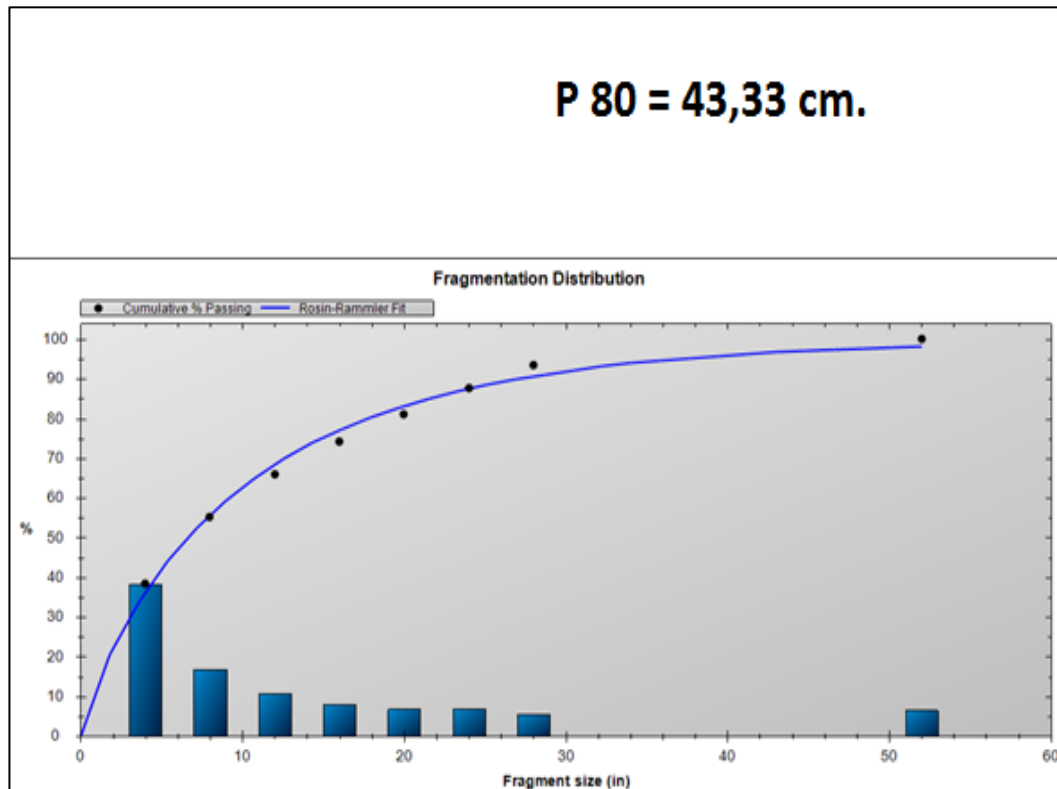


Figura 26. Distribución de fragmentación.

Fuente: Análisis software Power sieve – Orica.

Para el análisis de fragmentación se usó una escala de 19 cm de diámetro (pelota), es el resultado de un frente de minado los 4 primeros días con un total de 24 imágenes, se dejó de analizar puesto que en varios sectores del frente trabajaron equipos secundarios como: martillo 700 y equipos de perforación secundaria.

b) Demoras de planta vs material, consumo de energía vs material

Para elaborar esta sección de la línea base se trabajó con la información acumulada hasta antes del inicio de las pruebas.

Tabla 10

Porcentaje de demoras en planta vs material.

% Demoras en Planta	
CG/FG	10 %
R	90 %

Fuente: Elaboración propia

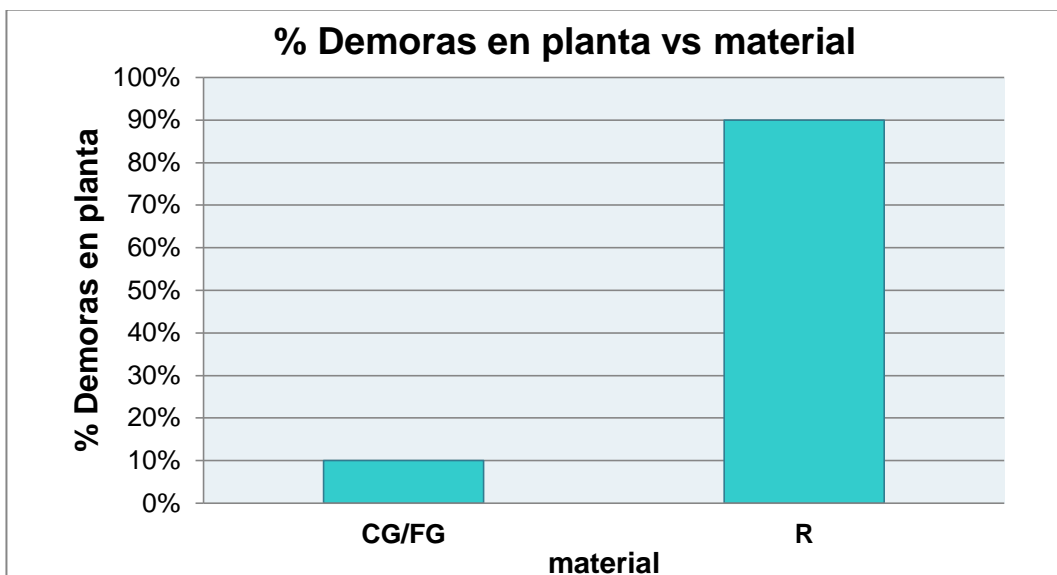


Figura 27. Porcentaje de demoras en planta vs material.

Fuente: Elaboración propia.

Para el gráfico de barras presentado se, trabajó con la información acumulada, el 100 % vendría hacer el total de horas de demoras en planta a la fecha el cual solo el 10 % se suscitó cuando la planta estaba procesando el material suave CG/FG y el 90 %, cuando la planta procesaba el material de hierro R clasificado como duro, lo que demuestra nuestro principal problema.

Tabla 11

Porcentaje de consumo de energía vs material.

% Consumo de Energía	
CG/FG	38 %
R	62 %

Fuente: Elaboración propia.

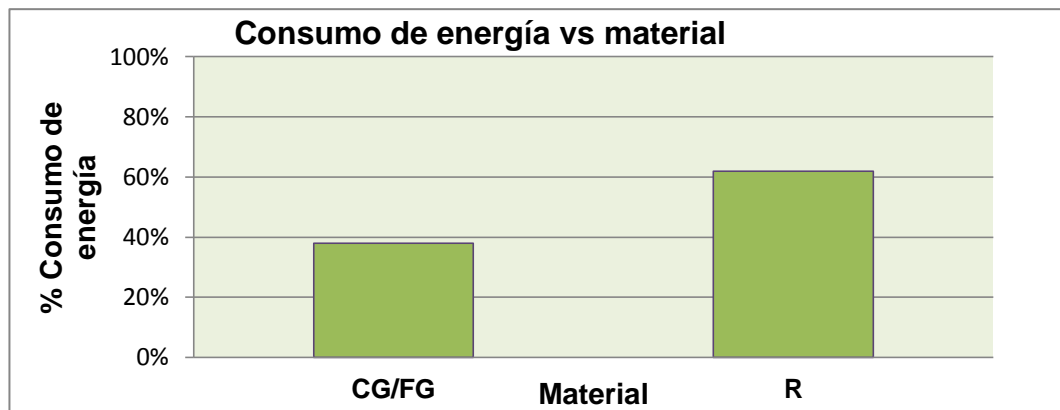


Figura 28. : Porcentaje de consumo de energía vs material.

Fuente: Elaboración propia.

Para el gráfico de barras presentado se trabajó con la información acumulada, el 100 % vendría hacer el consumo total de energía a la fecha antes de realizar las pruebas.

Para poder realizar este trabajo de investigación en las instalaciones de la empresa es uno de los requisitos de la misma, no revelar la

Información de planta, es por eso que se trabajó con porcentajes.

4.1.2 Resultado de las pruebas realizadas con anfo pesado 73 gasificado

Se realizaron 5 pruebas por material teniendo un total de 10 pruebas de las cuales se mostrarán sus resultados, de la misma manera se realizó con los resultados de la línea base.

a) Fragmentación, densidad y velocidad de detonación.

Un aumento de la velocidad de detonación implica un aumento de la energía de tensión (ET) y por consiguiente una disminución de la energía de los gases (EB), porque la suma de ambas permanece constante. La relación ET/EB es menor en zonas de caídas de velocidad, de detonación y mayor cuando el iniciador produce una elevación de la velocidad de detonación. El aumento de la ET solo es beneficioso en la

fragmentación, cuando se realizan tronaduras en rocas duras, frágiles y masivas.

En formaciones sedimentarias o rocas muy tectonizadas se debe incrementar EB, para aprovechar el efecto de las fracturas y planos de debilidades, con el objeto de obtener un desplazamiento adecuado de las rocas.

Tabla 12

Resultados de disparos realizados con emulsión gasificada, densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno suave (CG/FG).

Tabla para terreno suave (CG/FG)							
Malla de diseño x espaciamiento (m.)	Cantidad de taladros	Tipo de anfo pesado Anfo pesado 73 gasificado	Resultados de disparos realizados con emulsión gasificada: densidad, velocidad de detonación y fragmentación				
			Densidad inicial (g/cc) 0 min	Densidad final (g/cc) 30 min	Velocidad de Detonación (m/s)		Fragmentación P80 (pulg)
					Teórico	Final	
Malla actual	108	Prueba 1	1,334	1,14		5 545	5,4
4,8 x 5,5 m.	120	Prueba 2	1,34	1,142		5 643,1	5,44
	Promedio		1,334	1,141		5 594,05	5,42
	98	Prueba 3	1,325	1,152	5 000 - 5 800	5 505	5,2
Ampliación de malla	116	Prueba 4	1,328	1,16		5 634,06	5,4
5,0 x 5,8 m.	104	Prueba 5	1,337	1,146		5 502,1	6,1
	Promedio		1,330	1,15,3		5 547,23	5,567

Fuente: Elaboración propia.

Para mineral de Hierro CG/FG clasificado como suave, se realizaron 2 grupos de pruebas, una manteniendo los mismo parámetros de perforación burden y espaciamiento, logrando reducir el P80 = 17,88 cm. a 13,77 cm. Se logró una disminución del P80 en 4,1148 cm.

Para el análisis de fragmentación se usó una escala de 19 cm. de diámetro (pelota), se realizó seguimiento a cada frente logrando analizar en promedio 30 imágenes por frente en total.

En la segunda parte de las pruebas se procedió a incrementar la malla de perforación de 4,80 a 5,50 m. a 5,00x 5,80 m. con la intención de generar un ahorro en perforación.

El resultado fue satisfactorio, se consiguió una disminución del P80 = 17,88 cm. a 14,12 cm. Sumado al ahorro en perforación ha sido la propuesta con mayor aceptación de la gerencia.

Se presentará un registro representativo:

Prueba 02:

- **Densidad:** Densidad inicial = 1,34 g/cm³

Densidad final = 1,14 g/cm³



Figura 29. Materiales para determinación de densidad

Fuente: Elaboración propia

Para la toma de densidades se utiliza:

- ✓ Vaso calibrado de peso y volumen conocido.
- ✓ Espátula
- ✓ Trapos
- ✓ Termómetro

✓ Calculadora y libreta de apuntes (La densidad se va tomando cada 5 minutos).

- **Velocidad de detonación (VOD):** 5643,10 m/s.

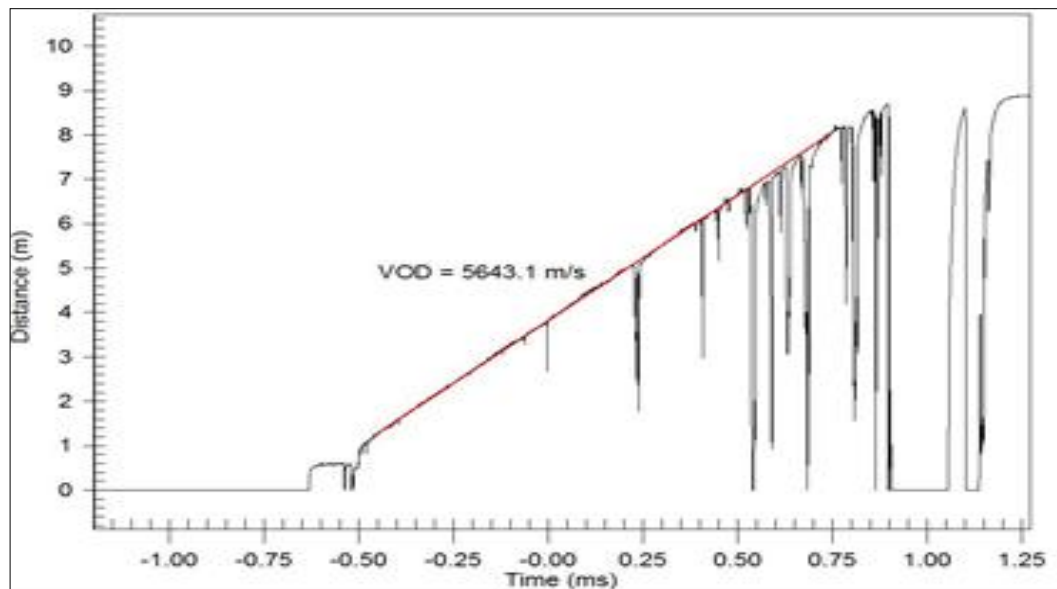


Figura 30. Velocidad de detonación anfo pesado 73 gasificado.

Fuente: Orica, 2009.

El resultado de velocidad de detonación se encuentra dentro del rango establecido para dicha mezcla (5000-5800) con lo cual se demuestra que el explosivo se está desarrollando de una manera adecuada.

- Fragmentación : 13,82 cm.



Figura 31. Fragmentación

Fuente: Elaboración propia.

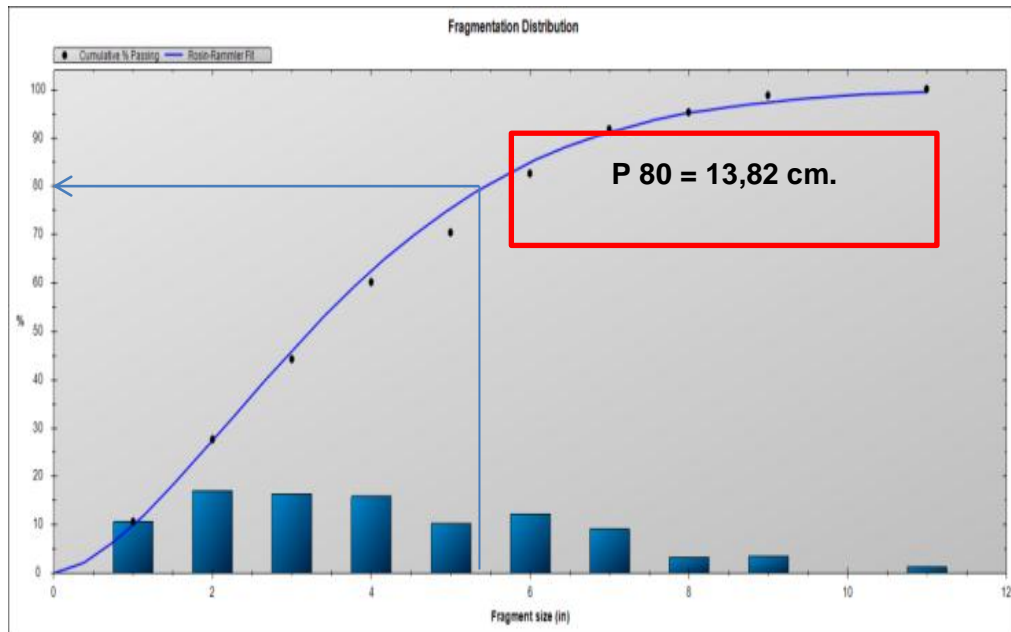


Figura 32, Distribución de fragmentación.

Fuente: Análisis software Power sieve – Orica.

Tabla 13

Resultados de disparos realizados con emulsión gasificada, densidad, velocidad de detonación y fragmentación para terreno duro (R).

Tabla para terreno duro (R)							
Resultados de disparos realizados con emulsion gasificada: Densidad, VOD y Fragmentación							
Malla de de diseño Burden x Espaciamiento	Cantidad de taladros	Tipo de Anfo pesado	Densidad inicial (g/cc)	Densidad final (g/cc)	VOD (m/s)		Fragmentación
		Anfo pesado 73 gasificado	0 min	30 min	Teórico	Final	P 80 (pulg)
Malla actual 4,8 x 5,5 m.	76	Prueba 1	1,336	1,336		5 572,00	11,65
	90	Prueba 2	1,342	1,339		5 707,900	11,04
	103	Prueba 3	1,33	1,156	5 000 – 5 800	5 600,00	10,6
	116	Prueba 4	1,334	1,161		5 557,80	10,75
	114	Prueba 5	1,331	1,157		5 542,20	10,8
Promedio			1,332	1,158		5 566,67	10,77

Fuente: Elaboración propia.

Para mineral de hierro R clasificado como duro, tenemos una densidad inicial promedio de 1,33 g/cm³ y una densidad final de 1,16 g/cm³, la velocidad de detonación promedio fue 5566,67 m/s y una fragmentación promedio de 27,36 cm.

Se presentará un registro representativo:

Prueba 02:

- **Densidad** : Densidad inicial = 1,33 g/cm³

Densidad final = 1,15 g/cm³



Figura 33. Materiales para determinación de densidad.

Fuente: Elaboración propia.

Para la toma de densidades se utiliza:

- ✓ Vaso calibrado de peso y volumen conocido.
- ✓ Espátula
- ✓ Trapos
- ✓ Termómetro
- ✓ Calculadora y libreta de apuntes (La densidad se va tomando cada 5 minutos)

- **Velocidad de detonación (VOD):** 5 707,90 m/s.

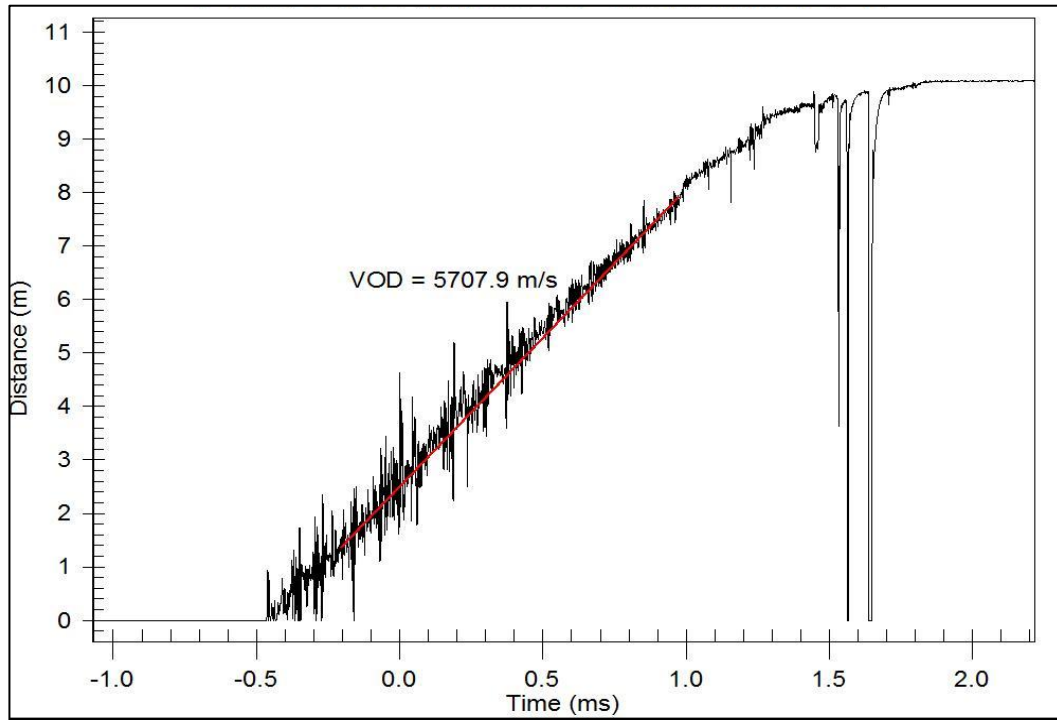


Figura 34. Velocidad de detonación anfo pesado 73 gasificado.

Fuente: Orica, 2009.

El resultado de velocidad de detonación se encuentra dentro del rango establecido para dicha mezcla (5 000- 5 800) con lo cual se demuestra que el explosivo se está desarrollando de una manera adecuada.

- Fragmentación: 28,04 cm.



Figura 35. Fragmentación.

Fuente: Elaboración propia

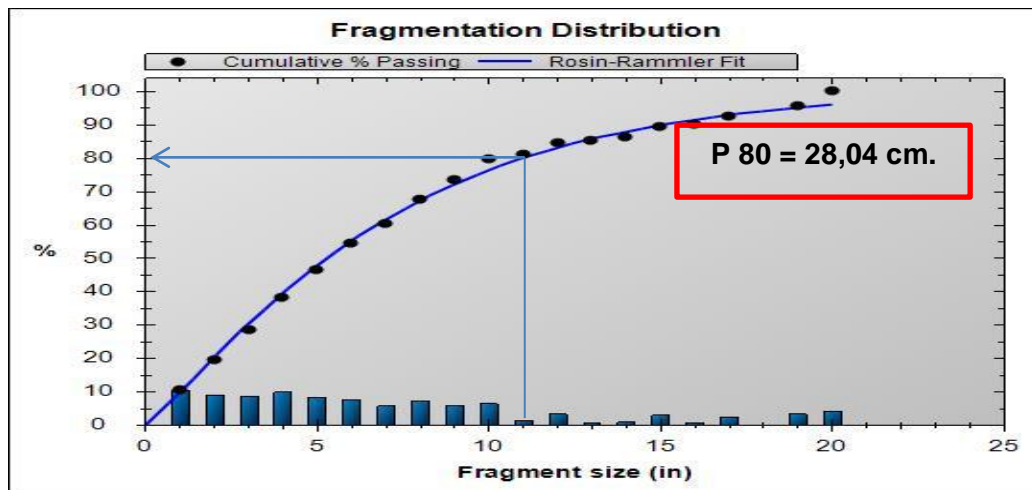


Figura 36. Distribución de fragmentación.

Fuente: Análisis software Power sieve – Orica.

Para el análisis de fragmentación se usó una escala de 19 cm de diámetro (pelota), es el resultado de un análisis de 8 días del frente de minado equivalentes a 48 imágenes analizadas.

Antes de realizar las pruebas, teníamos una fragmentación promedio de $P_{80} = 37,82$ cm. Con las pruebas pudimos llegar a obtener una fragmentación promedio de $P_{80} = 27,33$ cm. Logrando disminuir el P_{80} en 10,59 cm.

4.1.3 Análisis de resultados

En esta parte del estudio vamos a comparar los resultados obtenidos con los de la línea Base en fragmentación – velocidad de detonación, demoras en planta y consumo de energía y dejar en evidencia las mejoras que se consiguieron con las pruebas realizadas en base a emulsión gasificada. Terminaremos esta parte del estudio realizando un análisis económico, donde se compara el anfo pesado 73 gasificado usado para las pruebas con el anfo pesado 55 en base a emulsión matriz que se utilizaba en la operación. Para el análisis económico se considerará los costos del diésel, nitrato, emulsiones que son usados para la elaboración del anfo pesado.

a) Análisis de los resultados de fragmentación y velocidad de detonación para material de hierro suave (CG/FG)

a. Análisis de resultados de fragmentación

Tabla 14

Resultados promedio de fragmentación de CG/FG.

Resultados de fragmentación material de hierro CG/FG P80 (cm)		
Malla (Burden x Espaciamento)	Mezcla Explosiva	P80
4,8 x 5,5 m.	Anfo Pesado 55	17,88
4,8 x 5,5 m.	Anfo Pesado 73 G	13,77
5,0 x 5,8 m.	Anfo Pesado 73 G	14,12

Fuente: Elaboración propia.

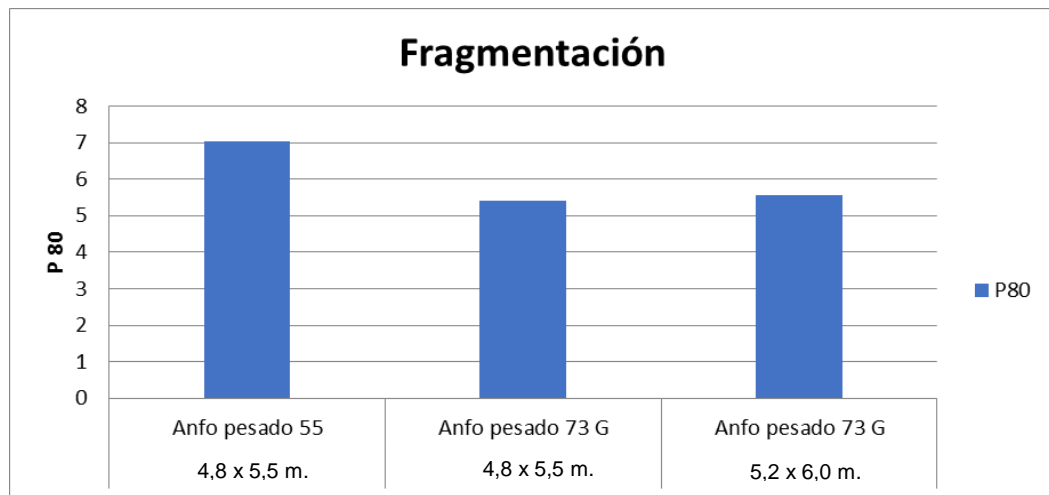


Figura 37. Resultados de fragmentación vs material.

Fuente: Elaboración propia.

b. Análisis de resultados de velocidad de detonación

Tabla 15

Resultados de velocidad de detonación.

Resultados de velocidad de detonación (m/s)		
Malla (burden x espaciamiento)	Mezcla Explosiva	VOD
4,8 x 5,5 m.	Anfo Pesado 55	5119,80
4,8 x 5,5 m.	Anfo Pesado 73 G	5594,05
5,0 x 5,8 m.	Anfo Pesado 73 G	5547,20

Fuente: Elaboración propia.

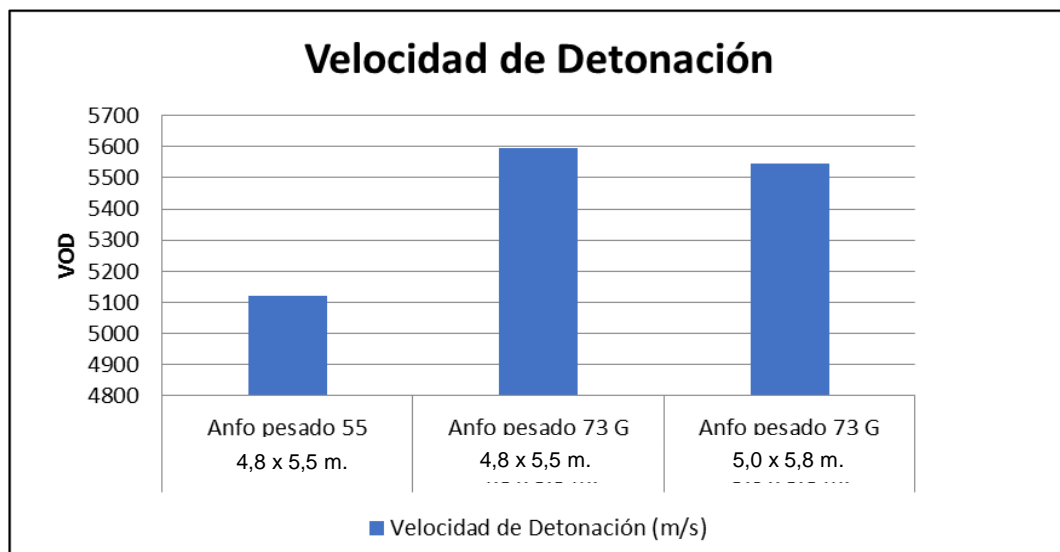


Figura 38. Resultados de velocidad de detonación vs material.

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos un evidente incremento de la velocidad de detonación lo que se evidenció en mejores resultados de fragmentación.

b) Análisis de los resultados de fragmentación y velocidad de detonación para material de hierro duro (R)

a. Análisis de resultados de fragmentación

Tabla 16

Resultado promedio de fragmentación R.

Resultados de fragmentación material de hierro R, P80 (cm.)		
Malla (burden x espaciamento)	Mezcla Explosiva	P80
4,8 x 5,5 m.	Anfo pesado 55	47,70
4,8 x 5,5 m.	Anfo pesado 73 G	27,35

Fuente: Elaboración propia.

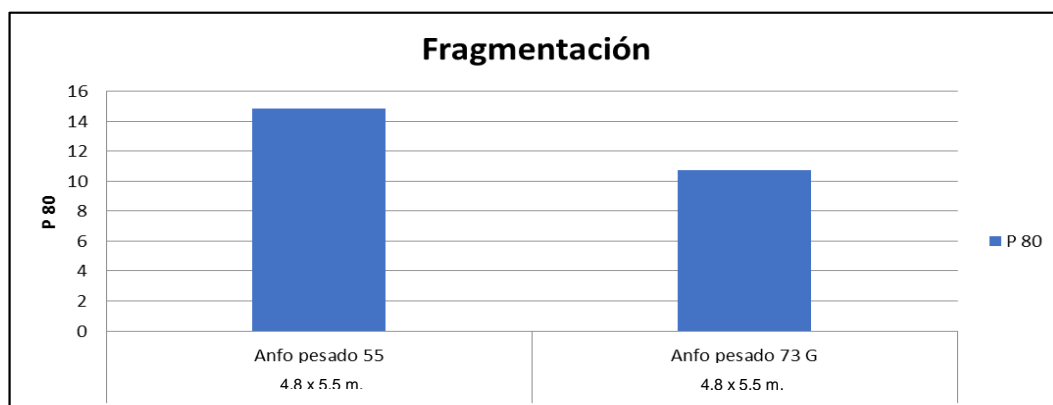


Figura 39. Resultados de fragmentación vs material.

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos una reducción de 8,20 cm. medido al 80 % pasante del material volado conocido como el P80.

b. Análisis de resultados de velocidad de detonación

Tabla 17

Resultados de velocidad de detonación.

Resultados de velocidad de detonación (m/s)		
Malla (burden x espaciamiento)	Mezcla explosiva	P80
4,8 x 5,5 m.	Anfo pesado 55	5 141,500
4,8 x 5,5 m.	Anfo pesado 73 G	5 595,980

Fuente: Elaboración propia.

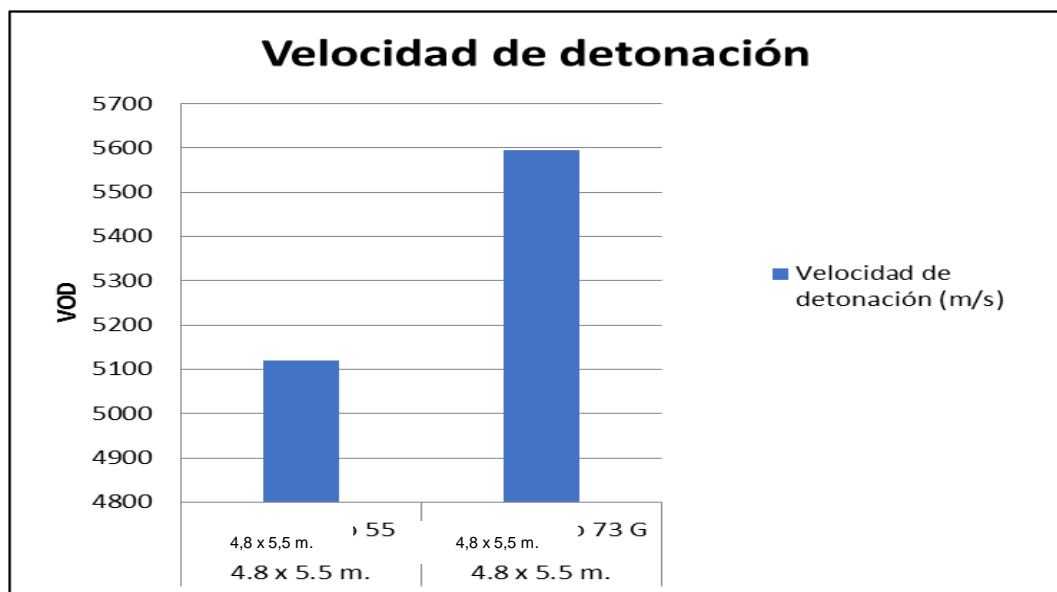


Figura 40. Resultados de velocidad de detonación vs material.

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos un evidente incremento de la velocidad de detonación. lo que se evidenció en mejores resultados de fragmentación.

c) Análisis de las mejoras en planta a consecuencia de mejores resultados en fragmentación

Para realizar este análisis se dividió las demoras en planta por mezcla explosiva y el consumo de energía por mezcla explosiva, evidenciando resultados muy favorables a consecuencia de la reducción del material que fue enviado a planta.

a. Demoras en planta vs mezcla explosiva

Al no poder mostrar los datos reales de planta se trabajará con porcentajes, para poder evidenciar las mejoras que se obtuvieron con las pruebas realizadas por material.

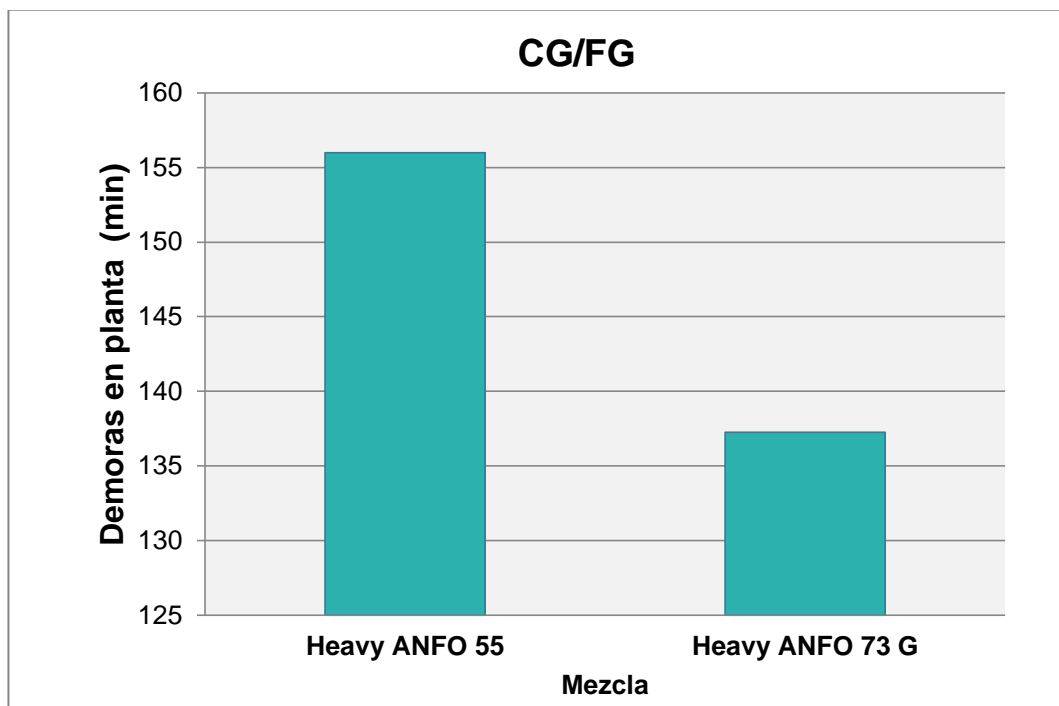


Figura 41. Resultados de demoras en planta vs material de hierro suave.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del material de hierro suave (CG/FG) al procesar el material resultante de las voladuras se obtuvo una reducción del 12 % de demoras en planta. Para obtener este porcentaje se trabajó a 10 000 toneladas producidas para poder realizar la comparación.

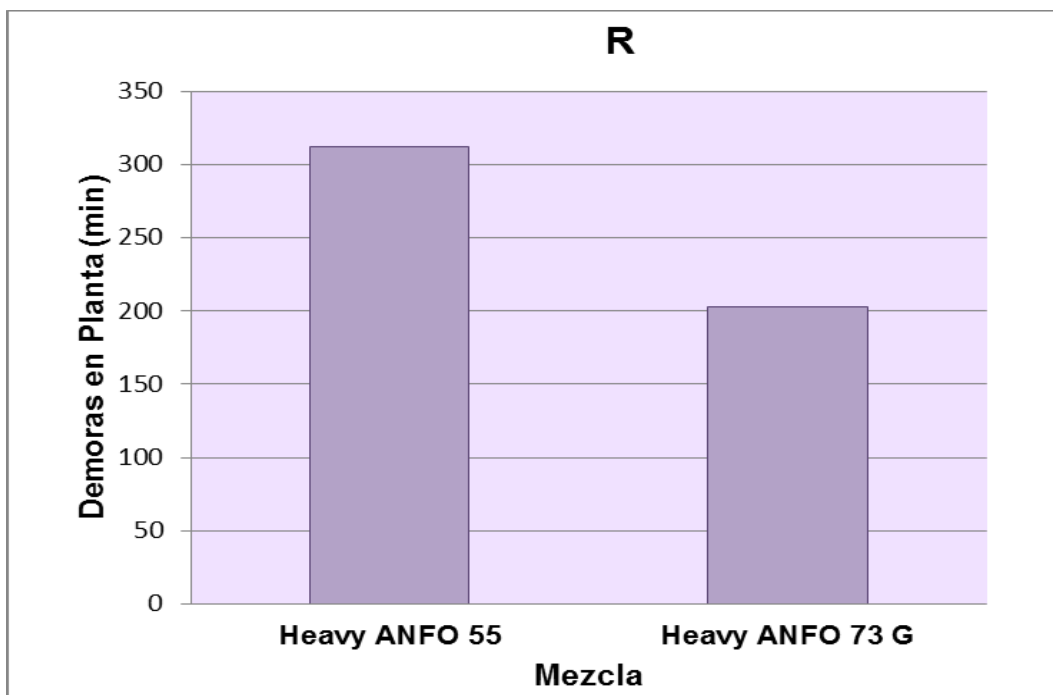


Figura 42. Resultados de demoras en planta vs material de hierro duro.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del material de hierro duro (R) al procesar el material resultante de las voladuras se obtuvo una reducción del 35 % de demoras en planta. Para obtener este porcentaje se trabajó con 10 000 toneladas producidas para poder realizar la comparación.

b. Consumo de energía vs mezcla explosiva

Al no poder mostrar los datos reales de planta se trabajará con porcentajes para poder evidenciar las mejoras que se obtuvieron con las pruebas realizadas por material.

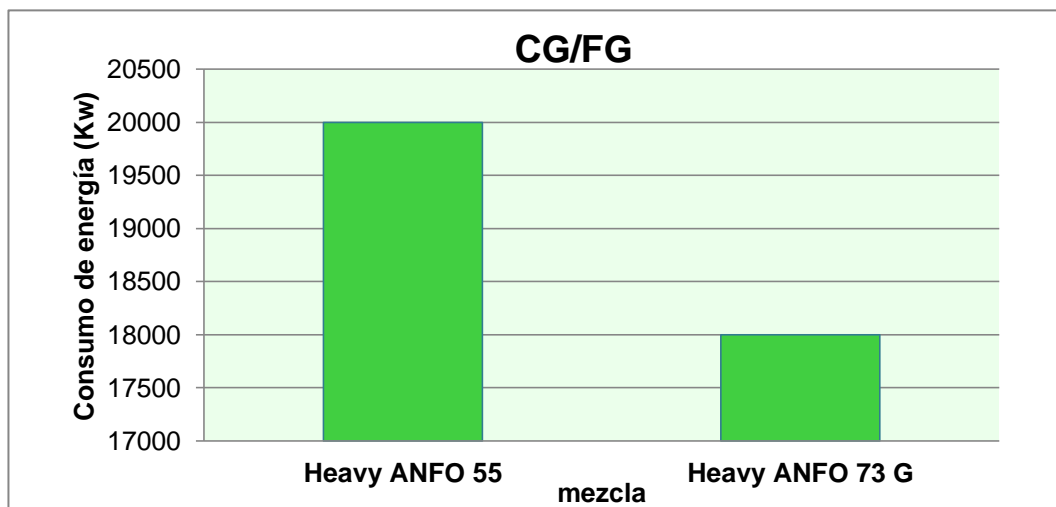


Figura 43. Resultados de consumo de energía vs material de hierro suave malla 5,00 x 5,80 m.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del material de hierro suave (CG/FG) al procesar el material resultante de las voladuras se obtuvo una reducción del 10 % de

consumo de energía en planta. Para obtener este porcentaje se trabajó con 10,000 toneladas producidas para poder realizar la comparación. Un menor consumo de energía nos evidencia que el material que llegó a planta tenía una menor granulometría.

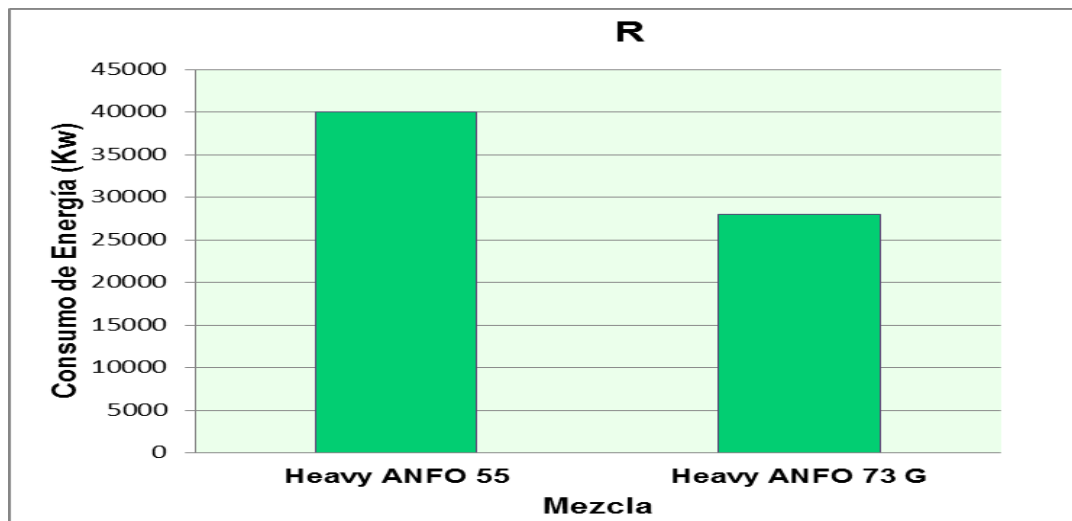


Figura 44. Resultados de consumo de energía vs material de hierro duro.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del material de hierro duro (R) al procesar el material resultante de las voladuras, se obtuvo una reducción del 30 % de consumo de energía en planta. Para obtener este

porcentaje se trabajó con 10,000 toneladas producidas para poder realizar la comparación. Un menor consumo de energía nos evidencia que el material que llegó a planta tenía una menor granulometría.

4.2 Discusión

4.2.1 Análisis económico

Una vez realizado el análisis operativo y comparar los resultados obtenidos de las dos diferentes mezclas, que por lo mostrado tenemos mejoras en la operación que se dan a consecuencia de haber obtenido mejoras significativas en los resultados de la voladura (fragmentación), a continuación se estudiará las ventajas económicas que puede brindar el nuevo producto a la operación.

Para realizar el análisis económico mostraremos el diseño de carga con anfo pesado 55 en base a emulsión matriz y el diseño de carga con anfo pesado 73 en base a emulsión gasificada. Posteriormente, se hará una comparación de costos para poder evaluar cuantitativamente

los resultados, los costos mostrados en este análisis son reales.

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

En primer lugar, es importante indicar que un análisis económico basado en la cantidad de explosivo alojado dentro de un taladro depende directamente de sus dimensiones geométricas (altura y diámetro). Estas variables definen el volumen y por ende la cantidad de explosivo que puede contener. Por tal motivo, este aspecto fue considerado y se hizo un cálculo considerando estos parámetros.

**a) *Análisis económico para mineral de hierro
CG/FG (Suave – Clasificación geomecánica)***

Con los precios unitarios de las materias primas se procedió a calcular el costo por kilo de cada mezcla, para así poder determinar el costo por taladro, para poder realizar una comparación

de costos entre nuestros dos diseños de carga el tradicional con la mezcla anfo pesado 55 en base a emulsión matriz y el diseño de carga de las pruebas con anfo pesado 73 en base a emulsión gasificada. En la Tabla 18 presentamos detallado los costos con sus diferencias.

Tabla 18

Parámetros de diseño.

Parámetros de Diseño	
Diámetro de taladro (cm.)	31,12
Densidad de la roca (g/cc)	4,40
Altura de banco (m)	12,00
Densidad anfo pesado 55 (g/cc)	1,29
Densidad anfo pesado 73 (g/cc)	1,34

Fuente: Compañía minera de hierro.

Tabla 19

Costos unitarios.

Costos unitarios	
1.- Costos de Iniciación	\$
Excel	2,05
Booster	3,16
Total costo de Iniciación	5,21

Fuente: Compañía minera de hierro.

Tabla 20

Costo materias primas.

2.- Costo Materias Primas	\$/kg
Nitrato de Amonio	0,59
Emulsión No Gasificable	0,55
Emulsión Gasificable (Prueba)	0,61
Diesel	1,21

Fuente: Compañía minera de hierro.

Tabla 21

Costo de Anfo.

3.- Costo de Anfo			
ANFO = 94 % Nitrato de Amonio + 6 % Diesel			
* Ejemplo para 300 kg de Anfo			Costo
94 % Nitrato de Amonio	282	kg de Nitrato	166,38
6 % Diesel	18	kg de Diesel	21,8187
Costo por 300 kg de Anfo			188,1987
Costo por Kg de Anfo			0,627329
Densidad Lineal			60,86535

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

Costo de mezclas explosivas anfo pesado 55.

Costo de Mezclas explosivas		
3.- Anfo Pesado 55		\$/kg
Altura de carga (m)	7,5	
Carga Lineal (kg/m)	98,145	
<i>Densidad Explosivo × Diámetro Taladro² x 0,507</i>		
Carga Total en 7,5 m. (kg)	736,09	
Kg. De Emulsión (50 % del total)	368,05	0,5887
Costo total de emulsión	202,42	
Kg. De Anfo (50 % del total)	368,05	
Costo Total de Anfo	230,89	
Costo Total 7,5 m.(730,3842 kg) de Anfo Pesado 55	433,31	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

Costo de mezclas explosivas anfo pesado 73 gasificado.

Costo de Mezclas explosivas		
4.- Anfo Pesado 73 Gasificado		\$/kg
Altura de carga (m)	6,7	
Carga Lineal (kg/m)	101,9495	
<i>Densidad Explosivo × Diámetro Taladro² x 0,507</i>		
Carga Total en 7,5 m. (kg)	683,06	
Kg. De Emulsión (50 % del total)	478,14	0,6152
Costo total de emulsión	291,67	
Kg. De Anfo (50 % del total)	204,92	
Costo Total de Anfo	128,55	
Costo Total 7,5 m.(730,3842 kg) de Anfo Pesado 55	420,22	

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo definido los parámetros de diseño y los costos por mezcla explosiva en base a los costos unitarios se realizará el análisis económico con el uso de cada mezcla explosiva.

- Análisis Económico para Mineral de hierro suave CG/FG

Tabla 24

Parámetros de diseño.

Valorización Económica Cambio Explosivo Mina de Hierro		
Parámetros de Diseño	A. P. 73 G.	AP 50
Díámetro Taladro (m):	0,31115	0,31115
Densidad Explosivo(g/cc):	1,34	1,29
Energía Explosivo (joules per gram):	2,829	2,599
Densidad Roca (g/cc):	4,4	4,4
Altura de Banco (m):	12	12
Angulo de Taladro (0 = vertical):	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en la Tabla 24 que la energía del explosivo a prueba (anfo pesado 73 gasificado) es mayor en 0,23 Joule/gramo que el anfo pesado 55. Parte importante en el presente trabajo a partir de ahí se justifica el precio superior de la emulsión a prueba.

Tabla 25

Comparación de anfo pesado 73 gasificado y anfo pesado 55.

N°	Ítem	Descripción	Anfo Pesado 73 G.	Anfo Pesado 55
1	Longitud de Taco (m).	Longitud de taco del diseño (m)	5,5	5,5
2	Factor de Taco	Factor de Taco = Longitud de Taco / Diámetro de Taladro	17,7	17,7
3	Distribución de Energía	Energía Distribución = (Altura Banco - Longitud Taco)/Altura Banco	54 %	54 %
4	Sobreperforación (m).	Longitud de Sobreperforación de diseño	1,0	1,0
5	Factor de Sobreperforación	Factor de Sobreperforación = Sobreperforación/Diámetro de Taladro	3,2	3,2
6	Altura de Taladro (m).	Altura taladro = Altura de Banco + Sobreperforación	13,0	13,0
7	Altura Carga Taladro (m).	Carga Total Taladro = Altura taladro - Longitud de Taco (Para gasificado menos 0.8 de gasificación)	6,7	7,5
8	Carga Lineal (m).	Carga Lineal = 785 x Diámetro taladro ² x Densidad Explosivo	101,8	98,0
9	Carga Total por taladro (kg).	Carga Total Taladro = Altura Carga Taladro x Carga Lineal	682	735
10	Energía Total por Taladro (Kcal)	Energía Total = Carga Total taladro x Energía explosivo	1,929	1,910
11	Burden (m.)	Distancia Burden	5,8	5,5
12	Factor de Burden	Factor de Burden = Burden (m) / Diámetro Taladro (m)	19	18
13	Relación de Rigidez	Relación de rigidez = Altura de Banco / Burden Relación de rigidez mayor a 2,0 son mejores para aprovechar eficientemente la energía	2,1	2,2
14	Espaciamiento (m.)	Distancia Espaciamiento	5,0	4,8
15	Factor de Espaciamiento	Factor Espaciamiento = Espaciamiento / Burden	0,86	0,87
16	Toneladas métricas por Taladro (bcm)	Toneladas métricas por Taladro = Burden x Espaciamiento x Altura Banco	348	317
17	Toneladas por Taladro	Tonnes Per Hole = Bcm Per Hole x Rock Density	1531	1395
18	Factor de Potencia	Factor de Potencia (kg/t.) = Carga Total por Taladro / Toneladas por Taladro	0,45	0,53
19	Factor de Energía	Factor Energía (kcal/t.) = Energía Total por Taladro / Toneladas por Taladro	1,26	1,37

Fuente: Elaboración propia.

En la primera parte de la Tabla 25 podemos resaltar:

- El anfo pesado 73 gasificado eleva su carga inicial en 0,80 m. Ver anexo 03 (Programa CalcDens el cual calcula altura de gasificación del explosivo en base a las características del terreno y del explosivo gasificado.)
- Tenemos a igual longitud de carga menos kilos de explosivo por taladro.
- El anfo Pesado 73 gasificado aporta mayor energía por taladro, razón por la cual se han obtenido mejores resultados en fragmentación.

En la segunda parte de la Tabla 25 podemos resaltar:

- Tenemos un menor factor de potencia con el anfo pesado 73 gasificado, se busca usar la cantidad adecuada del

explosivo para romper este tipo de roca suave.

- Se procedió en aumentar la malla de diseño (burden x espaciamiento) de 4,80 x 5,50 m. a 5,00 x 5,80 m. con el objetivo de buscar ahorros en perforación y voladura.
- La propuesta de aumentar la malla se da en la zona suave puesto que el explosivo al tener mayor energía lo permite. Los nuevos parámetros de diseño se calcularon por el método de modelo de Crosby & Pinco.

- **Modelo de Crosby & Pinco**

En el artículo "More Power to the Pop" escrito por W. Crosby y M. Pinco, ambos científicos plantean un modelo matemático basado en la potencia relativa por volumen (RBS), que en el caso de no cambiar el diámetro del taladro, se puede determinar nuevas dimensiones

del burden y el espaciamento, utilizando un nuevo explosivo de una potencia relativa por volumen en particular en vez del explosivo en uso, pero en este caso es necesario mantener invariables las dimensiones del taco (el volumen de explosivo es invariable) y la sobre perforación, las nuevas dimensiones se pueden calcular con la ecuación siguiente:

$$\left[\frac{RBSa}{RBSu} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad [2]$$

Donde:

RBSu = explosivo en uso.

RBSa = explosivo a usar.

Du = dimensión en uso.

Da = dimensión a usar.

En nuestro caso:

Potencia relativa por volumen (RBS): Esta es la energía disponible por volumen de explosivo

comparado a igual volumen de anfo, con una densidad de 0,85 g/cc. Esto se calcula dividiendo la ABS de un explosivo por la ABS del anfo y multiplicado por 100.

$$RBS = \frac{ABS \text{ explosivo}}{ABS \text{ ANFO}} \times 100 \quad [3]$$

Potencia absoluta por volumen (ABS): Esta es la medida de la cantidad de energía disponible (en calorías) en cada centímetro cúbico de explosivo. Esto se obtiene multiplicando la potencia absoluta por peso (AWS), esta variable es dada por el fabricante en las hojas técnicas del producto, por la densidad del explosivo.

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

Calculando:

- **ABS del anfo:**

$$AWS = 3,82 \text{ (J/g.)}$$

$$DENSIDAD = 0,85 \text{ (g/cc)}$$

$$ABS = AWS \times \delta_{\text{explosivo}} = 3,247 \text{ (J/cc)}$$

- **ABS del anfo pesado 73 gasificado:**

$$\text{AWS} = 2,829 \text{ (J/g.)}$$

$$\text{DENSIDAD} = 1,34 \text{ (g/cc)}$$

$$\text{ABS} = \text{AWS} \times \delta_{\text{explosivo}} = 3,81915 \text{ (J/cc)}$$

- **ABS del anfo pesado 55:**

$$\text{AWS} = 2,599 \text{ (J/g.)}$$

$$\text{DENSIDAD} = 1,29 \text{ (g/cc)}$$

$$\text{ABS} = \text{AWS} \times \delta_{\text{explosivo}} = 3,35271 \text{ (J/cc)}$$

- **RBS del anfo pesado 73 gasificado:**

$$\text{ABS anfo pesado 73 gasificado} = 3,81915 \text{ (J/cc.)}$$

$$\text{ABS anfo} = 3,247 \text{ (J/cc)}$$

$$\text{RBS anfo pesado 73 gasificado} = 117,62$$

- **RBS del anfo pesado 55:**

$$\text{ABS anfo pesado 55} = 3,35271 \text{ (J/cc.)}$$

$$\text{ABS anfo} = 3,247 \text{ (J/cc)}$$

$$\text{RBS anfo pesado 55} = 103,26$$

Aplicando el Modelo de Crosby & Plinco

tenemos:

$$\left[\frac{RBSa}{RBSu} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad [4]$$

Dónde:

$$RBSu = 103,26$$

$$RBSa = 117,62$$

$$Du = 4,8 \text{ m.} \times 5,5 \text{ m.}$$

$$\sqrt[3]{\frac{117,62}{103,26}} \times 4,8 = 5,01 \text{ m.} \rightarrow \text{Burden Nuevo}$$

$$\sqrt[3]{\frac{117,62}{103,26}} \times 5,5 = 5,74 \text{ m.} \rightarrow \text{Espaciamiento Nuevo}$$

De acuerdo al modelo la nueva dimensión de la malla de perforación es 5,01 m. x 5,74 m. por un tema operativo y de diseño la malla elegida quedó en 5,00 m. x 5,80 m. Con este aumento en el siguiente análisis económico para 1 000 000 t. requeridas se logrará un ahorro económico significativo.

Tabla 26

Análisis económico realizado para 1 000 000 toneladas producidas.

Costos unitarios	Anfo pesado 73 G.	Anfo pesado 55
Producción requerida	1000000,00	1000000,00
Toneladas por taladro	1531,00	1395,00
Altura total del taladro	13,00	13,00
Costo perforación \$/m.	11,00	11,00
Costo explosivo por kilogramo	0,62	0,59
Costo de iniciación por taladro	5,21	5,21
Costo mano de obra por taladro	12,00	12,00
Costos adicionales	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos un mayor costo de explosivo por kilogramo para el anfo pesado 73 gasificado, el cual está justificado por su mayor contenido de energía lo que permite ampliar la malla obteniendo buenos resultados de fragmentación. Pero al cargar menos kilogramos por taladro tenemos un costo inferior, además al ampliar la malla obtenemos ahorros en perforación, como se puede ver tenemos mayor tonelaje roto por taladro con el anfo pesado 73 gasificado de 1531 t/tal versus los 1395 t/tal del anfo pesado 55 tradicional.

Tabla 27

Costo total.

N°	Descripción	Descripción	Anfo Pesado 73G.	Anfo Pesado 55
1	Total Taladros Requeridos	Total Taladros Requeridos = Producción Requerida / Producción por taladro	653,17	716,85
2	Total Metros Perforación Requeridos	Total Metros Perforación Requeridos = Taladros Requeridos x Altura de Taladros	8491,18	9319,00
3	Costo Total de Perforación	Costo Total de Perforación = Metros Requeridos x Costo Perforación por Metro	93403,00	102508,96
4	Costo Unitario de Perforación	Costo Unitario Perforación = Costo Total / Producción Requerida	0,09	0,10
5	Total de Mezcla Explosiva	Total Mezcla Explosiva = Carga Total por Taladro x Número total taladros requeridos	445460,48	526881,72
6	Costo Total de Mezcla Explosiva	Costo Total Mezcla Explosiva = Total Mezcla explosiva x Costo Explosivo por Kilogramo	274047,29	310175,27
7	Costo Unitario de Mezclas Explosivas	Costo Unitario Mezclas Explosivas = Costo Total Explosivo / Producción Requerida	0,27	0,31
8	Costo de Iniciación	Costo Total de Iniciación = Costo de Iniciación por Taladro x Número de Taladros	3403,00	3734,77
9	Costo Unitario de Iniciación	Costo Unitario de Iniciación = Total Costo Iniciación / Producción Requerida	0,0034	0,0037
10	Costo Total de Labor	Costo Total de Labor = Costo Mano de Obra por Taladro x Número Taladros	7838,01	8602,15
11	Costo Unitario de Labor	Costo Unitario Labor = Costo Total Labor / Producción Requerida	0,01	0,01
12	COSTO TOTAL	Costo Total = Item 3 + Item 6 + Item 8 + Item 10	\$378,691	\$425,021
13	Costo Total Unitario	Costo Total Unitario = Costo Total / Producción Requerida	\$0,3787	\$0,4250

Fuente: Elaboración propia.

Por cada 1 000 000 toneladas de mineral requeridas obtenemos un ahorro de \$46 330, para una proyección de 12 000 000 de mineral requerido al año tenemos un ahorro anual de \$ 550 960.

Al ahorro económico demostramos se suma estos parámetros de diseño y carga explosiva, se obtuvo mejor resultado en la fragmentación y con todo los beneficios que trae consigo la propuesta para este tipo de mineral, se finalizó con éxito.

***b) Análisis económico para mineral de hierro R
(Duro – clasificación geomecánica)***

- Análisis económico para mineral de hierro refractario R, clasificado como duro, competente y macizo.

Tabla 28

Parámetros de diseño.

Valorización Económica Cambio Explosivo Mina de Hierro		
Parámetros de Diseño	Anfo pesado 73 G.	Anfo Pesado 55
Diámetro Taladro (m):	0,31115	0,31115
Densidad Explosivo(g/cc):	1,34	1,29
Energía Explosivo (joules per gram):	2,829	2,599
Densidad Roca (g/cc):	4,4	4,4
Altura de Banco (m):	12	12
Angulo de Taladro (0 = vertical):	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en la Tabla 28 que la energía del explosivo a prueba (anfo pesado 73 G.) es mayor en 0,23 Joule/gramo que el anfo pesado 55. Parte importante en el presente trabajo a partir de ahí se justifica el precio superior de la emulsión a prueba.

Tabla 29

Comparación de anfo pesado 73 gasificado y anfo pesado 55 gasificado para mineral de hierro suave.

N°	Ítem	Descripción	Anfo Pesado 73 G.	Anfo Pesado 55
1	Longitud de Taco (m).	Longitud de taco del diseño (m)	5,2	5,5
2	Factor de Taco	Factor de Taco = Longitud de Taco / Diámetro de Taladro	16,7	17,7
3	Distribución de Energía	Energía Distribución = (Altura Banco - Longitud Taco)/Altura Banco	57 %	54 %
4	Sobreperforación (m).	Longitud de Sobreperforación de diseño	1,0	1,0

Continúa tabla...

Sigue tabla...

5	Factor de Sobreperforación	Factor de Sobreperforación = Sobreperforación/Diámetro de Taladro	3,2	3,2
6	Altura de Taladro (m).	Altura taladro = Altura de Banco + Sobreperforación	13,0	13,0
7	Altura Carga Taladro (m).	Carga Total Taladro = Altura taladro - Longitud de Taco (Para gasificado menos 0,8 de gasificación)	7,0	7,5
8	Carga Lineal (m).	Carga Lineal = 785 x Diámetro taladro ² x Densidad Explosivo	101,8	98,0
9	Carga Total por taladro (kg).	Carga Total Taladro = Altura Carga Taladro x Carga Lineal	713	735
10	Energía Total por Taladro (Kcal)	Energía Total = Carga Total taladro x Energía explosivo	2,017	1,910

Fuente: Elaboración propia.

Diferencia resaltante en la primera parte de la Tabla 29 tenemos un taco de 5,20 m. para el anfo pesado 73 gasificado a diferencia de 5,50 para el diseño de carga con anfo pesado 55, con esto se busca reducir la fragmentación sobre todo en la zona de taco principal problema de las voladuras realizadas en este material.

Un punto adicional importante de resaltar es la energía total por taladro que se llega a obtener con el ANFO pesado 73 gasificado es superior al anfo pesado 55.

Tabla 30

Comparación de anfo pesado 73 gasificado y anfo pesado 55 gasificado para mineral de hierro duro.

N°	Ítem	Descripción	Anfo Pesado 73 G.	Anfo Pesado 55
1	Longitud de Taco (m).	Longitud de taco del diseño (m)	5,2	5,5
2	Factor de Taco	Factor de Taco = Longitud de Taco / Diámetro de Taladro	16,7	17,7
3	Distribución de Energía	Energía Distribución = (Altura Banco - Longitud Taco)/Altura Banco	57 %	54 %
4	Sobreperforación (m).	Longitud de Sobreperforación de diseño	1,0	1,0
5	Factor de Sobreperforación	Factor de Sobreperforación = Sobreperforación/Diámetro de Taladro	3,2	3,2
6	Altura de Taladro (m).	Altura taladro = Altura de Banco + Sobreperforación	13,0	13,0
7	Altura Carga Taladro (m).	Carga Total Taladro = Altura taladro - Longitud de Taco (Para gasificado menos 0,8 de gasificación)	7,0	7,5
8	Carga Lineal (m).	Carga Lineal = 785 x Diámetro taladro ² x Densidad Explosivo	101,8	98,0
9	Carga Total por taladro (kg).	Carga Total Taladro = Altura Carga Taladro x Carga Lineal	713	735
10	Energía Total por Taladro (Kcal)	Energía Total = Carga Total taladro x Energía explosivo	2,017	1,910
11	Burden (m.)	Distancia Burden	5,5	5,5
12	Factor de Burden	Factor de Burden = Burden (m) / Diámetro Taladro (m)	18	18
13	Relación de Rigidez	Relación de rigidez = Altura de Banco / Burden Relación de rigidez mayor a 2,0 son mejores para aprovechar eficientemente la energía	2,2	2,2
14	Espaciamiento (m.)	Distancia Espaciamiento	4,8	4,8
15	Factor de Espaciamiento	Factor Espaciamiento = Espaciamiento / Burden	0,87	0,87
16	Toneladas métricas por Taladro (bcm)	Toneladas métricas por Taladro = Burden x Espaciamiento x Altura Banco	317	317
17	Toneladas por Taladro	Tonnes Per Hole = Bcm Per Hole x Rock Density	1395	1395
18	Factor de Potencia	Factor de Potencia(kg/bcy) = Carga Total por Taladro / Bcm Por Taladro	2,25	2,32
19	Factor de Potencia	Factor de Potencia (kg/t.) = Carga Total por Taladro / Toneladas por Taladro	0,51	0,53
20	Factor de Energía	Factor Energía (kcal/t.) = Energía Total por Taladro / Toneladas por Taladro	1,45	1,37

Fuente: Elaboración propia

En la comparación de ambas mezclas explosivas se ha utilizados los mismos parámetros de diseño de malla burden y espaciamiento 4,80 x 5,50 m.

Las diferencias se dan en las características propias que nos otorga cada mezcla explosiva, en cuanto a energía del explosivo y la altura de gasificación, con anfo pesado 73 gasificado tenemos un factor de potencia de 0,51 kg/t. y con el anfo pesado 55 teníamos un factor de potencia superior 0,53 kg/t. Adicional al análisis se puede añadir que el factor de energía es un parámetro que nos permite determinar la cantidad de energía usada, para fragmentar una tonelada de mineral, lo cual se convierte en un factor importante a medir en nuestro caso tenemos una diferencia de 0,08 a favor del anfo pesado 73 gasificado.

Tabla 31

Costos unitarios, valorización para 1 000 000 toneladas requeridas.

Costos unitarios	Anfo pesado 73 g.	Anfo pesado 55
Producción requerida	1000000,00	1000000,00
Toneladas por taladro	1395,00	1395,00
Altura total del taladro	13,00	13,00
Costo perforación \$/m.	11,00	11,00
Costo explosivo por kilogramo	0,62	0,59
Costo de iniciación por taladro	5,21	5,21
Costo mano de obra por taladro	12,00	12,00
Costos adicionales	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos un mayor costo del explosivo anfo pesado 73 gasificado, la emulsión con la cual se fabrica este explosivo tiene un precio superior a la emulsión con la cual se fabrica el anfo pesado 55. Ver Tabla 31.

Tabla 32

Comparación de costo total para 1 000 000 toneladas requeridas.

N°	Descripción	Descripción	Anfo Pesado 73 G.	Anfo Pesado 55
1	Total Taladros Requeridos	Total Taladros Requeridos = Producción Requerida / Producción por taladro	716,85	716,85
2	Total Metros Perforación Requeridos	Total Metros Perforación Requeridos = Taladros Requeridos x Altura de Taladros	9319,00	9319,00
3	Costo Total de Perforación	Costo Total de Perforación = Metros Requeridos x Costo Perforación por Metro	102508,96	102508,96

Continúa tabla...

Sigue tabla...

4	Costo Unitario de Perforación	Costo Unitario Perforación = Costo Total / Producción Requerida	0,1025	0,1025
5	Total de Mezcla Explosiva	Total Mezcla Explosiva = Carga Total por Taladro x Número total taladros requeridos	511111,11	526881,72
6	Costo Total de Mezcla Explosiva	Costo Total Mezcla Explosiva = Total Mezcla explosiva x Costo Explosivo por Kilogramo	314435,56	310175,27
7	Costo Unitario de Mezclas Explosivas	Costo Unitario Mezclas Explosivas = Costo Total Explosivo / Producción Requerida	0,3144	0,3102
8	Costo de Iniciación	Costo Total de Iniciación = Costo de Iniciación por Taladro x Número de Taladros	3734,77	3734,77
9	Costo Unitario de Iniciación	Costo Unitario de Iniciación = Total Costo Iniciación / Producción Requerida	0,00373	0,00373
10	Costo Total de Labor	Costo Total de Labor = Costo Mano de Obra por Taladro x Número Taladros	8602,15	8602,5
11	Costo Unitario de Labor	Costo Unitario Labor = Costo Total Labor / Producción Requerida	0,0086	0,01
12	COSTO TOTAL	Costo Total = Ítem 3 + Ítem 6 + Ítem 8 + Ítem 10	\$429,281	\$425,021
13	Costo Total Unitario	Costo Total Unitario = Costo Total / Producción Requerida	\$0,4293	\$0,4250

Fuente: Elaboración propia.

Por cada 1 000 000 toneladas de mineral requeridas obtenemos un ahorro de \$. 4 260, para una proyección de 12 000 000 de mineral requerido al año tenemos un ahorro anual de \$. 51 120.

Al ahorro económico demostrado se suma que mediante estos parámetros de diseño y carga explosiva se obtuvo mejor resultado en la fragmentación y con todo los

beneficios que trae consigo la propuesta para este tipo de mineral se finalizó con éxito.

4.3 Implementación y control

Una vez demostrado con resultados los beneficios del uso de la emulsión gasificable en una mezcla de heavy anfo 73 gasificado versus la mezcla estándar usada en la operación anfo pesado 55 en base a emulsión matriz. Detallaremos los pasos a seguir para su correcta implementación y control así evitar posibles problemas a futuro puesto que la mina y en especial el área de perforación y voladura primera vez que trabajará con este producto.

4.3.1 Análisis costo beneficio

En base al análisis discutido en el capítulo anterior, se llega a las siguientes conclusiones costo-beneficio, donde se decide cual explosivo debe ser utilizado según sus ventajas y desventajas que presentaron durante el estudio. Es viable el reemplazo de las mezclas de anfo pesado 55 a base de emulsión matriz por el anfo pesado 73 a base de emulsión gasificable, debido a las siguientes ventajas:

- Se reduce sustancialmente la generación de gases nitrosos, inclusive en presencia de agua, siendo esta característica muy importante en términos de seguridad, medio ambiente y productividad.
- El mayor contenido de emulsión en la mezcla (70 %) brinda mayor resistencia a flujos de agua dinámica que dañan físicamente al explosivo.
- Una ventaja muy importante vendría hacer que es más económico, con el reemplazo del anfo pesado 55 obtenemos un ahorro de **13,09 \$** por taladro para mineral de hierro CG/FG (Material suave) y para mineral de hierro R (Material duro) un ahorro de **5,94 \$/taladro**. Se debe a la gasificación del explosivo que permite reducir los kilos por taladro, y no necesariamente reducir la altura de carga.

Tabla 33

Costo por taladro CG/FG.

Costo por Taladro CG/FG (\$)				
Tipo de Explosivo	Altura de Carga (m)	Carga por taladro (kg.)	Costo Unitario Explosivo	Costo por taladro CG/FG
Heavy ANFO 55	7,5	735	0,59	432,69
Heavy ANFO 73 G.	6,7	682,06	0,62	419,60
Ahorro por Taladro (\$/taladro)				13,09

Fuente: Elaboración propia.

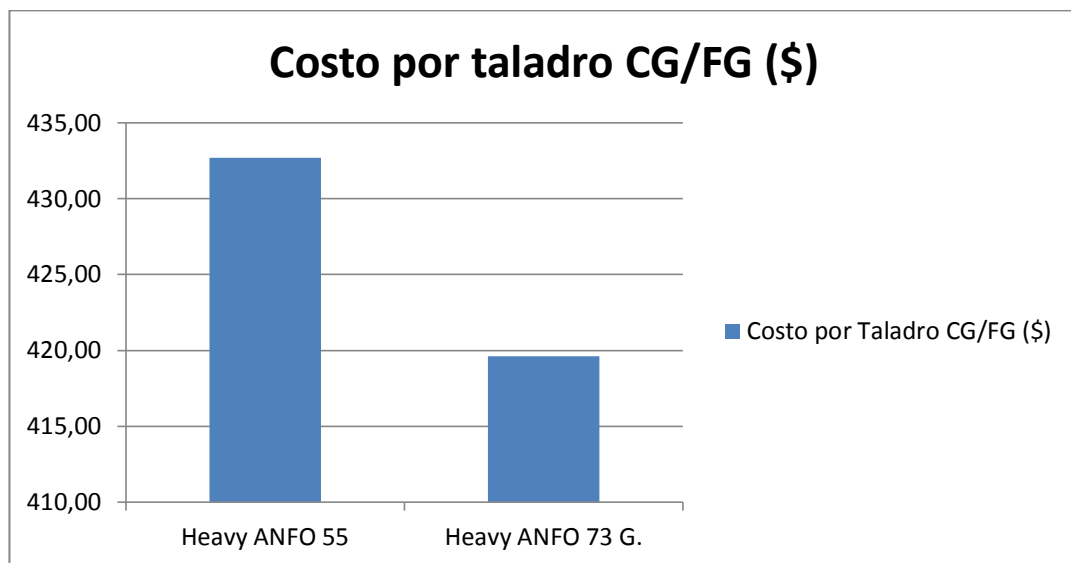


Figura 45. Costo por taladro CG/FG.

Fuente: Elaboración propia.

Tenemos un menor costo por taladro para el explosivo anfo pesado 73 gasificado 13,09 \$/taladro a consecuencia de tener menos kilos por taladro gracias a la gasificación del explosivo.

Tabla 34

Costo por taladro R.

Costo por Taladro CG/FG (\$)				
Tipo de Explosivo	Altura de Carga (m)	Carga por taladro (kg.)	Costo Unitario Explosivo	Costo por taladro CG/FG
Heavy ANFO 55	7,5	735	0,59	432,69
Heavy ANFO 73 G.	7	713	0,62	438,64
Ahorro por Taladro (\$/taladro)				5,94

Fuente: Elaboración propia.

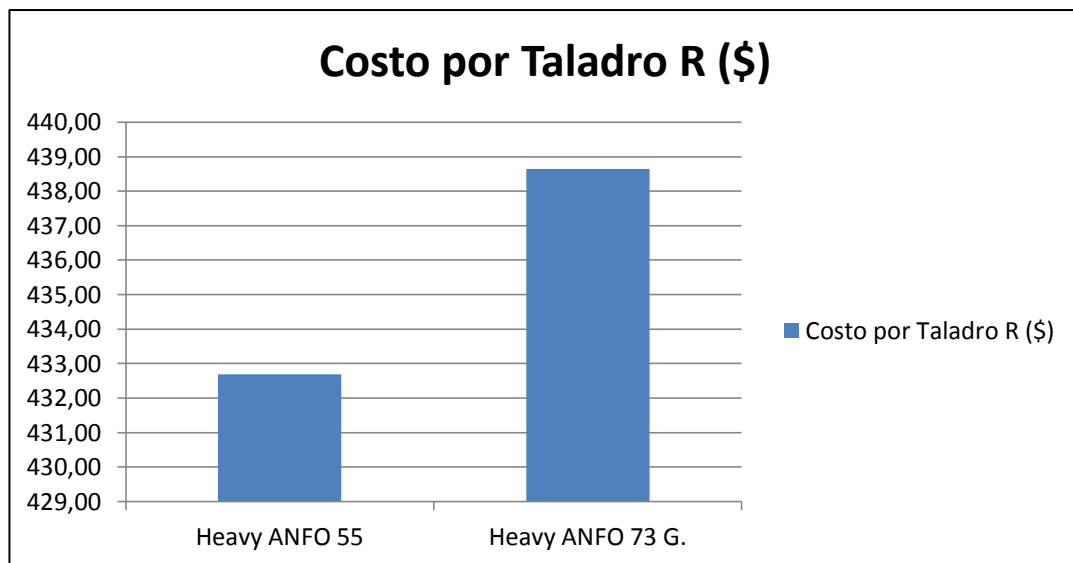


Figura 46. Costo por taladro R.

Fuente: Elaboración propia.

- Se lograron mejores resultados en fragmentación lo que se vio reflejado en un menor consumo de energía en la planta y una considerable disminución de paradas de planta sobre todo para el mineral de hierro R (material duro)

- El reemplazo generará un importante ahorro para el área de Perforación y Voladura con mejores resultados los que se verán reflejados en un ahorro en planta. Todo esto trae consigo un mejor ciclo de minado.

4.3.2 Gestión de stakeholders

Para obtener todos los beneficios del nuevo producto, se tiene que realizar un trabajo conjunto en el área de perforación & voladura, debido que al ser algo novedoso no todos los involucrados están familiarizados con el producto y sus puntos críticos. Es por eso que se detalla en la Tabla 35 el plan de manejo y supervisión de los Stakeholders.

Tabla 35

Plan de manejo y supervisión de los Stakeholders.

Stakeholders	Objetivo	Acciones a realizar
Diseño y Supervisión Per & Vol	Comprometer al área e involucrarnos en el éxito del proyecto.	*Hacer el seguimiento a todo el proyecto. *Hacer los ajustes a los procedimientos de carguío de taladros.
Supervisor de Campo Per & Vol	Comprometer a sus colaboradores en el éxito del proyecto.	*Exigir que se realicen las pruebas en campo de densidad y tiempo de esponjamiento antes de tapar taladros. *Verificar el correcto carguío de taladros. *Identificar puntos de mejora.
Asistencia Técnica – Empresa proveedora de explosivos	Asistir técnicamente en las características del producto.	*Brindar el soporte para medir los parámetros de desempeño del nuevo producto. *Aportar sugerencias para mejorar los procedimientos.

Continúa tabla...

Sigue tabla...

Operador de Camión fabrica	Concientizarlo de su importancia en el éxito del proyecto.	*Capacitarlo en el nuevo sistema que se incluirá en su camión. *Involucrarlo en el proyecto, hacerlo sentir importante.
Personal Carguío de Taladros	Concientizarlos de su importancia en el éxito del proyecto.	*Capacitarlos. *Hacerlos saber de su importancia en la exactitud del wincheo y verificación del esponjamiento del explosivo.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Control

Una vez decidido implementar la utilización del nuevo producto para el reemplazo de la mezcla anfo pesado 55 se proponen medidas de control para que los beneficios sean sostenibles en el tiempo y permitan una mejora continua.

Estas medidas se basan en el control en el uso de este nuevo explosivo y en el seguimiento de los resultados de las voladuras.

4.3.4 Aseguramiento de la calidad

Son las actividades enfocadas asegurar la calidad del proceso de fabricación de un producto. En este caso involucran el carguío de taladros, desde la perforación hasta el tapado con detrito.

Ello permitirá obtener resultados ideales que se traducen en una óptima fragmentación. Esto a su vez está ligado a una buena productividad de los equipos de minado, menores costos en chancado y molienda, influyendo en todo el ciclo de producción de mineral.

También es importante mencionar que el objetivo de este control es mejorar los procesos y eliminar las fuentes de error. Para lograrlo, es necesario tener al personal motivado e involucrado en el proyecto. Cada uno forma parte del proceso de fabricación y su labor está directamente ligada al aseguramiento de la calidad. Las acciones para lograrlo están detalladas en la Tabla 36.

Tabla 36

Actividades para mejoramiento de procesos.

Actividades	Parámetro	Medidas de Control
Perforación	Calidad Taladros perforado.	*Verificar la calidad de paredes y altura. *Comunicar al área de supervisión para tomar las medidas correctivas.
Carguío Taladros	Calibración Camión. Tapado de Taladro	*Realizar el cronograma de calibración del camión y cumplirlo. Pudiendo adelantarlo si se evidencian problemas. *Respetar el tiempo mínimo de esponjamiento (30 minutos).
Explosivo	Muestreo de densidades del camión antes del comienzo del carguío de talados. Calidad de mezcla.	*Notificar a la supervisión en caso de no lograrse la densidad deseada, o si se presenta un fenómeno de gasificación. *Llevar un registro ordenado de los resultados de densidades por proyecto. *Llevar un registro ordenado de los resultados de densidades por proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

Para la verificación cualitativa se usa un agregado de rodamina a la solución de Nitrito de sodio con lo cual se consigue que la mezcla obtenga un color rosáceo, así el personal de piso y operadores pueden darse cuenta de forma visual si se está inyectando la solución de Nitrito de Sodio.

4.3.5 Evaluación de resultados – Calidad

Son aquellos controles que hemos identificado en la etapa de análisis de resultados, para el presente estudio son los que se realizan principalmente después de la voladura para evaluarla e identificar puntos fuertes y aspectos a mejorar.

Tabla 37

Actividades y medidas de control.

Actividades	Parámetro	Medidas de Control
Planta	Demoras – Consumo de Energía.	*Evaluar el progreso de la voladura y su incidencia en mejorar los parámetros de planta como son: Demoras y Consumo de energía.
	Fragmentación.	*Realizar pruebas de fragmentación a los proyectos e identificar puntos de mejora.
Voladuras	Presencia de Humos	*Verificar la generación de humos nitrosos.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El uso del ANFO pesado 73 en base a emulsión gasificable optimiza las operaciones de perforación y voladura, demostró ser más eficiente en términos operativos y económicos sobre el ANFO pesado 55 en base a emulsión matriz, para terreno suave (CG, FG), se consiguió un ahorro para terreno suave de \$ 40 093 por cada 1 000 000.
2. Se incrementó los parámetros de perforación de 4,80 x 5,50 m. a 5,00 x 5,80 m. (malla triangular), consiguiendo un ahorro para terreno suave de \$ 40 093 por cada 1 000 000 toneladas producidas, para una producción anual de 12 000 000 toneladas se tendrá un ahorro anual de \$ 481 116.
3. Se demostró una mayor eficiencia del ANFO pesado 73 gasificado, se alcanzaron mejores resultados en velocidad de detonación con lo cual se aprovecha la mayor energía específica que contiene la mezcla explosiva.

RECOMENDACIONES

1. Existen puntos críticos en el uso del ANFO pesado 73 a base de emulsión gasificable, los cuales requieren constante monitoreo (control de densidades, tiempo de esponjamiento, inyección de nitrito de sodio y calibración de camiones-fábrica). Además, es importante contar con operadores altamente capacitados.
2. Se recomienda establecer mecanismos de control y supervisión post implementación para lograr resultados exitosos constantemente y tener una mejora continua en cuanto a resultados de fragmentación, seguridad y medio ambiente. Uno de estos mecanismos es establecer calibraciones periódicas de camiones-fábrica.
3. Se necesita tener siempre actualizados los registros de toma de densidades en campo y los registros de resultados de las voladuras.

4. Se recomienda tener especial cuidado cuando se va utilizar una emulsión recién llegada a la operación puesto que su temperatura será alta, y la emulsión caliente reacciona de una forma más rápida con la solución de nitrito de sodio, por lo que se tendrá que reducir la dosis. No es recomendable utilizar la emulsión recién llegada a la operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alcalá, E.; Flores, A. y Beltrán A. (2012) Manual de entrenamiento minero. Bolivia: SERGEOTECMIN.
2. Bampfield, H.; Morrey, W. (1984). *Emulsion explosives. CIM Third Coal Operators' Conference. Fernie, British Columbia, Canada, September, Paper N° 3.*
3. Bergman, S. (2005). *Funksjonell bergklassifisering. (Functional classification of rock masses) (in Swedish).* IVA meddelande nr. 142 pp. 115-128.
4. Cochilco. (2016). Necesidades futuras del sector minero.
<https://www.cochilco.cl/Paginas/Inicio.aspx>
5. Deere, D. (1963). *Technical Description of Cores for Engineering Purposes*, Rock mechanic and engineering geology 1 pp 16-22.
6. Enaex (2000). *Manual Práctico de Voladura*. Madrid: IGME.
7. EXSA. (2001). *Manual Práctico de Voladura*. Lima: EXSA.
8. Fuerstenau M. (1997). *Principles of mineral processing*. Amsterdam: Elsevier.

9. Konya, C.; Albarrán, E. (1998). *Diseño De Voladuras*. México D.F.: Ediciones Cuicatl.
10. Lizárraga, M. (2006). *Análisis de Geometría Digital de Imágenes en la Evaluación de Fragmentación de voladura de rocas* (Tesis de Grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
11. López, C. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Scribd. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/209393479/Manual-de-Perforacion-y-Voladura-de-Rocas-LOPEZ-JIMENO>
12. López, C.; López, E. y García, P. (2003). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: ITGE.
13. Muñoz, G. y Quintero, J. (2001). *Como desarrollar competencias investigativas en la educación*. Calda: Cooperativa Editorial Magisterio.
14. Orica. (2009). *Técnicas y tecnologías de voladura*. Lima: *Tecnología minera*. Recuperado de <http://www.tecnologiaminera.com/tm/novedad.php>

15. Watanabe, J. (2014). Explosivos - tipos y propiedades. Cajamarca:
Monografías.com. Recuperado de
[http://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-
tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-
propiedades.shtml#ixzz4RfWNu9pf](http://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-propiedades.shtml#ixzz4RfWNu9pf)
16. Alcalá, E.; Flores, A. y Beltrán A. (2012) Manual de entrenamiento
minero. Bolivia: SERGEOTECMIN.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿Cómo mejorar la fragmentación para incrementar la producción de la planta y disminuir su consumo de energía, sin realizar un gran incremento de nuestros costos de perforación y voladura?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>a. Se podrá lograr una mayor velocidad de detonación con un Anfo Pesado 73 en base a emulsión gasificable</p> <p>b. Se podrá demostrar un ahorro económico con este nuevo explosivo.</p> <p>c. Se podrá gasificar el explosivo sin disminuir su velocidad de detonación.</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Determinar las ventajas técnicas, operativas y económicas que se conseguirían con la utilización de la Emulsión Gasificable en comparación con la emulsión Matriz como componente en la fabricación de Anfo Pesado en el proceso de Voladura.</p> <p>OBJETIVO ESPECÍFICOS</p> <p>a. Demostrar una mayor eficacia de los beneficios de la emulsión gasificable tanto para la empresa minera como para la empresa proveedora de explosivos disminuyendo el costo por metro lineal y por taladro usando Anfo pesado a base de Emulsión Gasificable.</p> <p>c. Poder aumentar la columna de carga.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>La utilización de Anfo pesado 73 en base a Emulsión Gasificable de Anfo Pesado 55 es factible que mejore la Fragmentación, por ende los costos de voladura en una Mina de Hierro.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <p>a. El explosivo gasificable posee mayor energía en su mezcla Anfo Pesado 73.</p> <p>b. La gasificación del explosivo nos brindará beneficios económicos y operativos.</p> <p>c. La velocidad de detonación del Anfo Pesado 73 gasificado estará dentro de los rangos establecidos</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>-Diseño de voladura (factor de carga, burden, espaciamento, altura de banco, altura de carga, sobre-perforación, longitud de taco, densidad del explosivo y secuencia de iniciación).</p> <p>-Características geotécnicas de la roca (densidad de roca, RQD, UCS, módulo de Young, y el espaciamento, dirección y buzamiento de familias de juntas y fallas).</p> <p>-Características del explosivo: Heavy Anfo 73 gasificado.</p> <p>-En planta: potencia máxima disponible de los circuitos de chancado y molienda, disponibilidad por mantenimiento.</p> <p>INDICADORES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Factor de Potencia - Retención de Taco <p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>-En la perforación y voladura: Tamaño medio de fragmento X50, tamaño de fragmento al P80 y P20, índice de uniformidad n, tamaño máximo de fragmento X_{máx}, VOD y densidad del Explosivo.</p> <p>-En chancado y molienda: P80 del producto de los circuitos de chancado y molienda, porcentaje de carga re-circulante, P80 en el ciclón O/F del circuito de molienda, rendimiento y potencia del circuito de molienda, costo total de chancado y molienda.</p> <p>INDICADORES:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demoras dentro del ciclo de carguío - Numero de Voladuras Secundaria - Consumo de Energía en Planta 	<p>TIPO DE INVESTIGACIÓN</p> <p>Aplicada</p> <p>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</p> <p>Experimental</p> <p>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN</p> <p>Cualitativo y Cuantitativo</p> <p>TÉCNICA:</p> <p>Herramienta de mejora DIMAIC</p> <p>POBLACIÓN</p> <p>Mineral Volado - Fragmentado</p>

Anexo 2. Procedimiento para la determinación de densidades

2.3.1.1. Densidad de líquidos y sólidos

La densidad es una propiedad específica para cada sustancia. Es la relación entre la masa y el volumen de la sustancia.

Las densidades de los líquidos o gases se pueden determinar midiendo independientemente la masa y el volumen se determina indirectamente midiendo el desplazamiento de volumen de un líquido por efecto de la masa del sólido. Para la determinación de la masa de una sustancia se utiliza la balanza

2.3.1.2. Densidad de explosivos

Se define densidad de explosivo, a la cantidad de explosivo contenido en una unidad de volumen. Generalmente se expresa en g/cm^3 . La densidad del agua es $1,00 \text{ g/cm}^3$

Consideraciones a tener en cuenta:

- Si la densidad del explosivo es mayor a 1,00, el explosivo se hunde en el agua.

- Si la densidad del explosivo es menor a 1,00, el explosivo flota en el agua.
- Los cuerpos sólidos suelen tener mayor densidad que los líquidos y éstos tienen mayor densidad que los gases.
- Existe una fuerte relación entre el explosivo, la sensibilidad, la velocidad de detonación (VOD) y con el diámetro crítico.

La primera pregunta es esta: ¿Cuál es la fórmula para determinar la densidad?

Como sabemos, la fórmula de la densidad es la siguiente:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \longrightarrow d = \frac{m}{v} \longrightarrow d = \frac{\text{gr}}{\text{cc}}$$

Los explosivos con densidades más altas generan más energía.

Los explosivos son suministrados en diferentes densidades para que el operador de voladura controle la energía total liberada en un taladro, de acuerdo a las particulares condiciones de voladura y así obtener los resultados deseados.

3. Conceptos de densidades

3.1. Densidad lineal

Es la que se usa para medir la densidad de hilos, cables, varillas, alambres, etc. Resulta de la división de la masa entre la longitud del cuerpo.

Densidad lineal = masa/longitud, en unidades de masa sobre longitud, ejemplos: kg/m, g/cm, lb/pulg. Por ejemplo si un cable de 10 metros pesa 5 kilogramos, tiene una densidad lineal de 0,5 kg/m

3.2. Densidad superficial

Es la que se usa para medir la densidad de placas, láminas, cartones, pisos, etc. Se obtiene dividiendo la masa entre el área del cuerpo.

Densidad superficial = masa / área, en unidades de masa entre unidades de superficie, ejemplos: kg/metro cuadrado, gramos /centímetro cuadrado, libras / pulgada cuadrada.

Por ejemplo si un techo de un cuarto de 4 m x 4 m (16 metros cuadrados) pesa 1 000 kilogramos, tiene una densidad superficial de 62,5 kg/metro cuadrado.

3.3. Densidad volumétrica

Es la que se usa para medir la densidad de cuerpos de 3 dimensiones (largo, ancho y alto), como bloques, cubos, etc. Se obtiene dividiendo la masa entre el volumen del cuerpo.

Densidad volumétrica = masa / volumen, en unidades de masa sobre unidades de volumen, ejemplos: kg/metro cúbico, gramos /centimetro cúbico, libras / pulgada cúbica. Por ejemplo si un bloque de concreto de 2 m de ancho x 2 m de largo por medio metro de alto (2 metros cúbicos) pesa 500 kilogramos, tiene una densidad volumétrica de 250 kg/metro cúbico.

En resumen tenemos que una densidad de carga, en la densidad volumétrica es la cantidad de carga por unidad de volumen, la superficial es la cantidad de carga por unidad de superficie y la lineal la cantidad de carga por metro (en una línea).

4. Procedimiento de toma de densidades

4.1. Instrumentos y/o equipos

- Balanza metálica con capacidad de pesaje de por lo menos 1 kg (calibrada).
- Recipiente graduado de peso y volumen conocido.
- Espátula



4.2. Obtener una muestra del producto a analizar



- 4.3. Llene el vaso graduado, seguidamente dando golpes a la parte inferior del recipiente, para poder así eliminar las burbujas creadas en el interior del recipiente
- 4.4. Enrase el recipiente con el producto con la ayuda de la espátula
- 4.5. Limpie la pared exterior del recipiente de cualquier adhesión del producto
- 4.6. Determine el peso total con la balanza



- 4.7. Verificar en el cuadro de referencias para obtener la densidad o mediante la ayuda de la siguiente fórmula, halle la densidad:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso del recipiente vacío (gr)}}{\text{Volumen del recipiente (cm}^3\text{)}}$$

$$\text{Volumen del recipiente (cm}^3\text{)}$$

4.8. Recomendaciones: Mantener la balanza en buenas condiciones y el recipiente totalmente limpio y el producto debe estar limpio de elementos extraños, además no debe ser mezclado con otros productos.

Anexo 3. Descarga de nitrato



Descarga de nitrato

Anexo 4. Fotografías para análisis de fragmentación



Fotografías para análisis de fragmentación

Anexo 5. Variación del volumen de la mezcla explosiva en el taladro por gasificación

