

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA**



**“EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA-ECOLÓGICA DE LOS  
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS USANDO EMULSIONES  
GASIFICADAS EN CUAJONE – SOUTHERN PERU”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**ELABORADO POR:**

**ROBERT OSMAR MEDINA CORTEZ**

**ASESOR:**

**ING. AUGUSTO TEVES ROJAS**

**LIMA – PERÚ**

**2014**

### **DEDICATORIA:**

A mis Padres: Felipe y Brijida por apoyarme en todo momento, con sus consejos, sus valores y motivándome a desarrollarme tanto en lo personal como profesionalmente.

A mis hermanos por su confianza y apoyo moral que me permitió paso a paso alcanzar mis metas.

### **AGRADECIMIENTO:**

A la empresa Southern Perú - Unidad de Cuajone por ofrecerme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente. Así mismo a los Ingenieros del área de Perforación y Disparos e Ingeniería de quienes recibo mucho apoyo y buen ejemplo profesional y personal, también a mis compañeros de trabajo por las enseñanzas y apoyo que recibo dentro y fuera de nuestras labores.

A la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Ingeniería, docentes y compañeros por los conocimientos impartidos dedicados a la formación de profesionales altamente competitivos, y con la satisfacción de haber aprendido mucho y con el compromiso de seguir aprendiendo en esta larga carrera de conocimientos en que nos encontramos.

## **INDICE**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUCCION</b>                                      | <b>21</b> |
| <b>CAPÍTULO I GENERALIDADES.</b>                         | <b>26</b> |
| <b>1.1 UBICACIÓN.</b>                                    | <b>26</b> |
| <b>1.2 RESEÑA HISTÓRICA.</b>                             | <b>27</b> |
| <b>1.3 GEOLOGÍA REGIONAL.</b>                            | <b>28</b> |
| 1.3.1 Geología   | 29        |
| 1.3.2 Estructuras.                                       | 31        |
| 1.3.3 Alteraciones                                       | 32        |
| 1.3.4 Mineralización                                     | 34        |
| <br>   |           |
| <b>CAPITULO II - DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES</b>      |           |
| <b>MINERAS DE CUAJONE.</b>                               | <b>37</b> |
| <b>2.1 INTRODUCCIÓN.</b>                                 | <b>37</b> |
| <b>2.2 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN.</b>                        | <b>38</b> |
| <b>2.3 EQUIPOS.</b>                                      | <b>39</b> |
| <br>   |           |
| <b>CAPITULO III - FORMAS DE ATAQUE AL MACIZO ROCOSO.</b> | <b>42</b> |
| <b>3.1 INTRODUCCIÓN.</b>                                 | <b>42</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MÉTODOS DE ATAQUE AL MACIZO ROCOSO.</b>                            | <b>43</b> |
| 3.2.1 El ataque mecánico.  | 44        |
| 3.2.2 El ataque físico-químico.  | 46        |
| <br>   |           |
| <b>CAPITULO IV - PARADOJA DE LA VOLADURA DE ROCAS EN EL TERCER MILENIO.</b>                            | <b>51</b> |
| <b>4.1 INTRODUCCIÓN.</b>   | <b>51</b> |
| <b>4.2 VOLADURA DE PRODUCCIÓN.</b>   | <b>54</b> |
| 4.2.1 Definición de voladura de producción.  | 58        |
| <b>4.3 VOLADURA CONTROLADA.</b>  | <b>59</b> |
| 4.3.1 Definición de voladura controlada.   | 63        |
| <b>4.4 ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN.</b>  | <b>64</b> |
| <br>   |           |
| <b>CAPITULO V - CONCEPTOS MATEMÁTICOS BÁSICOS DE LA OPERACIÓN MINERA UNITARIA DE VOLADURA DE ROCAS</b> | <b>66</b> |
| <b>5.1 INTRODUCCIÓN.</b>   | <b>66</b> |
| <b>5.2 FACTORES QUE TIENEN UNA INFLUENCIA DETERMINANTE EN LOS RESULTADOS DE UNA VOLADURA DE ROCAS.</b> | <b>68</b> |
| <b>5.3 VARIABLES EN EL PROCESO DE FRACTURAMIENTO DE ROCAS.</b>   | <b>69</b> |
| 5.3.1 Las variables no controlables.   | 70        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.3.2 Variables controlables.   | 71         |
| <b>CAPITULO VI - EMULSIONES EXPLOSIVAS.</b>   | <b>75</b>  |
| <b>6.1 INTRODUCCIÓN.</b>  | <b>75</b>  |
| <b>6.2 DESARROLLO HISTÓRICO DE LAS EMULSIONES<br/>EXPLOSIVAS.</b>                             | <b>76</b>  |
| 6.2.1 Definiciones de una emulsión explosiva.   | 77         |
| <b>6.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.</b>  | <b>86</b>  |
| <b>6.4 HIPÓTESIS.</b>   | <b>87</b>  |
| <b>6.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.</b>   | <b>87</b>  |
| <b>6.6 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.</b>   | <b>87</b>  |
| <b>6.7 PLAN DE TRABAJO.</b>   | <b>88</b>  |
| 6.7.1 Cronograma de actividades.  | 88         |
| <b>6.8 ANFO PESADO (HEAVY ANFO).</b>  | <b>89</b>  |
| <b>6.9 ENERGÍA TERMOQUÍMICA DE LAS EMULSIONES.</b>  | <b>96</b>  |
| 6.9.1 Velocidad de detonación (VOD).  | 96         |
| 6.9.2 Ventajas.   | 96         |
| <b>6.10 EMULSIONES EXPLOSIVAS QUÍMICAMENTE GASIFICADAS</b>                                    | <b>97</b>  |
| <b>CAPÍTULO VII CASOS-ESTUDIO MONITOREADOS Y EVALUADOS<br/>USANDO EMULSIONES GASIFICADAS.</b> | <b>103</b> |
| <b>7.1 INTRODUCCIÓN.</b>  | <b>103</b> |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| <b>7.2</b> | <b>PRINCIPALES OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>                                  | 104 |
| <b>7.3</b> | <b>CASOS-ESTUDIO LLEVADOS A CABO USANDO UNA EMULSIÓN GASIFICADA Y ANFO</b>        | 104 |
| 7.3.1      | Disparo del Proyecto 3265-647 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.          | 105 |
| 7.3.2      | Disparo del Proyecto 3265-658 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.          | 116 |
| 7.3.3      | Disparo del Proyecto 3145-530 ubicado en la zona sur del tajo Cuajone.            | 122 |
| 7.3.4      | Disparo del Proyecto 3265-659 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.          | 127 |
| 7.3.5      | Disparo del Proyecto 3265-660 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.          | 135 |
| 7.3.6      | Disparo N° 3265-662 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.                    | 143 |
| 7.3.7      | Resumen de los Proyectos disparados con AP-73Q                                    | 149 |
|            | <b>CAPÍTULO VIII EVALUACIÓN ECONOMICA, ANALISIS DE FRAGMENTACIÓN Y ECOLOGICA.</b> | 150 |
| <b>8.1</b> | <b>INTRODUCCIÓN.</b>  | 150 |
| <b>8.2</b> | <b>COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS.</b>                                     | 150 |
| <b>8.3</b> | <b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>   | 151 |
| <b>8.4</b> | <b>ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN.</b>   | 153 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>8.5 ANÁLISIS ECOLÓGICO</b>  | 154 |
| <b>CAPÍTULO IX - INTERPRETACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</b>                             | 156 |
| <b>9.1 INTRODUCCIÓN.</b>   | 156 |
| <b>9.2 RESULTADOS DEL MONITOREO DE LA VOLADURA DE ROCAS CON EMULSIÓN GASIFICADA VS. ANFO PESADO.</b> | 156 |
| 9.2.1 Disparo del proyecto 3265-647.   | 156 |
| 9.2.2 Disparo del proyecto 3265-658.   | 157 |
| 9.2.3 Disparo del proyecto 3145–530.   | 158 |
| 9.2.4 Disparo del proyecto 3265-659.   | 158 |
| 9.2.5 Disparo del proyecto 3265-660.   | 159 |
| 9.2.6 Disparo del proyecto 3265-662.   | 159 |
| <b>CONCLUSIONES.</b>   | 160 |
| <b>RECOMENDACIONES.</b>  | 162 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.</b>   | 165 |



## **INDICE DE FIGURAS.**

Figura N° 1.1: Muestra la ubicación mina Cuajone

Figura N° 2.1: Diagrama de flujo de la operación en Cuajone.

Figura N° 3.1: Muestra los métodos de atacar al macizo rocoso,

Figura N° 3.2: Muestra la perforación subterránea Vs. La perforación superficial,

Figura N° 3.3: Muestra la perforación rotativa en minería superficial,

Figura N° 3.4: Muestra la pólvora negra como ingrediente de la mecha de seguridad,

Figura N° 3.5: Muestra el agente de voladura AN/FO,

Figura N° 3.6: Muestra un alto explosivo dinamita

Figura N° 4.1: Muestra el diseño de malla in situ,

Figura N° 4.2: Muestra las operaciones binomiales de perforación y voladura

Figura N° 4.3: Muestra la voladura de producción en Cuajone.

Figura N° 4.4: Muestra la fragmentación como resultado de la voladura en Cuajone.

Figura N° 4.5: Muestra un banco con las mallas de perforación y Voladura

Figura N° 4.6: Muestra el diseño de malla B x S en Cuajone.

Figura N° 4.7: Muestra la voladura de producción y el carguío y acarreo en Cuajone.

Figura N° 4.8: Muestra la voladura de pre-corte en Cuajone.

Figura N° 4.9: Muestra los diseños de carga para la voladura controlada,

Figura N° 4.10: Muestra los resultados usando voladura controlada

Figura N° 4.11: Muestra una voladura de producción y pre corte para proteger la roca remanente.

Figura N° 4.12: Muestra una voladura en Cuajone.

Figura N° 5.1: Muestra las propiedades físicas del macizo rocoso,

Figura N° 5.2: Muestra el diseño de las mallas de perforación y voladura y carguío de los taladros,

Figura N° 5.3: Muestra el macizo rocoso y sus variables aleatorias

Figura N° 5.4: Muestra la primera etapa del proceso de fracturamiento del macizo rocoso,

Figura N° 5.5: Muestra el diseño de un banco en open pit,

Figura N° 5.6: Muestra el proceso de fragmentación de la roca

Figura N° 5.7: Muestra el diseño de carga en Cuajone.

Figura N° 5.8: Muestra el proceso de fragmentación de la roca en Cuajone.

Figura N° 6.1: Muestra el camión fábrica cargando los taladros del pit en Cuajone.

Figura N° 6.2: Muestra el sistema de una emulsión gasificada,

Figura N° 6.3: Muestra el agente oxidante (Fase Dispersa) en petróleo (Fase Continua), con aceites emulsificantes

Figura N° 6.4: Muestra el carguío de un taladro con Heavy ANFO en Cuajone.

Figura N° 6.5: Muestra la típica fabricación de una emulsión,

Figura N° 6.6: Muestra la estructura de las emulsiones,

Figura N° 6.7: Muestra la composición básica de una emulsión,

Figura N° 6.8: Muestra la estructura del ANFO pesado,

Figura N° 6.9: Muestra las características de carga y resistencia al agua de diferentes tipos de ANFO pesado

Figura N° 6.10: Muestra la variación de la potencia y densidad de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión,

Figura N° 6.11: Muestra la variación de la sensibilidad del ANFO pesado con el porcentaje de emulsión,

Figura N° 6.12: Muestra el carguío de los taladros en open pit,

Figura N° 6.13: Muestra la variación de la densidad de columna de la emulsión gasificada

Figura N° 6.14: Muestra la variación de la densidad vs la longitud de columna explosiva para una emulsión gasificada con la densidad

de copa de 1,1 gr/cc.

Figura N°6.15: Muestra la presencia de gases anaranjados

Figura N° 7.1: Muestra la iniciación de la voladura de rocas en Cuajone

Figura N° 7.2: Muestra Condiciones del área de trabajo en Cuajone.

Figura 7.3: Muestra los parámetros y diseño de carga de los taladros secos,

Figura N° 7.4: Muestra los parámetros y diseño de carga de los taladros con agua en Cuajone.

Figura N° 7.5: Muestra los parámetros y diseño de carga de los taladros secos en Cuajone.

Figura N° 7.6: Muestra las imágenes del área del disparo en Cuajone.

Figura N° 7.7 Muestra el bombeo de la mezcla explosiva en taladros con presencia de agua

Figura N° 7.8: Muestra la zona de voladura con agua dinámica en Cuajone

Figura N° 7.9: Muestra la Zona B con taladros con agua dinámica.

Figura N° 7.10: Muestra la Zona A con taladros secos y con espaciamiento de 8 m.

Figura N° 7,11 Muestra la prueba de densidad cotizado en el proyecto 3265 - 647

Figura N° 7.12: Muestra la VOD de los taladros cargados con AP-73Q

Figura 7,13 Muestra de parámetros del monitor de (velocidad de detonación VOD

Figura 7,14 Muestra el resultado de la velocidad de detonación en el taladro 2609

Figura N° 7,15 Muestra los parámetros del monitoreo del VOD

Figura N° 7,16 La grafica muestra el resultado de la velocidad de detonación en el taladro 2610

Figura N° 7.17: Muestra la malla de perforación y voladura del Proyecto 3265-658

Figura N° 7.18: Muestra los parámetros y diseño de carga del Proyecto 3265-658

Figura N° 7.19: Muestra las imágenes del Proyecto 3265-658

Figura N° 7.20 Muestra el esponjamiento del material fragmentado

Figura N° 7.21: Muestra el diseño de amarre de la malla para el disparo del proyecto 3145-530.

Figura N° 7.22: Muestra los parámetros y diseño de carga.

Figura N° 7,23 Muestra los parámetros del monitoreo de VOD

Figura N° 7,24 Muestra la gráfica de los resultados de la VOD en el taladro 3544

Figura N° 7.25: Muestra la iniciación del disparo 3265-659 con AP-73Q

Figura N° 7.26: Muestra el proyecto 3265-659 (electrónico

Figura N° 7.27: Muestra los parámetros y diseño de carga.

Figura N° 7.28: Muestra la secuencia de las imágenes de la voladura

Figura N° 7.29: Muestra las imágenes post voladura con ANFO pesado 45/55.

Figura N° 7.30: Muestra el Proyecto 3265-660 (Disparo electrónico)

Figura N° 7, 31 Muestra las zonas

Figura N° 7.32: Muestra los parámetros y diseño de Carga

Figura N° 7.33: Muestra las imágenes de la Voladura con AP-73Q y ANFO pesado 45/55.

Figura N° 7,34 Muestra las imágenes de la voladura con HP 73Q y anfo pesado 45/55

Figura N° 7.35: Muestra las imágenes de post voladura.

Figura N° 7, 36 Muestra el material volado en la zona cargada con AP 73Q

Figura N° 7,37 Muestra el material volado en la zona cargada con HA – 45/55

Figura N° 7,38 Muestra los parámetros del monitoreo del VOD en el taladro 5851

Figura N° 7,39 Muestra los resultados del VOD en el taladro 5851

Figura N° 7.40: Muestra la malla de perforación del proyecto 3250 662

Figura N° 7,41: Muestra las zonas cargadas del proyecto

Figura N° 7.42: Muestra los parámetros y diseño de carga.

Figura N° 7.43: Muestra las imágenes de la voladura.

Figura N° 44 Muestra el material volado en la zona alargada con AP 73Q

Figura N° 7,45 Muestra el monitoreo volado en la zona largada con Ha – 45/55

Figura N° 8.1: Muestra la composición de las mezclas explosivas

HA45/55 y AP-73Q

Figura N° 8.2: Muestra la reducción de costos anuales por uso de

AP-73Q

## **INDICE DE TABLAS.**

Tabla N° 3.1: Muestra el desarrollo histórico de las mezclas explosivas comerciales.

Tabla N° 4.1: Muestra los valores del JSF de la calidad de la roca.

Tabla N° 6.1: Muestra los tipos de emulsiones más usadas a nivel mundial.

Tabla N° 6.2: Muestra una composición típica de una emulsión explosiva.

Tabla N° 6.3: Muestra el orden cronológico en el que aparecen las mezclas explosivas comerciales y sus principales componentes.

Tabla N° 6.4: Dimensiones de los oxidantes en los explosivos (Bampffield y Morrey, 1984).

Tabla N° 6.5: Muestra las actividades que se llevaran a cabo para elaborar esta tesis.

Tabla N° 7.1: Muestra de resultados de la prueba de densidades en el proyecto

3265 647



Tabla N° 7.2: Muestra los resultados de la prueba de densidad en el proyecto  
3265 658

Tabla N° 7,3 Muestra las densidades promedio del AP 730Q

Tabla N° 7.4: Muestra los resultados de la prueba de densidad

Tabla 7,5 Muestra los resultados de la prueba de densidades realizados en el  
proyecto 3268 659

Tabla N° 7 6 Muestra los resultados de la prueba de densidades en el proyecto  
3265 - 660

Tabla N° 7, 7 Muestra los resultados de la prueba de densidad en el proyecto  
3265 662

Tabla N° 7.8: Resumen de Voladuras

Tabla N° 8.1: Ahorro por disminución del factor e potencia.

Tabla N° 8.2: Muestra el resumen del Análisis de Fragmentación.

## **RESUMEN.**

En el presente trabajo de investigación se analiza, evalúa y se discute el uso de la emulsión gasificada AP-73Q, y se compara con los resultados obtenidos usando el ANFO pesado 45/55 en las operaciones mineras de voladura de rocas en Cuajone.

Para lo cual se llevaron a cabo varios disparos primarios. Algunos de estos disparos primarios fueron cargados solamente con emulsión gasificada AP-73; para poder comparar los resultados obtenidos, y otros disparos fueron cargados con emulsión gasificada AP-73Q y ANFO pesado 45/55. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en términos de fragmentación y uniformidad de esta, se debe mencionar que en términos generales con las dos mezclas explosivas comerciales se obtuvieron buenos resultados desde un punto de vista técnico-económico-ecológico.

Para lo cual, se recomienda en forma especial que se continúe con estas pruebas usando las dos mezclas explosivas comerciales mencionadas anteriormente. También se debe estandarizar el uso de los fulminantes electrónicos para la iniciación de los disparos primarios. Lo mismo que se debe continuar usando cámaras de aire en los taladros de producción, etc.

## **ABSTRACT**

The present work of investigation analyzed, evaluate and discuss the use of the AP-73Q gassed emulsion and also the use of the 45/55 heavy ANFO.

The results obtained using the explosive mixtures before mentioned have been good in terms of fragmentation and uniformity of this.

To carry-out the different case-studies, also electronic caps to initiate the blasts were used. Also it must be mentioned that the use of air decks have been given good results charged within the blast holes of production. Taking into account the environmental impacts; induced by the rock blasting operation it must be emphasized that no toxic fumes are generated for the detonation the explosive mixtures before mentioned.

## INTRODUCCION

En Cuajone – Southern Perú, se realiza la extracción de mineral buscando la minimización de los costos operativos y maximizando la producción. En este sentido, actualmente en el área de perforación y voladura se viene realizando pruebas con diferentes mezcla explosivas para compáralas con el (Heavy ANFO) que actualmente se vienen usando.

En Cuajone se viene realizando diversas pruebas con una nueva mezcla explosiva comercial, que tiene como principal característica su mayor poder energético, pudiendo sustituir a las mezclas explosivas usadas en esta unidad como es el caso del Heavy ANFO, en sus distintos tipos (HA37, HA45/55 ó HA64). Así mismo el ingreso de esta nueva tecnología a la operación unitaria de voladura puede ser una estrategia para la reducción de costos, aprovechado las propiedades del explosivo y modificando las mallas de perforación y voladura, lo cual ocasionara la disminución del factor de carga, y con ello los costos totales reflejados en el indicador dólares por tonelada fragmentada.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

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

Es por lo cual, las mezclas explosivas comerciales se han modificado en su matriz. En el caso de la emulsión matriz se ha modificado, agregando un ingrediente dando como resultado la emulsión gasificada. Entonces, la emulsión gasificada debe ser capaz de trabajar bajo cualquier condición en la que se encuentre el macizo rocoso, y fragmentar el macizo rocoso igual o mejor que la emulsión matriz, con cero gases tóxicos y bajo costos en US\$/Tm. Fragmentada.

## **OBJETIVOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN.**

Los principales objetivos de la presente tesis de investigación se mencionan a continuación:

- Dar a conocer a todos los inmersos en la industria minera que invirtiendo en un equipo humano integrado por investigadores se puede hacer modificaciones a las mezclas explosivas comerciales existentes, de tal

manera que estas sean más eficientes en la voladura y que no generen gases nocivos.

- Determinar el grado de fragmentación del material fragmentado con el uso de emulsiones gasificadas, comparándolas con los resultados obtenidos en los proyectos con Heavy ANFO.
- Determinar si es económicamente factible el reemplazo del heavy AN/FO por las emulsiones gasificadas.
- Las universidades deben promover, incentivar a sus equipos de investigación, integrados por catedráticos y alumnos a hacer investigación científica y aplicada, de tal manera que ayude al desarrollo del Perú.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Investigar, analizar y evaluar los impactos ambientales al usar otras mezclas explosivas con emulsiones gasificadas.
- Económicamente hablando es factible el reemplazo de la mezcla explosiva HA45/55 por la mezcla explosiva AP-73Q con emulsiones gasificadas.

**HIPÓTESIS.**

Estandarizar las emulsiones gasificadas en reemplazo de los ANFO pesados, minimizando los gases tóxicos y maximizar producción y productividad en US\$/Tm. Fragmentada.

**ALCANCES**

La metodología aplicada es de fácil aplicación y entendimiento, así como también comprobar con las pruebas de campo realizadas en Cuajone con la emulsión gasificada sus ventajas técnico-económicas, en Tm fragmentada, el análisis de impacto ambiental respectivo.

**METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.**

Se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva, para analizar, investigar y conocer las investigaciones realizadas y patentadas respecto al tema de tesis.

Actualmente en Mina Cuajone, las emulsiones gasificadas se vienen probando, cuyos resultados tanto en fragmentación, gases tóxicos vibraciones, etc. se están monitoreando. Luego los resultados de los monitoreos mencionados anteriormente se comparan y analizan con los resultados de los ANFOS pesados.

## **JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.**

Por lo mencionado en los párrafos anteriores el presente trabajo de investigación está más que justificado, si se tiene en cuenta la economía de libre mercado, la globalización y los impactos ambientales; pues la ciencia y tecnología avanza a pasos agigantados y cada vez las empresas se enfrentan a nuevos retos, los cuales deben desafiarlos; y para desafiarlos deben estar a la vanguardia de los cambios haciendo investigación científica y/o aplicada para poder existir en el mercado y llegar a la longevidad. Es por ello, que a la emulsión matriz se ha modificado, la cual está siendo implementada en el campo, cuyo carguío a los taladros se hace con el camión fabrica.



## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 UBICACIÓN**

La mina de cobre a tajo abierto, está ubicada aproximadamente a 42 km. al noreste del departamento de Moquegua, provincia de Mariscal Nieto, distrito de Torata, al sur del Perú. Se emplaza en el flanco andino de la cordillera occidental de los Andes entre los 3 150 y 3 850 m.s.n.m.

Geográficamente se encuentra entre las coordenadas UTM: 538,200 y 542,000 Este; 84,000 y 87,800 Norte. Figura N° 1.1

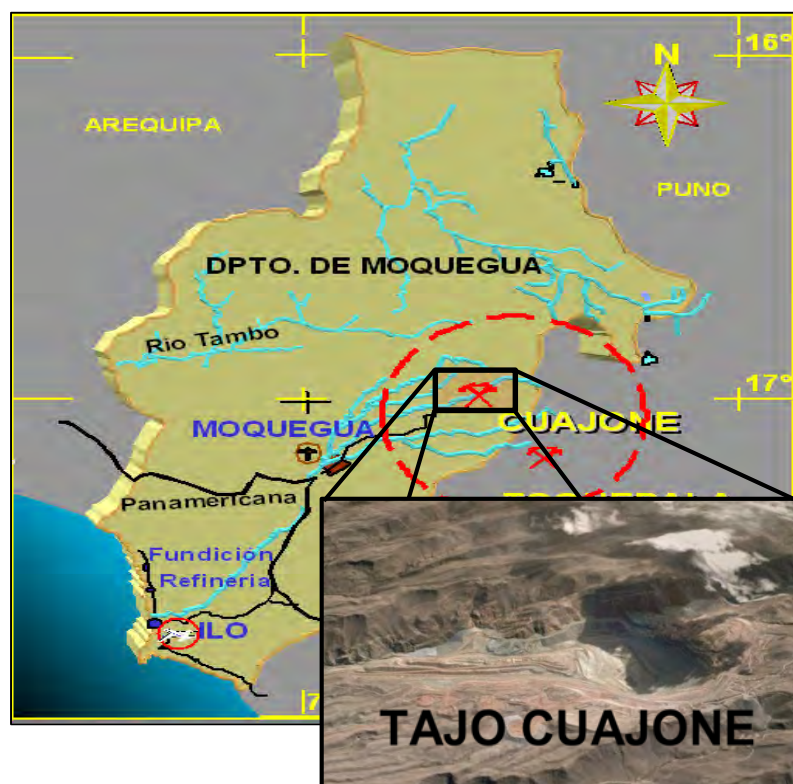


Figura N° 1.1: Muestra la ubicación mina Cuajone, (Fuente: Mina Cuajone).

## 1.2 RESEÑA HISTÓRICA

Mina Cuajone comienza a principios de 1937, cuando la Cerro de Pasco Cooper Corporation, al explorar la zona la reconoce como un Yacimiento de Pórfido Cuprífero, de allí en adelante (1942-1945) se haría una exploración con Perforación Diamantina, luego Newmont y Asarco realizarían una campaña de Prospección Geofísica, Prospección Geoquímica, Perforación Diamantina y también Pruebas Metalúrgicas.

En 1954 se formaría Southern Perú Copper Corporation (SPCC), y al año siguiente (1955) realizarían el Cálculo de Reservas y la Descripción

Geológica. Ya entre 1970-1975, se realizaría la etapa de construcción de: Vías de Acceso, Electricidad, Suministro de Agua, desbroce y preparación de la mina, así también comenzaría la construcción de la Concentradora, centros urbanos, hospitales, centros educativos, oficinas, talleres, etc.

En 1976 comenzaría la producción en la Mina, y para el año 1980 se iniciaría la construcción de la Planta de Molibdeno. En 1995 se inicia la Lixiviación, y en 1998 se amplía a 87100 TM/día del Tratamiento de Mineral, luego en 1999 Southern México asume la administración de Cuajone, la cual se mantiene hasta la actualidad.

### **1.3 GEOLOGÍA REGIONAL**

El yacimiento de Cuajone es un pórfido de cobre del tipo diseminado, está localizado en el área de la quebrada Chuntacala, un tributario seco del río Torata, a 30 Km al NE de la ciudad de Moquegua, y 25 Km al N - NW de la mina de cobre de Toquepala. Cuajone está localizada dentro de la "sub - provincia cuprífera del pacífico sur", en el flanco occidental de los andes, al sur del Perú.

De acuerdo a la teoría tectónica de placas para la formación de estos pórfidos de cobre, esta provincia metalogénica fue generada por la fusión parcial de los mantos superficiales ricos en cobre a lo largo de la zona Benioff de la placa este del pacífico. Los magmas que contenían

materiales calco-alcalinos se fueron introduciendo dentro de los mantos superficiales a través de profundas fisuras, dentro de los volcánicos del mesozoico de los mantos, a 100 - 150 Km verticalmente debajo de la zona de las placas.

Actualmente un conjunto de estructuras NW - SE dominan la geología regional, esta es la orientación de los trechos oceánicos.

### **1.3.1 Geología mina**

#### 1.3.1.1 Litología.

Como en el caso de muchos pórfidos de cobre, la alteración hidrotermal intensa ha destruido parcial o totalmente las texturas originales mineralógicas dentro de rocas pre mineral, e intrusivas en Cuajone.

#### 1.3.1.2 Volcánicos pre-mineral.

Las rocas más antiguas en el área de la mina son los dos miembros más bajos del grupo Toquepala de volcánicos (cretáceo superior / paleoceno), la andesita basáltica y la riolita porfirítica.

La andesita basáltica debe parte de su coloración oscura a la biotita, probablemente de origen hidrotermal, anfíbolita (tentativamente antofilita) y al piroxeno (hendenbergita) han sido identificados. Algún remanente de la estructura porfirítica, se puede encontrar, en la forma de finos granos anhedrales, ocasionalmente subhedrales, ferromagnesianos corroídos, aunque la alteración es a menudo total, la

parte inferior del basalto no ha sido encontrada ni en taladros, ni en roca expuesta.

El flujo de riolita porfirítica concordante con los estratos de basalto es de ligera profundidad. La potencia de la riolita es arriba de los 250 m, la riolita tiene una estructura fuertemente porfirítica, con cuarzo circundante y fenocristales de 2 mm de promedio, en una matriz afanítica.

#### 1.3.1.3 Complejo intrusivo.

El principal cuerpo intrusivo en Cuajone es un stock de latita porfirítica alterada y mineralizada. Para el área de la mina este es un stock de latita porfirítica cuarzosa, con cuarzo libre rodeado de fenocristales de 2 - 4 mm. de diámetro. Aunque altamente alterados, algunos feldespatos pseudos morfológicos han sido preservados en cristales alargados de 2 x 5 mm. de promedio. La matriz probablemente fue criptocristalina.

Los contactos entre la latita y los volcánicos pre-mineral son especialmente con andesita basáltica, puede ser transicional a causa de la asimilación.

#### 1.3.1.4 Brechas post – mineral.

Este consiste de clastos redondeados a sub-redondeados localmente derivados, alterados y mineralizados en volcánicos y rocas intrusivas, contenidos en una matriz fresca de latita porfirítica. Localmente la matriz puede ser silicificada o parcialmente compuesta de geodas, conteniendo incrustaciones de cuarzo.

#### 1.3.1.5 Volcánicos post – mineral.

Las mayores secuencias piroclásticas son reconocidas en Cuajone, separadas por la formación quebrada Chuntacala y ahora por el minado. Estos son los volcánicos Hualillas y los volcánicos Chuntacala del lado sur y lado norte de la mina respectivamente, Sus edades son 17 - 22 millones de años para Hualillas y de 9 – 14 millones de años para Chuntacala.

### **1.3.2 Estructuras.**

#### **1.3.2.1 Fallamiento.**

Son estructuras con orientación NW - SE (más específicamente con dirección 130° AZ), estos dominan completamente la estructura geológica de la mina Cuajone, este es un buzamiento regional. Los siguientes cuerpos geológicos tiene un buzamiento NW - SE; el cuerpo central principal de brecha, el emplazamiento lateral, las ramificaciones estructurales del principal stock de latita.

#### **1.3.2.2 Fracturamiento.**

El fracturamiento dominante encontrado dentro de las rocas intrusivas y pre - mineral en la mina de Cuajone es muy común en los depósitos porfiríticos, “el stockwork”; Este es un intenso y regular fracturamiento cruzado, concéntrico causado dentro del stock intrusivo, a causa de las tremendas presiones usadas para la intrusión de magmas y fluidos hidrotermales de alta presión.

En Cuajone la parte superior del intrusivo, sumado al volcánico pre - mineral adyacente, fueron afectados por fracturamiento tipo “stockwork”

el cual facilitó la entrada de fluidos hidrotermales que alteraron y mineralizaron las rocas.

### **1.3.3 Alteraciones.**

#### **1.3.3.1 Alteración Hidrotermal.**

Una zona de alteración de 3 - 4 Km de diámetro ha sido reconocida en Cuajone. Hay un control sobre la alteración hidrotermal usada por la mineralización pre-existente en Cuajone. Rocas principalmente dominadas por ensambles cuarzo - feldspatos fueron alteradas a filica -argílica, mientras aquellas conteniendo ferro-magnesianos fueron alteradas a biotita - clorita.

La alteración de arcillas es muy intensa en Cuajone, el cual podría ser considerada como “altamente arcillosa” comparada con otros depósitos; Esta arcilla de origen hipógena y supérgena, con un anormal contenido alto, a causa de las tensiones y el fracturamiento en el área de mina, proveyeron de canales para el ascenso y descenso de fluidos.

#### **1.3.3.2 Alteración Fílica.**

Un contenido balanceado de cuarzo y sericita (fílica), además de la menor alteración de arcillas domina la mineralogía sílica en la zona mineralizada de Cuajone, siendo la alteración dominante en los stocks de latita porfirítica de la mina; los fenocristales de cuarzo permanecen en su textura original, donde el feldespato ha sido hidratado a sericita y arcillas, esto está rodeado de una red de venillas de cuarzo con silificación adyacente.

#### 1.3.3.3 Silificación.

Intensa silificación adyacente es encontrada dentro de la riolita no - lixiviada en el sur de la zona mineral, la alteración sílica casi totalmente destruyó la textura mineralógica original. La zona central de brecha es también altamente silificada, como son ciertamente áreas dentro de la latita porfirítica. Además de la matriz de silificación, son encontrados múltiples estados de venillas de cuarzo en este tipo de alteración.

#### 1.3.3.4 Alteración argílica.

Además de los minerales arcillosos como la caolinita, la montmorillonita, la illita y la dickita, esta zona incluye significativas cantidades de clorita y biotita. La alteración argílica es casi exclusiva de las andesitas basálticas y es de origen tanto hipógena como supérgena.

#### 1.3.3.5 Alteración Potásica.

Ha sido reconocida por perforaciones diamantinas principalmente en el sector NE del yacimiento.

En la andesita basáltica es caracterizada principalmente por la presencia de biotita secundaria fina. En la latita porfirítica al SE del yacimiento, esta ha sido determinada en profundidad en forma de venillas con contenido de feldespatos potásicos, magnetita y biotita secundaria.

### **1.3.4 Mineralización.**

#### 1.3.4.1 General.

La zona de mineralización de Cuajone tiene una extensión de 2 200 x 1 000 m, alargado hacia el NW-SW. La mineralización de Cuajone es



típica por su forma regular, homogeneidad de ley, y mineralógicamente simple, actualmente las reservas para Cuajone son de 1 242 millones de toneladas a una ley de 0.64% Cu.

#### 1.3.4.2 Capa lixiviable.

Como en muchos pórfidos, una capa lixiviada se desarrolla sobre el mineral de Cuajone a causa de la disolución de cobre por aguas ácidas generadas por la reacción del agua de lluvia sobre la pirita. En el área de la mina la capa lixiviada es claramente visible en las riolitas al sur, donde aproximadamente con una potencia de 120 m de sobre encapado existen entre el contacto del volcánico post-mineral, con óxidos encontrados directamente debajo de los volcánicos post-mineral.

La capa lixiviada mineralógicamente es dominada por los óxidos de hierro (hematitas y limonitas), que nos dan la coloración rojiza, y aquellos de manganeso como la pirolusita.

#### 1.3.4.3 Óxidos.

La zona de óxidos se formó cuando las percolaciones hacia abajo del agua subterránea, conteniendo cobre en solución encontraron condiciones de cambio de  $pH - Eh$ , el cual resultó en la precipitación de óxidos, hidróxidos, carbonatos y silicatos de cobre. La zona oxidada en Cuajone es originalmente de forma tabular casi horizontal, es un cuerpo de alrededor 15 m de potencia, la mayoría de la cual no ha sido minado aún, el óxido de cobre es depositado para una futura lixiviación.

La mineralogía de la zona oxidada consiste de crisocola, malaquita, calcantita, más cobre nativo, cuprita y tenorita, estas ocupadas principalmente como manchas y en fracturas.

#### 1.3.4.4 Zona enriquecida.

La zona enriquecida en Cuajone es definida mineralógicamente por la predominancia de sulfuros secundarios sobre formas de mineralización económica, los cuales usualmente se reflejan en una rápida caída en ley debajo de la sábana de enriquecimiento, el cual tiene un promedio de 20 m, la zona ha sido mayormente minada y la verdadera zona enriquecida es encontrada en los bordes de la zona mineral.

La mineralogía es principalmente; calcosita, con menos bornita, digenita y covelita. La formación de calcosita refleja verdaderamente la zona enriquecida del sulfuro primario original, donde este fue diseminado, la calcosita ocurre como granos finos, donde las venas de sulfuros resultan en venas de calcosita.

#### 1.3.4.5 Zona mineralizada.

Localmente, calcopirita y calcosita pueden coexistir en forma masiva, llenando cavidades mayores de 2 cm. de ancho. En la latita, la cual domina la actual zona mineralizada, la situación típica es encontrar calcopirita en venas de cuarzo y diseminadas dentro de áreas silicificadas adyacentes, con calcositas en fracturas.

#### 1.3.4.6 Zona primaria.

Esta es simplemente pirita - calcopirita, con menos bornita y enargita, en venillas y finamente diseminadas dentro de un stock principal de latita porfirítica. En rocas andesíticas conteniendo clorita, calcopirita y encontrando emplazamiento de este mineral en venas y grupos. Dentro de la zona de brecha, trazas de enargita, tetrahedrita, esfalerita y galena pueden ser encontradas.

#### 1.3.4.7 Mineralización de zona de molibdeno

El molibdeno es un significativo sub - producto en Cuajone. Esto ocurre económicamente en sulfuro formando molibdenita, el cual es generalmente encontrada en tres diferentes formas en Cuajone; Finamente diseminado (generalmente detectado sólo al microscopio), cristalino en venillas de cuarzo, y en fracturas como relleno. La ocurrencia de la mineralización de molibdeno independiente de otro sulfuro económico sugiere una fase de mineralización separada.

## **CAPITULO II**

### **DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES MINERAS DE CUAJONE.**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN.**

La operación de minado se realiza por el método de tajo abierto, en la mina Cuajone se produce 90 mil toneladas métricas de mineral al día con una ley promedio de 0.60% de cobre. La mina está dividida en once fases de minado hasta alcanzar el límite final del tajo, actualmente se encuentra en explotación las fases de minado 5, 6 y 8. Cuajone es una mina que diariamente extrae más de 475.000 Tm/día. La perforación se realiza con máquinas rotativas en taladros de 16 metros de altura y 12 ¼ de pulgadas en diámetro, en la actualidad se cuenta con 8 máquinas perforadoras (2 recién adquiridos: una (D16) por remplazo de la D10 y otra (D17) por adición) y 3 máquinas de martillo en el fondo para la perforación del pre-corte.

Los distintos tipos de materiales a transportar son sulfuros de baja ley menores a 0,3 % en cobre depositados en botaderos, óxidos que son

llevados a planta de lixiviación y mineral transportados a las tolvas de transferencia.

La transferencia del mineral hacia la planta chancadora se realiza por medio de trenes, los puntos de acumulación del mineral son llamados hoppers o tolvas de transferencias llamadas B y C cuyas capacidades son de 2.000 toneladas cada uno aproximadamente, para el continuo envío de mineral se utiliza cinco trenes los cuales poseen 17 vagones cada uno con capacidad de 75 toneladas.

La sexta y octava fase de minado en mina Cuajone se encuentra en ejecución, para ello, todo lo relacionado con el desbroce se realiza con cuatro palas gigantes (Se tiene en total 07 palas, la última P07 entró en operación después de 2 meses de ensamblaje la segunda semana de julio del 2014).

## **2.2 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN**

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

Los ángulos de talud de trabajo (operación) varían entre los 37° y 47° y de banco de 75°

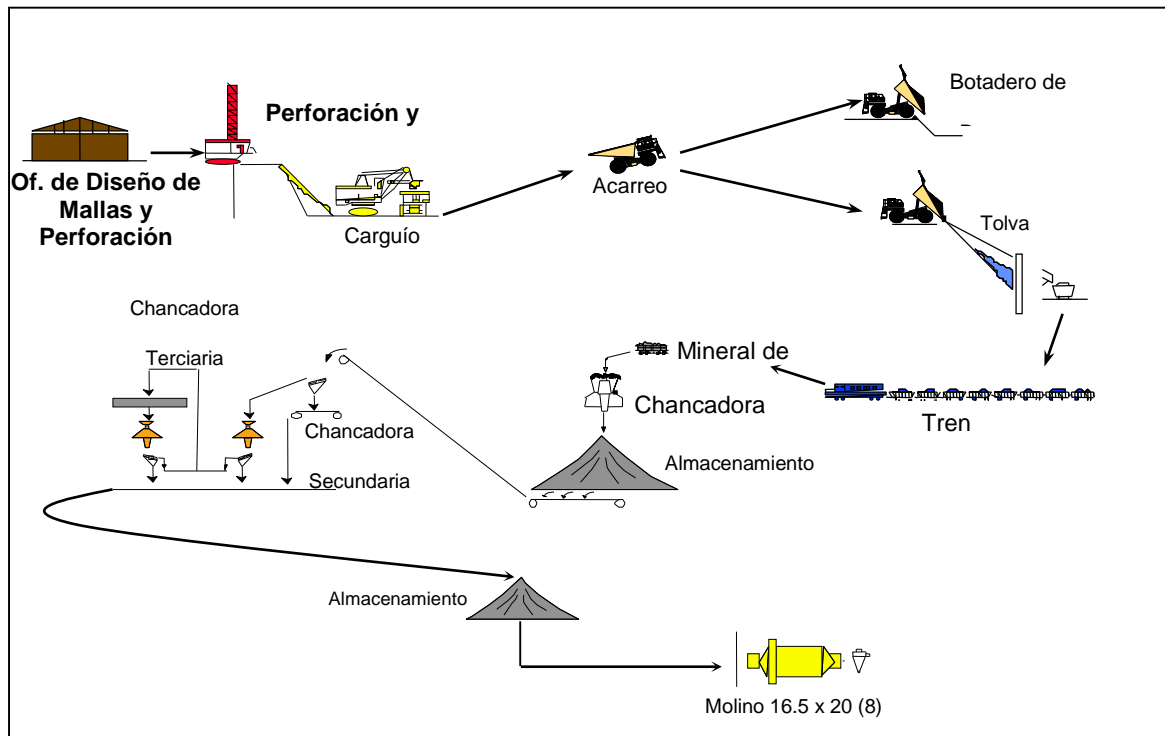


Figura N° 2.1: Diagrama de flujo de la operación en Cuajone.

### 2.3 EQUIPOS

En Cuajone se tiene 8 perforadoras rotativas eléctricas:

- D10, D11 y D12, marca P&H modelo 120A y 100XP.
- D13 y D14 de marca Bucyrus Erie, modelo 49HR
- D15 de marca Bucyrus Erie 39HR (cedida del proyecto minero Tía María);
- D16 Y D17, marca P&H, modelo 320XPC

La utilización de estos equipos está en el rango de 89% llegándose a perforar 9600 metros al mes.

En la perforación del precorte se utilizan dos perforadoras a combustible de la marca Sandvik modelo DR56 y una perforadora Atlas Copco RockL8 que perforan diámetros de 5" de 15 metros de altura con inclinaciones de taladros de 70°.

El acarreo se realiza con volquetes de diversos modelos entre los cuales se tiene los camiones komatsu 830 E y 930 E Caterpillar 793 y volquetes Caterpillar 797F cuyas capacidades son de 390 Tm., alcanzando productividades de 1.200 Tm/h mina Cuajone cuenta con 16 unidades

El carguío se realiza con 7 palas eléctricas de capacidades de cuchara de 42 a 73 yd<sup>3</sup>, modelo P&H 2800 se ubica en el fondo del tajo, esta pala es utilizada en zonas de mineral conjuntamente con el cargador frontal Letorneau proporcionando la mezcla diaria de acuerdo a las leyes y durezas según los planes programados.

La flota de equipos auxiliares está conformada por tractores de rueda, tractores de orugas, motoniveladoras, retroexcavadoras y cargadores frontales utilizados en las limpiezas de pisos de palas, áreas de perforación, carreteras, limpieza de tolvas de transferencias, mantenimiento de vías férreas, construcción de rampas, construcción de vías, mantenimiento de botaderos, habilitación de bermas laterales y centrales para el tránsito de volquetes, construcción de canales de drenajes.

El control de la polución se realiza con tres tanques de regadíos de la marca Caterpillar de capacidad de llenado de treinta mil galones distribuidos de la siguiente manera: dos tanques en las zonas centrales del tajo y dos tanques para la fase de minado 6B y 8.

El agua utilizada en el regadío de vías es la que se recolecta de las filtraciones (freática y lluvias) las cuales se han depositado en los niveles inferiores del tajo siendo bombeadas a superficie.



## **CAPITULO III**

### **FORMAS DE ATAQUE AL MACIZO ROCOSO.**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN.**

Según data la historia para extraer los minerales de la corteza terrestre el hombre ha realizado este trabajo con instrumentos hechos de piedra, madera, etc.; cuya explotación era incipiente y de muy pocas cantidades. Entonces, se puede enfatizar que para extraer los recursos mineralógicos de la corteza terrestre han sido, es y será una preocupación constante para el hombre en lograr la llamada fragmentación de la roca de manera adecuada en comparación con los costos operacionales que involucra obtener estos resultados.

El hombre ha usado una serie de métodos para atacar al macizo rocoso, desde el fuego hasta el uso binomial de los accesorios de voladura y las mezclas explosivas comerciales (físico-químico), cabe resaltar que es lo que mayormente se usa a nivel mundial.

En reto principal de las compañías mineras que enfrentan hoy en día, que es el cómo incrementar la rentabilidad de la empresa, mejorando de manera oportuna y eficiente cada una de las operaciones mineras unitarias que conforman el ciclo total de minado, siendo un proceso clave y fundamental dentro de esta cadena de valor la fragmentación de la roca como resultado de las operaciones mineras binomiales de perforación y voladura de rocas. Entonces, sin lugar a dudas se puede enfatizar que de las operaciones binomiales de perforación y voladura depende la rentabilidad de la empresa minera.

### 3.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MÉTODOS DE ATAQUE AL MACIZO ROCOSO.

Como bien se sabe, a nivel mundial se conoce que los métodos para atacar al macizo rocoso, son los siguientes:



Figura N° 3.1: Muestra los métodos de atacar al macizo rocoso

(Fuente: Roberto O. Medina Cortez).

En la actualidad los dos métodos más utilizados para atacar el macizo rocoso, son los siguientes:

- El ataque mecánico y
- El ataque físico-químico.

### 3.2.1 El ataque mecánico.

En la industria minera dentro de la cadena de valor se inicia la producción con la operación minera unitaria de perforación, en minería superficial a través de la perforación rotativa y en minería subterránea a través de la perforación percusiva.



Figura 3.2: Muestra la perforación subterránea Vs. La perforación superficial (Fuente: Roberto O. Medina Cortez).

#### 3.2.1.1 Perforación rotativa.

La perforación rotativa se realiza en operaciones mineras a tajo abierto, son máquinas diseñadas para operar con gran fuerza de avance o pull down y un par de rotación.

Los componentes principales de la perforadora rotativa son: el barreno, la broca y la circulación del flujo de aire para la limpieza de los taladros. El cálculo del rango de penetración relacionando la resistencia de compresión uniaxial, el peso por pulgada de diámetro de broca y la velocidad de rotación; realizadas por el Dr. A. Bauer fueron plasmadas en la siguiente ecuación:

$$PR = (61 - 28 \text{Log } Sc) \left( \frac{W}{\phi} \right) \left( \frac{RPM}{300} \right)$$

Dónde:

PR = rango de penetración (pies/hr.)

Sc = Resistencia compresiva uniaxial en 1000 psi.

W/Ø = peso por pulgadas del diámetro de la broca en 1000 lb.

RPM = velocidad rotativa RPM



Figura N° 3.3: Muestra la perforación rotativa en minería superficial,  
(Fuente Mina Cuajone).

### **3.2.2 El ataque físico-químico.**

En la industria minera se usa el ataque físico-químico a través de las mezclas explosivas comerciales junto a los accesorios de voladura, esto es debido a su menor costo en comparación con los ataques mecánicos.

A medida que avanza la ciencia y tecnología, desde que Nobel invento la dinamita hasta las emulsiones gasificadas el hombre, debido a las necesidades que se presenta en la vida diaria va desarrollando modificaciones en la composición de la matriz de las mezclas explosivas comerciales.

### 3.2.2.1 Clasificación general de las mezclas explosivas comerciales.

3.2.2.1.1 Bajos explosivos: Se denomina así a las mezclas explosivas comerciales que en su composición no llevan ningún explosivo intrínsecamente explosivo y que combustionan o deflagran pero no detonan. Ejemplo Pólvora negra (componente mecha seguridad).

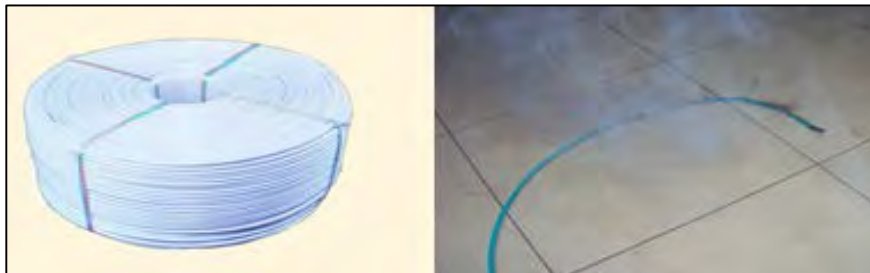


Figura N° 3.4: Muestra la pólvora negra como ingrediente de la mecha de seguridad, (Fuente Robert O. Medina Cortez).

3.2.2.1.2 Agentes de Voladura: Son las mezcla explosivas comerciales que en su composición no llevan ningún explosivo intrínsecamente explosivo y pero que al mezclarse sus ingredientes se convierten en un explosivo, así por ejemplo al mezclar el  $\text{NO}_3\text{NH}_4 + \text{CH}_2 = \text{AN/FO}$ . Un agente de voladura no es sensible a los fulminantes comunes y para su iniciación se requiere de un booster que produzca una alta presión de detonación.



Figura N° 3.5: Muestra el agente de voladura AN/FO, (Fuente web Exsa).

3.2.2.1.3 Altos explosivos: Son las mezclas explosivas comerciales que en su composición si llevan un explosivo intrínsecamente explosivo, y que para su iniciación se requiere de un fulminante común. Ejemplo la dinamita.



Figura N° 3.6: Muestra un alto explosivo dinamita, (Fuente web internet y Exsa).

### 3.2.2.2 Desarrollo histórico de las mezclas explosivas comerciales.

Desde el siglo XIII que se inventó la pólvora negra, el hombre se ha visto en la necesidad de inventar nuevas mezclas explosivas comerciales, siendo la década de los 40 que marca un hito en la historia de la humanidad por que se descubre el ANFO, se inventó la computadora, la investigación de operaciones, etc.; y así sucesivamente se continua con nuevos inventos hasta llegar la emulsión matriz inventada por el Dr. Melvin Cook. Dicha emulsión matriz es modificada en su composición, dando como resultado la emulsión gasificada.

A continuación se mencionaran las mezclas explosivas comerciales que se usan en la industria minera.



Tabla N° 3.1: Muestra el desarrollo histórico de las mezclas explosivas comerciales.

| <b>Mezcla explosiva comercial</b>  | <b>Año</b>   |
|--|--------------|
| Pólvora Negra (C, S, NO <sub>3</sub> N <sub>2</sub> )                          | 1300 – 1900. |
| Nitrocelulosa (4C <sub>6</sub> N <sub>3</sub> H <sub>7</sub> O <sub>11</sub> ) | 1832         |
| Nitroglicerina (4C <sub>3</sub> N <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>9</sub> ) | 1846         |
| Dinamita (NG + Kieselghür)   | 1865         |
| Dinamitas Amoniacales y Gelatinosas  | 1875 - 1950  |
| AN/FO  | 1940         |
| Slurries   | 1950         |
| Slurries empacados   | 1960         |
| AL/AN/FO   | 1968         |
| SAN/FO, Slurries a granel  | 1970         |
| Slurries para Diámetros pequeños   | 1972         |
| Emulsiones   | 1975         |
| Emulsiones para Diámetro pequeño y AN/FOs pesados (Heavy AN/FOs)               | 1980         |
| Plasma (Corea del sur)   | 1990         |
| Emulsiones gasificadas   | 1990         |
| AN/CO para Open Pit y Operaciones Mineras Subterráneas                         | 2002         |
| Agente de voladura para voladura controlada                                    | 2007         |

**CAPITULO IV**  
**PARADOJA DE LA VOLADURA DE ROCAS EN EL TERCER**  
**MILENIO.**

**4.1 INTRODUCCIÓN.**

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

Por lo que en la actualidad existen diversos modelos matemáticos para diseñar las mallas de perforación y voladura (B x S); siendo el burden (B)

una de las variables fundamentales que contribuye en los resultados de una voladura de rocas, dichos modelos matemáticos son validados en campo, tanto para minería subterránea como superficial.



Figura N° 4.1: Muestra el diseño de malla in situ (Fuente Mina Cuajone).

Pero, es importante resaltar que estas dos operaciones binomiales son las que dan inicio a la etapa de producción de cualquier complejo minero, donde los resultados de esta que es la denominada fragmentación influye en un 99% en la rentabilidad de la compañía minera, y en especial en las subsiguientes operaciones mineras unitarias (carguío, acarreo, chancadora primaria, chancadora secundaria, etc.). Enfatizando, la fragmentación como resultado de una voladura de rocas tiene un significativo impacto en la rentabilidad de la mina, para ello se requiere una adecuada fragmentación en el tamaño de la roca para maximizar el

desempeño de los procesos posteriores. Si la fragmentación de tamaño de roca fragmentado es modelada y controlada, la operación habrá hecho un avance significativo hacia la mejora de su desempeño.



Figura N° 4.2: Muestra las operaciones binomiales de perforación y voladura (Fuente Mina Cuajone).

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

#### **4.2 VOLADURA DE PRODUCCIÓN**

Como se reitera, existen diversos modelos matemáticos para determinar las mallas de perforación y voladura de rocas; así por ejemplo se tiene a los investigadores Segeren y Cheng; a mediados de la década de los 70 postularon el siguiente modelo matemático para obtener una "fragmentación óptima" en función de la minimización de los costos operacionales de las operaciones mineras unitarias que conforman el ciclo total de minado, cuya ecuación para obtener la "fragmentación óptima" es la siguiente:

$$Tc / Tm = \Sigma(D_c + B_c + L_c + H_c + D_c + PR_{cc} + SE_{cc} + TR_c) = MinCosUS\$/Tm = Optimum Fragmentation$$

Dónde:

- Dc = Costo de perforación
- Bc = Costo de voladura
- Lc = Costo de carguío
- Hc = Costo de acarreo
- Dc = Costo de descarga
- PRcc = Costo de chancado primario, etc.

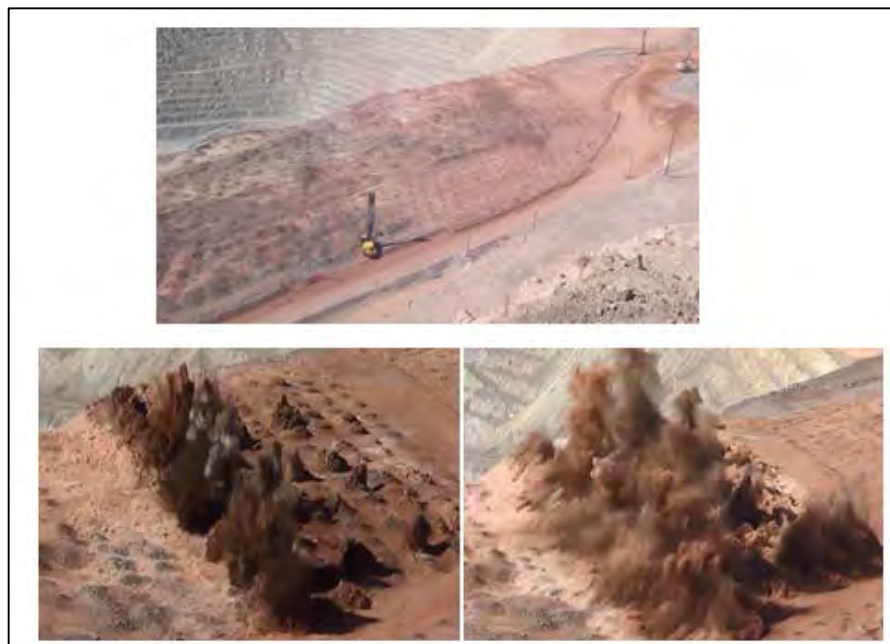


Figura N° 4.3: Muestra la voladura de producción en Cuajone.

Si la fragmentación como resultado de una voladura de rocas de producción no es la adecuada, se incrementaran los costos operaciones, tales como: perforación y voladura secundaria, incremento de la dificultad de transporte, disminución del factor de carga de los volquetes, incremento de consumo de energía en el chancado y molienda. Entonces se tendrán elevados costos de operación en US\$ por tonelada fragmentada.



Figura N° 4.4: Muestra la fragmentación como resultado de la voladura en Cuajone.

Por ejemplo, en Cuajone para determinar las mallas de perforación y voladura ( $B \times S$ ) se viene usando el modelo matemático de Pearse; porque hace intervenir un parámetro de la mezcla explosiva comercial que es la presión de detonación de la carga explosiva  $P_2$ , (PSI) y el parámetro de la roca como la Resistencia a la tensión dinámica de la roca  $S_{td}$  (PSI).

$$R = B = \frac{KD}{12} \sqrt{\frac{P_2}{S_{td}}}$$

Dónde:

R = Radio critico

B = Burden en pies

D = Diámetro del taladro (pulg)

$P_2$  = Presión de detonación de la carga explosiva (psi)

$S_{td}$  = Resistencia a la tensión dinámica de la roca (psi)

K = Factor de volabilidad.

$$K = 1.96 - 0.27 \ln(ERQD)$$

ERQD = Índice de calidad de roca equivalente (%)

ERQD = RQD x JSF

RQD = Índice de calidad de roca (Rock Quality Designation)

JSF = Joint Strength Correction Factor.

Factores de corrección para estimar JSF.

Tabla N° 4.1: Muestra los valores del JSF de la calidad de la roca.

| Estimación de la calidad de la roca | JSF        |
|-------------------------------------|------------|
| <b>Competente</b>                   | <b>1.0</b> |
| <b>Media</b>                        | <b>0.9</b> |
| <b>Suave</b>                        | <b>0.8</b> |
| <b>Muy suave</b>                    | <b>0.7</b> |



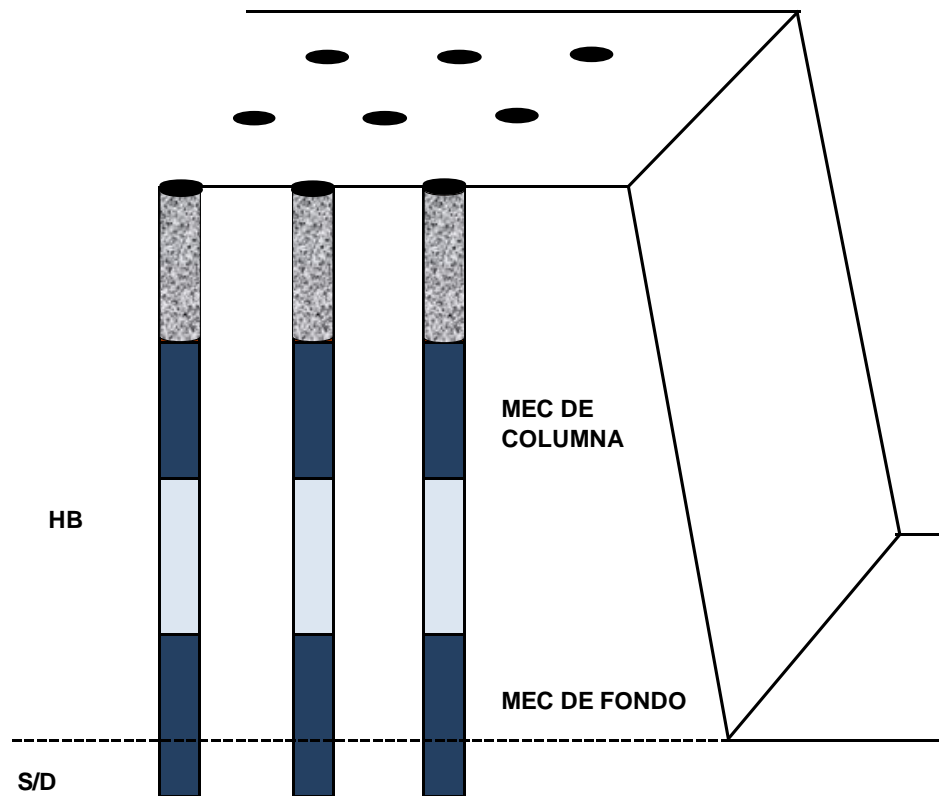


Figura N° 4.5: Muestra un banco con las mallas de perforación y voladura (Fuente Robert O. Medina Cortez).

#### 4.2.1 Definición de voladura de producción.

La voladura de producción, es la acción de fragmentar el macizo rocoso mediante el uso de mezclas explosivas comerciales con la finalidad de extraer los minerales depositados en dichos macizo rocoso, que mediante otros procesos se convierten en metales. La voladura de producción en la industria minera se explota en grandes cantidades de volúmenes de roca, dependiendo lo requerido en el planeamiento de minado.



Figura N° 4.6: Muestra el diseño de malla B x S en Cuajone.



Figura N° 4.7: Muestra la voladura de producción y el carguío y acarreo en Cuajone.

### 4.3 VOLADURA CONTROLADA.

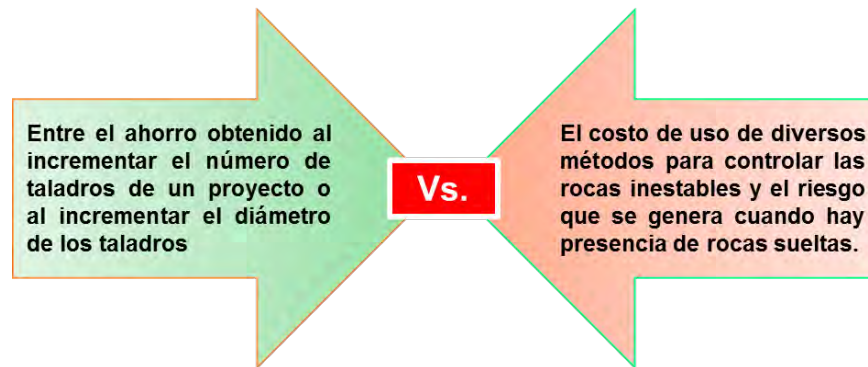
En la industria minera con el fin de obtener máxima producción muchas veces se incurre en el error de no tener en cuenta los posibles daños que puede generar a la roca remanente y en hasta posibles costos en sostenimiento, es por ello importante usar alguno de los modelos matemáticos que usa la voladura controlada para minimizar los daños que ocasiona la voladura de producción a la roca remanente o a estructuras cercanas al área del disparo.



Figura N° 4.8: Muestra la voladura de pre-corte en Cuajone.

La elección de una mezcla explosiva comercial tiene una influencia determinante en la reducción de costos operacionales; sin embargo, esto ha traído como consecuencia un incremento de la concentración de energía en el área del disparo, creando problemas de back break en el macizo rocoso remanente que debe ser afectado por la ondas de choque inducidas por la voladura de rocas.

Por lo mencionado anteriormente, es por esta razón, que algunos investigadores plantean que debe llevarse a cabo un análisis de sensibilidad técnico-económico en:



Los investigadores inmersos en esta materia, también plantean que la mejor solución para dicho problema es controlar los efectos negativos de la voladura de rocas; de tal manera, que la resistencia inherente de las paredes de las labores mineras después del disparo primario, no sean destruidas o afectadas. Es por lo cual, que los especialistas han inventado una serie de modelos matemáticos que están disponibles para ser usados en la industria minera, así se tienen los siguientes:

- Perforación en línea (Line drilling)
- Pre-corte (pre-splitting, preshearing, pre-slotting or stress relieving)
- Pre-corte con espaciamiento de aire (air deck pre-splitting).
- Voladura de recorte.
- Voladura lisa (smooth blasting)
- Voladura suave (cushion blasting)
- Voladura amortiguada (buffer blasting)

Los diferentes modelos matemáticos de la voladura controlada han sido desarrollados a través del tiempo y estas se empezaron a usar en la década de los años 50. El modelo matemático de perforación en línea, envuelve la creación de un plano de debilidad, el cual es obtenido mediante el uso de una serie de taladros cercanamente espaciados con o sin cargar y se encuentran en el límite de la labor minera. En Cuajone los taladros de precorte tienen 16 m de profundidad, inclinación es variable de 75° a 90° y 5" de diámetro y estos son cargados con emulsión encartuchada (Famecorte) de 1 ½", finalmente para su detonación son conectados mediante cordón detonante que es unido a disparo de producción.

Los otros modelos matemáticos, envuelven la perforación de una línea de taladros paralelos al perímetro de la excavación y el carguío de dichos taladros con mezclas explosivas comerciales.

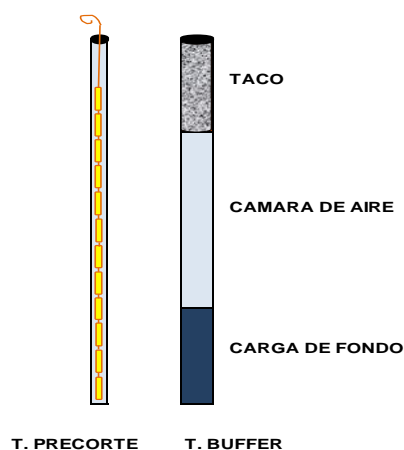


Figura N° 4.9: Muestra los diseños de carga para la voladura controlada (Fuente Robert O. Medina Cortez)

#### 4.3.1 Definición de voladura controlada.

La voladura controlada es la acción de crear un plano de falla con el objetivo de proteger a la roca remanente o a las estructuras cercanas de la zona del disparo. Dependiendo del modelo matemático que se elija se creara el plano de falla que muchas veces se produce antes o al mismo tiempo de la voladura de producción.

El objetivo fundamental de este plano de falla es que las ondas de la voladura de producción se refracten y se reflejen; estas últimas vienen fragmentando el macizo rocoso y las que no se reflejan se disipan.



Figura N° 4.10: Muestra los resultados usando voladura controlada,  
(Fuente ISEE).

#### 4.4 ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN.

Entonces, se tiene bien claro que la voladura de producción es para fragmentar la roca, mientras que la voladura controlada es para proteger el macizo rocoso remanente al área del disparo.

Por lo que, los profesionales que se encargan de esta operación minera unitaria de voladura de rocas, se encuentran en el dilema de obtener mayor producción fragmentando el macizo rocoso, y al mismo tiempo no deben ocasionar daños a la roca remanente.

Sin embargo, los ingenieros de minas que están preparados, capacitados y actualizados si podrán obtener producción y productividad reduciendo los costos operacionales, en especial los costos de los sistemas de sostenimiento.



Figura N° 4.11: Muestra una voladura de producción y pre corte para proteger la roca remanente.



Figura N° 4.12: Muestra una voladura en Cuajone.



**CAPITULO V**  
**CONCEPTOS MATEMÁTICOS BÁSICOS DE LA OPERACIÓN**  
**MINERA UNITARIA DE VOLADURA DE ROCAS.**

**5.1 INTRODUCCIÓN.**

Se sabe que la industria minero-metalúrgica tiene un rol muy importante en el desarrollo técnico económico financiero de cualquier país del mundo. Entonces, el Perú no puede ser la excepción, aun sabiendo que el Perú ha sido, es y será un país mineralizado; esta aseveración se basa en que es la industria minero-metalúrgica la que proporciona los mayores ingresos anuales al país (PBI).

Por otro lado, en el presente trabajo de investigación se describe, analiza y discute las variables y los parámetros más importantes que intervienen en el proceso del fracturamiento de rocas. También, se sabe que hasta la fecha se han escrito muchos artículos técnicos científicos, así como muchos libros y softwares, pero la mayoría de ellos solo tratan

parcialmente el complejo problema de la voladura de rocas; el cual como se sabe representa un proceso: Adiabático, dinámico, estocástico, etc.

Así por ejemplo, muchos autores han escrito y postulado modelos matemáticos para efectuar el diseño de los disparos primarios; otros han descrito acerca de la influencia de las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso en los resultados de una voladura de rocas.



Figura N° 5.1: Muestra las propiedades físicas del macizo rocoso  
(Fuente Robert O. medina Cortez).

También, algunos investigadores han escrito acerca de la geología estructural y de los parámetros de detonación y explosión de las mezclas explosivas comerciales en los resultados de una voladura de rocas. Finalmente, se debe mencionar que durante las últimas décadas se ha investigado acerca del proceso del fracturamiento de rocas, y el análisis

termohidrodinámico de las mezclas explosivas comerciales de modo que el enfoque tradicional ha sido reemplazado por una nueva metodología basada en los conceptos fundamentales de: Energía-fragmentación y movimiento de las rocas.

## 5.2 FACTORES QUE TIENEN UNA INFLUENCIA DETERMINANTE EN LOS RESULTADOS DE UNA VOLADURA DE ROCAS.

Los factores de la referencia son los siguientes:

- El explosivo
- El macizo rocoso
- La geometría del disparo.



Figura N° 5.2: Muestra el diseño de las mallas de perforación y voladura y carguío de los taladros (Fuente web internet & Robert O. Medina Cortez).

También, se debe tener especial consideración a los siguientes tópicos.

- La modelización de la voladura de rocas.
- El diseño de la voladura
- El análisis de sensibilidad de los resultados usando los modelos matemáticos en la computadora
- La implementación en el campo de los resultados más representativos y reales obtenidos en la computadora mediante el análisis de sensibilidad respectivo
- Los métodos de evaluación más modernos y más usados en la minería moderna
- Los impactos ambientales inducidos por al voladura de rocas
- Los costos de perforación y voladura por Tm disparada.
- La maximización de la producción y la productividad como función de la fragmentación y la uniformidad de esta, etc.
- Así como también, se debe tener especial consideración a la modelización de la voladura.

### **5.3 VARIABLES EN EL PROCESO DE FRACTURAMIENTO DE ROCAS.**

Los investigadores inmersos en esta materia dividen al proceso del fracturamiento de rocas en varias etapas, por ejemplo el investigador R. Frank Chiappetta divide en cuatro etapas, la escuela europea divide en 5 etapas y la escuela americana en tres etapas.

Pero cabe resaltar que la mayoría de los investigadores están de acuerdo en que los factores determinantes en los resultados de un disparo primario entre otros son los siguientes:

La geometría del disparo para lo cual se divide las variables en controlables y no controlables.

**5.3.1 Las variables no controlables** o aleatorias del macizo rocoso, tales como:

- Resistencia compresiva ( $S_c$ )
- Resistencia tensional ( $S_t$ )
- La hidrología y las condiciones climáticas
- La geología local, regional y estructural
- Las fallas, contactos, discontinuidades, las caracterizaciones geomecánicas (RQD, RMR, Q de Barton, RMI, etc.)
- Las constantes elásticas del macizo rocoso: Relación de Poisson ( $\mu$ ), el módulo de elasticidad de Young ( $E$ ), el módulo de rigidez ( $G$ ), la constante de Lamé ( $\lambda$ ), el módulo de bulk ( $K$ ), los índices de volabilidad, etc.



Figura N° 5.3: Muestra el macizo rocoso y sus variables aleatorias,

(Fuente Robert O. Medina Cortez).

### 5.3.2 Variables controlables.

5.3.2.1 Variables geométricas: Entre ellas se tienen: Burden (B), Diámetro de taladro ( $B_H$  F), Espaciamiento (S), Longitud de carga ( $B_{HL}$ ), Sobre perforación (S/D), Taco (ST), Altura de banco (BH), Profundidad de taladro ( $B_{HD}$ ), etc.

5.3.2.2 Variables físico-químicas: Tipo de mezcla explosiva, Densidad de la mezcla explosiva ( $\rho_1$ ), Parámetros del explosivo: Detonación: VOD,  $P_2$ ,  $T_2$ , etc. Parámetros de explosión:  $Q_3$ ,  $P_3$ ,  $T_3$ , Boostering

$$AE = \int_{V_1}^{V_f} PdV - q$$

5.3.2.3 Variables de tiempo: Tipos y tiempos de retardo, tipos y secuencia de salida, etc.

5.3.2.4 Variables operativas: Fragmentación requerida

En esta tesis, se propone dar mucho énfasis a las fases o etapas del proceso de fracturamiento del macizo rocoso.

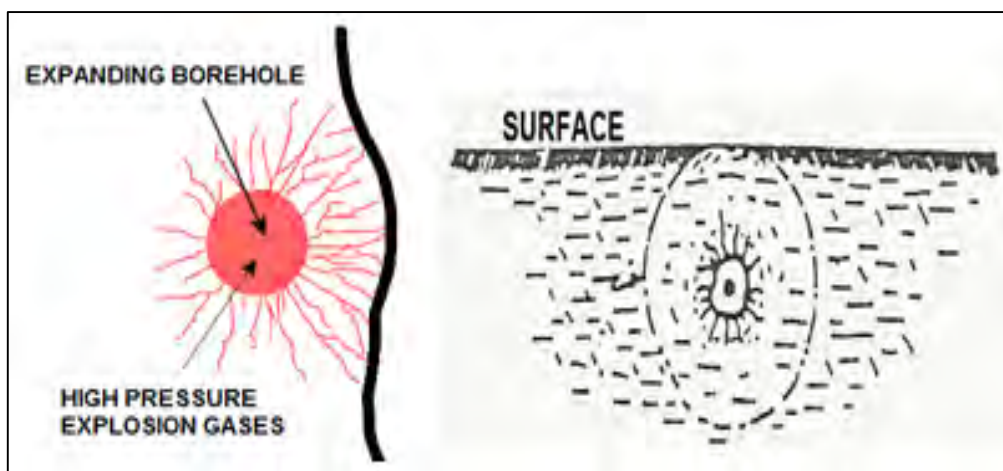


Figura N° 5.4: Muestra la primera etapa del proceso de fracturamiento del macizo rocoso, (Fuente ISEE).

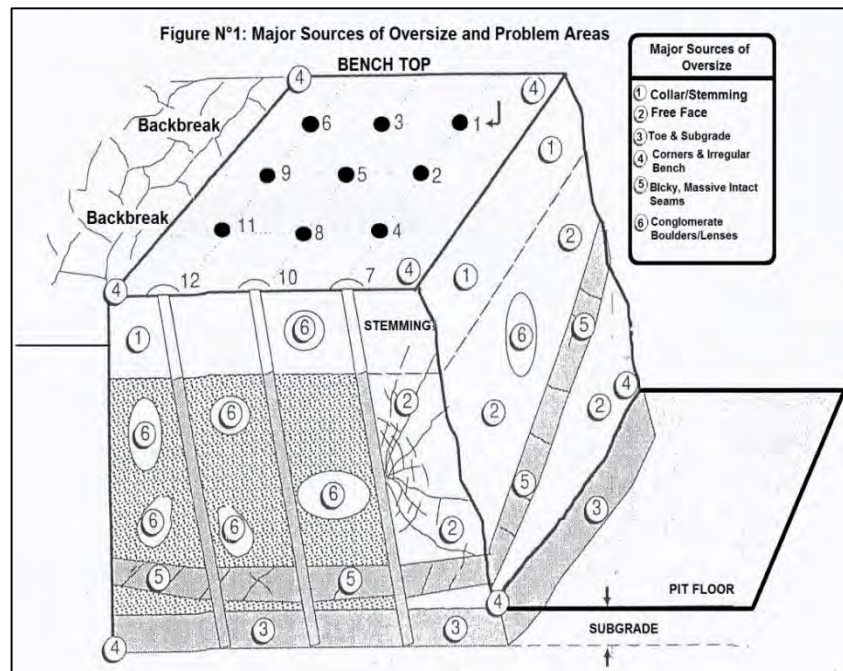


Figura N° 5.5: Muestra el diseño de un banco en open pit, (Fuente ISEE).

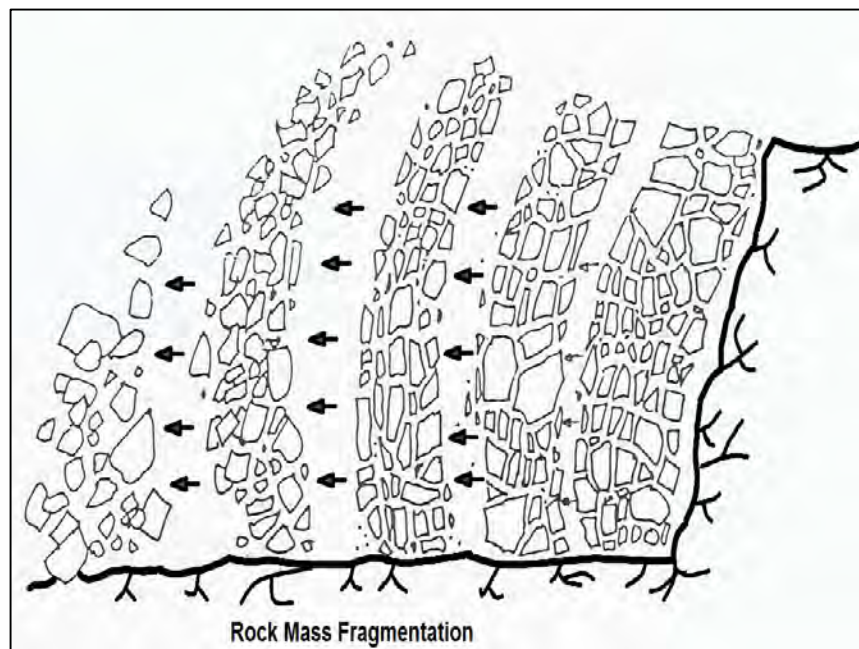


Figura N° 5.6: Muestra el proceso de fragmentación de la roca, (Fuente ISEE).



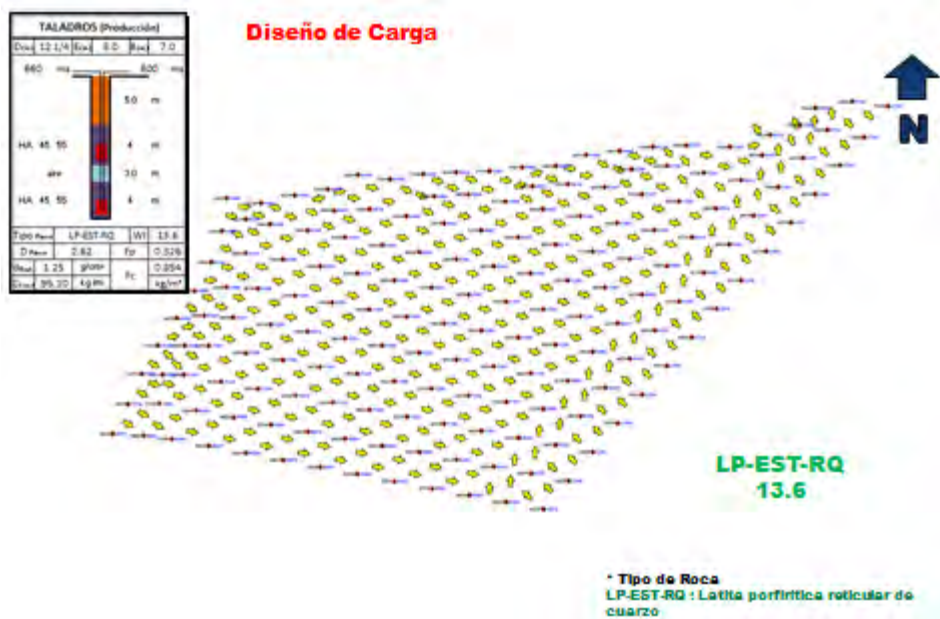


Figura N° 5.7: Muestra el diseño de carga en Cuajone.



Figura N° 5.8: Muestra el proceso de fragmentación de la roca en Cuajone.

## **CAPITULO VI**

### **EMULSIONES EXPLOSIVAS**

#### **6.1 INTRODUCCIÓN**

Las emulsiones explosivas son llamadas mezclas explosivas comerciales de la última generación, porque junto con los slurries y el ANFO pesado fueron las últimas mezclas explosivas que inventó el Dr. Melvin Cook. Se debe mencionar que las emulsiones fueron diseñadas y preparadas para fragmentar rocas muy competentes en las condiciones más severas referentes a cantidades de agua y temperatura. Las emulsiones explosivas han sido formuladas para ser transportadas y cargadas mediante los llamados camiones fábrica.



Figura N° 6.1: Muestra el camión fábrica cargando los taladros del pit en Mina Cuajone.

## 6.2 DESARROLLO HISTÓRICO DE LAS EMULSIONES EXPLOSIVAS

El desarrollo de la referencia es como sigue:

Las emulsiones explosivas tienen su inicio en 1961 cuando R. Egly y A. Nektar de la Comercial Solvents Corporation llevaron una aplicación de una patente americana para formular y fabricar un agente de voladura compuesto de una mezcla y un agente oxidante sólido tal como el nitrato de amonio ( $\text{NO}_3\text{NH}_4$ ).

La patente fue concebida en 1964. En 1960 y a comienzos de 1970 siguieron desarrollos subsiguientes hasta obtener las emulsiones encartuchadas para diámetros pequeños.

Se debe mencionar que el Dr. Melvin Cook, de Utah University para inventar las emulsiones trato de superar las desventajas del ANFO a estas nuevas mezclas explosivas las llamó: “explosivos con mezcla pastosa”, que realmente era una mezcla de nitrato de amonio a base de agua. Lo que resultó un explosivo impermeable de alta densidad especialmente adecuado para fragmentar rocas muy competentes y húmedas. Las que se encuentran especialmente en los minerales de fierro y cobre, etc.

A continuación se mencionan las patentes más recientes y el orden en que fueron patentadas:

Analizando las patentes americanas relacionadas con este tema se debe mencionar que dichas patentes han sido publicadas en los años: 1969, 1972, 1975, 1977, 1981, 1982, 1987, 1989, 1990, 1995, 1999, 2000, 2001, 2005, etc.

### **6.2.1 Definiciones de una emulsión explosiva**

Una emulsión explosiva es definida como una mezcla íntima de dos líquidos que no se pueden disolver uno en el otro.

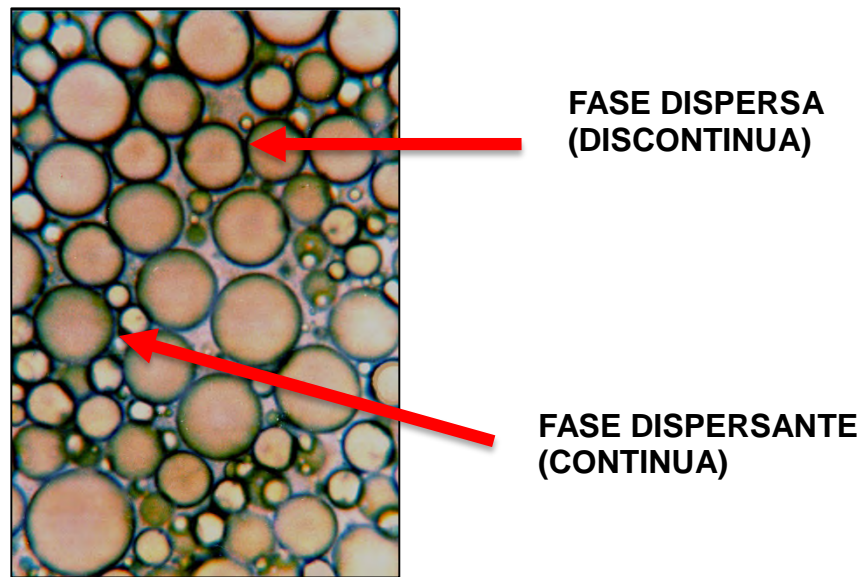


Figura N° 6.2: Muestra el sistema de una emulsión gasificada,  
(Fuente Robert O. Medina Cortez).

Expresado en términos más científicos una emulsión se puede definir como un sistema compuesto de dos fases en las cuales en la fase interna o dispersada es distribuida en una fase externa o continua en la tabla 6.1; se muestran algunos tipos de emulsiones más usadas a nivel mundial.

**Tabla N° 6.1 Muestralos tipos de emulsiones más usadas a nivel mundial**

| <b>Aceite en agua</b>                        | <b>Agua en aceite</b>                        |
|--|--|
| Sellador para asfalto, pintura, látex, milk. | Margarina, fluidos hidráulicos, mantequilla. |

Otra definición de una emulsión explosiva es como sigue:

“Una emulsión explosiva consiste de unas gotas de una solución oxidante suspendida en una fase continua de aceite”.

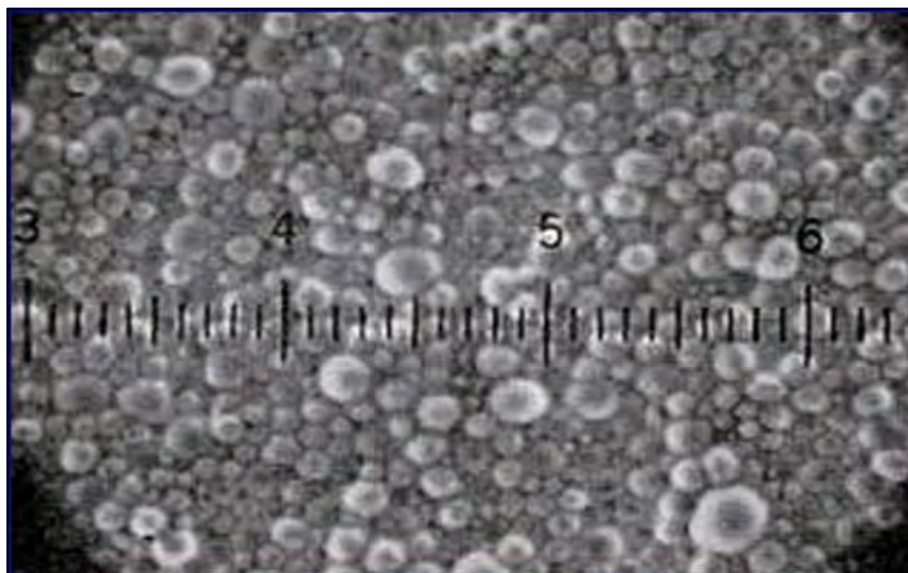


Figura N° 6.3: Muestra el agente oxidante (Fase Dispersa) en petróleo (Fase Continua), con aceites emulsificantes.

El tamaño de las gotas de la solución oxidante están en el orden de magnitud de un tamaño menor al tamaño de los prills de nitrato de amonio (micrones vs mm.). Una composición típica de una emulsión explosiva se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla N° 6.2 Muestra la composición típica de una emulsión explosiva**

| <b>Fase discontinua</b> | <b>Porcentaje (%)</b> |
|-------------------------|-----------------------|
| Agua                    | 10 – 22               |
| Sales inorgánicas       | 65 – 85               |
| Vacíos                  | 1 - 2                 |
| <b>Fase continua</b>    | <b>Porcentaje (%)</b> |
| Combustible             | 3.5 – 8               |
| Emulsificante           | 0.8 – 1.2             |



Figura N° 6.4: Muestra el carguío de un taladro con Heavy ANFO en Cuajone.

En el siguiente diagrama conceptual se muestra la metodología usada para fabricar una emulsión explosiva:

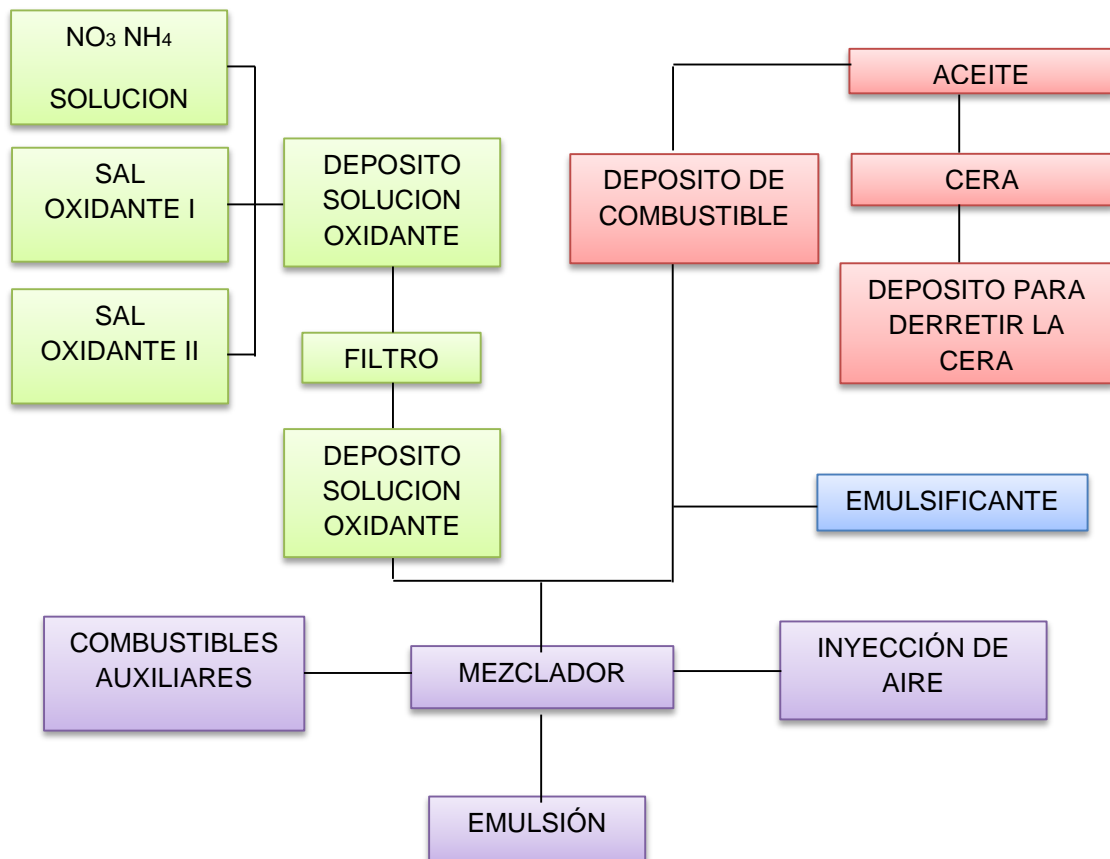


Figura N° 6.5: Muestra la típica fabricación de una emulsión, (Fuente ISEE)

Las emulsiones explosivas son 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 inmisible en el agua del tipo hidrocarbonado.

El desarrollo de las emulsiones ha sido acompañado con una reducción progresiva del tamaño de las partículas pasando desde los sólidos las soluciones salinas con sólidos y por último a las micro-gotas de una



emulsión. En la tabla 6.3 se muestra el orden cronológico de la aparición de las mezclas explosivas comerciales, los oxidantes, combustibles y sensibilizadores empleados en la fabricación de cada una de ellas.

Tabla N° 6.3 Muestra el orden cronológico en el que aparecen la mezcla explosiva comerciales y sus principales componentes

| <b>Explosivo</b> | <b>Oxidante</b>                                  | <b>Combustible</b>                                       | <b>Sensibilizante</b>                                      |
|------------------|--|--|--|
| DINAMITAS        | SOLIDO<br>Nitratos                               | SOLIDO<br>Materiales<br>absorbentes<br>(sensibilizantes) | LIQUIDO<br>Nitroglicerina<br>Gasificantes                  |
| ANFOS            | SOLIDO<br>Nitratos                               | LIQUIDO<br>Aceites                                       | Poros  |
| HIDROGELES       | SOLIDO/LIQUIDO<br>Nitratos<br>Soluciones salinas | SOLIDO/LIQUIDO<br>Alumino<br>Sensibilizante              | SOLIDO/LIQUIDO<br>THT<br>Aluminio en polvo<br>Gasificantes |
| EMULSIONES       | LIQUIDO<br>Soluciones salinas                    | LIQUIDO<br>Aceites / parafinas                           | Gasificantes   |

Tabla N° 6.4: Dimensiones de los oxidantes en los explosivos  
(Bampfield y Morrey, 1984).

| EXPLOSIVO | TAMAÑO<br>(mm) | ESTADO         | VELOCIDAD DE<br>DETONACION (km/s) |
|-----------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| ANFO      | 2              | Sólido         | 3,2                               |
| DINAMITA  | 0,2            | Sólido         | 4,0                               |
| HIDROGEL  | 0,2            | Sólido/Líquido | 3,3                               |
| EMULSION  | 0,001          | Líquido        | 5,0 – 6,0                         |

Se comprende así, que la dificultad de fabricación de las emulsiones se encuentra en la fase aceitosa, por el imperativo balance final de oxígeno, el 6% en peso de la emulsión, que es el aceite, debe englobar al 94% restante que se encuentra en forma de microgotas.

En la Tabla anterior las velocidades de detonación de cada uno de los explosivos, que corresponden a un diámetro dado, reflejan la fuerte dependencia de la eficiencia de la reacción con el tamaño de las partículas.

La estructura de las emulsiones se observa en las fotografías adjuntas, donde las microgotas de solución saturada (oxidante) adoptan una forma poliédrica y no de esferas, con una fase continua de aceite que las envuelve. La figura 6.6 muestra el tamaño de las micro gotas comparado con el de un prill de nitrato de amonio es 100 veces más pequeño.

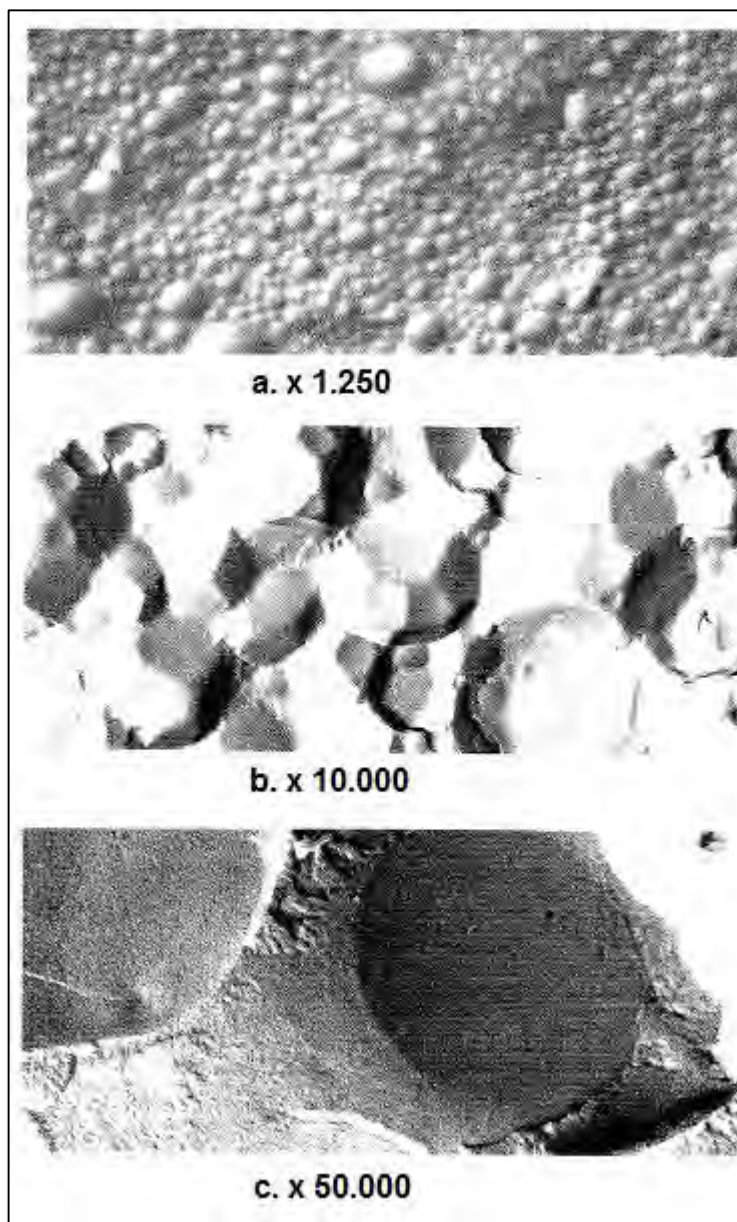


Figura N° 6.6: Muestra la estructura de las emulsiones (Fuente: Bampfield y Morrey, 1984)

Para conseguir una sensibilización adecuada de los explosivos cuando estos 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.

Los agentes gasificantes que se utilizan están constituidos por poliestireno expandido o micro-esferas de vidrio.

En lo referente a los tipos de emulsión, bajo ese término quedan englobados productos de diferentes propiedades relacionadas con las características de la fase continua y su efecto sobre viscosidad y consistencia.

Según el tipo de combustible, gas-oil, parafinas, gomas, etc., las características reológicas de las emulsiones son distintas, así como sus aplicaciones y métodos de empleo. También, el tipo de agente emulsificante que se utilice para reducir la tensión superficial entre los dos líquidos inmiscibles y permitir la formación de la emulsión, puede ayudar a evitar los problemas de coagulación en grandes gotas de la solución de nitrato de amonio, así como el fenómeno de cristalización de las sales.

Otro aspecto a tener en cuenta es el enfriamiento del producto desde el momento de su fabricación, que se realiza a unas temperaturas próximas de 80°C, hasta el instante de su uso.

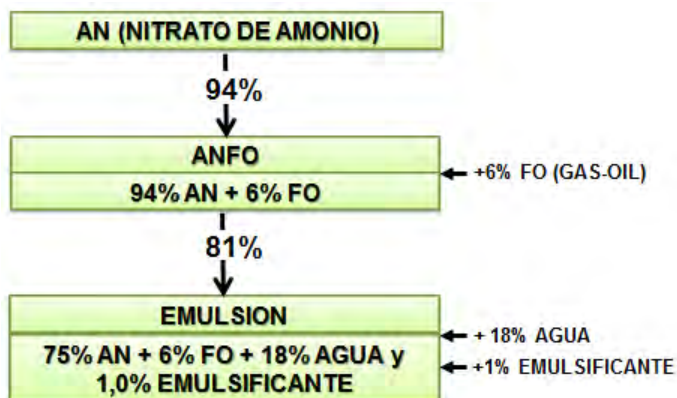


Figura N° 6.7: Muestra la composición básica de una emulsión,  
(Fuente ISEE)

### 6.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

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

Es por el cual, las mezclas explosivas comerciales se han modificado en su matriz. En el caso de la emulsión matriz se ha modificado, agregando un ingrediente dando como resultado la emulsión gasificada. Entonces, la emulsión gasificada debe ser capaz de trabajar bajo cualquier condición en la que se encuentre el macizo rocoso y fragmentar el macizo rocoso igual o mejor que la emulsión matriz, con cero gases tóxicos y bajo costos en US\$/Tm – Fragmentada-

#### **6.4 HIPOTESIS**

Estandarizar las emulsiones gasificadas en reemplazo de los ANFO pesados, minimizando los gases tóxicos y maximizar producción y productividad en US%/Tm. Fragmentada

#### **6.5 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION**

Se ha realizado una revisión bibliográfica exhaustiva para analizar, investigar y conocer las investigaciones realizadas y patentadas respecto al tema de tesis.

Actualmente en Mina Cuajone, las emulsiones gasificadas se vienen provocando, cuyos resultados tanto en fragmentación, gases tóxicos vibraciones, etc se están monitoreando. Luego los resultados de los monitoreos mencionados anteriormente se comparan y analizan con los resultados de los ANFOS pesados.

#### **6.6 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION**

Por lo mencionado en los párrafos anteriores el presente trabajo de investigación está más que justificada, si se tiene en cuenta la economía de libre mercado, la globalización y los impactos ambientales; pues la ciencia y tecnología avanza a pasos agigantados y cada vez las empresas se enfrentan a nuevos retos, los cuales deben desafiarlos; y para desafiarlos deben estar a la vanguardia de los cambios haciendo

investigación científica y/o aplicada para poder existir en el mercado y llegar a la longevidad. Es por ello, que a la emulsión matriz se ha modificado, la cual está siendo implementada en el campo , cuyo carguío a los taladros se hace con el camión fabrica.

## 6.7 PLAN DE TRABAJO.

El plan de trabajo para desarrollar la presente tesis de investigación se explica y describe en el cronograma de actividades respectivas.

### 6.7.1 Cronograma de actividades.

Tabla N° 6.5: Muestra las actividades que se llevaran a cabo para elaborar esta tesis.

| Actividades | Meses |    |     |    |
|-------------|-------|----|-----|----|
|             | I     | II | III | IV |
| I           |       |    |     |    |
| II          |       |    |     |    |
| III         |       |    |     |    |
| IV          |       |    |     |    |

- I. Se hará una revisión de toda la información concerniente al tema de la presente tesis, inclusive si hubieran nuevas formulaciones de mezclas y/o modificaciones de mezclas explosivas comerciales a la fecha.
- II. Se analizara e interpretara los resultados de los disparos de la emulsión gasificada y se compara estos resultados con el ANFO pesado.

- III. Se harán los controles y monitoreos de los disparos respectivos, en términos de fragmentación y gases tóxicos.
- IV. interpretación, análisis, evaluación y discusión de resultados.
  - Si hubiera algún impacto negativo inducido por la voladura de rocas con la mezcla explosiva comercial denominada emulsión gasificada, se tomaran las medidas de control, mitigación y prevención.
  - Conclusiones y recomendaciones
  - Bibliografía.
  - La clasificación de la información, organización y elaboración de la tesis, etc., etc.

Este trabajo de investigación presenta una metodología descriptiva, mostrándose gráficamente las comparaciones entre las diversas diferencias técnicas y económicas las mezclas explosivas comerciales usadas. Los datos tomados para el desarrollo de la presente tesis vienen de las pruebas que actualmente se están desarrollando en la Mina Cuajone.

## **6.8 ANFO PESADO (HEAVY ANFO)**

En la tecnología actual de la voladura de rocas es incuestionable que el ANFO constituye el explosivo básico. Diversos intentos se han dirigido hacia la obtención de mayor energía de este explosivo, desde la trituración de los prills de nitrato de amonio de alta densidad hasta el empleo de combustibles líquidos de alta energía, como las



nitroparafinas, el metanol y el nitropropano, pero comercialmente no han dado buenos resultados.

El ANFO pesado, que es una mezcla de emulsión base con ANFO, abre una nueva perspectiva en el campo de los explosivos.

El ANFO presenta unos orificios intersticiales que pueden ser ocupados por un explosivo líquido como la emulsión que actúa como una matriz energética.

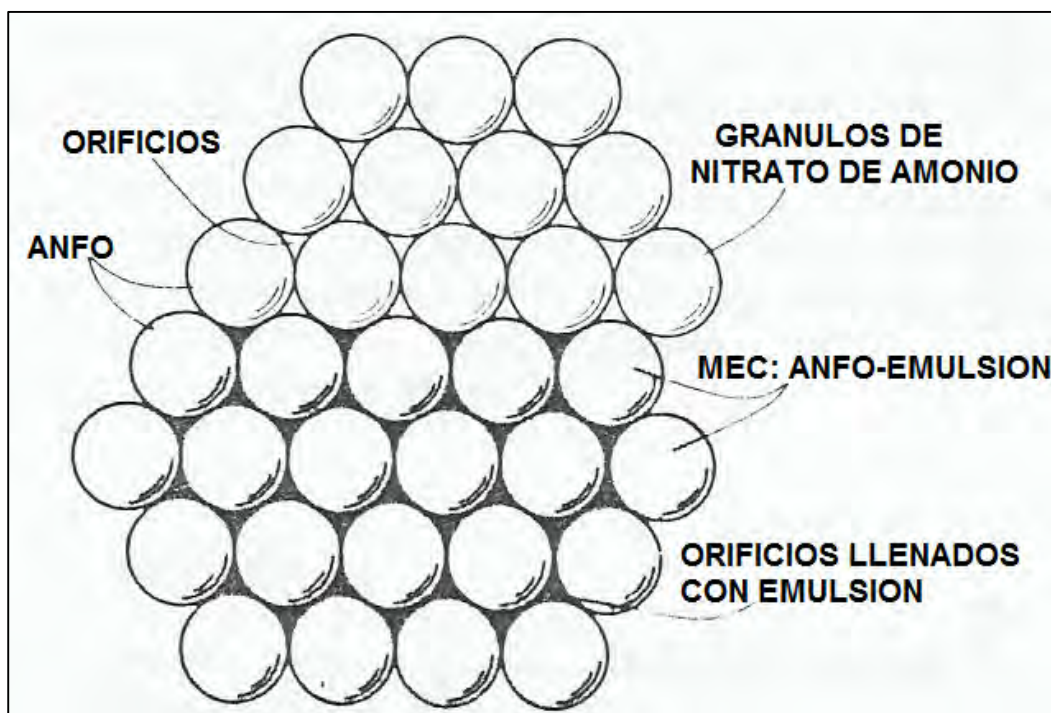


Figura N° 6.8: Muestra la estructura del ANFO pesado, (Fuente Du Pont).

Aunque las propiedades de este explosivo dependen de los porcentajes de la mezcla, las ventajas principales que presentan son:

- Mayor energía
- Mejores características de sensibilidad
- Gran resistencia al agua

Posibilidad de efectuar cargas con variación de energía a lo largo del taladro. La fabricación es relativamente fácil, pues la matriz emulsión puede ser preparada en una planta fija y transportada en un camión fábrica hasta un depósito de almacenamiento o bombeada a los taladros directamente. Con los camiones fábrica pueden ser preparadas las emulsiones in situ en proporciones a las condiciones del área de trabajo o de acuerdo a las características físico mecánicas del macizo rocoso.

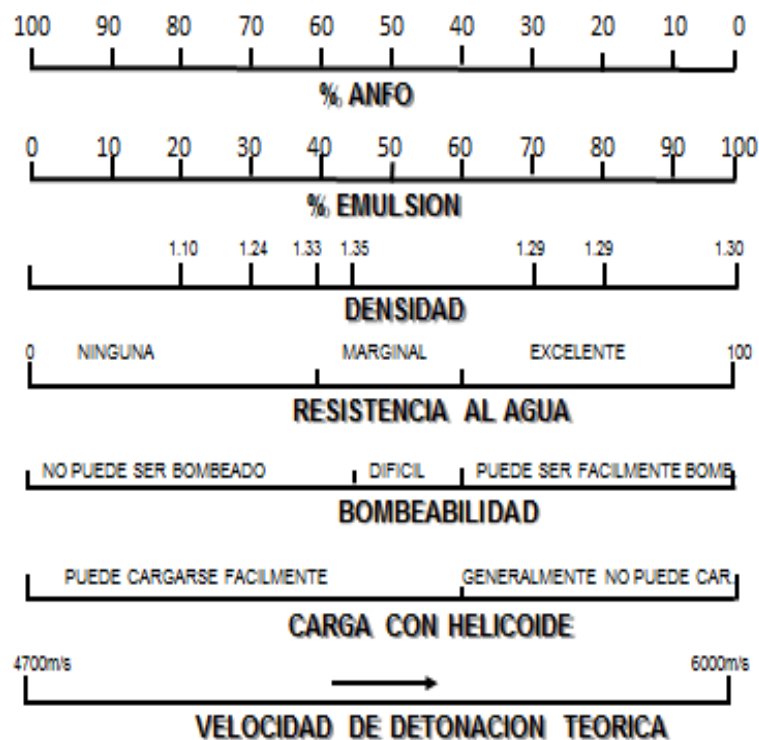


Figura N° 6.9: Muestra las características de carga y resistencia al agua de diferentes tipos de ANFO pesado (Fuente: Du Pont, 1986)

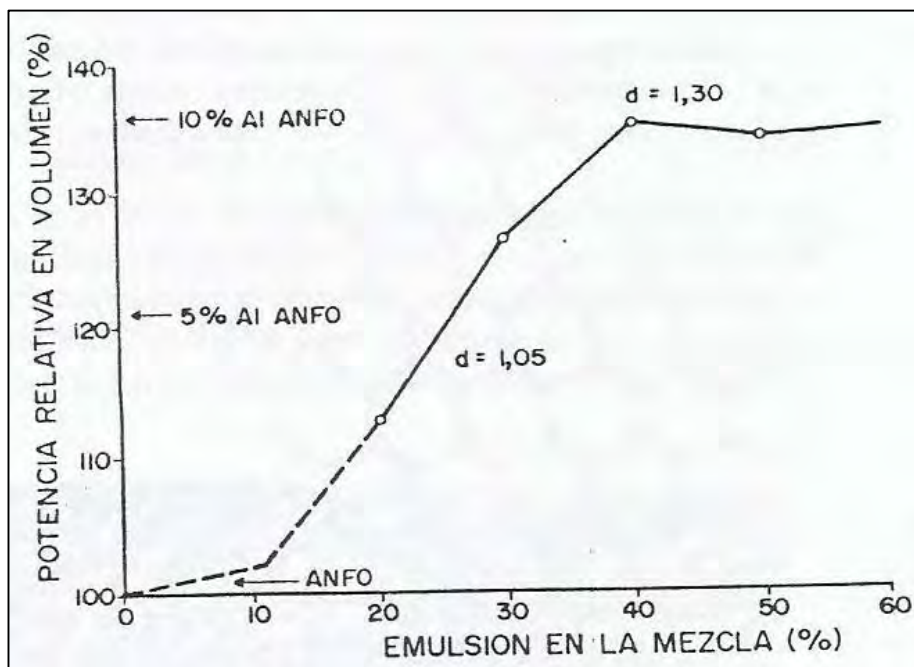


Figura N° 6.10: Muestra la variación de la potencia y densidad de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión, (Fuente Bampffield y Morrey, 1984)

Encima del 40% la potencia disminuye debido a que la separación de las partículas de ANFO resulta elevada para que estas actúen eficientemente como puntos calientes y propagadores de la onda de choque.

La densidad de la mezcla aumenta con el porcentaje de emulsión, alcanzándose la energía máxima para un valor de esta de 1.3 Gr/cc aproximadamente.

En la figura N° 6.11 se indica la variación de la sensibilidad del ANFO pesado conforme aumenta el porcentaje de emulsión. La sensibilidad disminuye al incrementarse la densidad, siendo necesario cada vez un iniciador de mayor peso. Para una densidad de 1.33 gr/cc se necesita un multiplicador de pentolita de 450 g como mínimo.

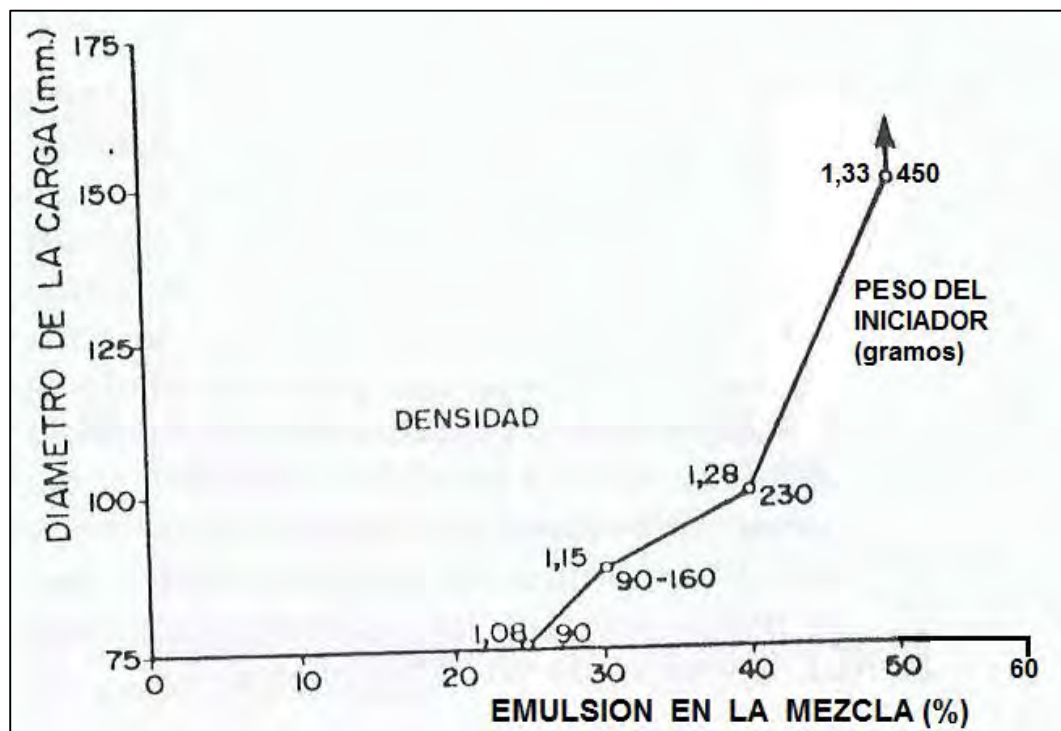


Figura N° 6.11: Muestra la variación de la sensibilidad del ANFO pesado con el porcentaje de emulsión (Fuente: Bampfield y Morrey, 1984)

Por otro lado, una emulsión explosiva también puede ser definida como una mezcla de una solución de sales oxidantes y una fase coloidal dada

por los combustibles. La solución de sales oxidantes está formada por AN, SN,  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , etc., y es disuelta en agua al nivel de saturación que normalmente está dentro de un rango de 40° a 60°F, la solución sobre saturada se encuentra en forma de gotas muy pequeñas típicamente entre 2 a 20 micrones, la cual está envuelta en la fase coloidal de combustibles, la cual forma un medio o fase continua. La sensibilidad de una emulsión está en función de la dispersión o del contacto externo entre el oxidante y el combustible. Esta propiedad o características de las emulsiones es fundamental para obtener una buena fragmentación del macizo rocoso, cuando se lleva a cabo la operación minera de voladura de rocas.

En realidad la solución oxidante que está completamente saturada por capas de combustibles que son impermeables al agua, y es justamente esta propiedad la que les da el grado de resistencia de las emulsiones. En la preparación de una emulsión a granel, el oxidante es disuelto en agua y mezclado con el combustible para formar una matriz.

Finalmente se añade el sensibilizador, y si es necesario combustibles adicionales para obtener la emulsión requerida.

Por otro lado, se debe mencionar que las formulaciones de las emulsiones pueden ser ajustadas de acuerdo al tipo de macizo rocoso

donde será usada, y también de acuerdo a las condiciones donde será usada.

Cabe mencionar, que los primeros conceptos físicos-químicos de las emulsiones tuvieron lugar en la década de los 60; pero realmente cuando se comienzan a usar en las operaciones mineras de la voladura de rocas, es en la década de los 80, cuando el Dr. Melvin Cook junto a Robert Clay inventan los ANFOS pesados.

Entonces, se debe enfatizar que los explosivos de la nueva generación son: Slurries, emulsiones, ANFOS pesados, Plasma, etc.

Por otro lado, las emulsiones son preparadas en la forma de emulsiones agua en aceite. La fase interna está compuesta de una solución de sales oxidantes suspendidas microscópicamente como gotas finas; las cuales son circundadas por una fase continua de combustibles. En la figura 6.5 se muestra este concepto. También se debe mencionar que las emulsiones son estabilizadas para evitar su separación líquida por un agente emulsificante. Además se puede agregar algunos sensibilizadores para poder controlar la densidad, etc.

Rango de la densidad ( $\rho_1$ )



## 6.9 ENERGÍA TERMOQUÍMICA DE LAS EMULSIONES.

Las emulsiones son muy eficientes desde el punto de vista termoquímico; se debe principalmente al tamaño microscópico de sus partículas.

Por otro lado, los explosivos granulares, que son fabricados con varios tamaños de partículas, tales como el AN/FO o los slurries; estos no tendrán un rango uniforme de la reacción de sus partículas, y por lo tanto no serán termoquímicamente tan eficientes como las emulsiones.

### 6.9.1 Velocidad de detonación (VOD)

Debido al tamaño de partículas que es muy fino, por lo tanto la VOD es muy alta.

### 6.9.2 Ventajas.

Entre las ventajas más notables del uso de las emulsiones para llevar a cabo las operaciones mineras de voladura de rocas se tienen las siguientes:

- Facilidad en el manipuleo, transporte y almacenaje.
- Brindan mucha seguridad en todo el proceso de la voladura de rocas.
- Explosivo usado a nivel mundial
- Se puede variar sus densidades muy fácilmente
- Durante su detonación no produce gases tóxicos.
- Tiene una excelente resistencia al agua
- Tiene un buen acoplamiento con las paredes del taladro
- Alta velocidad de detonación
- Brinda un buen ambiente de trabajo
- Se carga muy fácilmente y en corto tiempo
- Las emulsiones pueden ser del tipo agente de voladura, así como también del tipo alto explosivo, etc.

#### **6.10 Emulsiones explosivas químicamente gasificadas.**

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

Esta técnica requiere la inyección de pequeñas cantidades de un reactivo químico dentro de la fase de la emulsión justo antes de bombear la emulsión dentro de los taladros. Al estar el reactivo químico en



contacto con la emulsión este reacciona produciendo burbujas de gas muy finas en la emulsión, que la hace sensible a un iniciador de alta potencia (booster, dinamita o emulsión sensible al detonador), y finalmente con la mezcla del ANFO el producto es cargado dentro de los taladros.

La sensibilización usando gaseado químico es muy similar al uso de microbalones; con dos excepciones principales que son las siguientes:

- La densidad del producto cambia con el tiempo, de acuerdo al grado de determinación de la reacción del gaseado químico.
- La densidad del producto es afectada por la presión hidrostática.

Ambos factores impactan significativamente para el manipuleo del producto y en el proceso del carguío de los taladros se deben tomar algunas muestras y la densidad final solamente podrá ser chequeada después de completar la reacción del gaseado lo cual normalmente toma aproximadamente 25 minutos.

Normalmente el operador del camión de fábrica debe tomar muestras regularmente de la mezcla explosiva que está cargado en los taladros; y también debe medir la densidad de cada una de las muestras cada cierto tiempo para chequear el rango del gaseado.

Ajustes en el rango de adición de los componentes del gaseado pueden ser realizados para asegurarse que la densidad del producto final está muy bien controlada bajo los estándares de utilización de la emulsión gasificada.



Figura N° 6.12: Muestra el carguío de los taladros en open pit,  
(Fuente web Exsa).

Las densidades finales obtenidas de las pequeñas muestras tomadas durante el carguío de los taladros son denominadas como densidades de copa, y esta representan las densidades del explosivo de la parte superior de la columna explosiva; se debe tener en cuenta que estas no son el promedio ni las máximas densidades.

Debido a que la mezcla final contiene burbujas finamente dispersas a través de la fase emulsión, en el volumen de las burbujas dependerá de la presión hidrostática. Por lo tanto, en el fondo del taladro; donde la

presión debido a la columna explosiva será alta, el volumen de las burbujas será reducido, y entonces el volumen relativo de gas a emulsión será también reducido.

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



Figura N° 6.13: Muestra la variación de la densidad de columna de la emulsión gasificada, (Fuente Robert O. medina Cortez).

En la figura 6.14, se muestra el rango de la diferencia de densidades para una columna explosiva de una altura de carga de 20 metros en un

taladro de gran diámetro, y esta carga explosiva no tiene taco y con una densidad de copa de 1.10 gr/cc.

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

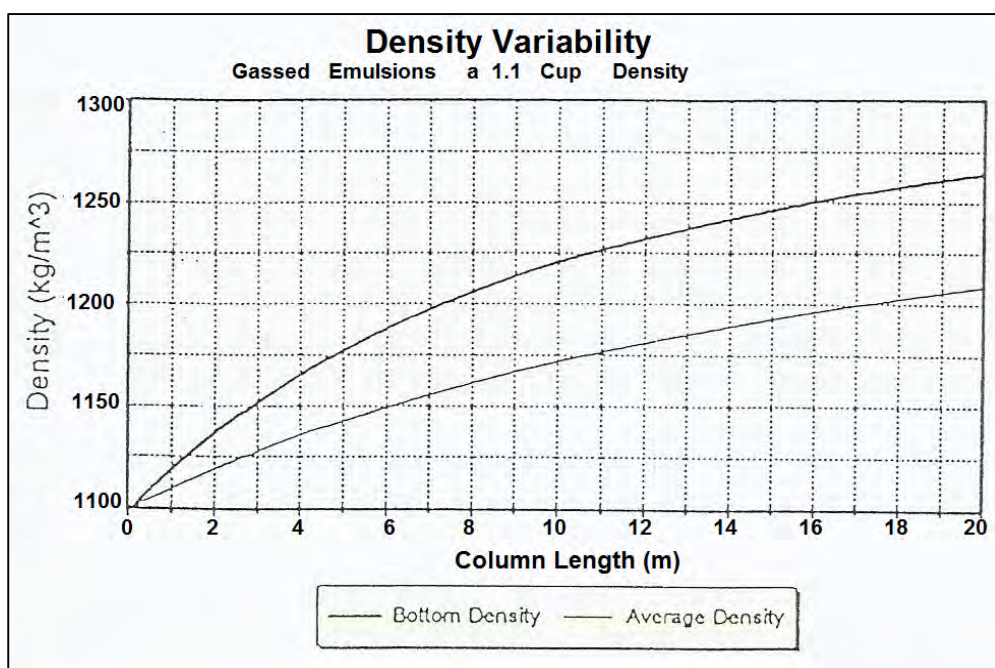


Figura N° 6.14: Muestra la variación de la densidad vs la longitud de columna explosiva para una emulsión gasificada con la densidad de copa de 1,1 gr/cc.

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

densidad crítica de la emulsión; para un diámetro de taladro que se está usando.

Si la densidad de la columna explosiva incrementa demasiado, la velocidad de detonación disminuye; requiriendo el uso de boosters que produzcan mayor presión de detonación ( $P_2$ ); y podrían producir gases del color anaranjado indicando una reacción incompleta.

### Proceso de la voladura de rocas



Figura N°6.15: Muestra la presencia de gases anaranjados (Fuente Mina Cuajone).

## **CAPÍTULO VII**

### **CASOS-ESTUDIO MONITOREADOS Y EVALUADOS USANDO EMULSIONES GASIFICADAS.**

#### **7.1 INTRODUCCIÓN.**

Teniendo en cuenta que como resultado de la operación minera unitaria de voladura de rocas en Cuajone; se quiere obtener una muy buena fragmentación en términos de granulometría y uniformidad de esta para lo cual se está investigando una serie de alternativas para conseguir lo anteriormente mencionado.

Una de estas investigaciones consiste en efectuar una serie de pruebas para evaluar y comparar los resultados técnicos-económicos-ecológicos obtenidos usando una emulsión gasificada vs el ANFO pesado en sus diferentes mezclas (HA-28, HA-37, HA-45/55, HA-55 y HA-64)

#### **7.2 PRINCIPALES OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Los objetivos de la referencia entre otros son los siguientes:

- Analizar y evaluar la fragmentación obtenida.
- Eliminar la generación de humos naranja inducidos por la voladura de rocas.
- Evaluar el apilamiento del material disparado.
- Llevar a cabo una evaluación económica en US\$/Tm. disparada usando una emulsión gasificada vs ANFO pesado, etc.

### **7.3 CASOS-ESTUDIO LLEVADOS A CABO USANDO UNA EMULSIÓN GASIFICADA**

Para realizar la evaluación técnico-económico-ecológico de la referencia; se efectuaron seis disparos primarios, que a continuación se describen cada uno ellos, considerando los parámetros de diseño y resultados de velocidad de detonación como también la mitigación de gases nitrosos con el empleo de la emulsión gasificada.

### 7.3.1 Disparo del Proyecto 3265-647 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone, perforadora 10-11.

En el banco se perforaron 159 taladros, que fueron cargados con la mezcla AP-73Q gasificada.

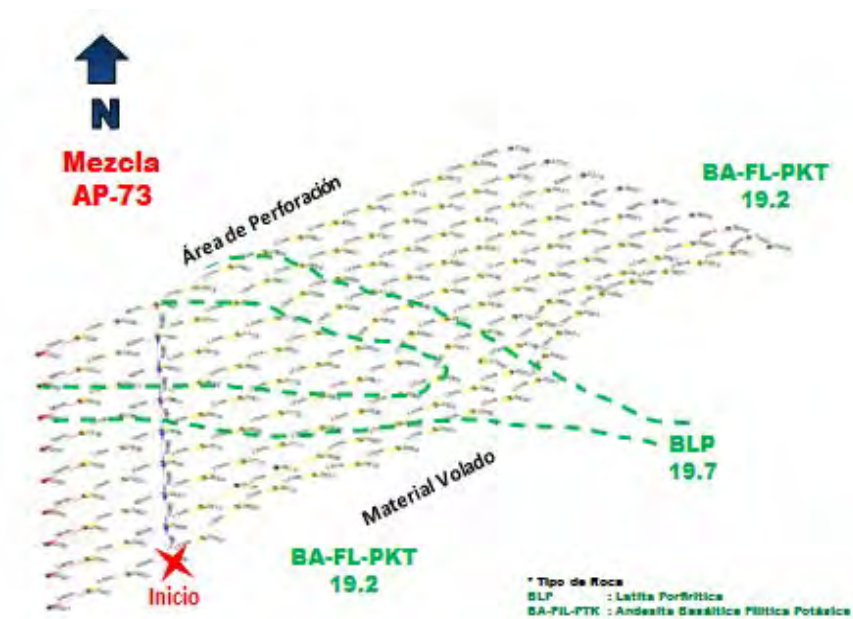


Figura N° 7.1: Muestra la iniciación de la voladura de rocas en Cuajone.

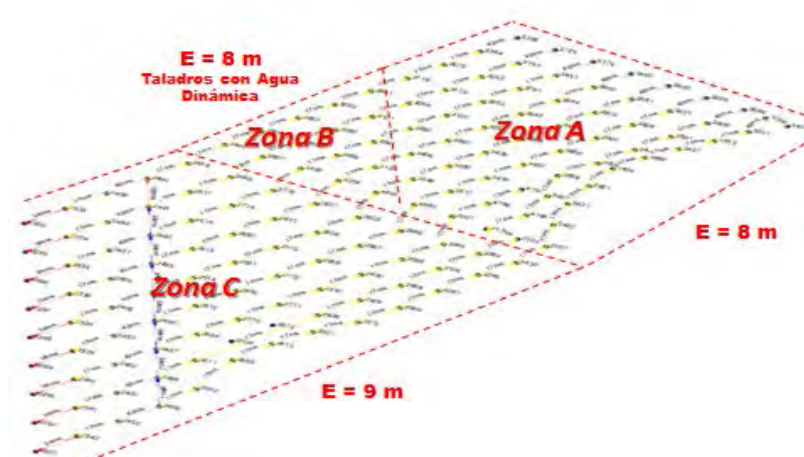


Figura N° 7.2: Muestra Condiciones del área de trabajo en Cuajone.



a. Parámetros de Diseño (E = 8m), taladros Secos (Zona A)

| TONELAJE                |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| TEORICO                 | Ton.   | 2245.6 |
| FACTOR DE POTENCIA REAL | kg/Ton | 0.34   |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO | kg/Ton | 1.17   |
| FACTOR DE CARGA         | kg/Ton | 0.81   |

| CARGAS EN EL TALADRO       |        |            |
|----------------------------|--------|------------|
| CARGA DE FONDO             |        |            |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0        |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4        |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38       |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15       |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q     |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20         |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0      |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5          |
| CARGA / TALADRO (REAL)     | kg/Tal | 376.9      |
| CAMARA DE AIRE             |        |            |
| CAMARA DE AIRE             | m.     | 2.5        |
| CARGA DE COLUMNA           |        |            |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0        |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4        |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38       |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15       |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q     |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20         |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0      |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5          |
| CARGA / TALADRO (REAL)     | kg/Tal | 376.9      |
| TACO DE FINAL              |        |            |
| DETRITUS                   | m.     | 5.5        |
| DISEÑO DE MALLA ACTUAL     |        |            |
| DISPARO                    |        | PRIMARIO   |
| DATOS GENERALES            |        |            |
| FECHA                      |        | 03/07/2014 |
| HORA                       |        | 01:18 p.m. |
| PROYECTO                   |        | 647        |
| NIVEL                      |        | 3265       |
| TAJO                       |        | CUAJONE    |
| ZONA                       |        | NORTE      |
| TIPO DE ROCA               |        | BA-FIL-PTK |
| DENSIDAD ROCA              | gr/cc  | 2.69       |
| PARAMETROS DE PERFORACION  |        |            |
| ALTURA DE BANCO            | m.     | 15.0       |
| DIAMETRO DE BROCA          | Pulg.  | 12 1/4     |
| MALLA                      |        | Triangular |
| ESPACIAMIENTO              | m.     | 8.0        |
| BURDEN                     | m.     | 7.0        |
| SUB DRILLING               | m.     | 1.0        |
| ALTURA TALADRO             | m.     | 16.0       |
| ALTURA DE AGUA             | m.     | 0.0        |

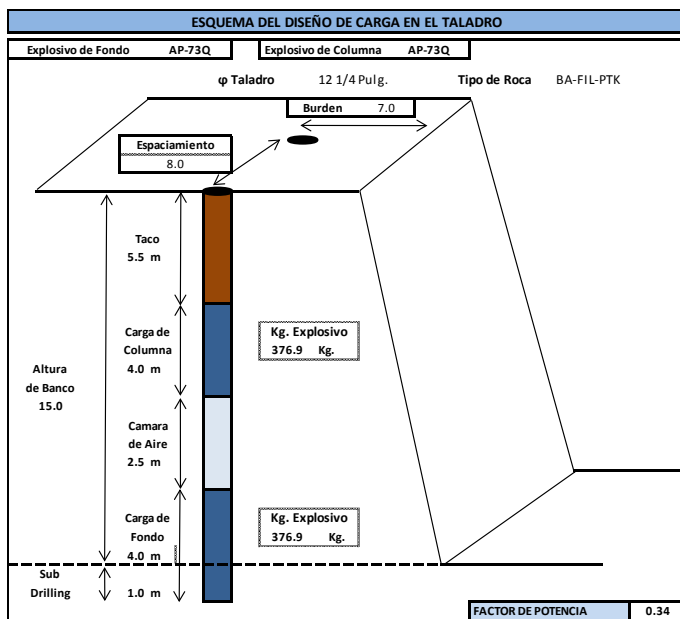


Figura 7.3: Muestra los parámetros y el diseño de carga de taladros secos en Cuajone.

b. Parámetros de diseño (E = 8m), taladros con agua (Zona B)

| CARGAS EN EL TALADRO       |        |        |
|----------------------------|--------|--------|
| CARGA DE FONDO             |        |        |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 8.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 6.8    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5      |
| CARGA / TALADRO (REAL)     | kg/Tal | 753.8  |
| CAMARA DE AIRE             |        |        |
| CAMARA DE AIRE             | m.     | 2.5    |
| TACO DE FINAL              |        |        |
| DETRITUS                   | m.     | 5.5    |

| DISEÑO DE MALLA ACTUAL    |              |
|---------------------------|--------------|
| DISPARO                   | PRIMARIO     |
| DATOS GENERALES           |              |
| FECHA                     | 03/07/2014   |
| HORA                      | 01:18 p. m.  |
| PROYECTO                  | 647          |
| NIVEL                     | 3265         |
| TAJO                      | CUAJONE      |
| ZONA                      | NORTE        |
| TIPO DE ROCA              | BA-FIL-PTK   |
| DENSIDAD ROCA             | gr/cc 2.69   |
| PARAMETROS DE PERFORACION |              |
| ALTURA DE BANCO           | m. 15.0      |
| DIAMETRO DE BROCA         | Pulg. 12 1/4 |
| MALLA                     | Triangular   |
| ESPACIAMIENTO             | m. 8.0       |
| BURDEN                    | m. 7.0       |
| SUB DRILLING              | m. 1.0       |
| ALTURA TALADRO            | m. 16.0      |
| ALTURA DE AGUA            | m. 2.5       |
| TONELAJE                  |              |
| TEORICO                   | Ton. 2245.6  |
| FACTOR DE POTENCIA        | kg/Ton 0.34  |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO   | kg/Ton 1.17  |
| FACTOR DE CARGA           | kg/Ton 0.81  |

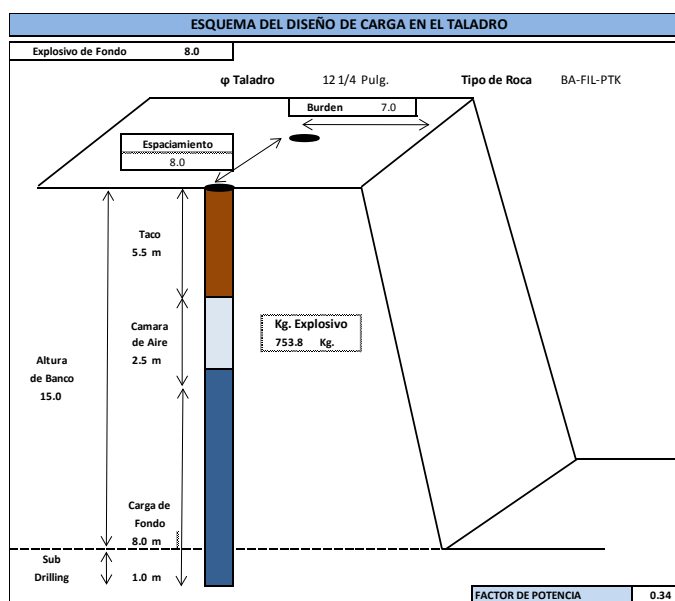


Figura N° 7.4: Muestra los parámetros y diseño de carga de los taladros con agua en Cuajone.

c. Parámetros de diseño (E = 9m), taladros secos (Zona C)

| TONELAJE                |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| TEORICO                 | Ton.   | 2842.0 |
| FACTOR DE POTENCIA      | kg/Ton | 0.27   |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO | kg/Ton | 1.17   |

#### DISEÑO DE MALLA ACTUAL

|         |          |
|---------|----------|
| DISPARO | PRIMARIO |
|---------|----------|

#### DATOS GENERALES

|               |             |
|---------------|-------------|
| FECHA         | 03/07/2014  |
| HORA          | 01:18 p. m. |
| PROYECTO      | 647         |
| NIVEL         | 3265        |
| TAJO          | CUAJONE     |
| ZONA          | NORTE       |
| TIPO DE ROCA  | BA-FIL-PTK  |
| DENSIDAD ROCA | gr/cc 2.69  |

#### PARAMETROS DE PERFORACION

|                   |       |            |
|-------------------|-------|------------|
| ALTURA DE BANCO   | m.    | 15.0       |
| DIAMETRO DE BROCA | Pulg. | 12 1/4     |
| MALLA             |       | Triangular |
| ESPACIAMIENTO     | m.    | 9.0        |
| BURDEN            | m.    | 7.8        |
| SUB DRILLING      | m.    | 1.0        |
| ALTURA TALADRO    | m.    | 16.0       |
| ALTURA DE AGUA    | m.    | 0.0        |

#### CARGAS EN EL TALADRO

##### CARGA DE FONDO

|                            |        |        |
|----------------------------|--------|--------|
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5      |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 376.9  |

##### CAMARA DE AIRE

|                |    |     |
|----------------|----|-----|
| CAMARA DE AIRE | m. | 2.5 |
|----------------|----|-----|

##### CARGA DE COLUMNA

|                            |        |        |
|----------------------------|--------|--------|
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5      |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 376.9  |

##### TACO DE FINAL

|          |    |     |
|----------|----|-----|
| DETRITUS | m. | 5.5 |
|----------|----|-----|

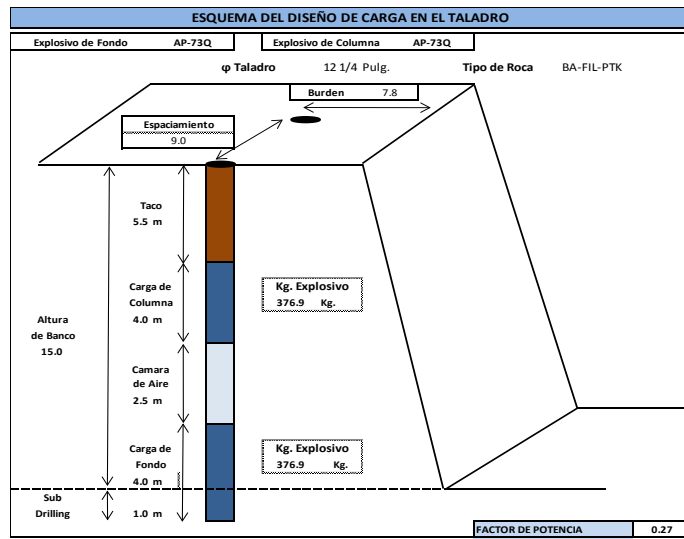
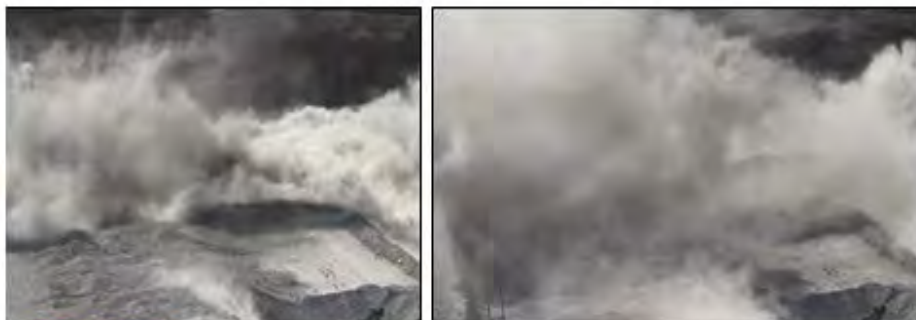


Figura N° 7.5: Muestra los parámetros y diseño de carga de los taladros secos en Cuajone.





Figura N° 7.6: Muestra las imágenes del área del disparo en Cuajone.



**d. Condiciones del área de trabajo.**

- Se evidenció un 80% de agua en todos los taladros, en alturas hasta 8 metros por taladro.



Fig N° 7.7 Muestra el bombeo de la mezcla explosiva en taladros con presencia de agua

- Se tuvo 18 taladros con agua dinámica, esto se identificó durante el carguío, llegando a entrar 500 kg de explosivo que al realizar la medición, también se evidenció que no levantó ni un metro de carga.
- Para estos taladros se decidió colocar un taponex en el fondo del taladro (15m) para cargar con carga corrida, dejando 6.5m de taco, para que esponje a un taco final de 5.5m.
- Estos 18 taladros fueron cargados el 28 de junio, y se disparó el día 03 de Julio 2014 (tiempo de cargado = 6 días)



Figura N° 7.8: Muestra la zona de voladura con agua dinámica en Cuajone.



Figura N° 7.9: Muestra la Zona B con taladros con agua dinámica.



Figura N° 7.10: Muestra la zona A con taladros secos y con espaciamiento de 8 m.

**e. Prueba de densidades en campo**



Se realizó la prueba de densidades en campo al camión fabrica (Q 34) preparado para la prueba (AP-73Q).



Figura N° 7,11 Muestra la prueba de densidad cotizado en el proyecto 3265 -647

Tabla N° 7,1 Muestra de resultados de la prueba de densidades en el proyecto 3265 647

| <b>%Nitrito de Sodio</b> | <b>0.30%</b> | <b>0.32%</b> | <b>0.33%</b> | <b>0.32%</b> |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| AP-73 Q                  | Muestra 1    | Muestra 2    | Muestra 3    | Muestra 4    |
| T. Inicial               | 1.38         | 1.39         | 1.39         | 1.385        |
| 5 Minutos                | 1.33         | 1.32         | 1.30         | 1.26         |
| 10 Minutos               | 1.24         | 1.23         | 1.21         | 1.21         |
| 15 Minutos               | 1.18         | 1.16         | 1.14         | 1.15         |
| 20 Minutos               | 1.12         | 1.13         | 1.10         | 1.11         |

#### f. Registro de VOD

Se monitoreo dos taladros para obtener el registro de la VOD en el proyecto prueba, obteniendo como resultados: Taladro 2609 con una

VOD de 5229.3 m/s y Taladro 2610 con una VOD de 5255.8 m/s. (Los dos taladros con agua 6 metros).



Figura N° 7.12: Muestra la VOD de los taladros cargados con AP-73Q

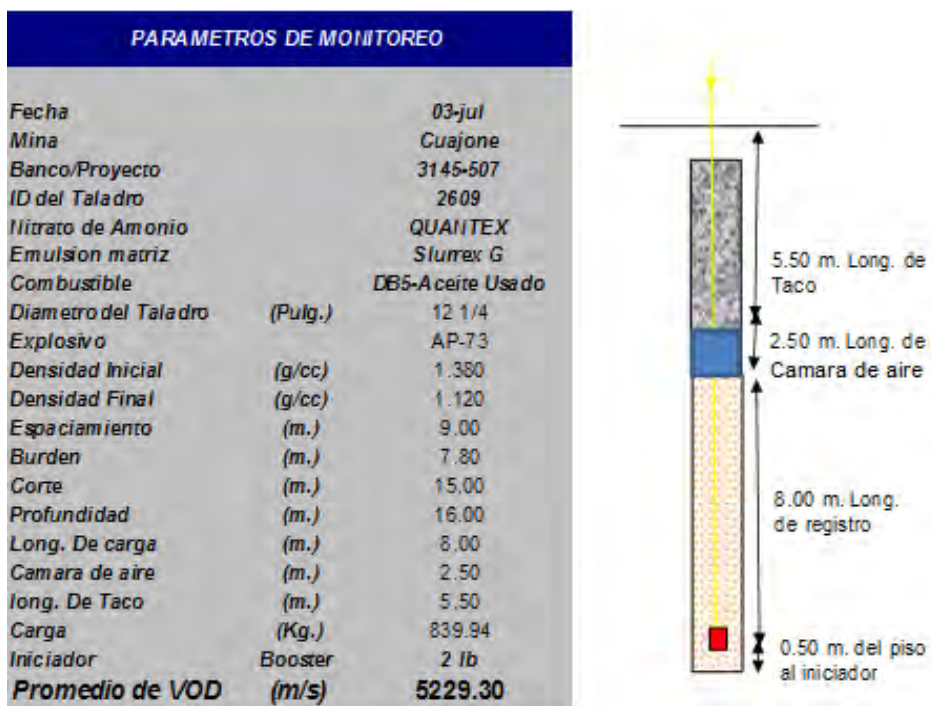


Figura 7,13 Muestra de parámetros del monitor de (velocidad de detonación VOD

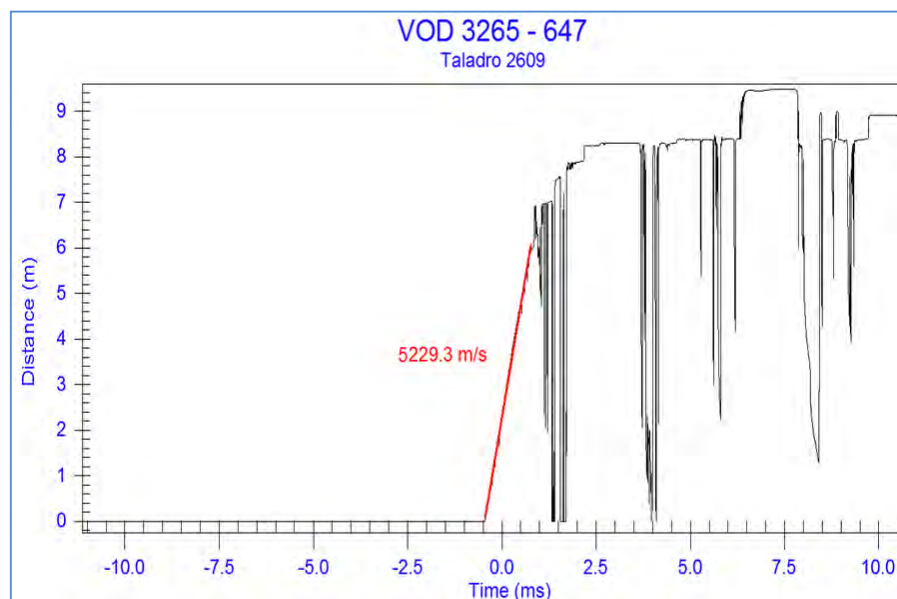


Figura 7,14 Muestra el resultado de la velocidad de detonación en el taladro 2609

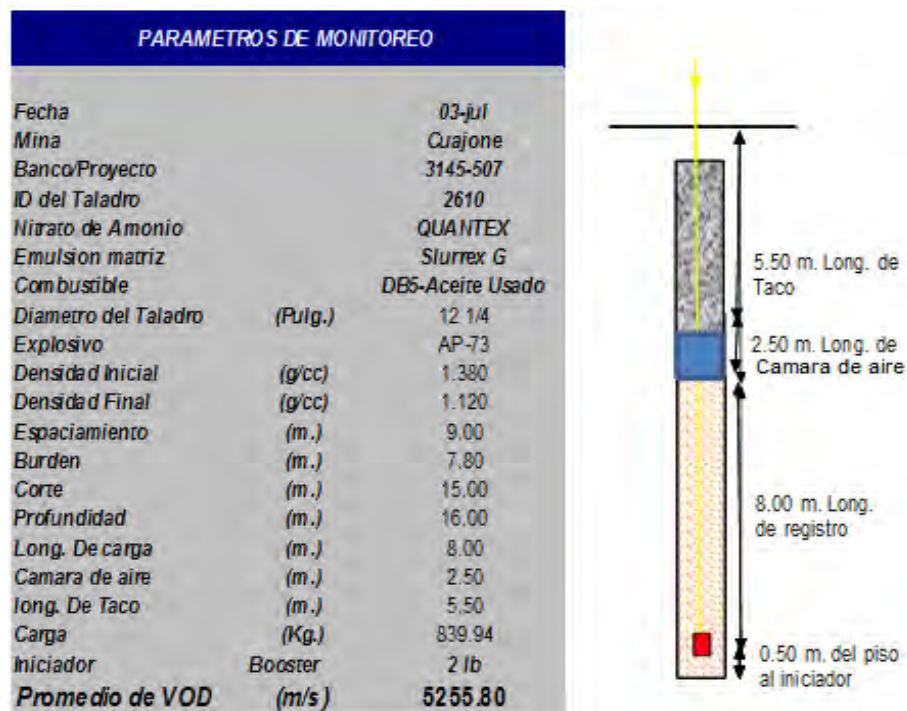


Figura N° 7,15 Muestra los parámetros del monitoreo del VOD

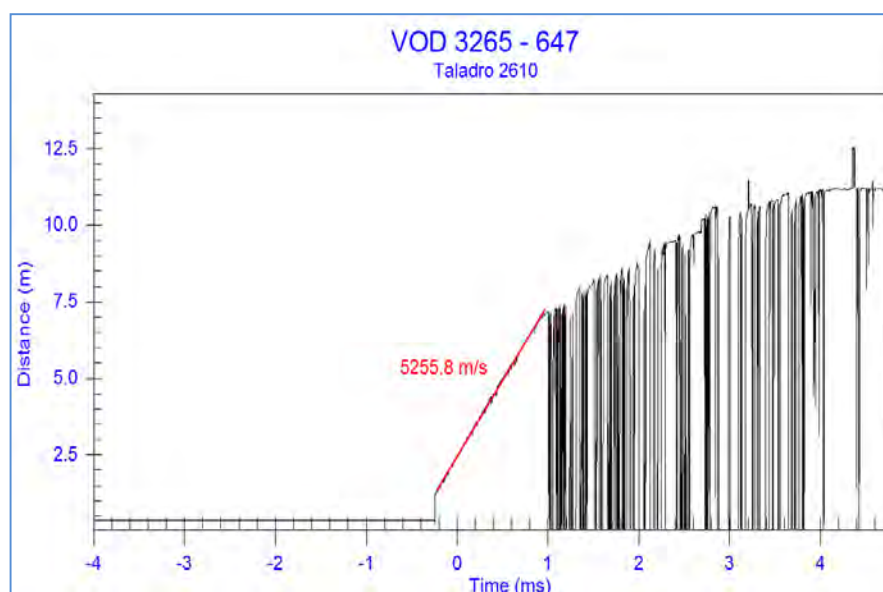


Figura N° 7,16 La grafica muestra el resultado de la velocidad de detonación en el taladro 2610

### 7.3.2 Disparo del Proyecto 3265-658 ubicado en la zona norte, perforadora 10-11.

En el banco se perforaron 210 taladros que fueron cargados con la mezcla AP-73Q (emulsión gasificada).

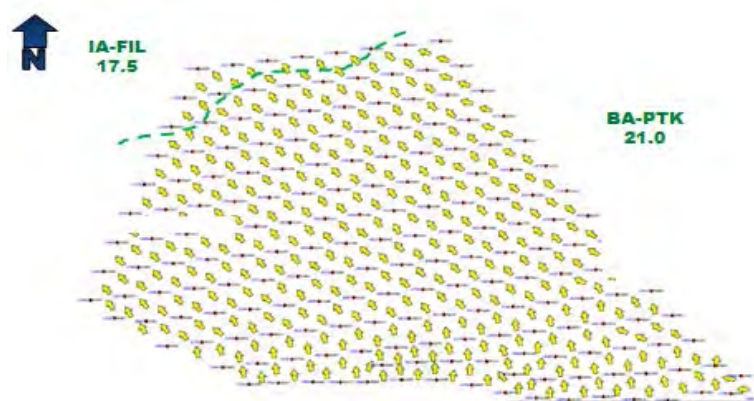


Figura N° 7.17: Muestra la malla de perforación y voladura del Proyecto 3265-658

#### a. Parámetros de diseño

| TONELAJE                |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| TEORICO                 | Ton.   | 2245.6 |
| FACTOR DE POTENCIA      | kg/Ton | 0.38   |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO | kg/Ton | 1.17   |

| DISEÑO DE MALLA ACTUAL |          |
|------------------------|----------|
| DISPARO                | PRIMARIO |

| DATOS GENERALES |             |
|-----------------|-------------|
| FECHA           | 10/07/2014  |
| HORA            | 01:00 p. m. |
| PROYECTO        | 658         |
| NIVEL           | 3265        |
| TAJO            | CUAJONE     |
| ZONA            | NORTE       |
| TIPO DE ROCA    | BA-PTK      |
| DENSIDAD ROCA   | gr/cc 2.69  |

| PARAMETROS DE PERFORACION |       |            |
|---------------------------|-------|------------|
| ALTURA DE BANCO           | m.    | 15.0       |
| DIAMETRO DE BROCA         | Pulg. | 12 1/4     |
| MALLA                     |       | Triangular |
| ESPACIAMIENTO             | m.    | 8.0        |
| BURDEN                    | m.    | 7.0        |
| SUB DRILLING              | m.    | 1.0        |
| ALTURA TALADRO            | m.    | 16.0       |
| ALTURA DE AGUA            | m.    | 0.0        |

| CARGAS EN EL TALADRO       |        |        |
|----------------------------|--------|--------|
| CARGA DE FONDO             |        |        |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 5.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 4.3    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5      |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 471.1  |
| CAMARA DE AIRE             |        |        |
| CAMARA DE AIRE             | m.     | 1.5    |
| CARGA DE COLUMNA           |        |        |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5      |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 376.9  |
| TACO DE FINAL              |        |        |
| DETRITUS                   | m.     | 5.5    |

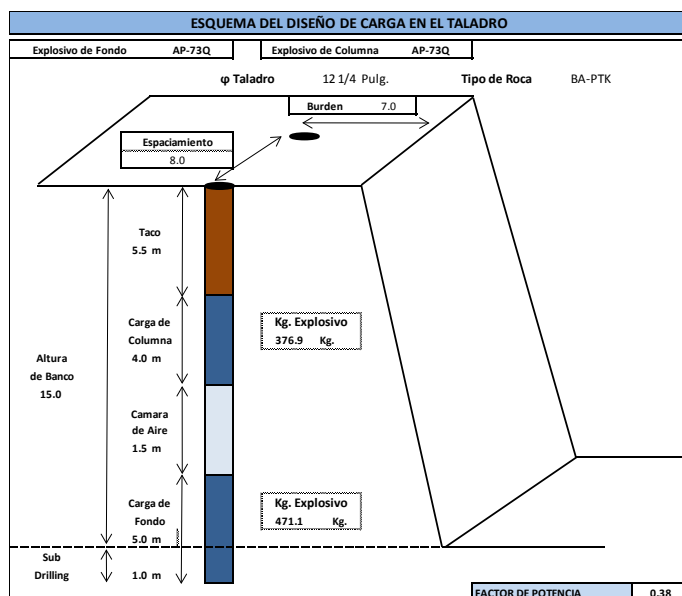


Figura N° 7.18: Muestra los parámetros y diseño de carga del Proyecto

3265-658



Figura N° 7.19: Muestra las imágenes del Proyecto 3265-658



Figura N° 7.19(a): Muestra las imágenes del Proyecto 3265-658



Figura N° 7.19(b): Muestra las imágenes del Proyecto 3265-658





Figura N° 7.20 Muestra el esponjamiento del material fragmentado.



Figura N° 7.20 (a): Muestra el esponjamiento del material fragmentado

| H1   | H2   | H3   | Esponjamiento (m) |
|------|------|------|-------------------|
| 1.80 | 1.75 | 1.70 | 1.75              |

b. Prueba de densidades en campo

Se realizó la prueba de densidades en campo al camión fabrica (Q34) preparado para la prueba con emulsión gasificada (AP-73Q)



Figura 7,21 Muestra la realización de la prueba de densidades

Tabla N° 7,2 Muestra los resultados de la prueba de densidad en el proyecto 3265 658

| <b>%Nitrito de Sodio</b> | <b>0.30%</b> | <b>0.30%</b> | <b>0.30%</b> | <b>0.30%</b> |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| AP-73 Q                  | Muestra 1    | Muestra 2    | Muestra 3    | Muestra 4    |
| T. Inicial               | 1.38         | 1.37         | 1.39         | 1.377        |
| 5 Minutos                | 1.32         | 1.31         | 1.320        | 1.299        |
| 10 Minutos               | 1.225        | 1.23         | 1.232        | 1.239        |
| 15 Minutos               | 1.17         | 1.15         | 1.196        | 1.197        |
| 20 Minutos               | 1.14         | 1.13         | 1.14         | 1.15         |

### 7.3.3 Disparo del Proyecto 3145–530 ubicado en la zona sur del tajo Cuajone.

Se cargó todo el proyecto con emulsión gasificada AP-73Q con nitrato quantex, en total 32 taladros de producción con emulsión gasificada AP-73Q, y 32 taladros con el método de voladura controlada denominado “buffer blasting” AP-73Q.

#### a. Desarrollo de Actividades

El camión fábrica Q-34, se encuentra en perfectas condiciones mecánicas y operativas para realizar las pruebas con el AP73Q. Inicialmente se realizó la calibración de los flujos del porcentaje de la solución gasificada determinándose las condiciones de trabajo siguiente:

- Flujo de matriz : 300 – 350 kg/min.
- Presión de bombeo : 50 – 60 psi

Densidades

Tabla N° 7,3 Muestra las densidades promedio del AP 730Q

| Densidad del AP-73Q |             |
|---------------------|-------------|
| Nitrato Quantex     | 1.023 gr/cc |
| Emulsión Gasificada | 1.345 gr/cc |
| Petróleo            | 0.88 gr/cc  |
| AP-73Q              | 1.36 gr/cc  |



Tabla N° 7.4: Muestra los resultados de la prueba de densidad

| Densidades de Campo AP-73Q | tipo      | Lugar de muestreo | Densidad AP-73Q [g/cm3] | Flujo de Alwailer Kg/min | Flujo L-8 [lph] | Densidad 5min [g/cm3] | Densidad 10min [g/cm3] | Densidad 15min [g/cm3] | Densidad 25min [g/cm3] |
|----------------------------|-----------|-------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                            | Slurrex G | Q-34              | 1.36                    | 300                      | 29              | 1.24                  | 1.185                  | 1.17                   | 1.154                  |
|                            | Slurrex G | Q-34              | 1.355                   | 300                      | 28              | 1.25                  | 1.176                  | 1.161                  | 1.149                  |
|                            | Slurrex G | Q-34              | 1.365                   | 350                      | 29              | 1.24                  | 1.166                  | 1.15                   | 1.125                  |

TIMING BETWEEN HOLES : 10ms  
TIMING BETWEEN ROWS : 100ms  
HOLES : 64

Figura N° 7.21: Muestra el diseño de amarre de la malla para el disparo del proyecto 3145-530.

- Se cargó con una densidad final de 1.13 a 1.15 gr/cc.
- Se cargó con un factor de potencia de 0.35 kg/Tm , esto considerando un 7% de ensanchamiento calculado durante el carguío en campo.

**b. Parámetros de Diseño.**

| CARGAS EN EL TALADRO       |        |        |
|----------------------------|--------|--------|
| CARGA DE FONDO             |        |        |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 8.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 7.1    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.37   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.15   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 104.2  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 7      |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 796.6  |
| CAMARA DE AIRE             |        |        |
| CAMARA DE AIRE             | m.     | 2.5    |
| TACO DE FINAL              |        |        |
| DETRITUS                   | m.     | 5.5    |
| TONELAJE                   |        |        |
| TEORICO                    | Ton.   | 2253.9 |
| FACTOR DE POTENCIA         | kg/Ton | 0.35   |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO    | kg/Ton | 1.12   |
| FACTOR DE CARGA            | kg/Ton | 0.84   |

| DISEÑO DE MALLA ACTUAL    |              |
|---------------------------|--------------|
| DISPARO                   | PRIMARIO     |
| DATOS GENERALES           |              |
| FECHA                     | 11/07/2014   |
| HORA                      | 01:00 p.m.   |
| PROYECTO                  | 530          |
| NIVEL                     | 3145         |
| TAJO                      | CUAJONE      |
| ZONA                      | SUR          |
| TIPO DE ROCA              | IA-FIL       |
| DENSIDAD ROCA             | gr/cc 2.70   |
| PARAMETROS DE PERFORACION |              |
| ALTURA DE BANCO           | m. 15.0      |
| DIAMETRO DE BROCA         | Pulg. 12 1/4 |
| MALLA                     | Triangular   |
| ESPACIAMIENTO             | m. 8.0       |
| BURDEN                    | m. 7.0       |
| SUB DRILLING              | m. 1.0       |
| ALTURA TALADRO            | m. 16.0      |
| ALTURA DE AGUA            | m. 0.0       |

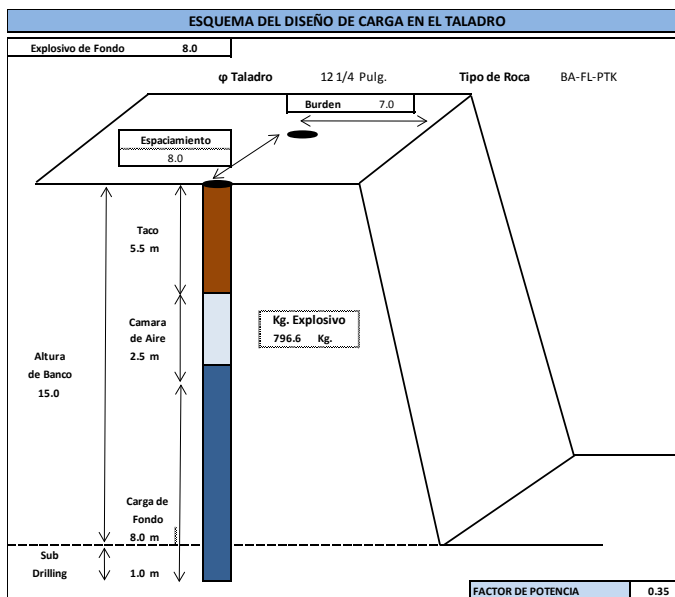


Figura N° 7.22: Muestra los parámetros y diseño de carga.

- Este disparo fue cargado con 01 detonador electrónico IKON y 01 pirotécnico (este último como backup por corte en el cable del Ikon)

**c. Registro de VOD**

Se puede observar que se obtuvo un registro de VOD de 5192.6 m/s

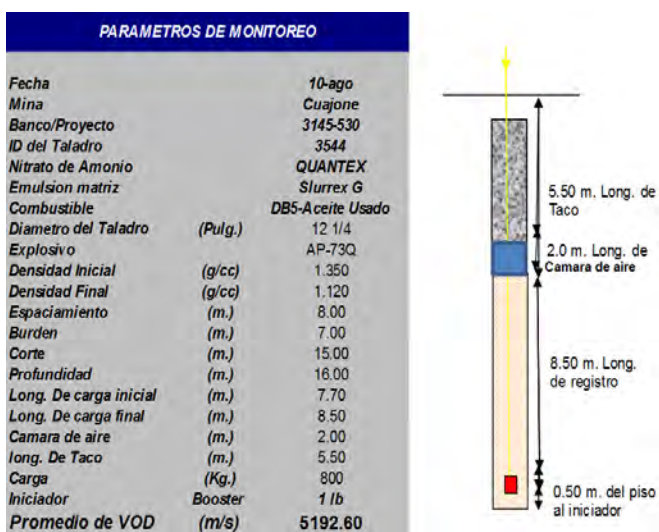


Figura N° 7,23 Muestra los parámetros del monitoreo de VOD

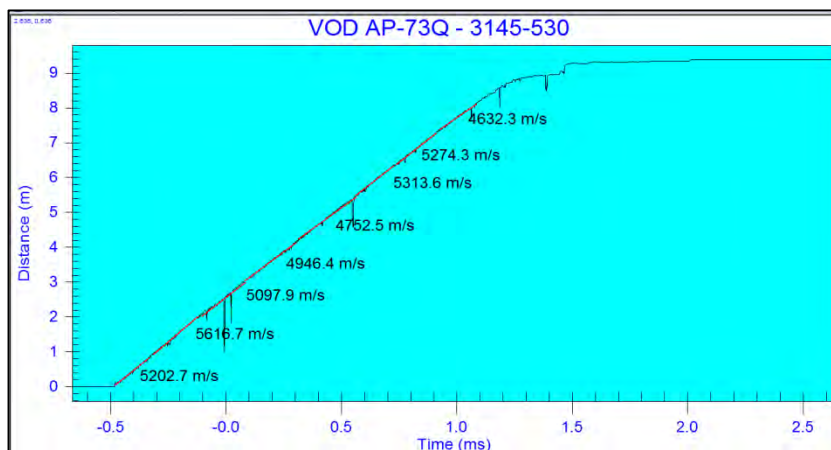
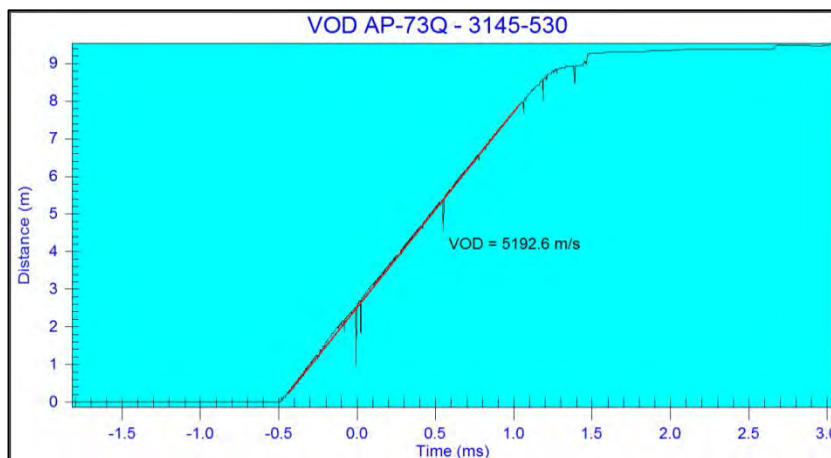


Figura N° 7,24 Muestra la gráfica de los resultados de la VOD en el taladro 3544



Fig 7,24,(a) Muestra los parámetros del monitoreo de VOD





Fig 7,24(b), Muestra los parámetros del monitoreo de VOD

### 7.3.4 Disparo del Proyecto 3265-659 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.

El proyecto disparado se encuentra ubicado en la zona norte del tajo Cuajone, perforadora 10-11. En el banco se perforaron 171 taladros, donde fueron cargados 110 taladros con la mezcla la mezcla AP-73Q y 61 taladros con Heavy ANFO 45/55.

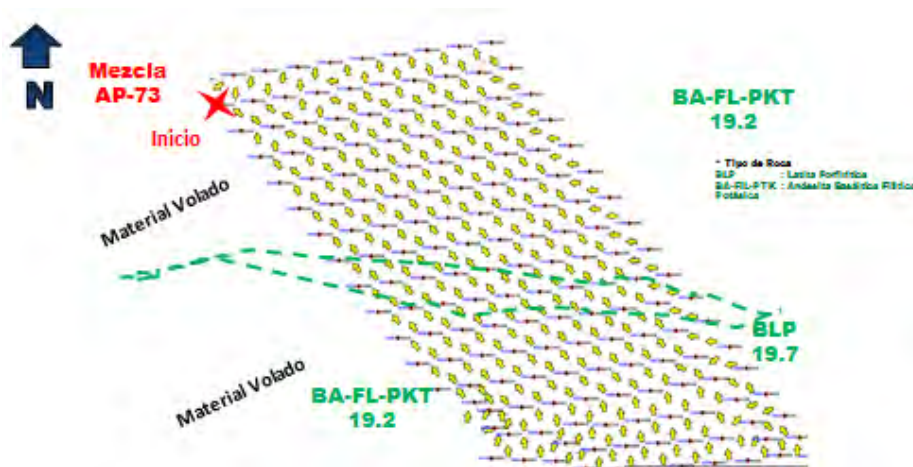


Figura N° 7.25: Muestra la iniciación del disparo 3265-659 con AP-73Q



Figura N° 7.26: Muestra el Proyecto 3265-659 (electrónico)

a. Parámetros de diseño

| TONELAJE                |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| TEORICO                 | Ton.   | 2245.6 |
| FACTOR DE POTENCIA      | kg/Ton | 0.38   |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO | kg/Ton | 1.17   |
| FACTOR DE CARGA         | kg/Ton | 0.91   |

| DISEÑO DE MALLA ACTUAL |          |
|------------------------|----------|
| DISPARO                | PRIMARIO |

| DATOS GENERALES |             |
|-----------------|-------------|
| FECHA           | 14/07/2014  |
| HORA            | 01:00 p. m. |
| PROYECTO        | 659         |
| NIVEL           | 3265        |
| TAJO            | CUAJONE     |
| ZONA            | NORTE       |
| TIPO DE ROCA    | BA-PTK      |
| DENSIDAD ROCA   | gr/cc 2.69  |

| PARAMETROS DE PERFORACION |       |            |
|---------------------------|-------|------------|
| ALTURA DE BANCO           | m.    | 15.0       |
| DIAMETRO DE BROCA         | Pulg. | 12 1/4     |
| MALLA                     |       | Triangular |
| ESPACIAMIENTO             | m.    | 8.0        |
| BURDEN                    | m.    | 7.0        |
| SUB DRILLING              | m.    | 1.0        |
| ALTURA TALADRO            | m.    | 16.0       |
| ALTURA DE AGUA            | m.    | 0.0        |

| CARGAS EN EL TALADRO       |        |        |
|----------------------------|--------|--------|
| CARGA DE FONDO             |        |        |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 5.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 4.3    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.14   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5      |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 471.1  |
| CAMARA DE AIRE             |        |        |
| CAMARA DE AIRE             | m.     | 1.5    |
| CARGA DE COLUMNA           |        |        |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0    |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4    |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38   |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.14   |
| TIPO DE MEZCLA             |        | AP-73Q |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20     |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0  |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5      |
| CARGA / TALADRO (TEORICO)  | kg/Tal | 358.9  |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 376.9  |
| TACO DE FINAL              |        |        |
| DETRITUS                   | m.     | 5.5    |

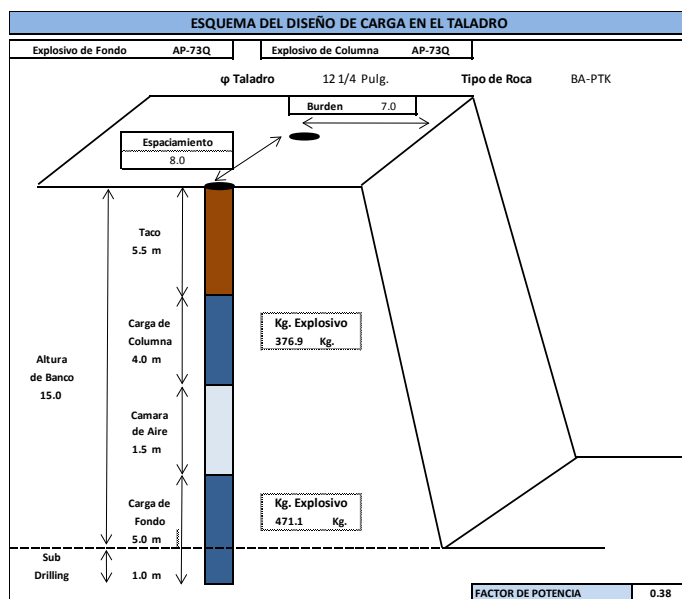


Figura N° 7.27: Muestra los parámetros y diseño de carga.

**b. Prueba de densidades en campo.**

Se realizó la prueba de densidades en campo al camión fabrica (Q 34) preparado para la prueba con emulsión gasificada (AP-73Q).

Tabla 7,5 Muestra los resultados de la prueba de densidades realizados en el proyecto 3268 659

| %Nitrito de Sodio | 0.31%     | 0.30%     | 0.32%     | 0.30%     |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AP-73 Q           | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
| T. Inicial        | 1.39      | 1.395     | 1.40      | 1.379     |
| 5 Minutos         | 1.33      | 1.33      | 1.32      | 1.28      |
| 10 Minutos        | 1.24      | 1.24      | 1.23      | 1.225     |
| 15 Minutos        | 1.18      | 1.16      | 1.182     | 1.18      |

|            |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|
| 20 Minutos | 1.14 | 1.12 | 1.13 | 1.15 |
|------------|------|------|------|------|



Figura N° 7.28: Muestra la secuencia de las imágenes de la voladura



Figura N° 7.28(a): Muestra la secuencia de las imágenes de la voladura



Figura N° 7.28 (b): Muestra la secuencia de las imágenes de la voladura

De la figura N° 7.27, se puede observar que con HA 45/55 no se tiene una buena retención de taco, sin embargo en la zona cargada con AP-73Q si se tiene buena retención pese a su alta energía que es distribuida en las burbujas de nitrógeno de la emulsión gasificada.

**c. Esponjamiento del material fragmentado.**

Se observa una mejor fragmentación y homogeneidad en la zona cargada con AP-73Q así como un menor apilamiento de material fragmentado en la parte superficial quedando a la espera del carguío de la pala para corroborar los resultados de fragmentación.



Figura N° 7.29: Muestra el resultado de la voladura con AP-73Q Y ANFO pesado 45/55.



Figura N° 7.30: Muestra las imágenes post voladura con AP-73Q.



Figura N° 7.30 (a): Muestra las imágenes post voladura con AP-73Q.



Figura N° 7.30 (b): Muestra las imágenes post voladura con ANFO pesado 45/55.





Figura N° 7.29(c): Muestra las imágenes post voladura con ANFO pesado 45/55.

### **7.3.5 Disparo del Proyecto 3265-660 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.**

Prueba con emulsión gasificada y nitrato de amonio quantex, el disparo esta ubicado en la zona norte del tajo Cuajone, perforadora 10-11. En el banco se perforaron 230 taladros, donde fueron cargados 167 taladros con la mezcla AP-73Q gasificada y 63 taladros con Heavy ANFO 45/55.

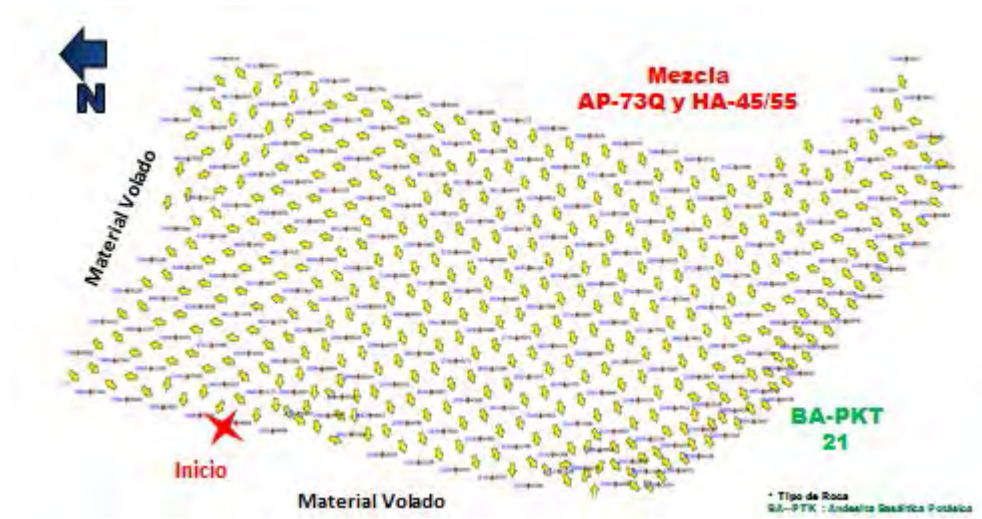


Figura N° 7.30: Muestra el Proyecto 3265-660 (Disparo electrónico)



Figura N° 7, 31 Muestra las zonas

## a. Parámetros de Diseño.

| TONELAJE                |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| TEORICO                 | Ton.   | 2245.6 |
| FACTOR DE POTENCIA      | kg/Ton | 0.38   |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO | kg/Ton | 1.17   |
| FACTOR DE CARGA         | kg/Ton | 0.91   |

| DISEÑO DE MALLA ACTUAL |          |  |
|------------------------|----------|--|
| DISPARO                | PRIMARIO |  |

| DATOS GENERALES |             |      |
|-----------------|-------------|------|
| FECHA           | 19/07/2014  |      |
| HORA            | 01:00 p. m. |      |
| PROYECTO        | 660         |      |
| NIVEL           | 3265        |      |
| TAJO            | CUAJONE     |      |
| ZONA            | NORTE       |      |
| TIPO DE ROCA    | BA-PTK      |      |
| DENSIDAD ROCA   | gr/cc       | 2.69 |

| PARAMETROS DE PERFORACION |            |        |
|---------------------------|------------|--------|
| ALTURA DE BANCO           | m.         | 15.0   |
| DIAMETRO DE BROCA         | Pulg.      | 12 1/4 |
| MALLA                     | Triangular |        |
| ESPACIAMIENTO             | m.         | 8.0    |
| BURDEN                    | m.         | 7.0    |
| SUB DRILLING              | m.         | 1.0    |
| ALTURA TALADRO            | m.         | 16.0   |
| ALTURA DE AGUA            | m.         | 0.0    |

| CARGAS EN EL TALADRO       |        |       |
|----------------------------|--------|-------|
| CARGA DE FONDO             |        |       |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 5.0   |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 4.3   |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38  |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.14  |
| TIPO DE MEZCLA             | AP-73Q |       |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20    |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0 |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5     |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 471.1 |
| CAMARA DE AIRE             |        |       |
| CAMARA DE AIRE             | m.     | 1.5   |
| CARGA DE COLUMNA           |        |       |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0   |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4   |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38  |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.14  |
| TIPO DE MEZCLA             | AP-73Q |       |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20    |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0 |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5     |
| CARGA / TALADRO (TEORICO)  | kg/Tal | 358.9 |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 376.9 |
| TACO DE FINAL              |        |       |
| DETRITUS                   | m.     | 5.5   |

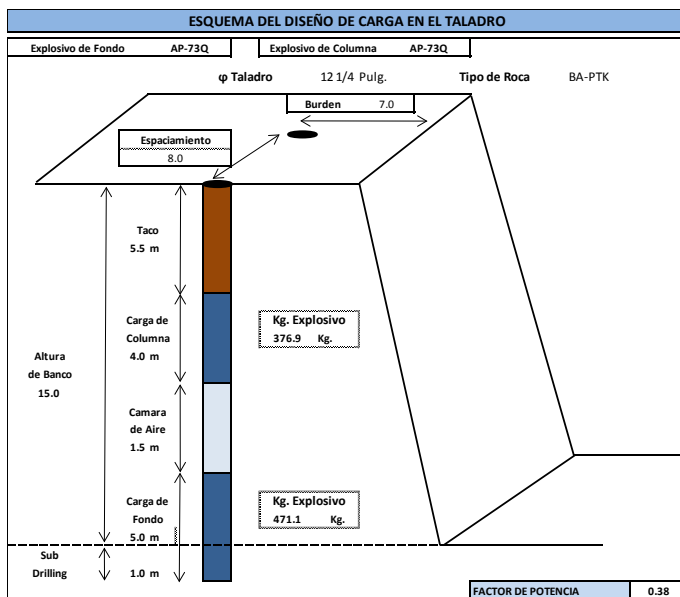


Figura N° 7.32: Muestra los parámetros y diseño de Carga

**b. Prueba de densidades en campo.**

Se realizó la toma de muestras y tomó densidades en campo de estas al camión fábrica (Q-34) preparado para la prueba con emulsión gasificada (AP-73Q)

Tabla N° 7 6 Muestra los resultados de la prueba de densidades en el  
proyecto 3265 - 660

| %Nitrito de Sodio | 0.30%     | 0.29%     | 0.30%     | 0.30%     |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AP-73 Q           | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
| T. Inicial        | 1.40      | 1.39      | 1.385     | 1.395     |
| 5 Minutos         | 1.30      | 1.31      | 1.30      | 1.95      |
| 10 Minutos        | 1.245     | 1.25      | 1.24      | 1.245     |
| 15 Minutos        | 1.16      | 1.17      | 1.18      | 1.17      |
| 20 Minutos        | 1.14      | 1.15      | 1.145     | 1.155     |



Figura N° 7.33: Muestra las imágenes de la Voladura con AP-73Q y  
ANFO pesado 45/55.

Se puede observar que con HA-45/55 existe mayor proyección comparado con el AP-73Q.

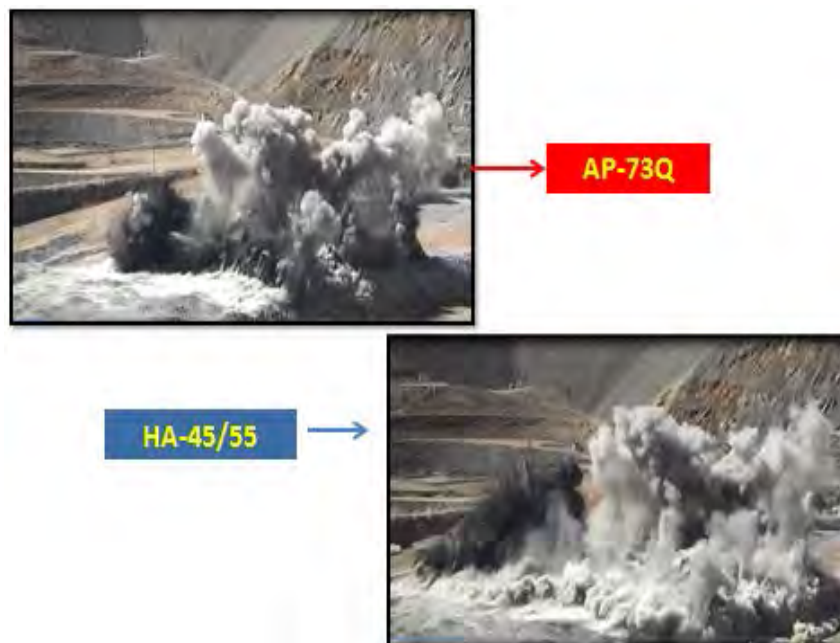


Figura N° 7,34 Muestra las imágenes de la voladura con HP 73Q y anfo pesado 45/55

**c. Esponjamiento del material fragmentado.**

Se observa una mejor fragmentación y homogeneidad en la zona cargada con AP-73Q, así como un menor apilamiento de material disparado en la parte superficial quedando a la espera del carguío de la pala para realizar el monitoreo de fragmentación interna.

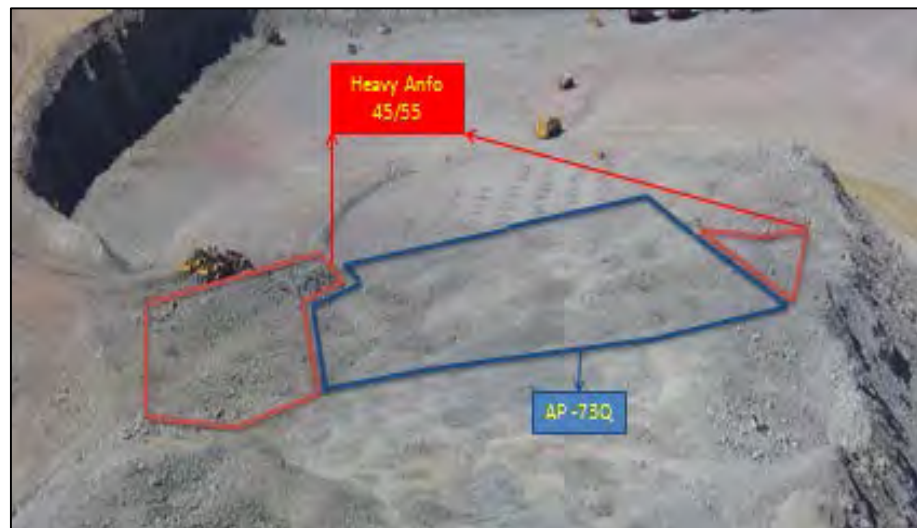


Figura N° 7.35: Muestra las imágenes de post voladura.



Figura N° 7.35 (a): Muestra las imágenes de post voladura.

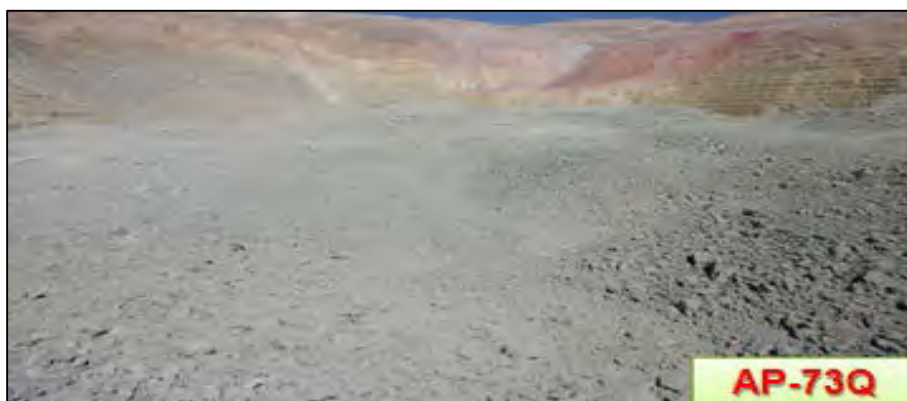


Figura N° 7, 36 Muestra el material volado en la zona cargada con AP  
73Q



Figura N° 7,37 Muestra el material volado en la zona cargada con HA –  
45/55



## d. Registro de VOD

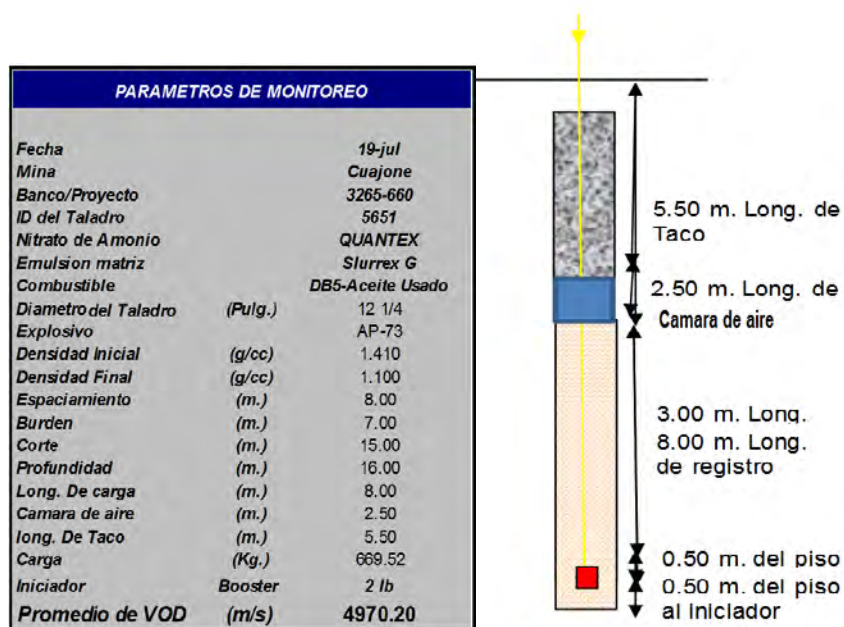


Figura N° 7,38 Muestra los parámetros del monitoreo del VOD en el taladro 5851

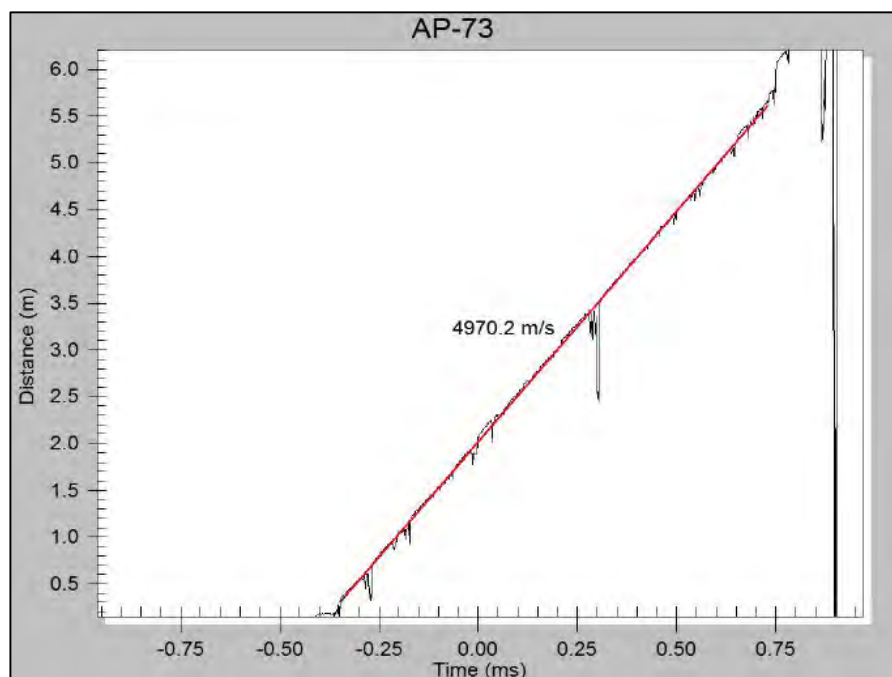


Figura N° 7,39 Muestra los resultados del VOD en el taladro 5851

### 7.3.6 Disparo del Proyecto 3265-662 ubicado en la zona norte del tajo Cuajone.

Este disparo está ubicado en la zona norte del tajo Cuajone, perforadora 10-11. En el banco se perforaron 215 taladros, de los cuales fueron cargados 53 taladros con la mezcla AP-73Q gasificada y 162 taladros con Heavy ANFO 45/55.

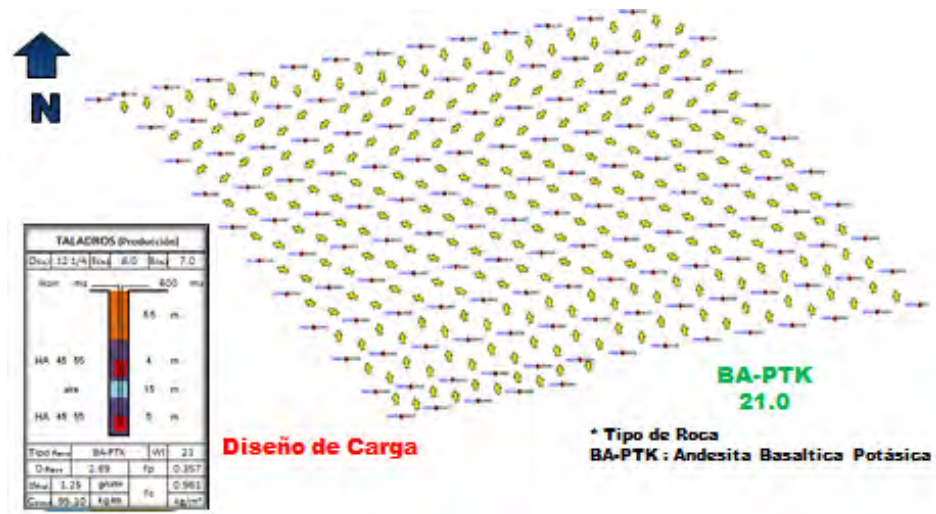


Figura N° 7.40: Muestra la malla de perforación del proyecto 3250 662



Figura N° 7,41: Muestra las zonas cargadas del proyecto

## a. Parámetros de diseño.

| TONELAJE                |        |        |
|-------------------------|--------|--------|
| TEORICO                 | Ton.   | 2245.6 |
| FACTOR DE POTENCIA      | kg/Ton | 0.38   |
| FACTOR DE ESPONJAMIENTO | kg/Ton | 1.17   |
| FACTOR DE CARGA         | kg/Ton | 0.91   |

| DISEÑO DE MALLA ACTUAL |          |  |
|------------------------|----------|--|
| DISPARO                | PRIMARIO |  |

| DATOS GENERALES |             |      |
|-----------------|-------------|------|
| FECHA           | 21/07/2014  |      |
| HORA            | 01:00 p. m. |      |
| PROYECTO        | 662         |      |
| NIVEL           | 3265        |      |
| TAJO            | CUAJONE     |      |
| ZONA            | NORTE       |      |
| TIPO DE ROCA    | BA-PTK      |      |
| DENSIDAD ROCA   | gr/cc       | 2.69 |

| PARAMETROS DE PERFORACION |            |        |
|---------------------------|------------|--------|
| ALTURA DE BANCO           | m.         | 15.0   |
| DIAMETRO DE BROCA         | Pulg.      | 12 1/4 |
| MALLA                     | Triangular |        |
| ESPACIAMIENTO             | m.         | 8.0    |
| BURDEN                    | m.         | 7.0    |
| SUB DRILLING              | m.         | 1.0    |
| ALTURA TALADRO            | m.         | 16.0   |
| ALTURA DE AGUA            | m.         | 0.0    |

| CARGAS EN EL TALADRO       |        |       |
|----------------------------|--------|-------|
| CARGA DE FONDO             |        |       |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 5.0   |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 4.3   |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38  |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.14  |
| TIPO DE MEZCLA             | AP-73Q |       |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20    |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0 |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5     |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 471.1 |
| CAMARA DE AIRE             |        |       |
| CAMARA DE AIRE             | m.     | 1.5   |
| CARGA DE COLUMNA           |        |       |
| ALTURA DE CARGA FINAL      | m.     | 4.0   |
| ALTURA DE CARGA INICIAL    | m.     | 3.4   |
| DENSIDAD DE MEZCLA INICIAL | gr/cc  | 1.38  |
| DENSIDAD DE MEZCLA FINAL   | gr/cc  | 1.14  |
| TIPO DE MEZCLA             | AP-73Q |       |
| TIEMPO ESPONJAMIENTO       | min.   | 20    |
| DENSIDAD LINEAL            | kg/m.  | 105.0 |
| ENSANCHAMIENTO             | %      | 5     |
| CARGA / TALADRO (TEORICO)  | kg/Tal | 358.9 |
| CARGA / TALADRO            | kg/Tal | 376.9 |
| TACO DE FINAL              |        |       |
| DETRITUS                   | m.     | 5.5   |

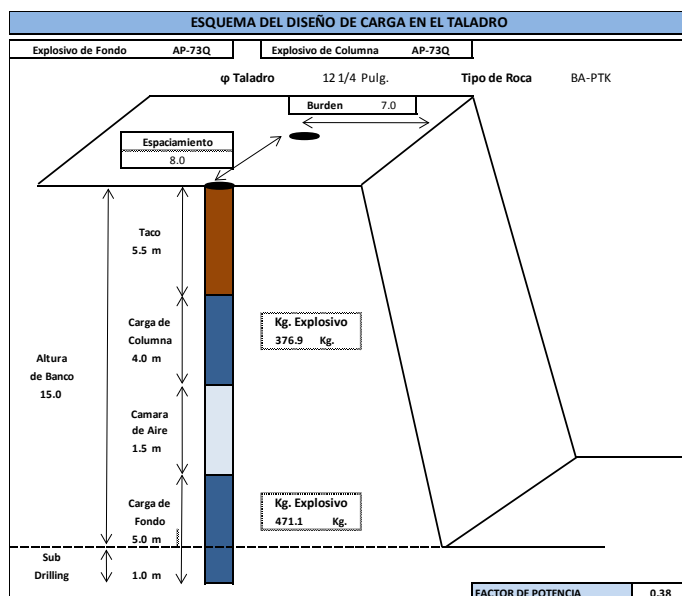


Figura N° 7.42: Muestra los parámetros y diseño de carga.

**b. Prueba de densidades en campo.**

Se realizó la toma de muestras, y las pruebas de densidades en campo de estas al camión fábrica (Q-34) preparado para la prueba con emulsión gasificada (AP-73Q).

Tabla N° 7, 7 Muestra los resultados de la prueba de densidad en el proyecto 3265 662

| %Nitrito de Sodio | 0.30%     | 0.30%     | 0.30%     | 0.30%     |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AP-73 Q           | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
| T. Inicial        | 1.395     | 1.39      | 1.408     | 1.40      |
| 5 Minutos         | 1.31      | 1.32      | 1.30      | 1.31      |
| 10 Minutos        | 1.24      | 1.26      | 1.25      | 1.24      |

|            |      |       |      |      |
|------------|------|-------|------|------|
| 15 Minutos | 1.17 | 1.17  | 1.16 | 1.17 |
| 20 Minutos | 1.14 | 1.145 | 1.15 | 1.15 |



Figura N° 7.43: Muestra las imágenes de la voladura.

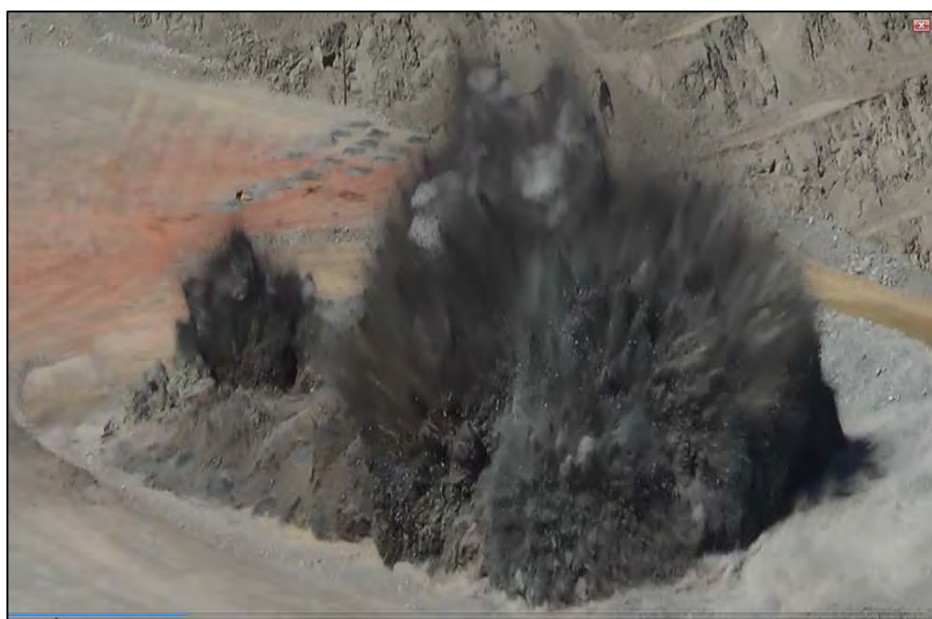


Figura N° 7.43 (a) Muestra las imágenes de la voladura.



Figura N° 7.43 (b) Muestra las imágenes de la voladura.



Figura N° 44 Muestra el material volado en la zona alargada con AP

73Q



Figura N° 7,45 Muestra el monitoreo volado en la zona largada con Ha

– 45/55

### 7.3.7 Resumen de los proyectos disparado con AP-73Q.

En la Tabla N° 7.2 Podemos ver el resumen de las voladuras realizadas en Cuajone.

Tabla N° 7.8: Resumen de Voladuras

| Resumen de Voladuras con Mezcla AP-73Q |            |       |          |              |             |          |                        |
|--|------------|-------|----------|--------------|-------------|----------|------------------------|
| N° Voladura                            | Fecha      | Nivel | Proyecto | Tipo de Roca | Malla (m)   | Taladros | F. de Potencia (kg/tn) |
| 1er                                    | 03/07/2014 | 3265  | 647      | BA-FIL-PTK   | 8x7 / 9x7.8 | 159      | 0.31                   |
| 2do                                    | 10/07/2014 | 3265  | 658      | BA-PTK       | 8x7         | 210      | 0.378                  |
| 3er                                    | 11/07/2014 | 3145  | 530      | IA-FIL       | 8x7         | 32       | 0.353                  |
| 4to                                    | 14/07/2014 | 3265  | 659      | BA-PTK       | 8x7         | 120      | 0.378                  |
| 5to                                    | 19/07/2014 | 3265  | 660      | BA-PTK       | 8x7         | 167      | 0.378                  |
| 6to                                    | 21/07/2014 | 3265  | 662      | BA-PTK       | 8x7         | 53       | 0.378                  |



## **CAPÍTULO VIII**

### **EVALUACIÓN ECONOMICA, ANALISIS DE FRAGMENTACIÓN Y ECOLOGICA**

#### **8.1 INTRODUCCIÓN.**

Expuesto los casos-estudios en el capítulo anterior podemos realizar la evaluación técnico – económico – ecológico de las pruebas que se vienen realizando en la mina Cuajone con ello determinar si es conveniente la incorporación de este explosivo a la operación ya mencionada.

#### **8.2 COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS**

Antes de empezar de revisar costos que conlleva a usar las mezclas explosivas es importante conocer como es la composición en masa de dichas mezclas explosivas en comparación, para ello elegimos la mezcla más común de Heavy ANFO utilizado en cuajone (HA45/55) y la mezcla AP-73Q con emulsión gasificada.

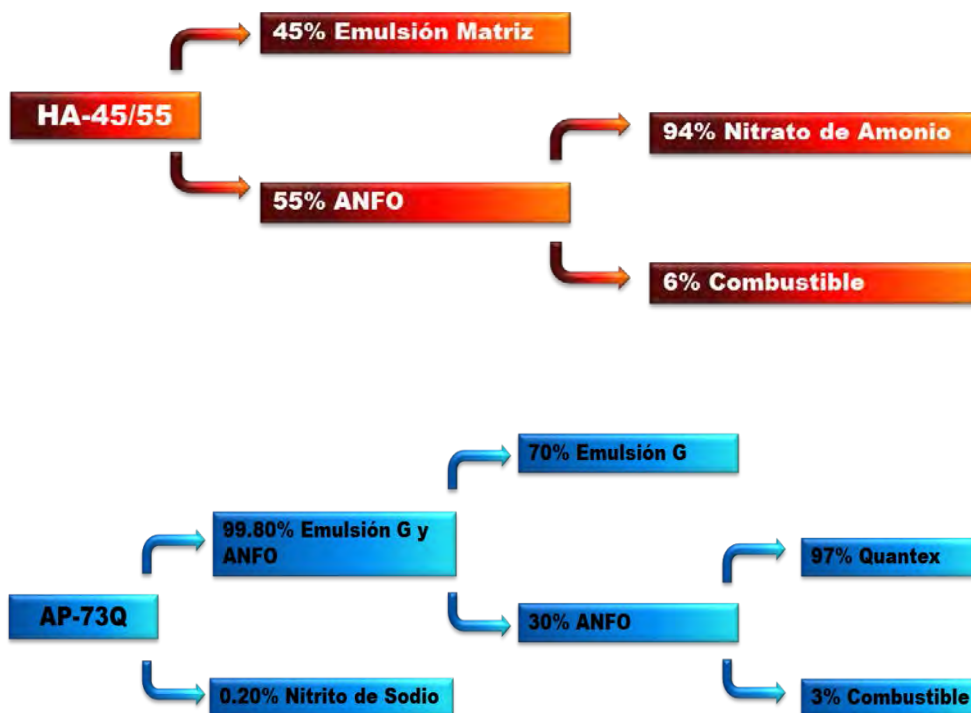


Figura 8.1: Muestra la composición de las mezclas explosivas HA 45/55 y AP-73Q

### 8.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Una reducción del factor de potencia en 17% de variación en promedio involucra un ahorro de US\$. 0.043 US\$/Tn Rotas.

Factores permiten proyectar un ahorro anual de US\$ 3'024,000.00 (50% de sustitución del actual explosivo), sin considerar la ampliación de mallas. Para ver las evaluaciones Económicas ver Anexos.

Tabla N° 8.1: Ahorro por disminución del factor de potencia.

| Ahorro por Disminución del Factor de Potencia |                   |                     |                              |                     |                     |
|---|-------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|
| Proyecto                                      | Explosivo         | F. Potencia (kg/tn) | Variación de F. Potencia (%) | Ahorro US\$/Taladro | Ahorro US\$/Tn Rota |
| 3265-647                                      | AP-73Q (Zona A)   | 0.336               | 21.13%                       | 105.6               | 0.047               |
|   | HA-45/55 (Zona A) | 0.407               |                              |                     |                     |
|   | AP-73Q (Zona B)   | 0.336               | 21.13%                       | 105.6               | 0.047               |
|   | HA-45/55 (Zona B) | 0.407               |                              |                     |                     |
|   | AP-73Q (Zona C)   | 0.265               | 21.51%                       | 105.6               | 0.037               |
|   | HA-45/55 (Zona C) | 0.322               |                              |                     |                     |
| 3265-658                                      | AP-73Q            | 0.380               | 13.13%                       | 111.3               | 0.050               |
|   | HA-45/55          | 0.430               |                              |                     |                     |
| 3145-530                                      | AP-73Q            | 0.353               | 4.25%                        | 29.8                | 0.013               |
|   | HA-45/55          | 0.368               |                              |                     |                     |
| 3265-659                                      | AP-73Q            | 0.378               | 19.83%                       | 111.3               | 0.050               |
|   | HA-45/55          | 0.453               |                              |                     |                     |
| 3265-660                                      | AP-73Q            | 0.378               | 19.83%                       | 111.3               | 0.050               |
|   | HA-45/55          | 0.453               |                              |                     |                     |
| 3265-662                                      | AP-73Q            | 0.378               | 19.83%                       | 111.3               | 0.050               |
|   | HA-45/55          | 0.453               |                              |                     |                     |

En la Figura 8.2: Muestra una simulación teórica de hasta dónde puede llegar el ahorro anual por el cambio de explosivo. Dicho gráfico indica que para un porcentaje de reemplazo del 50 % del total del consumo de explosivo anual (Emulsión y Nitrato de Amonio) la mina podría acceder a un ahorro de US\$.3'024,000.00 al año y si se produce un reemplazo del 100 % del total de consumo de explosivo anual, se podría obtener un ahorro del orden de US \$.6'049,000 anuales.

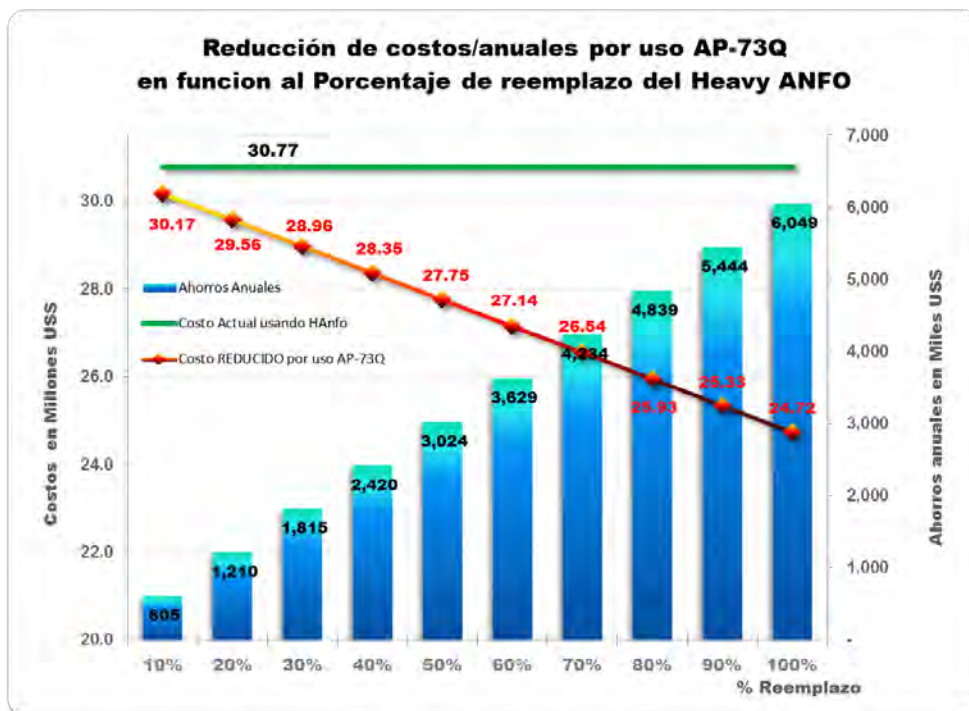


Figura 8.2: Muestra la Reducción de costos anuales por uso del AP-73Q en reemplazo del HA45/55

### 8.4 ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN

El análisis de fragmentación se viene realizando con el software Wipfrag, que analiza las imágenes tomadas del frente de las palas cuando estas pasan por los proyectos disparados. En los proyectos disparados con la mezcla explosiva AP-73Q se logró una disminución del P80, obteniendo como resultado un rango de [4.908 - 7.575] pulgadas, en las áreas disparadas con HA 45/55 se obtuvo un rango de [5.821 – 10.080] pulgadas.

Tabla N° 8.2: Muestra el resumen del Análisis de Fragmentación

| Resumen de Fragmentación |                |       |          |                             |            |
|--------------------------|----------------|-------|----------|-----------------------------|------------|
| Fecha de Analisis        | Frente de Pala | Nivel | Proyecto | Coefficiente de Uniformidad | P80 (pulg) |
| 17-jul                   | 6              | 3265  | 647      | 1.44                        | 5.369      |
| 18-jul                   | 6              | 3265  | 647      | 1.21                        | 5.125      |
| 19-jul                   | 6              | 3265  | 647      | 1.33                        | 5.410      |
| 21-jul                   | 6              | 3265  | 647      | 1.31                        | 7.050      |
| 30-jul                   | 3              | 3265  | 658      | 1.26                        | 7.575      |
| 04-ago                   | 3              | 3265  | 658      | 1.56                        | 6.639      |
| 06-ago                   | 3              | 3265  | 659      | 1.76                        | 5.693      |
| 08-ago                   | 1              | 3145  | 522      | 1.73                        | 6.399      |
| 11-ago                   | 1              | 3145  | 522      | 1.74                        | 5.964      |
| 07-ago                   | 3              | 3265  | 659      | 1.41                        | 6.196      |
| 08-ago                   | 3              | 3265  | 660      | 1.29                        | 5.957      |
| 09-ago                   | 3              | 3265  | 660      | 1.35                        | 5.296      |
| 10-ago                   | 3              | 3265  | 660      | 1.39                        | 4.908      |
| 11-ago                   | 3              | 3265  | 660      | 1.4                         | 5.717      |
| 15-ago                   | 3              | 3265  | 662      | 1.29                        | 5.705      |
| 23-ago                   | 1              | 3145  | 522      | 1.25                        | 6.511      |
| 21-ago                   | 3              | 3265  | 662      | 1.32                        | 7.039      |

## 8.5 ANÁLISIS ECOLÓGICO

La mayoría de explosivos son deficientes en oxígeno, pues no tienen suficiente para poder convertir cada átomo de carbono e hidrógeno presentes en la mezcla explosiva en dióxido de carbono y agua, por lo tanto no tener el porcentaje de combustible necesario puede generar óxidos nitrosos en el momento de la voladura. Los óxidos de nitrógeno son en general muy reactivos y al inhalarse afectan al sistema respiratorio.

Las emulsiones gasificadas es una emulsión que ha sido sensibilizada mediante la generación de burbujas muy pequeñas dentro de su matriz.

La Emulsión G es una emulsión Gasificada químicamente mediante de

un aditivo (Nitrito de Sodio), el cual al estar en contacto con la emulsión genera burbujas de Nitrógeno ( $N_2$ ) evitándose los humos anaranjados.

En Cuajone de un total de 60 disparos mensuales se tenía en promedio 30% voladuras con presencia de gases nitrosos. Sin embargo en los proyectos disparados con la mezcla AP-73Q se ha mitigado estos gases, como se puede ver en las imágenes en los casos-estudios.

## **CAPÍTULO IX**

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

#### **9.1 INTRODUCCIÓN.**

Una vez realizados los casos-estudio en la Mina Cuajone, se ha interpreta y analiza los resultados de dichos casos-estudio del capítulo anterior, usando el modelo matemático de Pearse para calcular las mallas de perforación y voladura; cuyos taladros han sido cargados con AP-73Q (emulsión gasificada) y ANFO pesado. Por lo tanto, se puede afirmar lo siguiente:

#### **9.2 RESULTADOS DEL MONITOREO DE LA VOLADURA DE ROCAS CON EMULSIÓN GASIFICADA VS. ANFO PESADO.**

##### **9.2.1 Disparo del Proyecto 3265-647.**

- El AP-73Q permaneció 06 días en los taladros cargados, y de estos 18 taladros identificados con agua dinámica; 14 taladros fueron lavados haciendo que el explosivo no se desarrolle con normalidad,

llegando a deflagrar, sin esponjar ni fracturar el macizo rocoso, luego ello solicito la re-perforación de esta zona.

- En el área del disparo hubo presencia de agua en un 80% de la malla de perforación y voladura de rocas.
- En este disparo no se evidenció presencia de gases nitrosos.
- Visualmente se apreció una mejor fragmentación con la emulsión gasificada comparada con la mezcla Heavy ANFO 45/55.
- Se obtuvo valores de la VOD (5229.3 y 5255.8 m/s) de acuerdo a la densidad final requerida (1.12 gr/cc), se probará con una densidad final de 1.15 gr/cc.
- Se enfatiza que se tuvo problemas con el carguío de taladros con agua dinámica, para lo cual se coordinó tomar medidas de control en el carguío en caso se vuelva a encontrar agua dinámica (sugiriéndose cargar los taladros con mangas, y cargar los taladros el mismo día del disparo)

### **9.2.2 Disparo del Proyecto 3265-658**

- Después de la voladura no se evidenció presencia de gases nitrosos en la zona del disparo.
- Visualmente se aprecia una mejor fragmentación con emulsión gasificada en comparación con la mezcla Heavy ANFO 45/55.
- Las densidades están dentro de los valores destinados a esta prueba (1.15 gr/cc).



### 9.2.3 Disparo del Proyecto 3145 – 530

- Durante ni después de la voladura no se evidenció generación de gases nitrosos en la zona cargada con AP-73Q.
- Se trabajó con densidades de 1.13 gr/cc a 1.15 gr/cc.
- Se pudo observar que se tiene una mejor fragmentación superficial con el AP-73Q comparado con HA-45/55.
- El esponjamiento de apilamiento de material fragmentado con AP-73Q es menor que con HA-45/55.
- Se obtuvo un registro de la VOD dentro de los valores establecidos para este producto (5192.6 m/s).

### 9.2.4 Disparo del Proyecto N° 3265-659.

- Durante ni después de la voladura no se evidenció presencia de gases nitrosos en el área del disparo.
- Visualmente se aprecia una mejor fragmentación superficialmente con emulsión gasificada comparado con la mezcla Heavy ANFO 45/55. Lo cual se observara mejor durante el carguío de la pala, y se corroborará estos resultados.
- Se trabajó con densidades de 1.12 gr/cc a 1.15 gr/cc.
- Según los resultados obtenidos se solicitó la ampliación de las mallas de perforación para aprovechar el mayor poder rompedor del las emulsiones gasificadas.

### 9.2.5 Disparo del Proyecto N° 3265-660

- Durante el disparo se evidenció un poco de gases nitrosos en la zona que se cargó los taladros con HA-45/55.
- Se trabajó con densidades de 1.13 gr/cc a 1.15 gr/cc.
- Se puede observar que se tiene una mejor fragmentación superficial con el AP-73Q comparado con HA-45/55.
- El registro de la VOD, resultó bajo debido a la densidad de la mezcla disminuyó hasta 1.10 gr/cc. Sin embargo, está dentro de los valores dados por este producto.
- Se ha coordinado continuar con las pruebas en el nivel 3265.

### 9.2.6 Disparo del Proyecto N° 3265-662

- Durante ni después del disparo no se evidenció presencia de Humos Naranjas.
- Se trabajó con densidades de 1.13 gr/cc a 1.15 gr/cc.
- Se observa una mejor fragmentación superficial con el AP-73Q comparado con HA-45/55.
- Se coordinó para continuar con las pruebas.

## **CONCLUSIONES.**

Las conclusiones a las que se llegaron después de realizar el presente trabajo de investigación son las siguientes:

1. Usando la emulsión gasificada en la mezcla AP-73Q, se obtuvieron mejores resultados en términos de fragmentación y uniformidad, el P80 disminuyó en un 21.5% comparado con los resultados de los análisis realizados en proyectos disparado con HA 45/55.
2. Con un reemplazo del 100% de la nueva mezcla explosiva en Cuajone, se llegaría a ahorrar hasta US\$ 6'049,000 anuales.
3. Para evitar el sobre fracturamiento lateral o el back break de la roca remanente, se está usando el método de voladura controlada llamado pre corte.

4. Se debe mencionar que usando la emulsión gasificada AP-73Q, no se generaron gases nitrosos, es debido a que en su formulación química el nitrógeno presente en la mezcla pasa a ser nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) siendo este estable y no generando los óxidos nitrosos.
5. La velocidad de detonación de la mezcla explosiva AP-73Q es 3.9% mayor al de Heavy ANFO 45/55, esto es importante debido que la presión de detonación dentro del taladro es proporcional al VOD del explosivo.
6. De las pruebas realizadas en Cuajone, se puede determinar que se obtuvieron mejores resultados en fragmentación, uniformidad y apilamiento del material volado con respecto a los resultados de las voladuras usando la mezcla explosiva HA 45/55.

## **RECOMENDACIONES.**

Después de realizar el presente trabajo de investigación, se pueden dar las recomendaciones siguientes:

- 1.** Se debe estandarizar el uso de las mezclas explosivas comerciales llamadas: Emulsiones gasificadas AP-73Q para obtener una buena fragmentación como resultado de la voladura de rocas; y de esta manera minimizar los costos de carguío, acarreo, chancado primario, etc., lográndose de esta manera optimizar la rentabilidad de la empresa minera.
- 2.** Se debe estandarizar el uso de los fulminantes electrónicos en reemplazo de los pirotécnicos; ya que de esta manera se mejorara la iniciación de los disparos primarios minimizando la dispersión de los retardos.

3. De acuerdo al análisis y evaluación técnica-económica-ecológica es muy conveniente seguir usando en los disparos primarios de Cuajone el método de la voladura controlada usando cámaras de aire; porque esto permite obtener buena fragmentación con menor factor de carga y por lo tanto un menor costo en US\$/Tm volada.
4. Hay que tener un control adecuado de la densidad de la mezcla explosiva debido que al no tener un control adecuado, en la detonación puede existir un desbalance de oxígeno pudiendo generar la aparición de gases anaranjados.
5. Se debe conocer todas y cada una de las propiedades físico mecánicas del macizo rocoso, lo mismo que su caracterización geomecánica debido que se utiliza para determinar los parámetros de voladura.
6. Se debe continuar usando el método de voladura controlada empleando cámaras de aire en los taladros de producción para distribuir mejor energía producida por la detonación de las mezclas explosivas comerciales respectivas.
7. También, para controlar los límites finales del pit, se debe seguir usando el método de la voladura controlada llamado pre-corte con carga espaciada y desacoplada.

8. Se sugiere que la universidad uno de sus objetivos de existir o un pilar es la investigación, por lo que debe incentivar y motivar a sus profesores y alumnos hacer investigación científica y/o aplicada a la industria minera, claro que estas investigaciones deberían ser en coordinación con la industria minera, etc.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

1. Tenney L. Davis: The Chemistry of Powder and Explosives Hardcover – February 15, 2012.
2. Jacqueline Akhavan: The Chemistry of Explosives (RSC Paperbacks) Paperback – July 8, 2011
3. Wildon Fickett, William C. Davis, Physics: Detonation: Theory and Experiment (Dover Books on Physics) Paperback – Unabridged, December 17, 2010.
4. Jai Prakash Agrawal, Robert Hodgson: Organic Chemistry of Explosives Hardcover – January 5, 2007.
5. Jared Ledgard: The Preparatory Manual of Explosives Paperback – April 4, 2007.



6. Nurul, A: Dictionary of explosion & explosives, USA, 2007.
7. Person, A. Holmberg, R. And Lee: Rock blasting and explosives engineering, CRG, Press, US, 2004.
8. Brown, G. (2000): "The big bang a history of explosives"
9. Köhler, J. y Meyer, R. (2002): "Explosives"
10. Olofsson, S. (2002): "Applied explosives technology for construction and mining"
11. Akhavan, J. (1998): "The chemistry of explosives"
12. Rustan, A. (1998): "Rock Blasting Terms and Symbols"
13. International Society of Explosives Engineers (1998): "Blasters' Handbook"
14. Cooper, P. (1996): "Explosives engineering"
15. Muhamed, S.: Test methods for explosives, Springer 1995.

- 16.** Paul Cooper & Stanley R. Kurowski : Introduction to the Technology of Explosives Hardcover – October 10, 1996.
- 17.** Paul Cooper: Explosives Engineering Hardcover – November 28, 1996.
- 18.** Langefors, U. y Khilström, B. (1987): “Técnica moderna de voladura de rocas”.
- 19.** Homberg, H and Volk, F.: The cylinder test in the context of physical detonation measurement methods, Propellants, explosive, pyrotechnics, 1989.
- 20.** Cowperthwhite, M and Rosenberg, J. T: Lagrange gauge studies of detonation in some intermolecular EA based explosives, Proc. 8<sup>th</sup> Symposium (international) on detonation, NSWC PM 86-194, Albuquerque, NM, 1985, pp. 111-122.
- 21.** Stanley Fordham: High explosives and propellants, Pergamon Press, 1980.
- 22.** Wade, C: Water in oil emulsion explosive composition. USA patent 4, 110, 134 Atlas powder company, 1978.

- 23.** Bjarnholt G.: Strength testing of explosive by underwater detonation, Propellants and explosive, 1978.
- 24.** Cook, M. A: The science of industrial explosives, IRECO chemical, Salt Lake City, Utah, 1974.
- 25.** Cook, M. A: Science of High Explosives, Hardcover, June 1, 1971.
- 26.** Cook, M. A: The science of high explosives, Reinhold publishing Corporation, New York, 1958.
- 27.** Deal, W. E.: Measurement of Chapman-Jouguet pressure for explosives, J. Chem. Phys. 1957.