



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN PERFORACIÓN Y VOLADURA  
MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE  
CROSBY & PINCO EN LA UNIDAD MINERA APUMAYO S.A.C.**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. WILLIAM CAHUAPAZA SAAVEDRA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO – PERÚ**

**2022**



## DEDICATORIA

Al concluir esta etapa quiero dedicar la presente tesis a Dios por darme vida, salud y la oportunidad de cumplir cada uno de mis propósitos y por todas las bendiciones recibidas.

A mis padres Feliciano Cahuapaza y Marta Saavedra, por su apoyo incondicional y brindarme lo necesario en cada etapa de mi vida, especialmente durante mi formación universitaria, por haberme inculcado valores y principios para mi crecimiento personal.

A mi hijo William Gabriel, por su amor, cariño, afecto y ser mi motivación e inspiración en cada paso que doy, y ayudarme a concluir la presente tesis y ser un ejemplo para él.

A mis hermanas que, con sus ejemplos me ayudaron en todo momento durante mi formación universitaria, mención especial para mi hermana Luzdelia.

**William.**



## AGRADECIMIENTO

*Agradezco a Dios por darme vida, salud, por todas las bendiciones para el logro de cada uno de mis objetivos y la oportunidad de cumplir cada uno de mis propósitos*

*A la universidad Nacional del Altiplano por acogerme en sus aulas para realizar y culminar mis estudios universitarios, especialmente a la Facultad de Ingeniería de Minas.*

*A los docentes de la escuela profesional de Ingeniería de Minas, que, con sus conocimientos, experiencias y orientaciones impartidas, lograron de mí, hacerles frente a los desafíos de mi vida profesional, mención especial a los miembros del jurado: D.Sc. Jorge Gabriel Durant Broden, Ing. Amílcar Giovanni Terán Dianderas, Ing. Emmanuel Hernán Tumy Gómez y Mtro. Anibal Sucari León, quienes con sus aportes y comentarios acertados hicieron realidad esta investigación.*

*Mi agradecimiento a los directivos, empleados, personal del Departamento de Perforación y Voladura de la Empresa Minera Apumayo S.A.C., y al personal de Famesa Explosivos S.A.C. por su constante apoyo en el desarrollo de esta investigación.*

**William.**



# ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTO**

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

**RESUMEN ..... 12**

**ABSTRACT..... 13**

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN ..... 16

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ..... 17

1.2.1 Problema General..... 17

1.2.2 Problemas Específicos ..... 17

1.3 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS ..... 17

1.3.1 Hipótesis General..... 17

1.3.2 Hipótesis específicas ..... 18

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN ..... 18

1.4.1 Objetivo General ..... 18

1.4.2 Objetivos Específicos..... 18

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ..... 18

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 20

2.2 MARCO TEÓRICO..... 23

2.2.1 Modelo matemático de Crosby & Pinco ..... 24

2.2.2 Modelo de Crosby & Pinco modificado ..... 26

2.2.3 Estructura de Costos en Minería ..... 28

2.2.4 Sistemas de Costos..... 29

2.2.5 Energía de los Explosivos ..... 29

2.2.6 Determinación de la Energía..... 30



2.2.7	Eficiencia de los explosivos .....	32
2.2.8	Factor de energía .....	33
2.2.9	Distribución de energía .....	34
2.2.10	Modelo de factor de energía.....	35

### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	ÁMBITO DE ESTUDIO.....	36
3.1.1	Ubicación .....	36
3.1.2	Accesibilidad.....	36
3.2	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
3.3	TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	38
3.4	NIVEL DE INVESTIGACIÓN .....	38
3.5	POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
3.5.1	Población.....	38
3.5.2	Muestra .....	39
3.6	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	40
3.6.1	Variable independiente .....	40
3.6.2	Variable dependiente .....	40
3.7	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	40
3.7.1	Técnicas de recolección de datos .....	40
3.7.2	Instrumentos de recolección de datos .....	41
3.8	PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	41

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	PARÁMETROS OPERATIVOS DE PROYECTOS PRE TEST .....	44
4.1.1	Parámetros de perforación .....	44
4.1.2	Parámetros de voladura.....	45
4.1.3	Resultados de proyectos de pre test .....	47
4.1.4	Resumen de resultados de proyectos pre test.....	56
4.2	APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CROSBY & PINCO .....	56
4.2.1	Cálculo de potencia de relativa por volumen en proyectos de pre test .....	56
4.2.2	Cálculo de nuevas dimensiones de burden y espaciamiento. ....	60
4.2.3	Cuadro resumen de nuevos parámetros de perforación .....	65



4.3	PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA POST TEST .....	65
4.3.1	Parámetros de perforación .....	65
4.3.2	Parámetros de voladura.....	66
4.3.3	Resultados de proyectos de aplicación .....	66
4.3.4	Resumen de Resultados de Proyectos Post Test .....	71
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROYECTOS POST TEST .....	71
4.4.1	Análisis de resultados de costos para SGM .....	72
4.4.2	Análisis de resultados para SGC.....	73
4.4.3	Análisis de resultados para SM.....	75
4.4.4	Resultados de costos unitarios acumulados de perforación y voladura.....	77
4.5	CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	78
4.5.1	Prueba estadística T-student de hipótesis 1 .....	78
4.5.2	Prueba estadística T-student de hipótesis 2 .....	82
4.6	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	86
	<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>88</b>
	<b>VI. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>89</b>
	<b>VII. REFERENCIAS.....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>94</b>

Área: Ingeniería de minas

Tema: Análisis de costos mineros y comercialización de minerales

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 11 de febrero de 2022.



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Grado de aprovechamiento de la energía de diversos explosivos .....	33
<b>Tabla 2:</b> Acceso a la Unidad Minera Apumayo.....	36
<b>Tabla 3</b> Operacionalización de variables. ....	40
<b>Tabla 4</b> Parámetros geotécnicos generalizado según Hoek - Brown .....	43
<b>Tabla 5</b> Clasificación de dureza. ....	44
<b>Tabla 6</b> Parámetros de perforación .....	45
<b>Tabla 7</b> Parámetros de voladura.....	46
<b>Tabla 8</b> Datos generales banco 4048 py 16 .....	50
<b>Tabla 9</b> Parámetros de perforación banco 4048 py 16.....	50
<b>Tabla 10</b> Parámetros de voladura banco 4048 py 16 .....	51
<b>Tabla 11</b> Costo de perforación y voladura banco 4048 py 16 .....	51
<b>Tabla 12</b> Datos generales banco 3976 py 05 .....	54
<b>Tabla 13</b> Parámetros de perforación banco 3976 py 05.....	55
<b>Tabla 14</b> Parámetros de voladura banco 3976 py 05 .....	55
<b>Tabla 15</b> Costos de perforación y voladura banco 3976 py 05.....	55
<b>Tabla 16</b> Resultados costos de perforación y voladura de los proyectos de pre test ....	56
<b>Tabla 17</b> Resumen de características energías de mezclas explosivas .....	60
<b>Tabla 18</b> Resumen parámetros de burden y espaciamiento de perforación.....	65
<b>Tabla 19</b> Parámetros del nuevo diseño de perforación .....	65
<b>Tabla 20</b> Datos generales banco 4000 py 12 .....	70
<b>Tabla 21</b> Parámetros de perforación banco 4000 py 12.....	70
<b>Tabla 22</b> Parámetros de voladura banco 4000 py 12 .....	70
<b>Tabla 23</b> Costos de perforación y voladura banco 4000 py 12.....	71
<b>Tabla 24</b> Resultados de costos de perforación y voladura de proyectos post test .....	71



<b>Tabla 25</b>	Parámetros de burden y espaciamento para HA37 y HA73G .....	72
<b>Tabla 26</b>	Parámetros de burden y espaciamento para HA46 y HA73G .....	73
<b>Tabla 27</b>	Parámetros de burden y espaciamento para HA45/55 y HA73G .....	75
<b>Tabla 28</b>	Cuadro comparativo de resultados de costos unitarios de perforación.....	79
<b>Tabla 29</b>	Análisis de resultados heavy anfo vs HA73G .....	80
<b>Tabla 30</b>	Resultados de la prueba estadística T Student. ....	81
<b>Tabla 31</b>	Cuadro comparativo de resultados de CU de voladura.....	82
<b>Tabla 32</b>	Análisis de resultados de voladura heavy anfo vs HA73G.....	83
<b>Tabla 33</b>	Resultados de la prueba estadística T student.....	83
<b>Tabla 34</b>	Resultados de costos unitarios de perforación y voladura.....	84
<b>Tabla 35</b>	Resultados estadísticos de CU de perforación y voladura pre y post test.....	85
<b>Tabla 36</b>	Prueba T-student de resultados de costos unitarios de pre y post test. ....	85



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ensayo de la prueba de Trauzl .....	31
<b>Figura 2</b> Esquema para la medición de la energía del explosivo.....	32
<b>Figura 3</b> Metodología de la investigación. ....	37
<b>Figura 4</b> Diseño de carga de proyectos pre test .....	46
<b>Figura 5</b> Dominio de mineralización banco 4048 py 16.....	47
<b>Figura 6</b> Dominio de alteraciones banco 4048 py 16 .....	48
<b>Figura 7</b> Dominio de dureza banco 4048 py 14.....	48
<b>Figura 8</b> Diseño de malla de perforación banco 4048 py 16 .....	49
<b>Figura 9</b> Plano de dureza final banco 4048 py 16 .....	49
<b>Figura 10</b> Dominios de mineralización banco 3976 py 05 .....	52
<b>Figura 11</b> Dominios de alteraciones banco 3976 py 05.....	52
<b>Figura 12</b> Dominios de dureza banco 3976 py 05 .....	53
<b>Figura 13</b> Diseño de malla de perforación banco 3976 py 05 .....	53
<b>Figura 14</b> Plano de dureza banco 3976 py 05 .....	54
<b>Figura 15</b> Diseño de carga de proyectos post test.....	66
<b>Figura 16</b> Dominios de mineralización banco 4000 py 12 .....	67
<b>Figura 17</b> Dominios de alteraciones banco 4000 py 12.....	68
<b>Figura 18</b> Dominios de dureza de roca banco 4000 py 12 .....	68
<b>Figura 19</b> Representación del diseño de malla de perforación banco 4000 py 12 .....	69
<b>Figura 20</b> Representación de dureza banco 4000 py 12 .....	69
<b>Figura 21</b> Costos unitarios de perforación para HA37 vs HA73G.....	72
<b>Figura 22</b> Costos unitarios de voladura para HA37 y HA73G.....	73
<b>Figura 23</b> Costos unitarios de perforación HA46 vs HA73G.....	74
<b>Figura 24</b> Costos unitarios de voladura para HA46 y HA73G .....	75



<b>Figura 25</b> Costos unitarios de perforación HA45/55 vs HA73G.....	76
<b>Figura 26</b> Costos unitarios de voladura para HA45/55 y HA73G.....	76
<b>Figura 27</b> Resultados de CU de perforación y voladura de heavy anfo y HA73G.....	77
<b>Figura 28</b> Distribución de costos unitarios de perforación de heavy anfo vs HA73G ..	78
<b>Figura 29</b> Distribución de costos unitarios de voladura de heavy anfo vs HA73G.....	78
<b>Figura 30</b> Prueba de hipótesis 1 - región crítica .....	81
<b>Figura 31</b> Prueba de hipótesis - región crítica .....	84
<b>Figura 32</b> Región crítica de costos unitarios de proyectos pre y post test.....	86



## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

SGM	Macizo rocoso con alteración de sílice granular moderada
SGC	Macizo rocoso con alteración sílice granular compacta
SM	Macizo rocoso con alteración sílice masiva
HA	Heavy anfo
HA37	Heavy anfo 37 (30% de emulsión, 70 de anfo)
HA46	Heavy anfo 40 (40% de emulsión, 60 de anfo)
HA45/55	Heavy anfo 45/55 (45% de emulsión, 55 de anfo)
HA73G	Heavy anfo 73 gasificado
TDC	Costo total de perforación
PV	Presión y volumen de los gases de explosión
ET	Energía de tensión
EB	Energía de Burbuja
AWS	Potencia absoluta por peso
ABS	Potencia Absoluta por volumen
RBS	Potencia relativa por volumen
BI	Índice de volabilidad
B	Burden
S	Espaciamiento
CU	Costo unitario
MP	Metros perforados



## RESUMEN

En la Unidad Minera Apumayo S.A.C. se encontró los costos elevados en las operaciones unitarias de perforación y voladura los cuales representan el 7% y 17 % respectivamente del costo total de operaciones mina, si continúa así afectaría los costos operativos de la empresa. Motivo por el cual se planteó como objetivo optimizar los costos de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C. siguiendo la metodología de un enfoque cuantitativo y de tipo de investigación preexperimental con un nivel descriptivo comparativo, porque se logró manipular la variable independiente en una muestra de 12 proyectos de una población de estudio de 19 proyectos de voladura, en un primer escenario se analizó los costos unitarios aplicando la malla de perforación usando la mezcla explosiva heavy anfo; en un segundo escenario se modificó las dimensiones de malla de perforación mediante el modelo matemático de Crosby & Pinco reemplazando la mezcla explosiva a heavy anfo 73 gasificado, con lo cual se logró optimizar los costos unitarios de perforación y voladura de 0,39 US\$/TM a 0,33 US\$/TM. Finalmente se concluye que el costo unitario de perforación y voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C. se logró optimizar reduciendo 15,38 %, aplicando un nuevo diseño de malla de perforación mediante el modelo matemático de Crosby & Pinco realizando el cambio de la mezcla explosiva de heavy anfo a HA73G.

**Palabras clave:** Costos, modelo matemático, optimización, perforación, voladura.



## ABSTRACT

In the Apumayo S.A.C. Mining Unit high costs were found in unit operations of drilling and blasting which represent 7% and 17% respectively of the total cost of mine operations, if it continues like this it would affect the operating costs of the company. Reason for which the objective was to optimize drilling and blasting costs through the application of the Crosby & Pinco mathematical model in the Apumayo S.A.C. Mining Unit, Following the methodology of a quantitative approach and a pre-experimental research type with a comparative descriptive level, because it was possible to manipulate the independent variable in a sample of 12 projects from a study population of 19 blasting projects, in a first scenario the unit costs applying the perforation mesh using the heavy anfo explosive mixture; In a second scenario, the dimensions of the drilling mesh were modified using the Crosby & Pinco mathematical model, replacing the explosive mixture with heavy anfo 73 gasified, with which it was possible to optimize the unit costs of drilling and blasting of 0.39 US\$/ MT at 0.33 US\$/MT Finally, it is concluded that the unit cost of drilling and blasting in the Apumayo Mining Unit SAC optimization was achieved by reducing 15.38%, applying a new perforation mesh design using the Crosby & Pinco mathematical model, changing the explosive mixture from heavy anfo to HA73G.

**Keywords:** Costs, mathematical model, optimization, drilling, blasting.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Apumayo S.A.C es una empresa privada constituida bajo el amparo de las normas legales vigentes, cuya actividad principal es la extracción y beneficio de minerales de Oro y Plata, se encuentra ubicada en los Distrito de Sancos y Chaviña, Provincia de Lucanas, Departamento de Ayacucho, las actividades de operación minera se desarrollan en el tajo Apumayo 01, siendo los procesos binomiales de perforación y voladura las de mayor relevancia, se plantea el desarrollo de la presente tesis titulado optimización de costos en perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

En todas las actividades del ciclo de minado, se tienen la política de búsqueda de mejora continua, debido a la variabilidad en el precio de los metales, además por los costos crecientes reportados por perforación y voladura, los costos están directamente ligados a los precios de los insumos en el mercado, lo cual obliga a optimizar los costos en cada proceso operativo, por lo que se plantea optimizar los costos de perforación y voladura, aplicando el modelo matemático de Crosby & Pinco, modelo que considera el redimensionamiento de los diseños de mallas de perforación, a partir del reemplazo de mezclas explosivas con mayor potencia relativa por volumen.

Para el análisis de resultados de optimización de costos de perforación y voladura en un primer escenario se caracteriza los factores que influyen en los costos de perforación y voladura, los datos son obtenidos de la data histórica del área de perforación y voladura de la Unidad Minera Apumayo S.A.C, Para el segundo escenario se redimensiona las mallas de perforación y voladura considerando la energía producida por el explosivo heavy anfo 73 gasificado con una densidad de 1.31 gr/cc y potencia relativa



por volumen de 150.21 %, en reemplazo de mezclas explosivas tradicionales de heavy anfo 37 con una densidad de 1.02 gr/cc y potencia relativa por volumen de 116.10 % , heavy anfo 46 con una densidad de 1.20 gr/cc y potencia relativa por volumen de 132.52 % y heavy anfo 45/55 con una densidad de 1.26 gr/cc y potencia relativa por volumen de 135.73 %, aplicando el modelo matemático de Crosby & Pinco.

Para tal propósito el presente trabajo de investigación consta de cuatro capítulos. En el capítulo I, se desarrolla el planteamiento de problema, describiendo la problemática de la situación actual, indicando las causas y consecuencias del problema, y los objetivos a alcanzar con la presente investigación.

En el capítulo II, está la revisión de la literatura, en la que se desarrolla los antecedentes referenciales de las investigaciones relacionadas; la descripción del marco teórico relacionados con la optimización de costos de perforación y voladura mediante el modelo matemático de Crosby & Pinco.

En el capítulo III, se desarrolla la metodología de la investigación, tipo y diseño de la investigación, la operacionalización de variables.

En el capítulo IV, se desarrolla los resultados y discusión sobre los objetivos de optimización de costos de perforación y voladura y la comprobación de la hipótesis.

Finalmente, la investigación termina con presentar las conclusiones, recomendaciones, y bibliografía consultada, además con la presentación de anexos de datos auxiliares requeridos para la conclusión del presente trabajo.



## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

En la Unidad Minera Apumayo S.A.C. En el marco de la búsqueda progresiva de mejora continua en cada uno de las etapas de los procesos de operación, y debido a la problemática actual de costos elevados en las operaciones de perforación igual a 0,15 US\$/TM y en voladura igual a 0,31 US\$/TM, que representan el 7 % y 17 % respectivamente del costo total de operación mina, por lo tanto, el departamento de perforación y voladura propuso optimizar los costos unitarios de perforación y voladura modificando las variables controlables de burden y espaciamiento de las mallas de perforación, que permitan en el plazo más breve lograr los objetivos de optimización de costos.

Las modificaciones de las variables controlables de mallas de perforación se realizan en forma empírica y arbitraria ejecutando pruebas de ensayo y error, hasta alcanzar una dimensión de malla adecuada, lo que genera, incremento en los costos unitarios de perforación y voladura. Asimismo, genera la variación en la fragmentación del macizo rocoso, incrementando el diámetro del P80 del material volado de 3.5 in a 4.15 in, debido a este problema se redujo el rendimiento horario de los equipos de carguío de 1014 TM/h a 933 TM/h, afectando directamente a la producción de operación mina y a la recuperación metalúrgica en el proceso de lixiviación del mineral en Pad.

Existen varios métodos o modelos matemáticos para redimensionar las variables controlables de burden y espaciamiento en el diseño de mallas de perforación y voladura, los cuales utilizan muchos variables tanto controlables y no controlables, esto se puede notar en la aplicación del modelo matemático que toma en cuenta la energía producida por un explosivo para redimensionar y obtener una nueva malla de perforación.



Los costos de perforación y voladura ejecutados con heavy anfo representan el 24 % del costo total de operación mina, este costo se incrementó en 4% respecto al costo del año 2020, debido a la modificación de la malla de perforación por el incremento de la dureza macizo rocoso.

En operaciones a tajo abierto es importante la reducción de costos de perforación y voladura optimizando las variables de burden y espaciamiento utilizando explosivos que generen mayor energía por volumen en los proyectos de voladura.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 Problema General**

¿Cómo se puede optimizar los altos costos de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

a) ¿Cómo se puede optimizar los costos de perforación mediante la aplicación del método matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.?

b) ¿Cómo se puede optimizar los costos de voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.?

## **1.3 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS**

### **1.3.1 Hipótesis General**

La aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco optimiza los costos de perforación y voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.



### **1.3.2 Hipótesis específicas**

- a) La aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco optimiza los costos de perforación en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.
- b) La aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco optimiza los costos de voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo General**

Optimizar los costos de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- a) Optimizar los costos de perforación mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.
- b) Optimizar los costos de voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El trabajo de investigación se realizó para optimizar los costos de perforación y voladura ya que estas actividades representan el 7% y 17% de los costos de las operaciones unitarias en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

El trabajo de investigación se realizó porque se encontró el problema de altos costos en perforación 0,15 US\$/TM y en voladura 0,31 US\$/TM esto afecta a los costos de operación de la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

El trabajo de investigación es importante porque permite demostrar la optimización de los costos mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby &



Pinco en una minería a tajo abierto, y es un ejemplo para que puedan aplicar en otras unidades mineras en el proceso de optimización de costos de perforación y voladura.

El trabajo de investigación presenta una justificación metodológica porque propone un nuevo método en la optimización de costos en perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco, ya que permite modificar las variables controlables como el burden y espaciamiento y el remplazo de la mezcla explosiva heavy anfo por otra de mayor energía como es el HA73G. este método puede ser aplicado por otros investigadores.

El trabajo de investigación presenta una justificación práctica porque ayuda a resolver el problema de los costos elevados en perforación y voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C. mediante un nuevo diseño de la malla de perforación y voladura, así mismo con un remplazo de explosivo de mayor potencia para optimizar los costos de perforación y voladura, sin comprometer la fragmentación de mineral requerida por Pad de lixiviación para su posterior tratamiento, para así mejorar las utilidades de la empresa.



## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Según Calderon (2018) en su estudio titulado “Optimización de costos mediante modificación de variables controlables de perforación y voladura en Mina el Toro”. En la Universidad Nacional del Trujillo; en la que se planteó como objetivos optimizar los costos, modificando las variables de burden y espaciamento de malla de perforación y voladura en mina el Toro, además, determinar el burden y espaciamento de la malla de perforación aplicando el modelo matemático de Crosby y Pinco, se determinó bajo la metodología de modificación de dimensiones de burden y espaciamento aplicando el modelo matemático de Crosby y Pinco por reemplazo de mezcla explosiva, siguiendo el procedimiento de realizar el mapeo de procesos, recolección de datos, determinación de proyectos, definición de burden y espaciamento y tipo de explosivo, aplicación del nuevo diseño de malla y discusión de resultados, concluye que al realizar el reemplazo de anfo por heavy anfo obtiene resultados favorables de reducción de costos de perforación y voladura en 8.33 % en la prueba N° 01 y 7.61 % en la prueba N° 02, lo que significó un ahorro en los procesos de perforación y voladura.

Según Gómez (2016) en su estudio titulado “Diseño de malla de perforación basado en la energía de mezclas explosivas, para optimizar costos de perforación y voladura en Aruntani SAC 2015” en la Universidad Nacional de Moquegua; en la que propuso como objetivo demostrar la optimización los costos de perforación y voladura con la aplicación de malla de perforación basado en la energía de mezclas explosivas, aplicando el modelo matemático de Crosby y Pinco. La metodología planteada es la modificación de variables controlables de burden y espaciamento de mallas de



perforación basado en la energía de mezclas explosivas, en la que empleó la técnica de registro de datos obtenidos por el sistema Open Mine, para datos de pre test y post test. Concluye que con la aplicación de nuevos parámetros de perforación y voladura reemplazando el anfo por el heavy anfo optimiza los costos de perforación y voladura en 5.1% para mineral y 3.6 % para desmonte.

Según Ames (2008) en su estudio titulado “Diseño de mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas” en la Universidad Nacional de Ingeniería; en la que se plantea como objetivos realizar el análisis y aplicación de la energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura, empleando metodología de cálculo de nuevas medidas de burden y espaciamiento mediante el modelo matemático escrito por W. Crosby y M. Pinco, reemplazando la mezcla explosiva anfo por anfo pesado a granel, mezcla explosiva que permite obtener diferentes combinaciones de emulsión/anfo. Concluye que con el reemplazo de anfo por anfo pesado 55, logró una reducción de costos de perforación y voladura de 5.98 %.

Según Iparraguirre (2017) En su estudio titulado “Diseño de mallas de perforación y voladura utilizando la potencia relativa por volumen para mejorar la fragmentación en tajo Chalarina-Minera Shahuindo – 2017” en la que se plantea como objetivos, obtener la influencia de la potencia relativa por volumen en el eficiente diseño de las mallas de perforación y voladura para una buena fragmentación de la roca, además de demostrar que el modelo matemático de potencia relativa por volumen es una herramienta eficiente para el diseño de mallas de perforación, en cuya caracterización del modelo matemático hace referencia del modelo de Crosby & Pinco, siguiendo método de estudio en la que comprende dos etapas, el primero es trabajo en campo cuyo objetivo fue la recolección de datos, el segundo es el trabajo en gabinete donde los datos obtenidos,



son ordenados, procesados e interpretados, en la que se determinó la influencia de la potencia relativa por volumen en el diseño de mallas de perforación, obteniendo los siguientes resultados, Cuantificando la potencia relativa por volumen permite modificar las dimensiones de burden y espaciamiento, asimismo, con la aplicación de la emulsión gasificada Quantex con mayor potencia relativa por volumen, permite aumentar el Espaciamiento hasta en 10 cm, respecto a los resultados económicos concluye que se redujo los costos de perforación y voladura en 6.90 %.

Según López (2003) en su estudio titulado “Evaluación de la energía de los explosivos mediante modelos termodinámicos de detonación” de la Universidad Politécnica de Madrid, Donde se plantea como objetivo principal la evaluación de la energía del explosivo en aplicaciones civiles en la que analiza la relación de existente entre la energía empleada en fragmentar la roca y la energía teórica del explosivo, en la emplea el método teórico para establecer la energía de los explosivos concluye, que existe importantes discrepancias respecto a la energía disponible del explosivo, en su estudio demuestra que esas diferencias están en 4.4% utilizando el calor de explosión como energía disponible, hasta 6.6% con trabajo útil de hasta 2000 bar, además examinó el parámetro energético que mejor define la energía disponible en el proceso de voladura, aplicando las diferentes regresiones múltiples establece una relación lineal para predecir el valor de la fragmentación utilizando como variables independientes diferentes parámetros de la voladura, la mejor correlación obtuvo utilizando trabajo útil hasta 2000 bar y la peor corresponde al criterio de expansión de 10 veces el volumen inicial, además establece que los balances de energía en el proceso de voladura muestran que el calor de explosión es un parámetro que describe correctamente la energía disponible del explosivo, para la evaluación del calor o del trabajo útil se requiere el empleo de códigos termodinámicos en los que es necesario calcular estados de detonación, para ello los



códigos deben incluir un modo de resolver el equilibrio químico y deben describir correctamente los productos de detonación mediante ecuaciones de estado apropiadas.

Según Music (2007) en su estudio realizado en Chile Tesis de pregrado “Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal mina el teniente”, en la Universidad de Chile. Tiene como objetivo efectuar un diagnóstico técnico de las operaciones de perforación y tronadura de desarrollo horizontal en la “Mina Reservas Norte” de Codelco Chile División el Teniente, específicamente en el nivel de producción (Teniente Sub-6). y también superar los problemas de sobre excavación en los desarrollos actuales, que generan desprendimiento de rocas, demoras en el ciclo por mayor acuñamiento, extracción y fortificación adicional, en la que concluye que el nuevo diseño permitió la reducción de número de taladros de 51 más 2 de alivio a 48 más 01 taladro de alivio, que representa el 8% de reducción, los metros perforados disminuye de 201.4 m a 186 m, el índice de perforación específica disminuye de 3.77 a 3.48 mp/m<sup>3</sup>.

## 2.2 MARCO TEÓRICO

El avance de la tecnología en ingeniería de explosivos con la implementación de nuevos productos de innovación hace de que las operaciones unitarias binomiales de perforación y voladura sea dinámico, por ello en Apumayo S.A.C. nos hemos propuesto la implementación de uso de las emulsiones gasificadas explosivo de gran potencia en los proyectos de voladura, que se está implementando en la mayoría de las unidades mineras de Perú.

Lo que significa que se tiene que rediseñar las dimensiones de las mallas de perforación y voladura, para lo cual, en el presente trabajo de investigación consideramos el modelo matemático basado en potencia relativa por volumen (RBS) de los explosivos.



Este modelo matemático propuesto por Crosby & Pinco, sustenta que la energía generada de una mezcla explosiva comparado al de otra mezcla explosiva es totalmente diferente, también es muy diferente la cantidad de energía que puede liberar un explosivo comparado con otro, en todas las etapas o fases en las que se desarrolla la detonación.

Es importante resaltar que la potencia relativa por volumen (RBS), nos ayuda a modificar las dimensiones de la malla de perforación rápidamente, sin estar incurriendo en los ensayos de prueba y error para implementar las nuevas dimensiones de las mallas de perforación, ganando tiempo y ahorrando costos en el proceso de perforación y voladura, también cabe precisar que nos ayudara a implementar el uso de factor de energía en los indicadores de gestión de operaciones mina, porque permite cuantificar el rendimiento de la energía del explosivo Kcal(MJ) por volumen de material volado (m<sup>3</sup>).

Empleando este modelo matemático para la modificación de la malla de perforación y voladura se optimiza los costos de las operaciones unitarias binomiales de perforación y voladura de la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

### **2.2.1 Modelo matemático de Crosby & Pinco**

(Crosby & Pinco, 1992) en su artículo *More Power to the Pop*, plantean un modelo matemático basado en la potencia relativa por volumen (RBS), que en el caso de no cambiar el diámetro del taladro, se puede determinar nuevas dimensiones del burden y el espaciamiento, utilizando un nuevo explosivo de una potencia relativa por volumen en particular en vez del explosivo en uso, pero en este caso es necesario mantener invariables las dimensiones del taco (el volumen de explosivo es invariable) y la sobre perforación, las nuevas dimensiones se pueden calcular con la ecuación siguiente (Crosby & Pinco, 1992):



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

Donde:

RBSa : potencia relativa por volumen del explosivo a usar.

RBSu : potencia relativa por volumen del explosivo en uso.

Da : Dimensión de burden/espaciamiento a usar.

Du : Dimensión de burden/espaciamiento en uso.

### 2.2.1.1 Potencia de los Explosivos

La potencia es la medida de la cantidad de energía de un explosivo. Se expresa como potencia absoluta por peso (AWS) y potencia absoluta por volumen (ABS). También se puede expresar como una comparación de la energía de un explosivo respecto al del ANFO, el cual es tomado como el 100%, obteniéndose la potencia relativa por peso o la potencia relativa por volumen (Ames, 2008).

#### 2.2.1.1.1 Potencia absoluta por peso (AWS)

Esta es la medida de la cantidad de energía disponible (en calorías), en cada gramo de explosivo. Ejemplo: la AWS del ANFO es 900 cal/gr.

#### 2.2.1.1.2 Potencia absoluta por volumen (ABS)

Esta es la medida de la cantidad de energía disponible (en calorías) en cada centímetro cúbico de explosivo. Esto se obtiene multiplicando la AWS por la densidad del explosivo.

$$ABS = AWS \times \delta \text{ explosivo} \quad (2)$$



### 2.2.1.1.3 Potencia relativa por peso (RWS)

Esta es la medida de la energía disponible de explosivo comparado a un peso igual de ANFO. Esta se calcula dividiendo la AWS del explosivo por la AWS del ANFO y multiplicado por 100.

$$RWS = \frac{AWS \text{ explosivo}}{AWS \text{ anfo}} \times 100 \quad (3)$$

### 2.2.1.1.4 Potencia relativa por volumen (RBS)

Esta es la energía disponible por volumen de explosivo comparado a igual volumen de ANFO, con una densidad de 0,82 g/cc. Esto se calcula dividiendo la ABS de un explosivo por la ABS del ANFO y multiplicado por 100 (Ames, 2008).

$$RBS = \frac{ABS \text{ explosivo}}{ABS \text{ anfo}} \times 100 \quad (4)$$

## 2.2.2 Modelo de Crosby & Pinco modificado

En operaciones mineras a tajo abierto, se utilizan varios tipos de explosivos en una misma columna explosiva. En las que se agrega cargas de fondo y cargas de columna o en las cargas desacopladas (carga de explosivos por pisos con tacos intermedios), los cuales dependen de las condiciones de campo, tipos de roca (Ames, 2008).

El modelo matemático modificado de Crosby y Pinco permite determinar las dimensiones del burden y espaciamiento cuando se utiliza de dos o más tipos de explosivos (Ames, 2008).

Considerando:

$V_e$  = Volumen de explosivo.

Reemplazando en la ecuación 1, se tiene:

$$\left[ \frac{V_e \times RBS_a}{V_e \times RBS_u} \right]^{1/3} \times D_u = D_a \quad (5)$$



Considerando que el volumen del explosivo es invariable con el tipo de explosivo

se tiene:

$$V_e = V_u = V_a$$

$V_u$  = volumen de explosivo en uso

$V_a$  = volumen de explosivo a usar

Reemplazando la ecuación 5 se tiene:

$$\left[ \frac{V_a \times RBS_a}{V_u \times RBS_u} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (6)$$

Además:

$V_e$  = Área del taladro x longitud de carga

$$V_e = A \times L_c \quad (7)$$

Reemplazando la Ecuación 7 se tiene:

$$V_u = A \times L_{cu} \quad (8)$$

$$V_a = A \times L_{ca} \quad (9)$$

Donde:

$L_{cu}$  = longitud de carga del explosivo en uso

$L_{ca}$  = longitud de carga del explosivo a usar

Considerando tres tipos de explosivos, el volumen total de explosivo a usar sería:

$$V_a = A \times L_{c1} + A \times L_{c2} + A \times L_{c3} \quad (10)$$

Factorizando la ecuación 10.

$$V_a = A \times (L_{c1} + L_{c2} + L_{c3}) \quad (11)$$

Reemplazando ecuaciones 11 y 8 en la ecuación 6.

$$\left[ \frac{A \times (L_{c1} + L_{c2} + L_{c3}) \times RBS_a}{A \times L_{cu} \times RBS_u} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (12)$$

Simplificando y considerando que cada explosivo tiene potencia relativa por volumen diferente, la ecuación 12 será:

$$\left[ \frac{(Lc1 \times RBS1 + Lc2 \times RBS2 + Lc3 \times RBS3)}{Lcu \times RBSu} \right]^{1/3} \times Du = Da \quad (13)$$

La ecuación generalizada para mezclas explosivas de dos o más tipos de mezclas explosivas es:

$$Da = Du \times \frac{[\sum_{i=1}^n (Lc_i \times RBS_i)]^{1/3}}{(Lcu \times RBSu)^{1/3}}, n \in Z^+ \quad (14)$$

### 2.2.3 Estructura de Costos en Minería

El costo de operación de una empresa minera está constituido por la siguiente estructura de costos, estos costos son: costos de gestión geológica, costos de minado, costos de procesamiento, costos de servicios generales y administrativos, costos de sostenibilidad o seguridad, calidad y medio ambiente, costos legales (Chambergo, 2013).

#### 2.2.3.1 Costos operativos

Los costos operativos están conformados por el costo unitario total del ciclo de minado para labores de producción. Los costos unitarios de las operaciones unitarias de minado están expresados en US\$/TM costo total del ciclo de minado es expresado tonelada (por ejemplo, US\$ 2.50 / tonelada para la minería) (Chambergo, 2013, p. 02).

#### 2.2.3.2 Costos de minado.

Son todos aquellos costos en que se incurre para obtener el proceso de explotación desde mina hasta la planta de procesos, estos costos involucran: mano de obra, operaciones (tercerización de procesos, alquileres), perforación, voladura, acarreo, Transporte, servicios auxiliares (Chambergo, 2013).



## 2.2.4 Sistemas de Costos

### 2.2.4.1 Costos fijos:

Costos que se mantienen invariables al proceso productivo minero, se consideran independiente de la producción. estos costos varían en función del nivel de producción, pero no directamente con la producción generada (Chambergó, 2013).

### 2.2.4.2 Costos variables:

Costos que varían según la actividad del proceso minero, son los costos en los procesos productivos de perforación, voladura, carguío y acarreo y actividades auxiliares mina, definiéndose esto en los costos de personal de producción, materiales e insumos, equipos (Chambergó, 2013).

## 2.2.5 Energía de los Explosivos

La energía del explosivo se puede definir en términos del trabajo de expansión de los gases de alta presión, o sea, el área bajo la curva PV como se muestra en la siguiente ecuación (McKenzie, 1994):

$$Energía = \int_{P_d}^{P_c} P dV \quad (15)$$

Donde:

P = Presión de los gases de explosión en cualquier instante en el tiempo.

V = Volumen de los gases de explosión en cualquier instante en el tiempo.

$P_d$  = Es la presión de detonación

$P_c$  = Es la presión crítica a la cual ningún trabajo adicional se realiza debido a la expulsión del gas a la atmósfera.



## 2.2.6 Determinación de la Energía

La energía explosiva puede ser medida o calculada para determinar su rendimiento termoquímico de la mezcla explosiva (Exsa, 2008).

### 2.2.6.1 Medición de la Energía

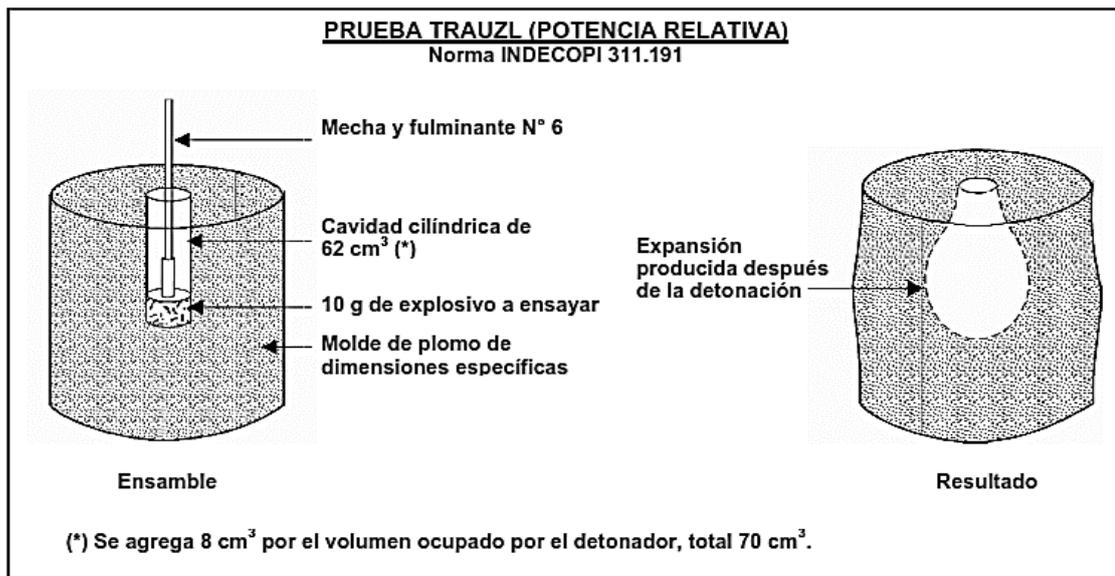
La medición de la energía de una mezcla explosiva, generalmente, se realiza por comprobación a otra de características ya conocidas. Para esta medición se usa los métodos siguientes: ensayo del mortero balístico, ensayo de Trauzl en bloque de plomo, ensayo de Brisance, concepto de potencia por peso, ensayo de energía de burbuja bajo el agua, (Exsa, 2008).

#### 2.2.6.1.1 Ensayo de Trauzl en bloque de plomo

Mediante la prueba de Trauzl se determina la capacidad de expansión que produce la detonación del 10 g de explosivo disparado dentro de una cavidad cilíndrica ( $70 \text{ cm}^3$ ) abierta en la parte superior de un molde cilíndrico de plomo de dimensiones específicas.

La expansión o deformación de esta cavidad originada por la detonación del explosivo a medir, se compara con la efectuada por una masa similar de gelatina explosiva de composición 94:6, nitroglicerina-nitrocelulosa denominada blasting o gelatina explosiva que se considera como patrón, con un valor de  $560 \text{ cm}^3$  (100 %).

El resultado se expresa en  $\text{cm}^3$  cuando se indica en incremento de volumen del agujero inicial, o en porcentaje cuando se compara con el patrón. Así, una determinada dinamita tendrá una fuerza de 60 % cuando la expansión que provoca en el bloque de plomo es igual a 60% del volumen generado por la detonación de la gelatina explosiva. La potencia relativa de los explosivos industriales varía entre 20 y 90 % (Exsa, 2008).



**Figura 1** Ensayo de la prueba de Trauzl

Nota: Ensayo de prueba de Trauzl en bloque de plomo (Exsa, 2008).

### 2.2.6.1.2 Ensayo de energía de burbuja bajo el agua

Se define como el trabajo útil realizado por un explosivo después que la roca ha estado sujeta a la energía de choque inicial. A la energía de burbuja se le considera responsable del desplazamiento de la roca después de fracturarse. Se mide en la prueba submarina de energía y se calcula de acuerdo a la ecuación.

$$E_b = 0.684 * P_h^{2.5} * t^3 * \rho_w^{-1.5} \quad (16)$$

Donde:

$E_b$  = Es la energía de burbuja

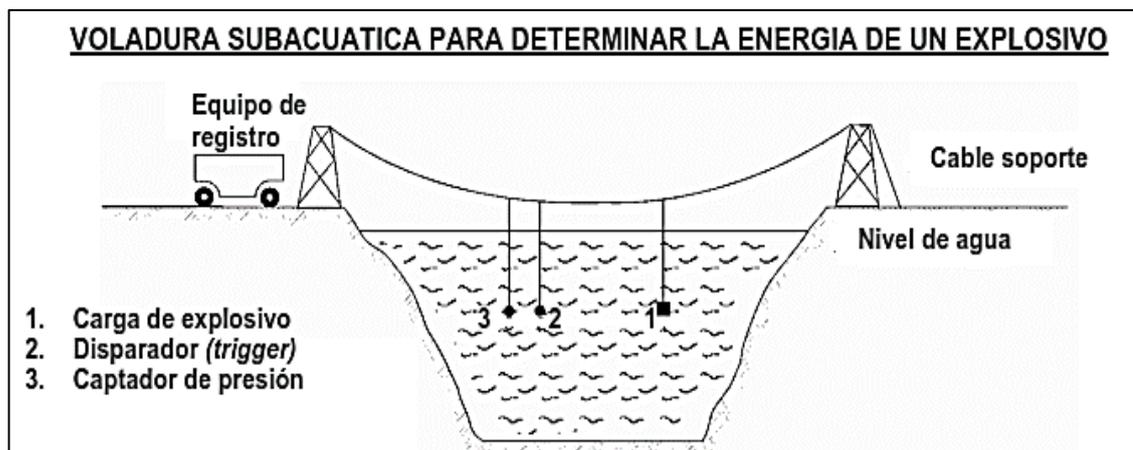
$P_h$  = Es la presión hidrostática a la profundidad de la carga,

$t$  = Es el período de tiempo entre el pulso de choque y la primera implosión de burbuja

$\rho_w$  = es la densidad del agua. Ver también Energía de choque.

Un método peculiar aplicado en la investigación en el de “cuantificación de energía bajo el agua”, que consiste en efectuar pruebas de disparo con cargas similares a

las introducidas en los taladros, sumergidas pero suspendidas a determinada profundidad en un estanque de magnitud apreciable, evaluadas mediante un captador de presión sumergido a una distancia determinada de la carga explosiva. Con él se determina por separado la energía vinculada a la onda de choque (energía de tensión ET) y la energía de los gases de detonación (energía de burbuja EB). Permite comparar los rendimientos de explosivos similares bajo las mismas condiciones de ensayo (Exsa, 2008).



**Figura 2** Esquema para la medición de la energía del explosivo.

Nota: Ensayo de energía de burbuja bajo el agua (Exsa, 2008).

### 2.2.7 Eficiencia de los explosivos

Este factor es un índice del grado de aprovechamiento práctico de la energía liberada por una mezcla explosiva, en relación a los parámetros termodinámicos calculados en forma teórica, la eficiencia total es una función de muchas variables, algunas de las cuales son internas e inherentes dentro del explosivo por la virtud de su formulación química y algunas de las cuales son externas y parte del diseño de la voladura o condiciones encontradas en el lugar. Las variables externas que pueden afectar la eficiencia total de un explosivo incluyen, a la eficiencia de la iniciación, condiciones de agua, diámetro de carga, longitud de carga, grado de confinamiento, temperatura, efectos de la detonación de cargas explosivas adyacentes, etc. (Exsa, 2008)

Las mediciones de las eficiencias de los explosivos han sido desarrolladas para evaluar la potencia práctica del explosivo y sugieren sus propiedades en el campo. La eficiencia es posible determinar empíricamente mediante la técnica de la "energía de burbuja" en las voladuras bajo el agua, y se mide como el porcentaje de energía aprovechable. Mediciones efectuadas permiten obtener los siguientes rangos de factores de eficiencia para las distintas familias de explosivos. Ver tabla 1 (Exsa, 2008).

**Tabla 1**

*Grado de aprovechamiento de la energía de diversos explosivos*

<b>Mezcla explosiva</b>	<b>Eficiencia</b>
Explosivos moleculares (nitroglicerina, pentrita, TNT y otros)	95-100
Emulsiones	90-95
ANFOs pesados bombeables (sobre 60% emulsión)	75-90
ANFOs pesados vaceables (bajo 50% ó 60% emulsión)	65-85
Hidrogeles	55-70
ANFO	60-80
SANFO	50-70

Nota: Eficiencia de aprovechamiento de energía de explosivos (EXSA, 2008)

### **2.2.8 Factor de energía**

La necesidad de cuantificar el rendimiento de la mezcla explosiva utilizada en un proceso de voladura motivó a que emplee el factor de carga, asumiendo que es igual a la energía explosiva, lo que es incorrecto, las diferentes mezclas explosivas no generan la misma energía durante el proceso de detonación, es así que 01 kg de ANFO, dinamita, o heavy anfo, generan diferentes rendimientos de energía, el factor de energía es un parámetro que nos permite determinar la cantidad de energía usada para fragmentar una tonelada de mineral o un metro cúbico de material estéril (en el movimiento de tierras), y se puede usar la siguiente relación (Ames, 2008):

$$\text{Factor de energía} = \frac{\text{Kcal (MJ) de energía}}{\text{TM ó m}^3 \text{ de material volado}} \quad (17)$$



### **2.2.9 Distribución de energía**

La distribución del explosivo dentro del macizo rocoso afecta el grado de fragmentación esperado, ya que la distribución de la energía desarrollada por el explosivo depende de la geométrica de este al interior del macizo. existen varias metodologías que permiten realizar un acercamiento a los requerimientos energéticos para fragmentar un macizo rocoso determinado. Entre los más conocidos están la metodología de Lilly, W. Hustrulid, y Bond. Las dos primeras están basadas en las propiedades geoestructurales de la roca y la última es una correlación efectuada a través del Work Index del material. En nuestro caso utilizaremos la metodología de Lilly para determinar el factor de energía necesario para fracturar la roca en el sector de Andesita Superior (McKenzie, 1994).

#### **2.2.9.1 Distribución de energía**

Según McKenzie (1994), la distribución del explosivo dentro del macizo rocoso afecta el grado de fragmentación esperado, ya que la distribución de la energía desarrollada por el explosivo depende de la geométrica de este al interior del macizo, existen varias metodologías que permiten realizar un acercamiento a los requerimientos energéticos para fragmentar un macizo rocoso determinado. Entre los más conocidos están la metodología de Lilly, W. Hustrulid, y Bond. Las dos primeras están basadas en las propiedades geoestructurales de la roca y la última es una correlación efectuada a través del Work Index del material. En nuestro caso utilizaremos la metodología de Lilly para determinar el factor de energía necesario para fracturar la roca en el sector de Andesita Superior.



### 2.2.10 Modelo de factor de energía

Debemos tener en cuenta que el factor de energía es el mejor parámetro para cuantificar el rendimiento del explosivo porque la energía del explosivo es el que fragmenta al macizo rocoso, La energía total se calcula de la siguiente manera:

$$Energia\ total\ (MJ) = \frac{(\pi \times \emptyset^2 \times Lc \times \rho_{exp} \times E_{exp})}{40} \quad (18)$$

Donde:

$\emptyset$  : Diámetro del taladro (cm).

Lc : Longitud de carga (m).

$\rho_{exp}$  : Densidad del explosivo (gr/cm<sup>3</sup>).

$E_{exp}$  : Energía del explosivo (MJ).

El factor de energía se calcula de la siguiente manera:

$$Factor\ de\ energia = \frac{Energia\ total\ (MJ)}{TM\ total\ fragmentado} \quad (19)$$

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 ÁMBITO DE ESTUDIO

##### 3.1.1 Ubicación

El Unidad Minera Apumayo, perteneciente a la compañía minera Apumayo S.A.C., del grupo Aruntani, está ubicado y forma parte del flanco Occidental de la Cordillera de los Andes del Sur del Perú, se localiza en la Región de Ayacucho, en la provincia de Lucanas, entre los distritos de Chaviña y Sancos.

##### 3.1.2 Accesibilidad

El acceso a la Unidad minera es por la ruta: Lima – Nazca – Puquio – Desvío - Unidad Minera Apumayo, este trayecto es por vía asfaltada y trocha carrozable; asimismo se puede acceder a la unidad minera por la ruta: Lima – Huamanga – Puquio – Desvío - Unidad Minera Apumayo.

**Tabla 2:**

*Acceso a la Unidad Minera Apumayo.*

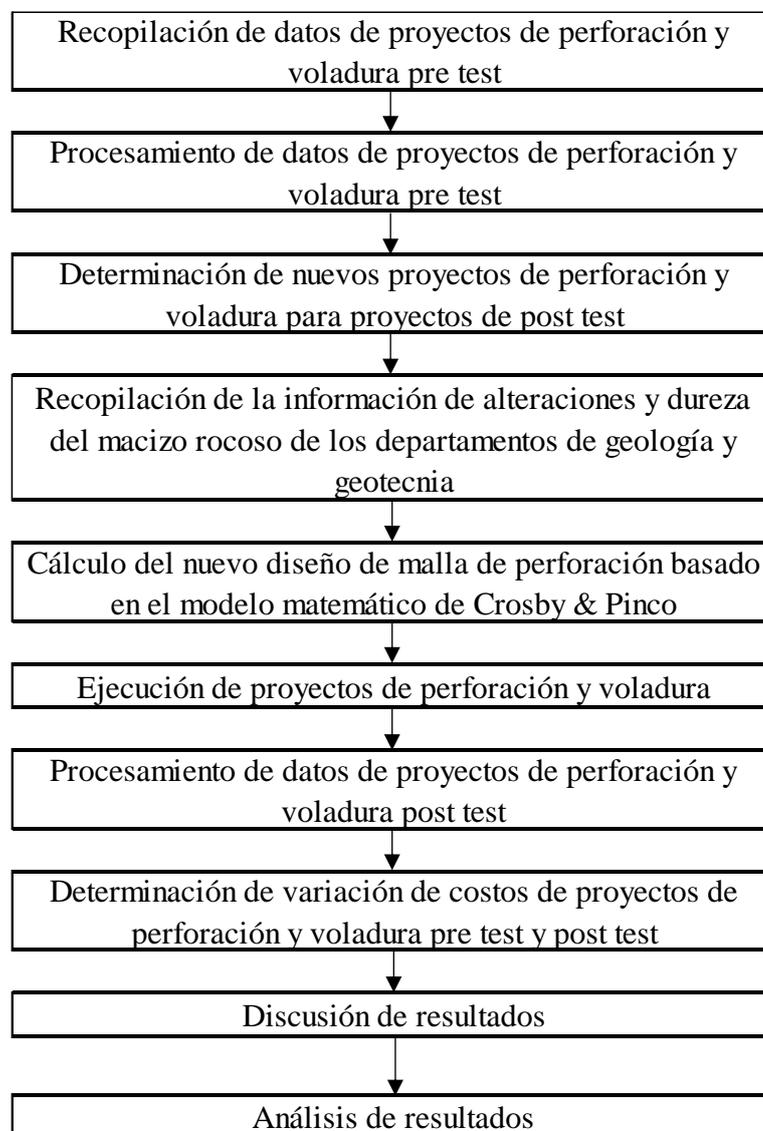
Ruta	Km	Tipo de via	Tiempo (hrs)
Lima - Nazca	444	Asfaltado	6
Nazca - Puquio	157	Asfaltado	3
Puquio - Desvío Sancos	58	Afirmado	2
Desvío Sancos - Apumayo	13	Trocha Carrozable	0.3
<b>Total</b>	<b>672</b>		<b>11.3</b>

#### 3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño para el presente trabajo de investigación fue de tipo pre experimental debido a que las mediciones se realizaron con proyectos de pre test y post test. Así mismo

Para el primer escenario de este estudio de investigación los datos son obtenidos de la data histórica del área de perforación y voladura de la unidad minera Apumayo S.A.C. luego se redimensiona las mallas de perforación y voladura considerando la energía producida por el explosivo HA73G en reemplazo del ANFO mediante el modelo matemático de Crosby & Pinco.

La metodología para el desarrollo de la presente tesis se presenta en el siguiente flujograma:



**Figura 3** Metodología de la investigación.



### **3.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo de investigación expone características de un enfoque cuantitativo, debido al procesamiento e interpretación de datos. Por otra parte, Hernandez (2014) enfatiza que los métodos cuantitativos utilizan la recopilación de datos para probar hipótesis basadas en mediciones numéricas y análisis estadístico.

### **3.4 NIVEL DE INVESTIGACIÓN**

De acuerdo a la naturaleza y características tiene un enfoque descriptivo, debido a que el estudio está orientado en la optimización de costos de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

La investigación tiene un enfoque descriptivo, dentro de este marco el estudio busca describir las características fundamentales de perforación y voladura, para poner en manifiesto la estructura o el comportamiento de los mismos, proporcionando la información necesaria para realizar las comparaciones con otras Notas.

### **3.5 POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.5.1 Población**

la población de estudio estuvo conformada por 19 proyectos de perforación y voladura programados durante el mes de mayo y junio. Así mismo la población es la totalidad del fenómeno a estudiar, en el cual las unidades de población tienen características comunes, son estudiadas y dan lugar a los datos de investigación (Tamayo, 1997, p. 114). Por otra parte, la población es un conjunto de todos los individuos que cumplen un conjunto de características, cuyas poblaciones deben estar claramente ubicadas de acuerdo a las características de contenido, lugar y tiempo, en el campo, si nuestra población consta de un número relativamente



grande de unidades, esta población sería de hecho imposible, por razones de tiempo, costo y dado que no es absolutamente necesario, examinar cada unidad individual (Hernandez, 2014, p. 174).

### 3.5.2 Muestra

Hernandez (2014), refiere que la muestra es un subconjunto de la población, la muestra debe recoger todos los atributos de la población, cuando seleccionamos ciertos elementos con el objetivo de aprender algo sobre una determinada población, llamamos a este grupo de elementos una muestra. Por supuesto, esperamos que lo que encontremos en la muestra sea cierto para toda la población. La precisión de la información recopilada depende en gran medida del método de muestreo.

No se puede saber a priori si la muestra obtenida es representativa o no, porque para saberlo con absoluta certeza habría que encuestar a todo el universo y luego comparar los dos resultados, la muestra para la presente tesis, se obtiene empleando la siguiente formula.

$$n = \frac{N \times Z_c^2 \times P \times Q}{D^2 \times (N - 1) + Z_c^2 \times P \times Q} \quad (20)$$

Donde:

N : Población representada por 19 proyectos de voladura del mes de mayo.

Z : Nivel de confianza del 95% para una distribución normal 1.96.

P : Probabilidad de éxito 90 %.

Q : Probabilidad de fracaso (Q=1-P) 10%.

D : Precisión (Error máximo permisible en términos de proporción) 10%.



Reemplazando valores en la ecuación 20 se tiene:

$$n = \frac{19 \times 1.96^2 \times 0.9 \times 0.1}{0.1^2 \times (19 - 1) + 1.96^2 \times 0.9 \times 0.1} = 12$$

La muestra para proyectos de pre test y post test está conformada por 12 proyectos de perforación y voladura.

### 3.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

#### 3.6.1 Variable independiente

Diseño de la malla de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco.

#### 3.6.2 Variable dependiente

Costo de Perforación y Voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

**Tabla 3**

*Operacionalización de variables.*

Tipo de Variables	Indicadores	Escala de medición
<b>Variable Dependiente:</b>	- Costo de perforación	- US\$/m
Costo de perforación Voladura.	- Costo de voladura	- US\$/TM o US\$/m3
<b>Variable Independiente:</b>	- Burden	- metros
Diseño de la malla de	- Espaciamiento	- metros
perforación y voladura.	- Taladros	- unidad
	- Carga explosiva	- Kg/m3

### 3.7 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.7.1 Técnicas de recolección de datos

La técnica empleada fue la observación y análisis documental, para la obtención de datos mediante el registro de la base de datos del área de perforación



y voladura, del mismo modo la programación de proyectos del área de planeamiento, además los indicadores de gestión de operaciones mina.

### 3.7.2 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos de recolección de datos responden a criterios de validez, confiabilidad y discriminación, para obtener de los fenómenos, la información necesaria, cada instrumento tiene dos aspectos: forma y contenido, los principales instrumentos utilizados para el presente trabajo de investigación fueron:

- Laptop.
- Software especializado (Jk Simblast, Wip frag, I-Blast).
- Balanza.
- Vaso calibrado de peso y volumen.
- Espátula.
- Bandejas de plástico.
- Cámara digital.
- Portametrics.
- Sismógrafo.
- Microtrap - Geoteknik

## 3.8 PRUEBA DE HIPÓTESIS

El estudio y análisis de datos se desarrolla para cada escenario, usando algoritmos especializados, existen una gran variedad de pruebas estadísticas, para el presente trabajo de investigación se hace uso del estadístico T-student para la prueba de la hipótesis.

### a) Planteamiento de la hipótesis

**H<sub>0</sub>:** La aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco no optimiza los costos de perforación y voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.



**Hi:** La aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco optimiza los costos de perforación y voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C.

**b) Nivel de significancia**

$\text{Alpha} = 5\% = 0,05$

**c) Prueba estadística**

La prueba “t” de student

**d) Criterio de decisión**

Si  $(p\text{-value}) < \text{Alpha} \Rightarrow$  se rechaza la  $H_0$

Si  $(p\text{-value}) > \text{Alpha} \Rightarrow$  se acepta la  $H_0$

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta los resultados de optimización de costos de perforación y voladura mediante la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco en la Unidad Minera Apumayo S.A.C., en un primer escenario se presenta los costos pre test de operación de perforación y voladura y en un segundo escenario se muestra los costos de perforación y voladura con la modificación de las dimensiones de malla basado en el modelo matemático de Crosby & Pinco.

Para el análisis de resultados de costos de los proyectos de pre test se tomó como referencia la clasificación de dureza realizada por los departamentos de geotecnia y geología mina, esta clasificación es basado tomando en cuenta varios parámetros geotécnicos y geológicos, el resumen se detalla en el siguiente cuadro:

**Tabla 4**

*Parámetros geotécnicos generalizado según Hoek - Brown*

Parámetros	Sílice Clay	Clay Pirita	Sílice Granular Moderada I	Sílice Granular Moderada II	Sílice Granular Compacta	Sílice Masiva
RMR	34	37	41	45	48	55
GSI	29	32	36	40	43	50
mi	11	10	10	11	11	13
UCS (MPa)	19	30	39.83	49	61.18	76.4
P.E. (KN/m3)	20.2	17.5	21.3	22.72	21.53	24.39

Nota: Laboratorio Ingeotest Ingenieros, 2019 y 2020. (Revisados por geotecnia mina, agosto 2020.)

La clasificación de dureza es en base a los resultados de resistencia a compresión Uniaxial obtenidos UCS obtenidos por Ingeotest del macizo rocoso de la unidad Minera Apumayo S.A.C. los cuales se presentan en la Tabla 4, en donde se agrupó la dureza del macizo rocoso en 04 grupos:

**Tabla 5***Clasificación de dureza.*

<b>Parámetros</b>	<b>Rango (Mpa)</b>
Suave	0 - 30
Medio	31 - 60
Duro	61 – 76.4
Muy Duro	> 76.4

**Nota:** Clasificación de dureza

En el presente estudio, las pruebas se desarrollaron en 03 tipos de dureza definidos por su grado de alteraciones, uno clasificado como SGM (Sílice Granular Moderada) material de dureza media cuya resistencia a la compresión uniaxial (UCS) comprende desde 31 Mpa hasta 60 Mpa, la alteración predominante está el sílice granular SG cuya intensidad va de moderada a deleznable, la segunda se desarrolló en material clasificado como SGC (Sílice Granular Compacta) material duro en la que la resistencia a la compresión uniaxial esta desde 61 Mpa hasta 90 Mpa, la alteración predominante de este tipo de material es el SG con intensidad de compacta a masiva, y en SM Sílice Masiva material muy duro cuya resistencia a la compresión uniaxial está encima de 76.4 Mpa; se presentan rodeados principalmente de la Sílice Granular con intensidad de compacta, presenta escasa porosidad.

#### **4.1 PARÁMETROS OPERATIVOS DE PROYECTOS PRE TEST**

##### **4.1.1 Parámetros de perforación**

La primera etapa del proceso productivo de operaciones mina, se realiza con 01 perforadora Ingersoll rand DM45E, 01 perforadora Atlas Copco DML, los cuales perforan taladros de 9.00 metros de altura, con diámetros de broca de 6 3/4", con diseños de altura de banco de 8 metros y sobreperforacion de 1.0 metros,

Para el diseño de la malla de perforación se considera una malla triangular, siendo de diferentes dimensiones según la caracterización geotécnica del área de proyecto de perforación, el diseño de mallas de perforación contempla taladros de Producción, taladros de amortiguación, taladros de control de proyección de material, la tabla N° 6 resume los parámetros de perforación para el Tajo Apumayo.

**Tabla 6**

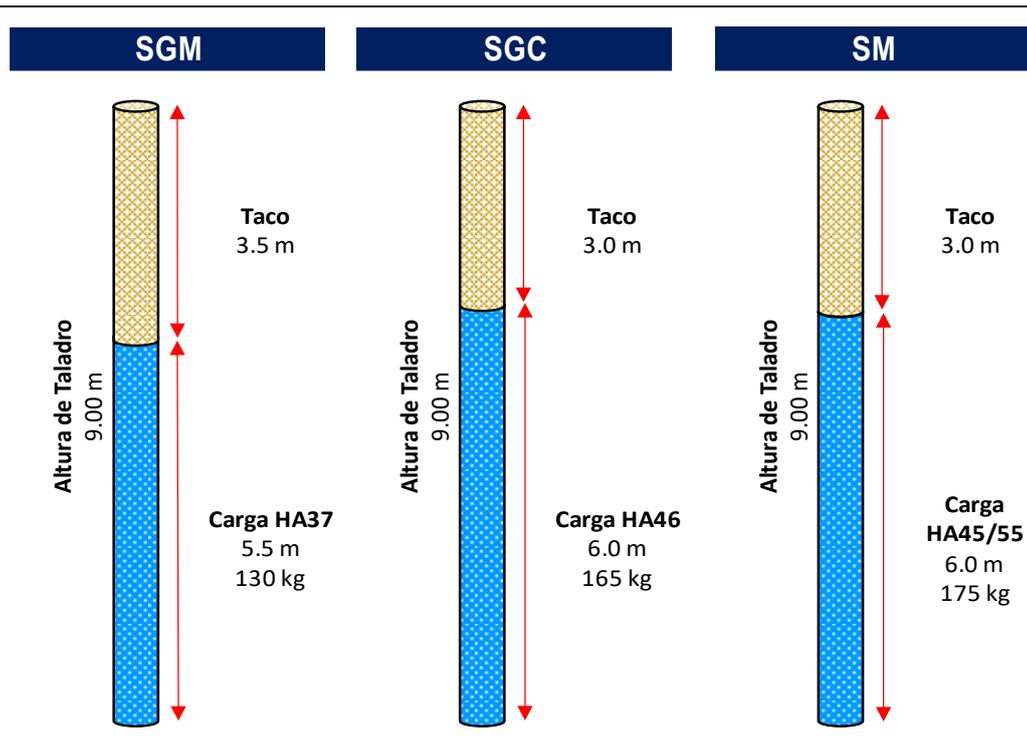
*Parámetros de perforación*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>SGM</b>	<b>SGC</b>	<b>SM</b>
Burden	m	5.00	4.80	4.60
Espaciamiento	m	5.80	5.50	5.30
Diámetro de taladros	in	6 ¾	6 ¾	6 ¾
Longitud taladro	m	9.0	9.0	9.0
Sobre perforación	m	1.0	1.0	1.0
Altura de Banco	m	8.0	8.0	8.0
Densidad de Mineral	t/m <sup>3</sup>	2.10	2.20	2.35

**Nota:** Parámetros de perforación de proyectos pre test.

#### **4.1.2 Parámetros de voladura.**

El proceso de carguío de taladros se realiza con camión fabrica Kenworth cuyas capacidades de los compartimientos son de 6.00 t. Para Nitrato de amonio y 9.00 t. para emulsión, el carguío de los taladros es de carga continua y la aplicación de cámaras de aire intermedias se realiza esporádicamente, para la iniciación de la detonación se usa 01 multiplicador de energía (booster), 01 detonador no eléctrico (Fanel dual), la figura 4 muestra el diseño de carga para taladros de SGM, SGC y SM.



**Figura 4** Diseño de carga de proyectos pre test

El resumen de los parámetros de voladura se observa en la tabla N° 7, donde se muestra que para SGM el explosivo usado es HA37 cuya densidad es de 1.02 gr/cc, para SGC el explosivo usado es HA46 con una densidad de 1.20 gr/cc, y para SM el explosivo usado es HA45/55 cuya densidad es 1.26 gr/cc.

**Tabla 7**

*Parámetros de voladura*

Parámetros	Unidad	SGM	SGC	SM
Diámetro de taladros	in	6 3/4	6 3/4	6 3/4
Longitud de taladro	m	9	9	9
Longitud de taco	m	3.5	3.0	3.0
Densidad de explosivo	gr/cc	1.02	1.20	1.26
densidad de carga lineal	kg/m	24	28	29
Columna de carga	m	5.5	6	6
Explosivo por taladro	kg/tal	130	166	175

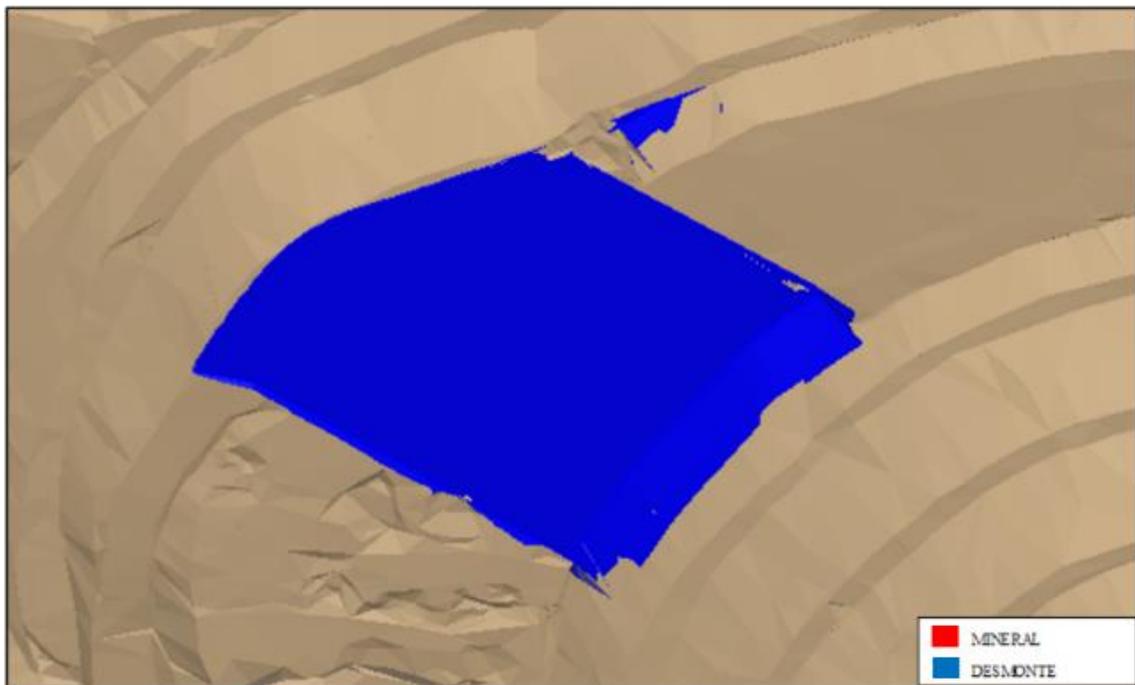
**Nota:** Parámetros de voladura proyectos pre test.

### 4.1.3 Resultados de proyectos de pre test

Para realizar el análisis de resultados fue necesario contar con los indicadores de costos de los proyectos de pre test para lo cual se consideró proyectos definidos por su grado de alteraciones y dureza.

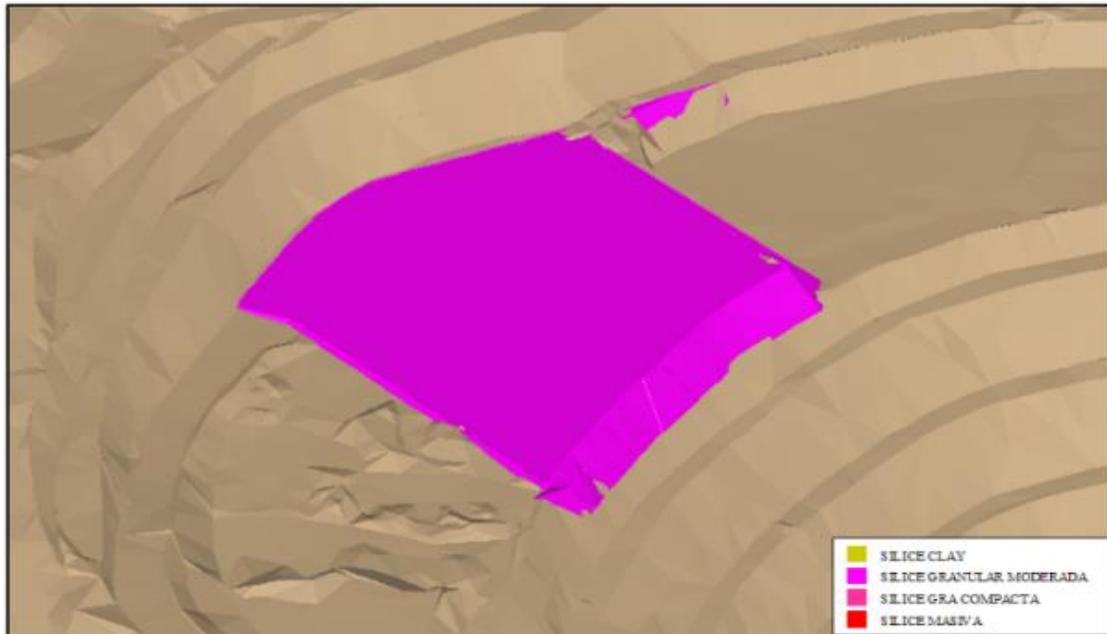
#### 4.1.3.1 Proyecto Banco 4048 py 16

El proyecto corresponde a la Fase-05, se inició con el polígono generado por el departamento de planeamiento, validados por el departamento de geología y geotecnia con los dominios de mineralización, alteraciones y dureza, los mismos que se presentan en las figuras 5, 6, 7.



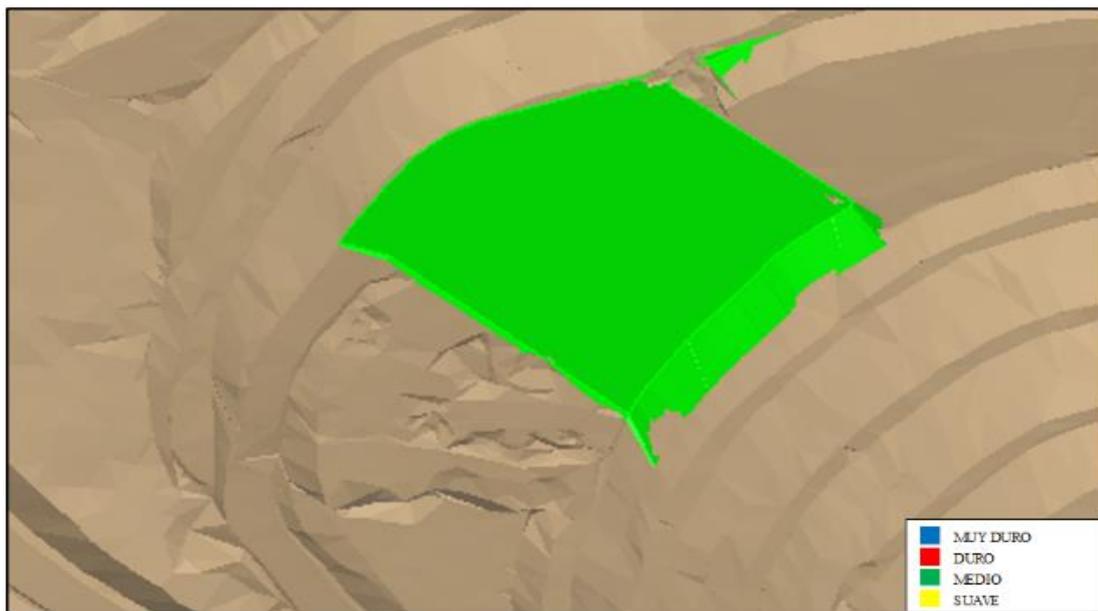
**Figura 5** Dominio de mineralización banco 4048 py 16

**Nota:** En el grafico se representa dominio de mineralización, en su totalidad proyecto de desmonte.



**Figura 6** Dominio de alteraciones banco 4048 py 16

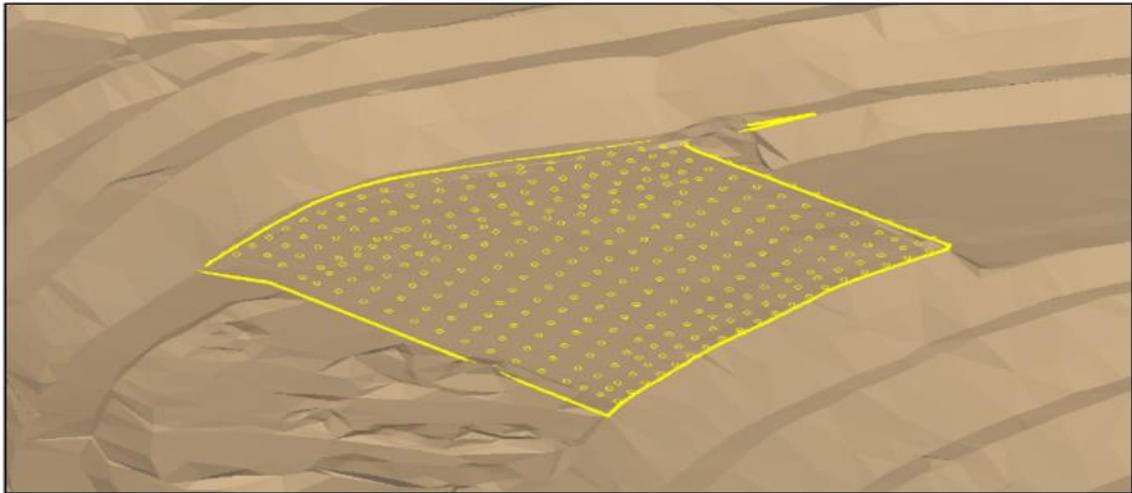
**Nota:** En el grafico se representa dominio de alteraciones, de sílice granular moderada.



**Figura 7** Dominio de dureza banco 4048 py 14.

**Nota:** En el grafico se representa dominio de dureza, en su totalidad proyecto con dureza media.

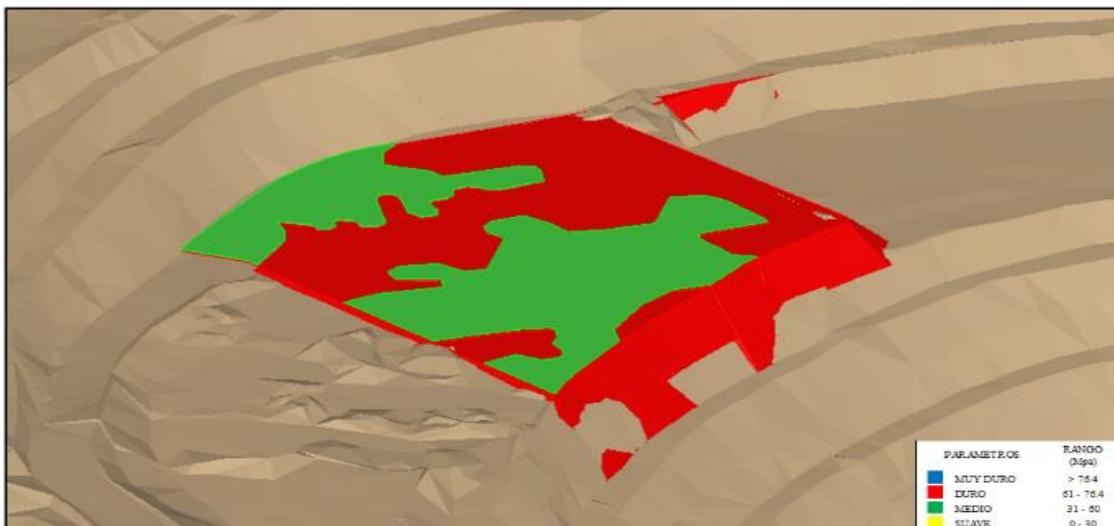
Con base a la información proporcionada de los dominios, se tiene el diseño de mallas de perforación con Burden de 5.0 m y espaciamiento de 5.80 m como se observa en la figura 8.



**Figura 8** Diseño de malla de perforación banco 4048 py 16

**Nota:** En el grafico se representa distribución de taladros.

Luego de realizar la perforación y logeo de los blast hole, se determinó la variación de la dureza del macizo rocoso con respecto a los dominios, como se observa en la figura 9, Presentando material con dureza media y duro.



**Figura 9** Plano de dureza final banco 4048 py 16

**Nota:** En el grafico se representa plano de dureza final del proyecto



## Datos generales del proyecto Banco 4048 – py 16

**Tabla 8**

*Datos generales banco 4048 Py 16*

<b>Datos generales</b>	
Banco_py	4048_16
Material	Desmonte
Tajo	Tajo Apu-01
Fecha	29/04/2021
Hora de iniciación	12:41:00
Supervisor	C.Torres

## Parámetros de perforación del proyecto banco 4048 py 16

**Tabla 9**

*Parámetros de perforación banco 4048 py 16*

<b>Parámetros de perforación</b>		
Altura de Banco	m	8.00
Diámetro de Broca	in	6 3/4
Sobre Perforación	m	0.60
Burden	m	5.00
Espaciamiento	m	5.80
M. Perforados	m	2,584
Costos de Total de Perforación	US\$	13,075

## Parámetros de voladura del proyecto banco 4048 py 16

**Tabla 10**

*Parámetros de voladura banco 4048 py 16*

Parámetros de voladura		
Tonelaje Roto	TM	108095
Volumen Roto	m <sup>3</sup>	50057
Factor de Carga	kg/m <sup>3</sup>	0.95
Factor de Potencia	kg/TM	0.44
Factor de Ruptura	kg/m	18
Índice de Perforación	t/tal	345
P80	in	6.80
Distancia de Monitoreo	m	57
Vibración vector suma	mm/s	102
Agente de Voladura	HA46 - HA4555	

## Costos de perforación y voladura del proyecto banco 4048 py 16

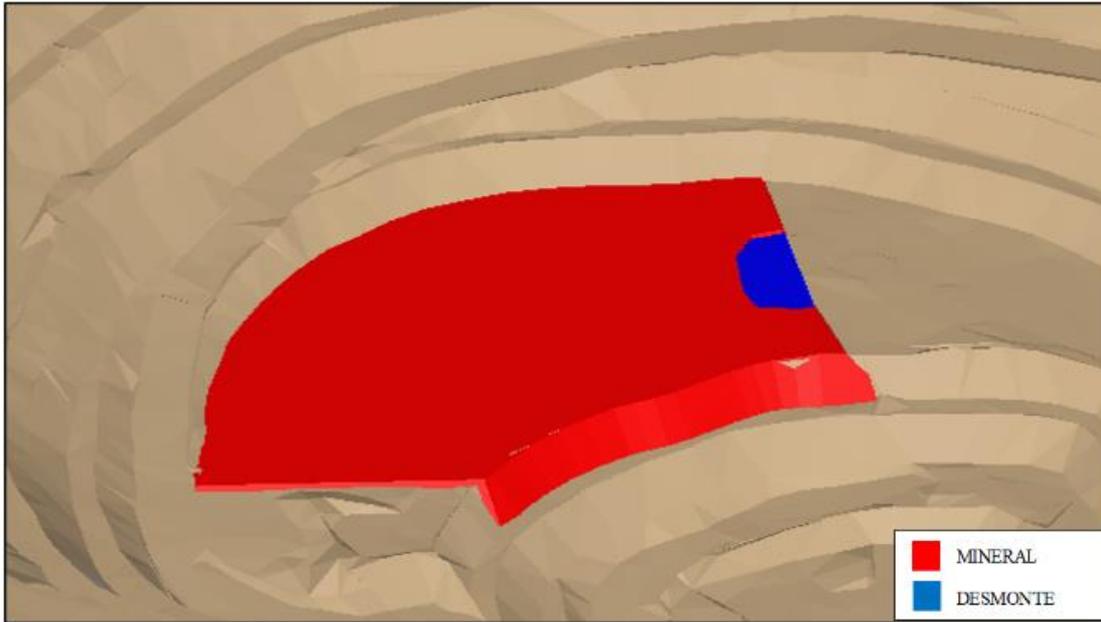
**Tabla 11**

*Costo de perforación y voladura banco 4048 py 16*

Descripción	Unidad	Cantidad
Costo de Perforación	US\$	13,272
Costo Unitario de perforación por tonelada	US\$/TM	0.12
Costo de Voladura	US\$	24789
Costo Unitario de Voladura	US\$/TM	0.23

### 4.1.3.2 Proyecto banco 3976 py 05

El proyecto correspondiente a la Fase 04, según los dominios de geología y geotecnia proyecto de mineral, con alteraciones predominante de sílice granular moderada y sílice granular compacta, por su grado de dureza se observa que es un proyecto con grado de dureza media a duro, como se representa en las siguientes figuras:



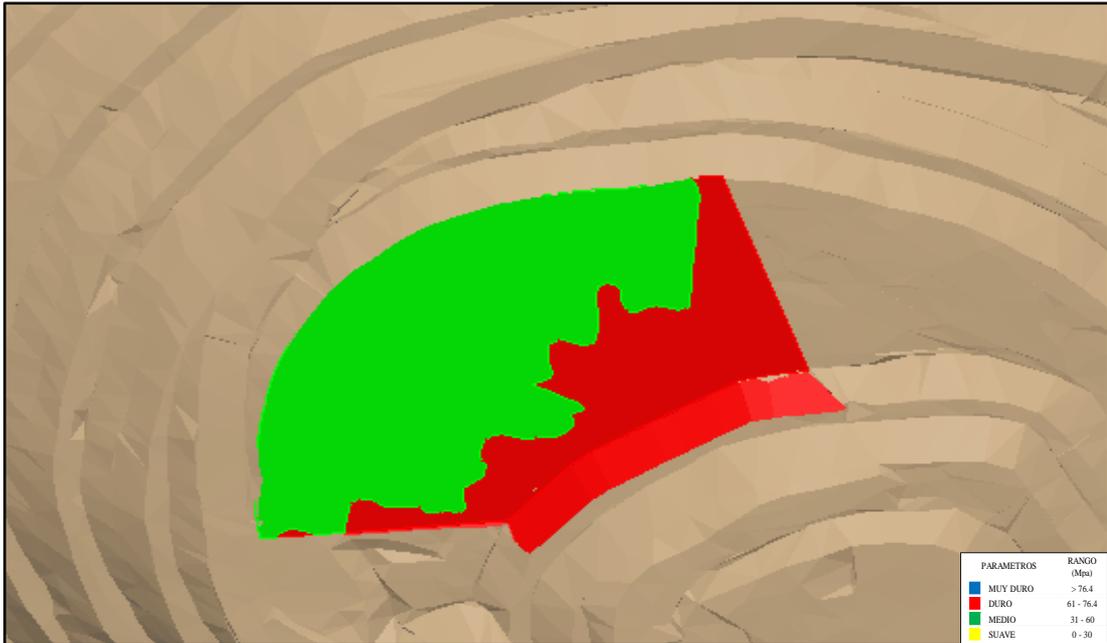
**Figura 10** *Dominios de mineralización banco 3976 py 05*

**Nota:** En el grafico se representa plano mineralización, en su mayoría con predominancia de mineral.



**Figura 11** *Dominios de alteraciones banco 3976 py 05*

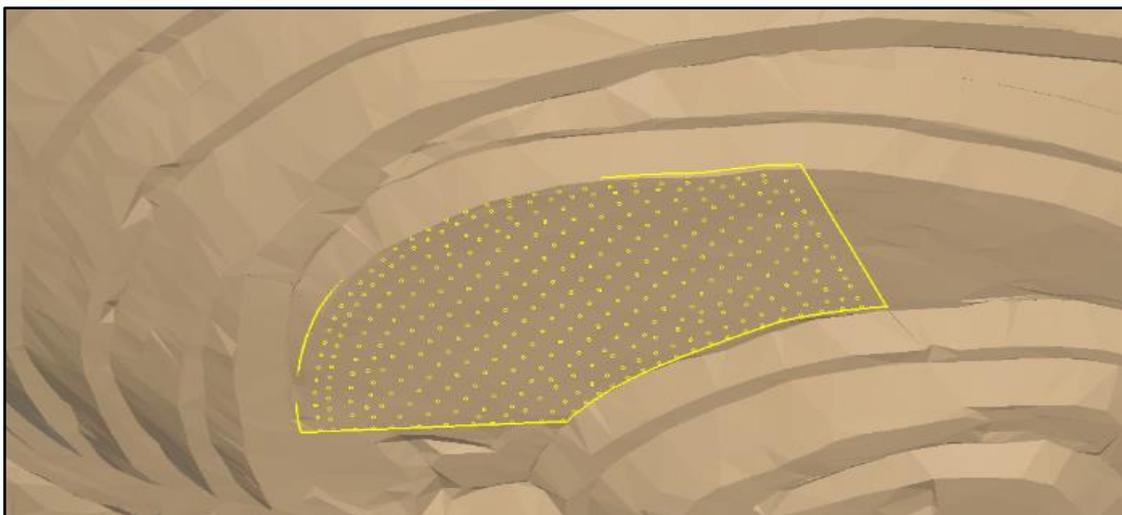
**Nota:** En el grafico se representa dominio de alteraciones, de sílice granular moderada a compacta.



**Figura 12** Dominios de dureza banco 3976 py 05

**Nota:** En el grafico se representa plano dureza, con predominancia de terreno medio a duro.

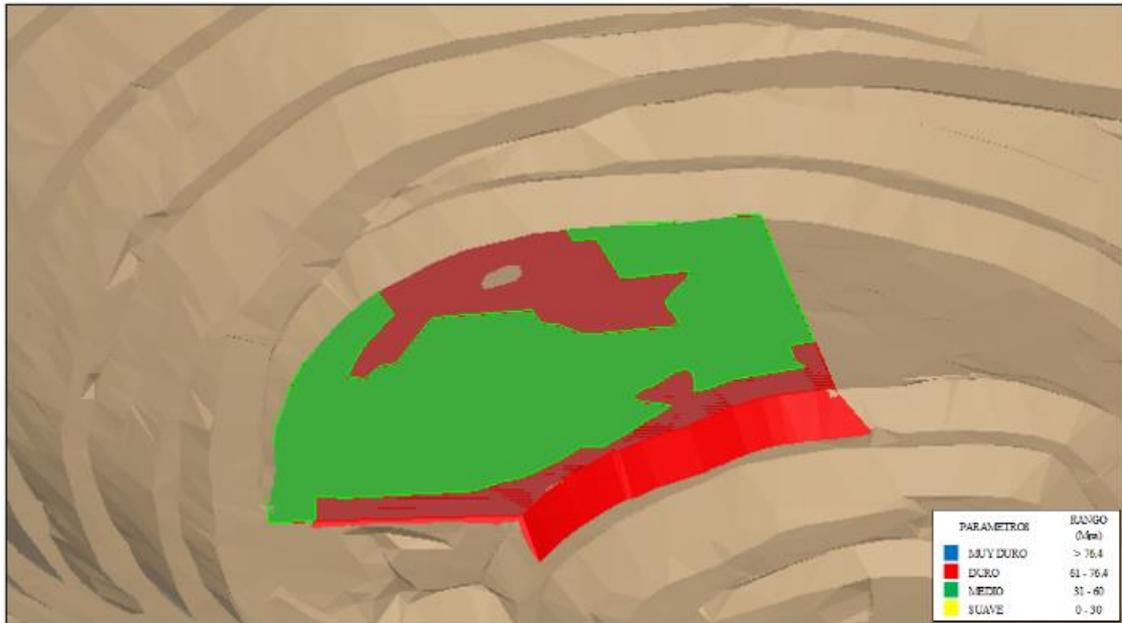
Con base a la información de los dominios, se tiene el diseño de mallas de perforación con Burden de 4.80 m y espaciamiento de 5.50 m como se observa en la figura 13.



**Figura 13** Diseño de malla de perforación banco 3976 py 05

**Nota:** En el grafico se representa la distribución de taladros.

Luego de realizar la perforación y logeo de los blast hole, se determinó la variación de dureza del macizo rocoso con respecto a los dominios, al lado norte y sur del proyecto se encontró material duro como se observa en la figura 14. Presentando material con dureza media y duro.



**Figura 14** Plano de dureza banco 3976 py 05

**Nota:** En el grafico se representa plano de dureza final.

### Parámetros de perforación y voladura del proyecto Banco 3976 py 05

**Tabla 12**

*Datos generales banco 3976 py 05*

Datos generales	
Banco_Proj	3976_5
Material	Mineral
Tajo	Tajo Apu-01
Fecha	16/05/2021
Hora de Iniciación	12:26:00
Supervisor	C.Torres



**Tabla 13**

*Parámetros de perforación banco 3976 py 05*

<b>Parámetros de perforación</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Altura de Banco	m	8.00
Diámetro de Broca	in	6 3/4
Sobre Perforación	m	0.60
Burden	m	4.80
Espaciamiento	m	5.50
M. Perforados	m	3,102
Costo total de Perforación	US\$	15,696

**Tabla 14**

*Parámetros de voladura banco 3976 py 05*

<b>Parámetros de voladura</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Tonelaje Roto	TM	126098
Volumen Roto	m <sup>3</sup>	58835
Factor de Carga	Kg/m <sup>3</sup>	1.08
Factor de Potencia	Kg/TM	0.50
Factor de Ruptura	Kg/m	20
Índice de Perforación	TM/Tal	348
P80	in	4.87
Distancia de Monitoreo	m	211
Vibración vector suma	mm/s	34
Agente de Voladura	HA37 - HA4555	

### **Costos de perforación y voladura del proyecto Banco 3976 py 05**

**Tabla 15**

*Costos de perforación y voladura banco 3976 py 05*

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Costo de Perforación	US\$	15,933
Costo Unitario de perforación	US\$/TM	0.13
Costo de Voladura	US\$	33342
Costo Unitario	US\$/TM	0.26

#### 4.1.4 Resumen de resultados de proyectos pre test

Tabla 16

Resultados costos de perforación y voladura de los proyectos de pre test

Banco-py	B (m)	S (m)	Tonelaje (TM)	M.p. (m)	CU Perf (US\$/TM)	Explosivo total (kg)	CU Vol (US\$/TM)	CU P&V (US\$/TM)
4048-16	5.00	5.80	108095	2584	0.12	47356	0.23	0.35
4048-17	5.00	5.80	100265	2488	0.13	47270	0.25	0.38
4040-18	5.00	5.80	78282	1960	0.13	34937	0.24	0.37
4040-17	4.80	5.50	98805	2593	0.13	49660	0.26	0.39
3976-05	4.80	5.50	126098	3102	0.13	63403	0.26	0.39
4032-15	4.80	5.50	65111	1708	0.13	27563	0.24	0.37
3976-06	4.80	5.50	90698	2485	0.14	38541	0.23	0.37
3984-06	4.60	5.30	112149	2983	0.14	57511	0.26	0.40
3984-07	4.60	5.30	60385	1859	0.16	23040	0.25	0.41
3976-04	4.60	5.30	48364	1589	0.17	25565	0.27	0.44
4016-13	4.60	5.30	103317	2845	0.14	46022	0.24	0.39
3960-04	4.60	5.30	111202	2979	0.14	53506	0.28	0.42
Promedio					0.14		0.25	0.39

#### 4.2 APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE CROSBY & PINCO

Para realizar los cálculos y obtener un nuevo diseño de malla de perforación y voladura, se tomó en cuenta la energía generada por diferentes mezclas explosivas usados en la Unidad minera de Apumayo S.A.C. y la energía generada por mezcla explosiva gasificada heavy anfo 73 gasificado.

##### 4.2.1 Cálculo de potencia de relativa por volumen en proyectos pre test

##### 4.2.1.1 Cálculo de potencia absoluta por volumen ABS de anfo:

$$ABS_{ANFO} = AWS_{ANFO} \times \delta_{explosivo} \quad (21)$$

**Datos:**

$$AWS_{ANFO} = 900 \text{ cal/gr}$$

$$\delta_{ANFO} = 0.82 \text{ gr/cc}$$



Reemplazando en la ecuación (21)

$$ABS_{ANFO} = AWS_{ANFO} \times \delta \text{ explosivo}$$

$$ABS_{ANFO} = 900 \times 0.82$$

$$ABS_{ANFO} = 738 \text{ cal/cc}$$

#### 4.2.1.2 Cálculo de potencia absoluta por volumen ABS de HA37:

**Datos:**

$$AWS_{HA37} = 840 \text{ cal/gr}$$

$$\delta_{HA37} = 1.02 \text{ gr/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (21)

$$ABS_{HA37} = AWS_{HA37} \times \delta \text{ explosivo}$$

$$ABS_{HA37} = 840 \times 1.02$$

$$ABS_{HA37} = 856.8 \text{ cal/cc}$$

#### 4.2.1.3 Cálculo de potencia relativa por volumen RBS de HA37:

$$RBS_{HA37} = \frac{ABS_{HA37}}{ABS_{ANFO}} \times 100 \quad (22)$$

**Datos:**

$$ABS_{HA37} = 856.8 \text{ cal/cc}$$

$$ABS_{ANFO} = 738.0 \text{ cal/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (22)

$$RBS_{HA37} = \frac{ABS_{HA37}}{ABS_{ANFO}} \times 100$$

$$RBS_{HA37} = \frac{856.8}{738.0} \times 100$$

$$RBS_{HA37} = 116.10 \%$$



#### 4.2.1.4 Cálculo de potencia absoluta por volumen ABS de HA46:

**Datos:**

$$AWS_{HA46} = 815 \text{ cal/gr}$$

$$\delta_{HA46} = 1.20 \text{ gr/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (21)

$$ABS_{HA46} = AWS_{HA46} \times \delta \text{ explosivo}$$

$$ABS_{HA46} = 815 \times 1.20$$

$$ABS_{HA46} = 978.0 \text{ cal/cc}$$

#### 4.2.1.5 Cálculo de potencia relativa por volumen RBS de HA46:

$$RBS_{HA46} = \frac{ABS_{HA46}}{ABS_{ANFO}} \times 100 \quad (23)$$

**Datos:**

$$ABS_{HA46} = 978.0 \text{ cal/cc}$$

$$ABS_{ANFO} = 738.0 \text{ cal/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (23)

$$RBS_{HA46} = \frac{ABS_{HA46}}{ABS_{ANFO}} \times 100$$

$$RBS_{HA46} = \frac{978}{738.0} \times 100$$

$$RBS_{HA46} = 132.52 \%$$

#### 4.2.1.6 Cálculo de potencia absoluta por volumen ABS de HA45/55:

**Datos:**

$$AWS_{HA45/55} = 795 \text{ cal/gr}$$

$$\delta_{HA45/55} = 1.26 \text{ gr/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (21)



$$ABS_{HA45/55} = AWS_{HA45/55} \times \delta \text{ explosivo}$$

$$ABS_{HA45/55} = 795 \times 1.26$$

$$ABS_{HA45/55} = 1001.7 \text{ cal/cc}$$

#### 4.2.1.7 Cálculo de potencia relativa por volumen RBS de HA45/55:

$$RBS_{HA45/55} = \frac{ABS_{HA45/55}}{ABS_{ANFO}} \times 100 \quad (24)$$

##### Datos:

$$ABS_{HA45/55} = 1001.7 \text{ cal/cc}$$

$$ABS_{ANFO} = 738.0 \text{ cal/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (24)

$$RBS_{HA45/55} = \frac{ABS_{HA45/55}}{ABS_{ANFO}} \times 100$$

$$RBS_{HA45/55} = \frac{1001.7}{738.0} \times 100$$

$$RBS_{HA45/55} = 135.73 \%$$

#### 4.2.1.8 Cálculo de potencia absoluta por volumen ABS de HA73G:

##### Datos:

$$AWS_{HA73G} = 843 \text{ cal/gr}$$

$$\delta_{HA73G} = 1.315 \text{ gr/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (21)

$$ABS_{HA73G} = AWS_{HA73G} \times \delta \text{ explosivo}$$

$$ABS_{HA73G} = 843 \times 1.315$$

$$ABS_{HA73G} = 1108.55 \text{ cal/cc}$$

#### 4.2.1.9 Cálculo de potencia relativa por volumen RBS de HA73G:

$$RBS_{HA73G} = \frac{ABS_{HA73G}}{ABS_{ANFO}} \times 100 \quad (25)$$

**Datos:**

$$ABS_{HA73G} = 1108.55 \text{ cal/cc}$$

$$ABS_{ANFO} = 738.0 \text{ cal/cc}$$

Reemplazando en la ecuación (25)

$$RBS_{HA73G} = \frac{ABS_{HA73G}}{ABS_{ANFO}} \times 100$$

$$RBS_{HA73G} = \frac{1108.55}{738.0} \times 100$$

$$RBS_{HA73G} = 150.21 \%$$

En la tabla 17 se presenta resumen de las diferentes características energéticas de mezclas explosivas empleadas en los proyectos de pre test y proyectos de post test en la unidad minera Apumayo S.A.C.

**Tabla 17**

*Resumen de características energías de mezclas explosivas*

Características	Und.	HA37	HA46	HA45/55	HA73G
Densidad	gr/cc	1.02	1.20	1.26	1.315
Potencia absoluta por peso AWS	cal/gr	840	815	795	843
Potencia absoluta por volumen ABS	cal/cc	856.8	978.0	1001.7	1108.5
Potencia relativa por peso RWS	%	93.33	90.56	88.33	93.67
Potencia relativa por volumen RBS	%	116.10	132.52	135.73	150.21

**Nota:** características de energías de diferentes mezclas explosivas (Famesa Explosivos S.A.C.).

#### 4.2.2 Cálculo de nuevas dimensiones de burden y espaciamiento.

Para el cálculo de las nuevas dimensiones de burden y espaciamiento, se emplea el modelo matemático de Crosby & Pinco, basado en la potencia relativa por volumen

RBS, reemplazando las mezclas explosivas tradicionales por una mezcla explosiva gasificada como es el HA73G, para lo cual se mantendrá el diseño de voladura en la que permanece invariable el volumen final del explosivo.

#### 4.2.2.1 Cálculo de burden y espaciamiento para macizo rocoso con alteraciones de SGM (macizo rocoso con dureza media)

La mezcla explosiva tradicional usada para voladura en material con alteraciones de SGM es HA37 cuya relación de Emulsión/Anfo es 30/70 con RBS de 116.10 %, y para realizar los cálculos para implementar los nuevos parámetros de perforación se reemplazó por la mezcla explosiva gasificada HA73G con RBS de 150.21%.

Cálculo de burden (B) para los nuevos parámetros de perforación.

##### Datos:

$$RBS_{HA37} = 116.10 \%$$

$$RBS_{HA73G} = 150.21 \%$$

$$B_{HA37} = 5.00 \text{ m}$$

##### Cálculo de Burden para los nuevos parámetros de perforación.

$$\left[ \frac{RBS_{HA73G}}{RBS_{HA37}} \right]^{1/3} \times B_{HA37} = B_{HA73G} \quad (26)$$

Reemplazando valores:

$$\left[ \frac{150.21}{116.10} \right]^{1/3} \times 5.00 = 5.45 \cong 5.40 \text{ m}$$

El Burden a usar con la mezcla explosiva gasificada HA73G es 5.40 m.

##### Cálculo de Espaciamiento (S) para los nuevos parámetros de perforación.

##### Datos:

$$RBS_{HA37} = 116.10 \%$$

$$RBS_{HA73G} = 150.21 \%$$



$$S_{HA37} = 5.80 \text{ m}$$

$$\left[ \frac{RBS_{HA73G}}{RBS_{HA37}} \right]^{1/3} \times S_{HA37} = S_{HA73G} \quad (27)$$

Reemplazando valores:

$$\left[ \frac{150.21}{116.10} \right]^{1/3} \times 5.80 = 6.32 \cong 6.20 \text{ m}$$

El Espaciamiento (S) a usar con la mezcla explosiva gasificada de HA73G para macizo rocoso SGM con dureza media es 6.20 m. considerando diseño de malla triangular.

#### 4.2.2.2 Cálculo de burden y espaciamento para macizo rocoso con alteraciones de SGC

La mezcla explosiva tradicional usada para voladura en material con alteraciones de SGC es HA46 cuya relación de Emulsión/Anfo es 40/60 con RBS de 132.52 %, y para realizar los cálculos para implementar los nuevos parámetros de perforación se reemplazó por la mezcla explosiva gasificada HA73G con RBS de 150.21%.

#### Cálculo de burden (B) para los nuevos parámetros de perforación

**Datos:**

$$RBS_{HA46} = 132.52 \%$$

$$RBS_{HA73G} = 150.21 \%$$

$$B_{HA46} = 4.80 \text{ m}$$

$$\left[ \frac{RBS_{HA73G}}{RBS_{HA46}} \right]^{1/3} \times B_{HA46} = B_{HA73G} \quad (28)$$

Reemplazando valores:

$$\left[ \frac{150.21}{132.52} \right]^{1/3} \times 4.80 = 5.00 \cong 5.00 \text{ m}$$



La nueva dimensión de Burden a usar con la mezcla explosiva gasificada de HA73G para macizo rocoso con SGC es 5.40 m.

### **Cálculo de espaciamiento (S) para los nuevos parámetros de perforación**

**Datos:**

$$RBS_{HA46} = 132.52 \%$$

$$RBS_{HA73G} = 150.21 \%$$

$$S_{HA46} = 5.50 \text{ m}$$

$$\left[ \frac{RBS_{HA73G}}{RBS_{HA46}} \right]^{1/3} \times S_{HA46} = S_{HA73G} \quad (29)$$

Reemplazando valores en la ecuación 29:

$$\left[ \frac{150.21}{132.52} \right]^{1/3} \times 5.50 = 5.73 \cong 5.80 \text{ m}$$

La nueva dimensión de espaciamiento (S) a usar con la mezcla explosiva gasificada de HA73G para macizo rocoso SGC material duro es 5.80 m. considerando diseño de malla triangular.

#### **4.2.2.3 Cálculo de burden y espaciamiento para macizo rocoso con SM (terreno muy duro)**

La mezcla explosiva tradicional usada para voladura en material con alteraciones de SM es HA45/55 cuya relación de emulsión/anfo es 45/55 con RBS de 135.73 %, y para realizar los cálculos para implementar los nuevos parámetros de perforación se reemplazó por la mezcla explosiva gasificada HA73G con RBS de 150.21%.

### **Cálculo de burden (B) para los nuevos parámetros de perforación**

**Datos:**

$$RBS_{HA45/55} = 135.73 \%$$



$$RBS_{HA73G} = 150.21 \%$$

$$B_{HA45/55} = 4.60 \text{ m}$$

$$\left[ \frac{RBS_{HA73G}}{RBS_{HA45/55}} \right]^{1/3} \times B_{HA45/55} = B_{HA73G} \quad (30)$$

Reemplazando valores:

$$\left[ \frac{150.21}{135.73} \right]^{1/3} \times 4.60 = 4.76 \cong 4.70 \text{ m}$$

La nueva dimensión de burden a usar con la mezcla explosiva gasificada de HA73G para macizo rocoso con SGC es 4.70 m.

### **Cálculo de espaciamiento (S) para los nuevos parámetros de perforación.**

**Datos:**

$$RBS_{HA45/55} = 135.73 \%$$

$$RBS_{HA73G} = 150.21 \%$$

$$S_{HA45/55} = 5.30 \text{ m}$$

$$\left[ \frac{RBS_{HA73G}}{RBS_{HA45/55}} \right]^{1/3} \times S_{HA45/55} = S_{HA73G} \quad (31)$$

Reemplazando valores en la ecuación 31:

$$\left[ \frac{150.21}{135.73} \right]^{1/3} \times 5.30 = 5.48 \cong 5.40 \text{ m}$$

La nueva dimensión de espaciamiento (S) a usar con la mezcla explosiva gasificada de HA73G para macizo rocoso SM material duro es 5.40 m. considerando diseño de malla triangular.

### 4.2.3 Cuadro resumen de nuevos parámetros de perforación

En la tabla 18 se muestra las nuevas dimensiones de burden y espaciamiento, obtenidos de los cálculos realizados con el modelo matemático de Crosby & Pinco, para cada tipo de alteración predominante.

**Tabla 18**

*Resumen parámetros de burden y espaciamiento de perforación*

Parámetros	Unidad	SGM	SGC	SM
Burden (B)	m	5.40	5.00	4.70
Espaciamiento (S)	m	6.20	5.80	5.40

## 4.3 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA POST TEST

### 4.3.1 Parámetros de perforación

Para el nuevo diseño de la malla de perforación al igual que en los proyectos de perforación de pre test se considera una malla triangular o trabada, siendo de diferentes dimensiones según la caracterización geológica del macizo rocoso del área de proyecto de perforación.

**Tabla 19**

*Parámetros del nuevo diseño de perforación*

Parámetros	Unidad	SGM	SGC	SM
Burden	m	5.40	5.00	4.70
Espaciamiento	m	6.20	5.80	5.40
Diámetro de taladros	in	6 ¾	6 ¾	6 ¾
Longitud taladro	m	9.0	9.0	9.0
Sobre perforación	m	1.0	1.0	1.0
Altura de Banco	m	8.0	8.0	8.0
Densidad de Mineral	Tm/m <sup>3</sup>	2.10	2.20	2.35

### 4.3.2 Parámetros de voladura

El proceso de carguío de la mezcla explosiva gasificada HA73G se realizó con camión fábrica de Famesa, que está diseñado con tecnologías que garantizan realizar el carguío de San-G, proceso que se basa en la generación de puntos calientes por reacción química produciéndose la sensibilización de la matriz después de ser bombeado por el camión fabrica, la figura 15 muestra el nuevo diseño de carga para taladros de SGM, SGC y SM.

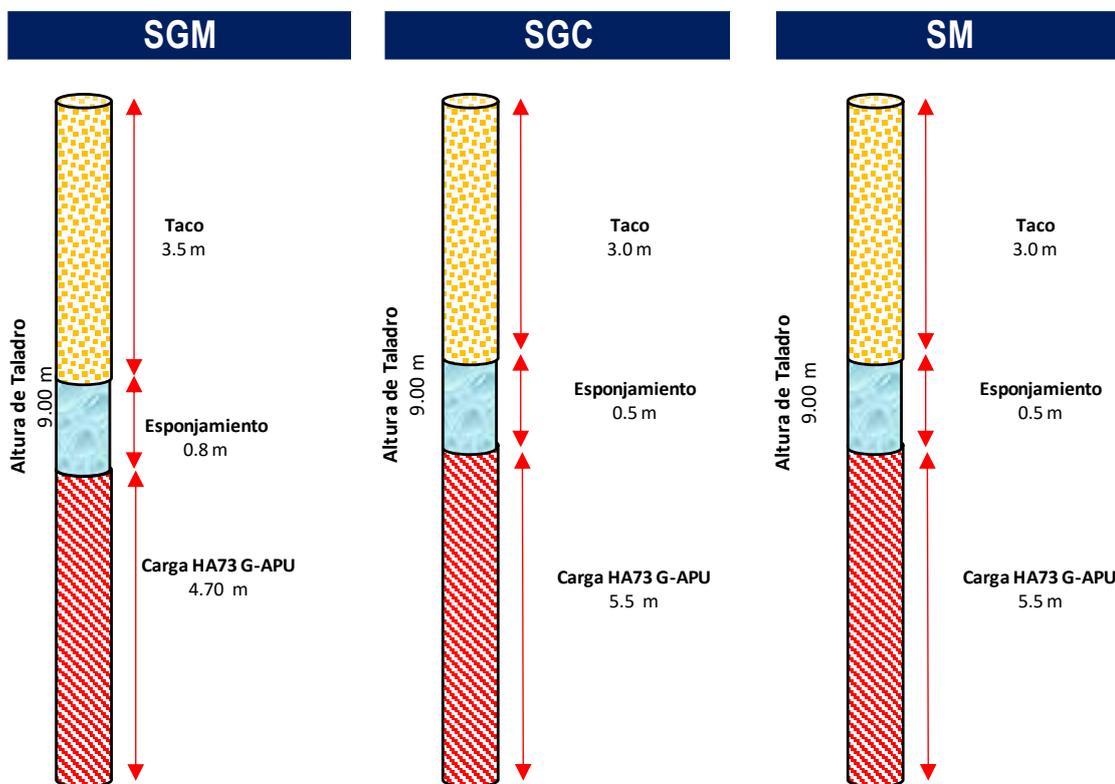


Figura 15 Diseño de carga de proyectos post test

**Nota:** Diseño de carga de proyectos post test considerando el esponjamiento de la mezcla explosiva.

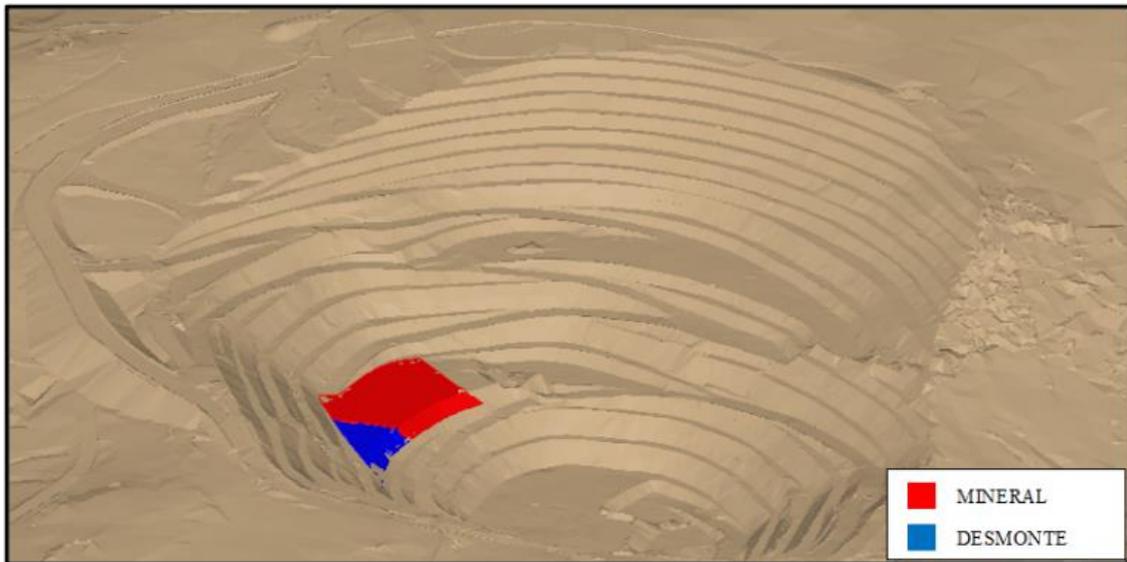
### 4.3.3 Resultados de proyectos de aplicación

Los proyectos post test de aplicación con el nuevo diseño de perforación aplicando el modelo matemático de Crosby & Pinco, en la que se muestra un incremento en las

dimensiones de burden y espaciamiento, por consiguiente, una mejor opción para la reducción de costos de perforación y voladura, se muestran a continuación.

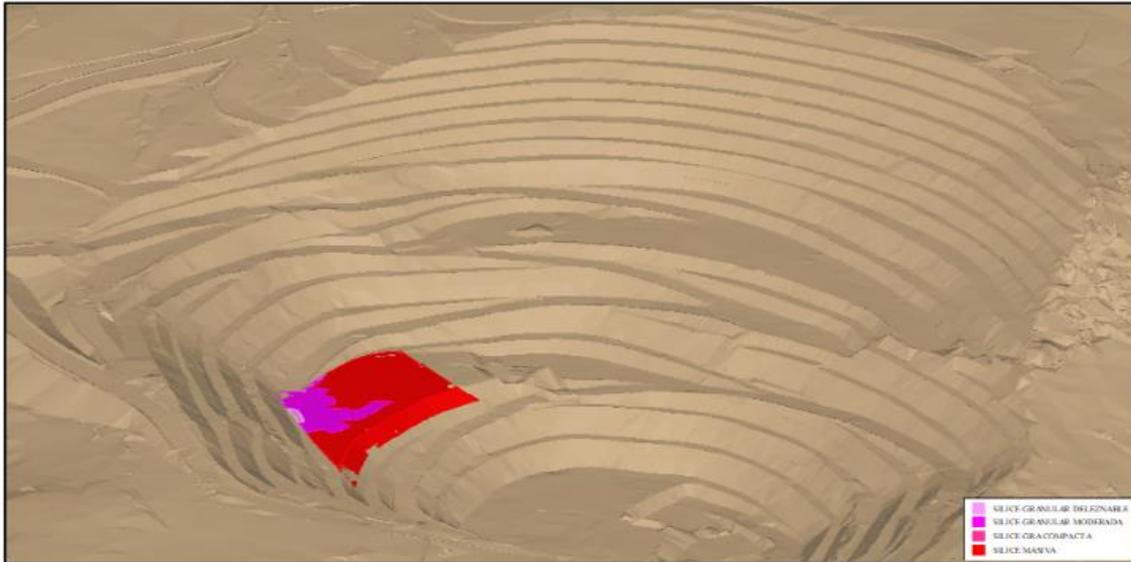
#### 4.3.3.1 Proyecto Banco 4000 py 12

El proyecto del Banco 4000 py 12, corresponde a la Fase-05, en la que la alteración predominante fue SM, terreno muy duro, y en su mayor parte con presencia de mineral.



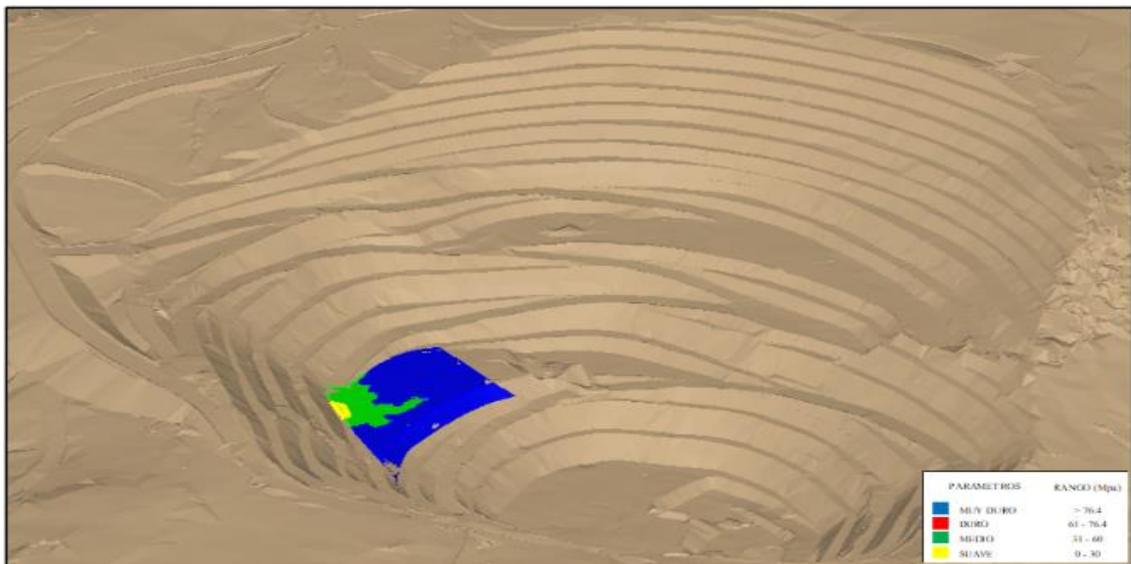
**Figura 16** Dominios de mineralización banco 4000 py 12

**Nota:** En el grafico se representa la mineralización, con predominancia de mineral.



**Figura 17** Dominios de alteraciones banco 4000 py 12

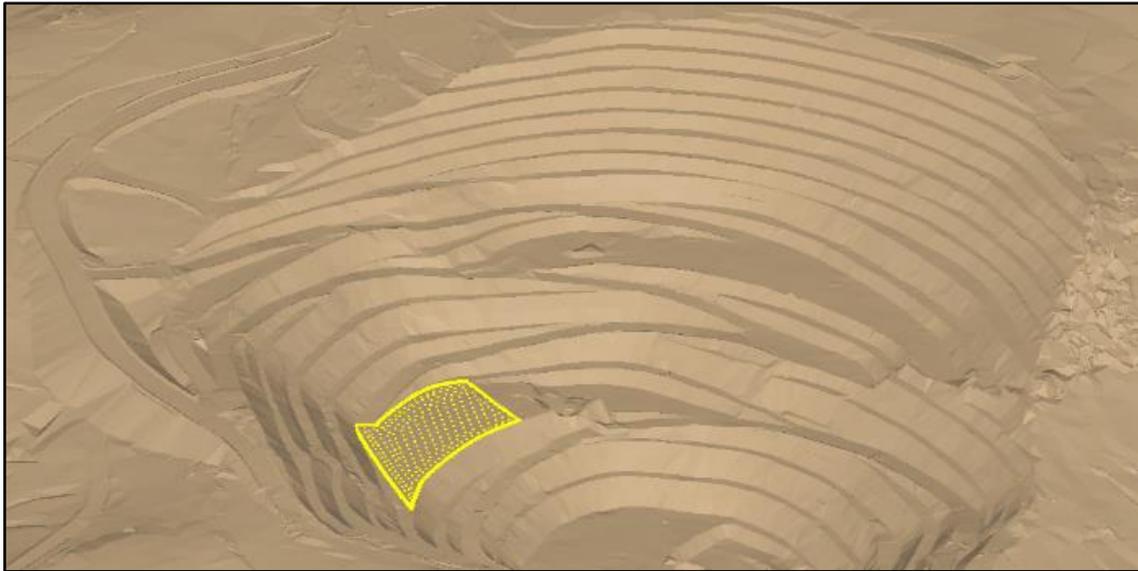
**Nota:** En el grafico se representa la alteración del proyecto, con predominancia de sílice masiva.



**Figura 18** Dominios de dureza de roca banco 4000 py 12

**Nota:** En el grafico se representa la dureza del proyecto, con predominancia de terreno muy duro.

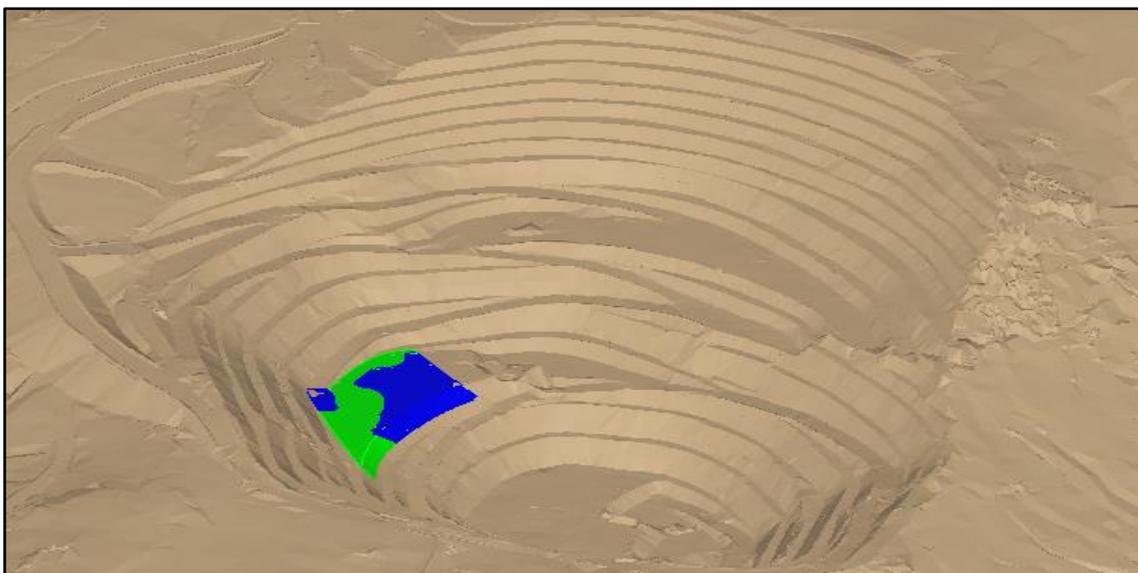
Con base a la información proporcionada de los dominios, se realizó el diseño de mallas de perforación con burden de 4.70 m y espaciamiento de 5.40 m como se observa en la figura 19.



**Figura 19** Representación del diseño de malla de perforación banco 4000 py 12

**Nota:** En el grafico se representa la distribución de taladros.

Luego de realizar la perforación y logeo de los blast hole, se determinó la variación de la dureza del macizo rocoso con respecto a los dominios, como se observa en la figura 20. Presentando material con dureza media y duro.



**Figura 20** Representación de dureza banco 4000 py 12

**Nota:** En el grafico se representa la dureza final del proyecto

#### 4.3.3.1.1 Datos generales del proyecto banco 4000 py 12

**Tabla 20***Datos generales banco 4000 py 12*

Datos generales	
Banco_Proj	4000_12
Material	Desmonte/mineral
Tajo	Apumayo 01
Fecha	15/06/2021
Hora de Iniciación	17:15:00
Supervisor	W. Cahuapaza

**4.3.3.1.2 Parámetros de perforación del proyecto banco 4000 py 12****Tabla 21***Parámetros de perforación banco 4000 py 12*

Parámetros de perforación	Unidad	Cantidad
Altura de Banco	m	8.00
Diámetro de Broca	in	6 3/4
Sobre Perforación	m	0.60
Burden	m	4.70
Espaciamiento	m	5.40
M. Perforados	m	1,982
Costos de Perforación	US\$	10,029

**4.3.3.1.3 Parámetros de voladura del proyecto banco 4000 py 12****Tabla 22***Parámetros de voladura banco 4000 py 12*

Parámetros de voladura	Unidad	Cantidad
Tonelaje Roto	TM	87203
Volumen Roto	m <sup>3</sup>	39751
Factor de Carga	Kg/m <sup>3</sup>	0.96
Factor de Potencia	Kg/TM	0.44
Índice de Perforación	TM/Tal	306
P80	in	2.33
Distancia de Monitoreo	m	228.2
Vibración vector suma	mm/s	22.5

**4.3.3.1.4 Costos de perforación y voladura del proyecto 4000 py 12**

**Tabla 23***Costos de perforación y voladura banco 4000 py 12*

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Costo de perforación	US\$	10,029
Costo Unitario	US\$/TM	0.12
Costo de Voladura	US\$	20352
Costo Unitario	US\$/TM	0.23

**4.3.4 Resumen de Resultados de Proyectos Post Test****Tabla 24***Resultados de costos de perforación y voladura de proyectos post test*

<b>Banco- py</b>	<b>B (m)</b>	<b>S (m)</b>	<b>Tonelaje (TM)</b>	<b>M.P. (m)</b>	<b>CU Perf (US\$/TM)</b>	<b>Explosivo total (kg)</b>	<b>CU Vol (US\$/TM)</b>	<b>CU P&amp;v (US\$/TM)</b>
4016-14	5.40	6.20	94597	2253	0.12	33293	0.20	0.32
4048-18	5.40	6.20	106843	2302	0.11	38678	0.20	0.31
4040-20	5.40	6.20	53074	1067	0.10	21755	0.21	0.31
3960-02	5.00	5.80	51263	1294	0.13	18331	0.21	0.34
4008-13	5.00	5.80	92981	2204	0.12	35929	0.21	0.34
3952-01	5.00	5.80	103254	2248	0.11	40378	0.21	0.32
4040-19	5.00	5.80	42452	1026	0.12	16701	0.21	0.34
4008-14	4.70	5.40	84549	2221	0.13	32054	0.20	0.34
4048-19	4.70	5.40	55317	1516	0.14	22272	0.22	0.36
4000-12	4.70	5.40	87203	1982	0.12	37999	0.22	0.34
4040-21	4.70	5.40	53262	1304	0.13	22642	0.23	0.36
3952-02	4.70	5.40	95699	2337	0.13	39548	0.23	0.35
Promedio					0.12		0.21	0.33

**4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PROYECTOS POST TEST**

El análisis de resultados luego de la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco, se fundamenta en evaluar los costos unitarios de perforación y voladura de los proyectos de pre test haciendo comparación con los costos unitarios de perforación y voladura de proyectos post test, luego de redimensionamiento de parámetros controlables de perforación como son el burden y espaciamento.

#### 4.4.1 Análisis de resultados de costos para SGM

##### 4.4.1.1 Análisis de resultados de costos de perforación para SGM

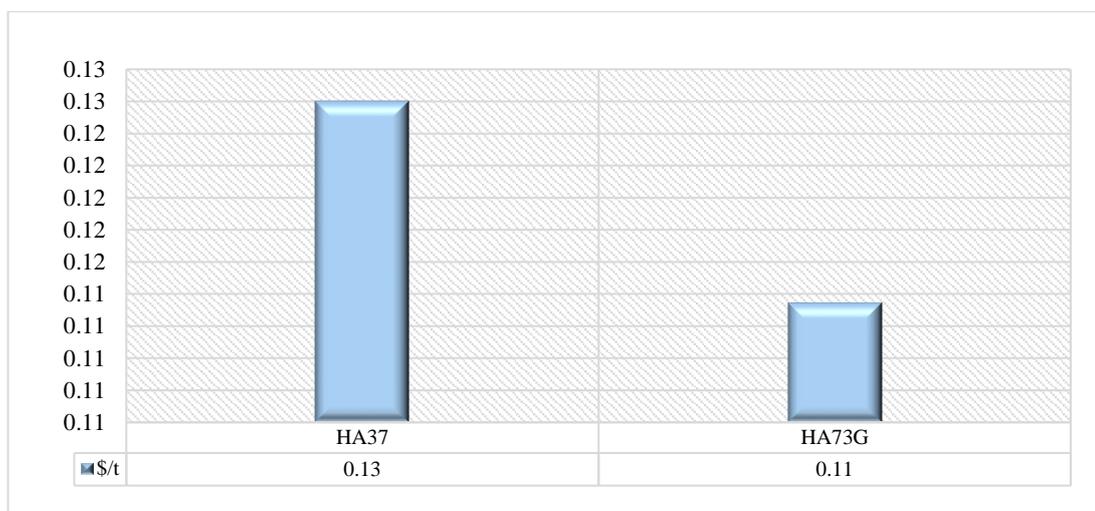
Según la caracterización geomecánica y geológica de los proyectos de perforación para el macizo rocoso SGM, se realizaron los diseños con las nuevas dimensiones de Burden y espaciamiento, el diseño de los parámetros de perforación se presenta en la tabla 25.

**Tabla 25**

*Parámetros de burden y espaciamiento para HA37 y HA73G*

Parámetros	Unidad	HA37	HA73G
Burden (B)	m	5.00	5.40
Espaciamiento (S)	m	5.80	6.20

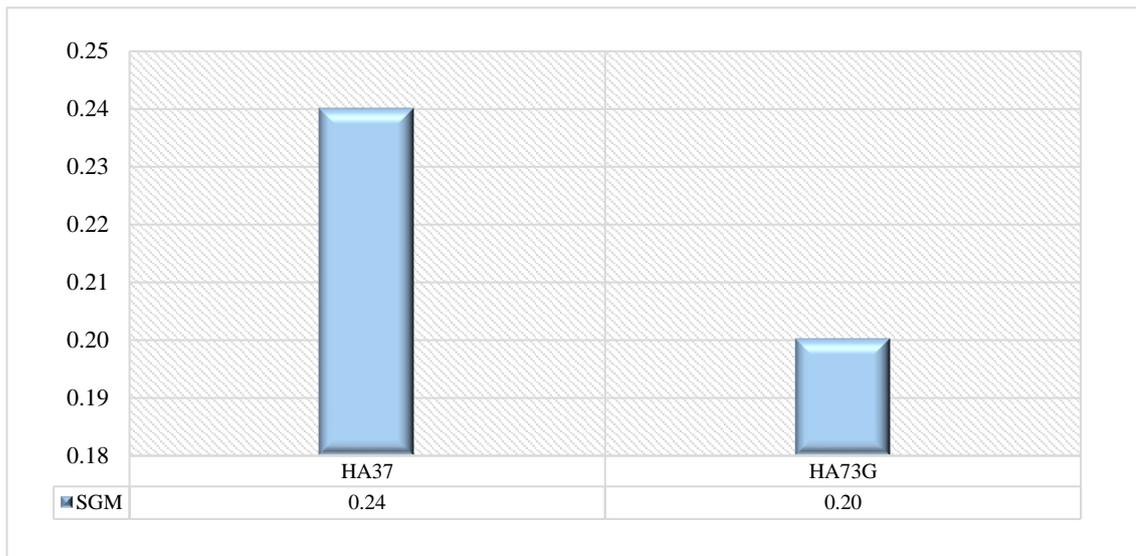
Realizado el análisis de resultados de costos unitarios de perforación para el macizo rocoso con alteración predominante de SGM, muestra que para proyectos de pre test, el costo unitario con diseños de perforación para mezcla explosiva HA37 considerando este tipo de material es de 0.13 US\$/TM, Para proyectos post test, con diseños de parámetros de perforación para aplicación de mezcla explosiva gasificada HA73G, el costo unitario es de 0.11 US\$/TM, como se muestra en la figura 21.



**Figura 21** Costos unitarios de perforación para HA37 vs HA73G

#### 4.4.1.2 Análisis de resultados de costos de voladura para SGM

Los resultados de costos unitarios de voladura para el material SGM, obtenidos para proyectos de pre test, cargados con mezcla explosiva HA37 el costo unitario de voladura es de 0.24 US\$/TM, y para proyectos post test, cargados con mezcla explosiva gasificada HA73G el costo unitario es de 0.20 US\$/TM



**Figura 22** Costos unitarios de voladura para HA37 y HA73G

#### 4.4.2 Análisis de resultados para SGC

##### 4.4.2.1 Análisis de resultados de costos de perforación para SGC

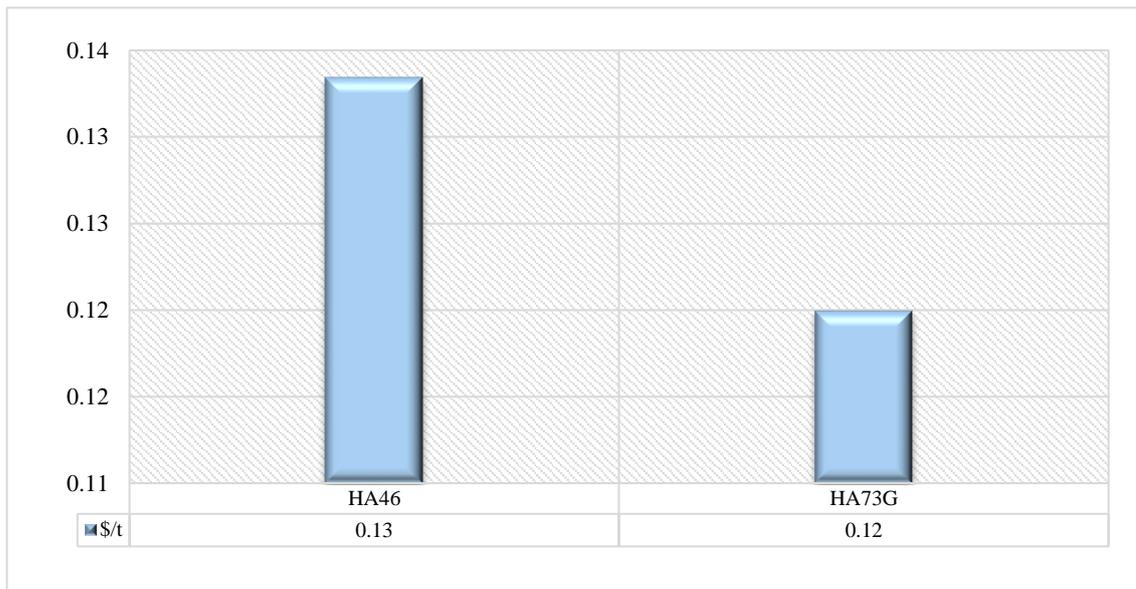
Para este de material las pruebas para los proyectos de pre test, como para proyectos post test de aplicación de mezcla explosiva gasificada HA73G, el diseño de parámetros de burden y espaciamento se realizaron según caracterización geomecánica y geológica, los cuales se presentan en la tabla 26.

**Tabla 26**

*Parámetros de burden y espaciamento para HA46 y HA73G*

Parámetros	Unidad	HA46	HA73G
Burden (B)	m	4.80	5.00
Espaciamento (S)	m	5.50	5.80

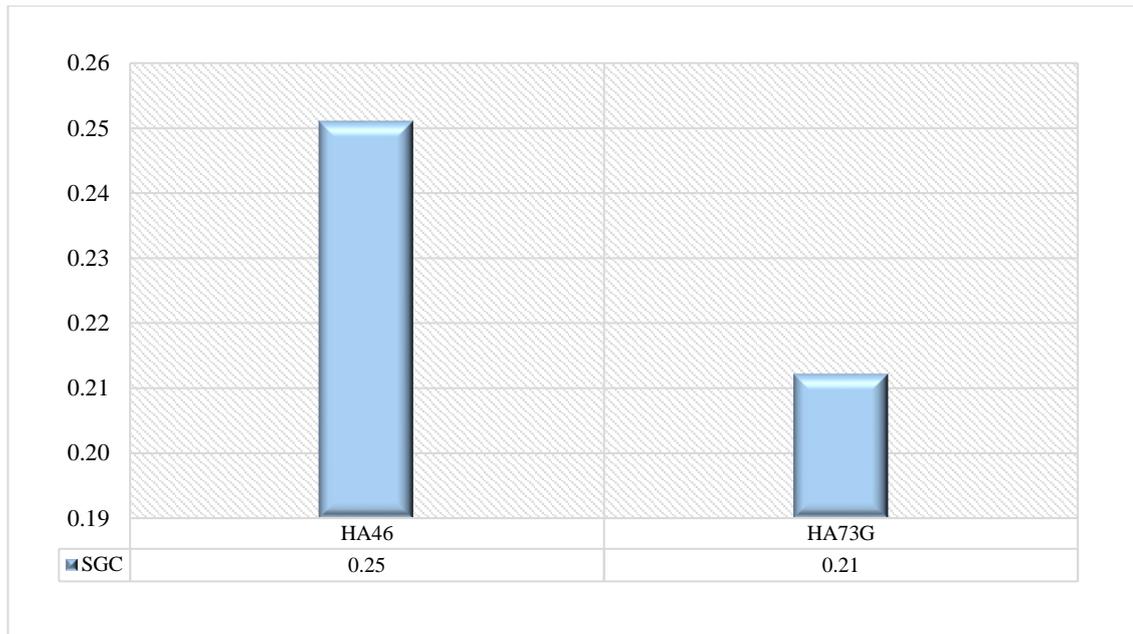
Los resultados de costos unitarios de perforación para macizo rocoso con alteraciones de SGC se presentan en la figura 23, obtenidos para mezcla explosiva tradicional HA46, es costo unitario de perforación para este tipo de material es de 0.13 US\$/TM, y para proyectos post test, con diseños de parámetros de perforación para aplicación de mezcla explosiva gasificada HA73G, el costo unitario es de 0.12 US\$/TM



**Figura 23** Costos unitarios de perforación HA46 vs HA73G

#### 4.4.2.2 Análisis de resultados de costos de voladura para SGC

Los resultados de costos unitarios de voladura para macizo rocoso con alteraciones de SGC, obtenidos para proyectos de pre test, con carguío de taladros de mezcla explosiva HA46 el costo unitario de voladura es de 0.25 US\$/TM, y para proyectos post test realizado con mezcla explosiva gasificada HA73G, el costo unitario es de 0.21 US\$/TM, como se presentan en la figura 24.



**Figura 24** Costos unitarios de voladura para HA46 y HA73G

#### 4.4.3 Análisis de resultados para SM

##### 4.4.3.1 Análisis de resultados de costos de perforación para SM

Para este tipo de macizo rocoso las dimensiones de burden y espaciamiento de los proyectos de pre test y proyectos post test realizados con mezcla explosiva gasificada HA73G, los parámetros de perforación se realizaron según caracterización geomecánica y geológica, como se presenta en la tabla 27.

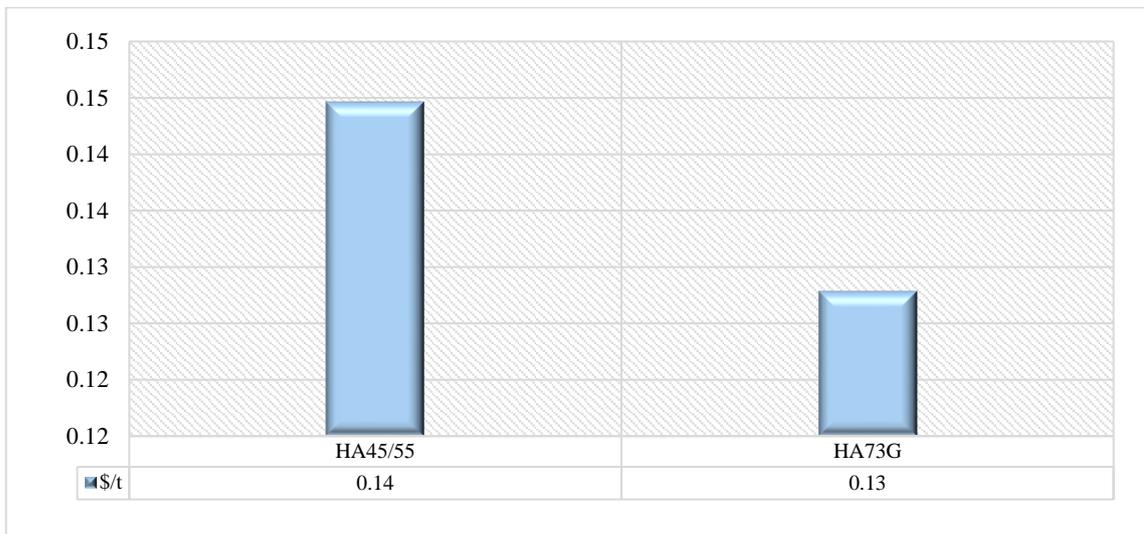
**Tabla 27**

*Parámetros de burden y espaciamiento para HA45/55 y HA73G*

Parámetros	Unidad	HA45/55	HA73G
Burden (B)	m	4.60	4.70
Espaciamiento (S)	m	5.30	5.40

Los resultados de costos unitarios de perforación para el macizo rocoso con alteración de SM, obtenidos en proyectos pre test realizados con mezcla explosiva HA45/55 para este tipo de material fue de 0.14 US\$/TM, y para proyectos post test, con

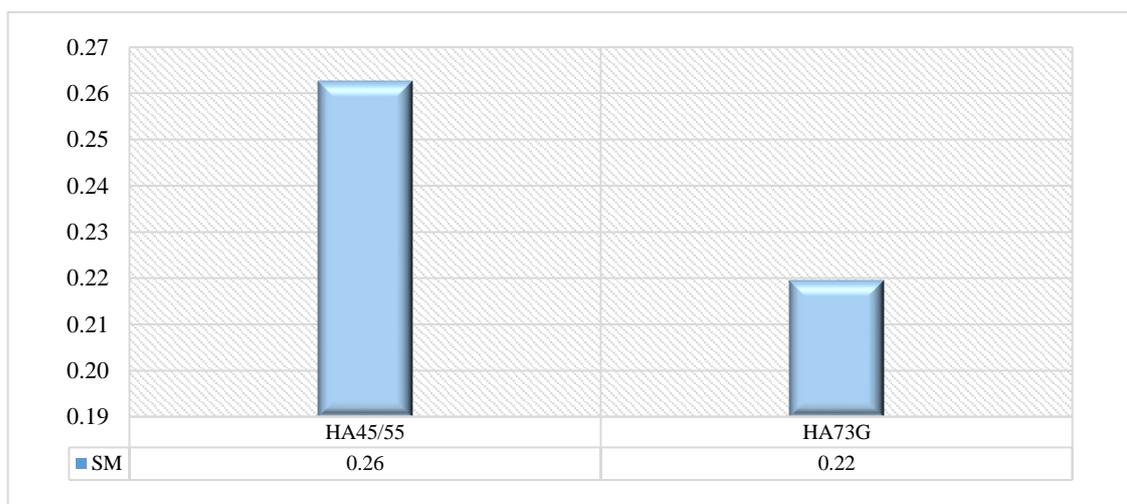
diseños de parámetros de perforación para aplicación de mezcla explosiva gasificada HA73G, el costo unitario es de 0.13 US\$/TM, como se presenta en la figura 25.



**Figura 25** Costos unitarios de perforación HA45/55 vs HA73G

#### 4.4.3.2 Análisis de resultados de costos de voladura para SM

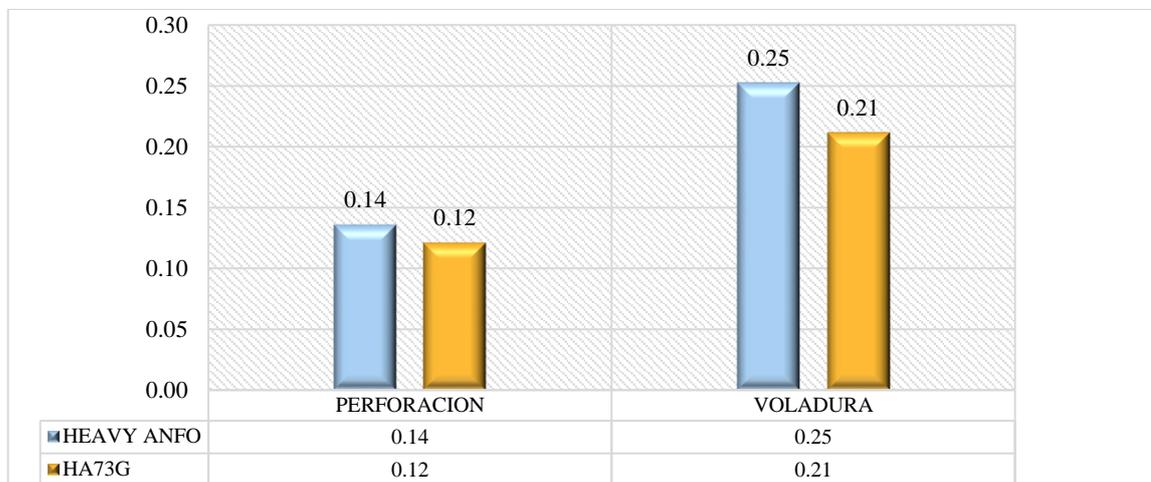
Los resultados de costos unitarios de voladura para macizo rocoso con alteraciones de SM, obtenidos para proyectos de pre test, con carguío de taladros de mezcla explosiva HA45/55 el costo unitario de voladura es de 0.26 US\$/TM, y para proyectos post test, con carguío de taladros con mezcla explosiva gasificada HA73G, el costo unitario es de 0.22 US\$/TM, como se presenta en la figura 26.



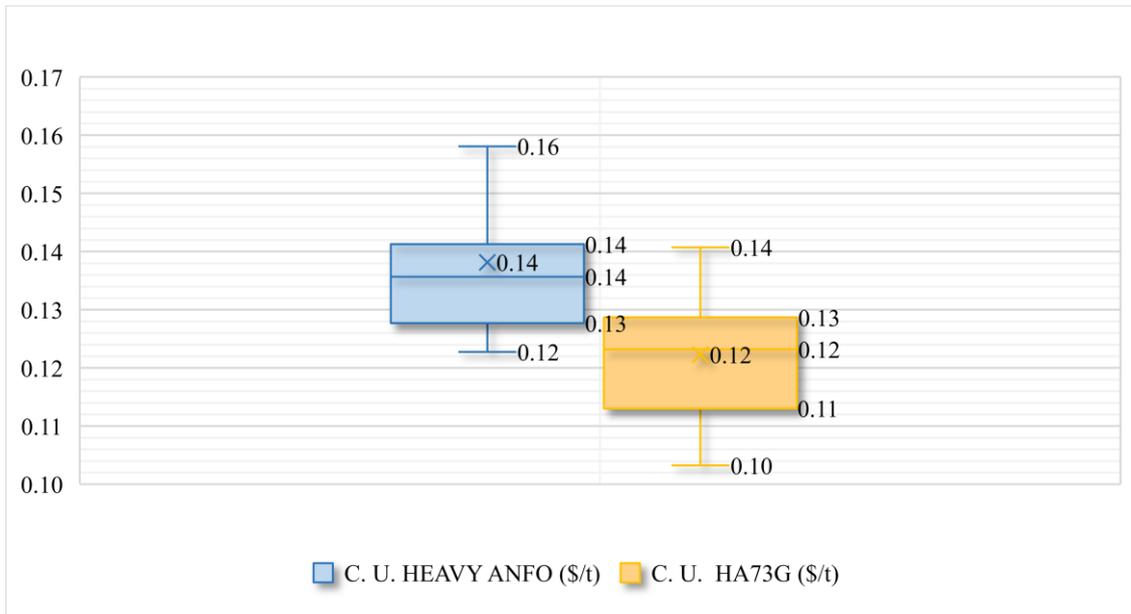
**Figura 26** Costos unitarios de voladura para HA45/55 y HA73G

#### 4.4.4 Resultados de costos unitarios acumulados de perforación y voladura

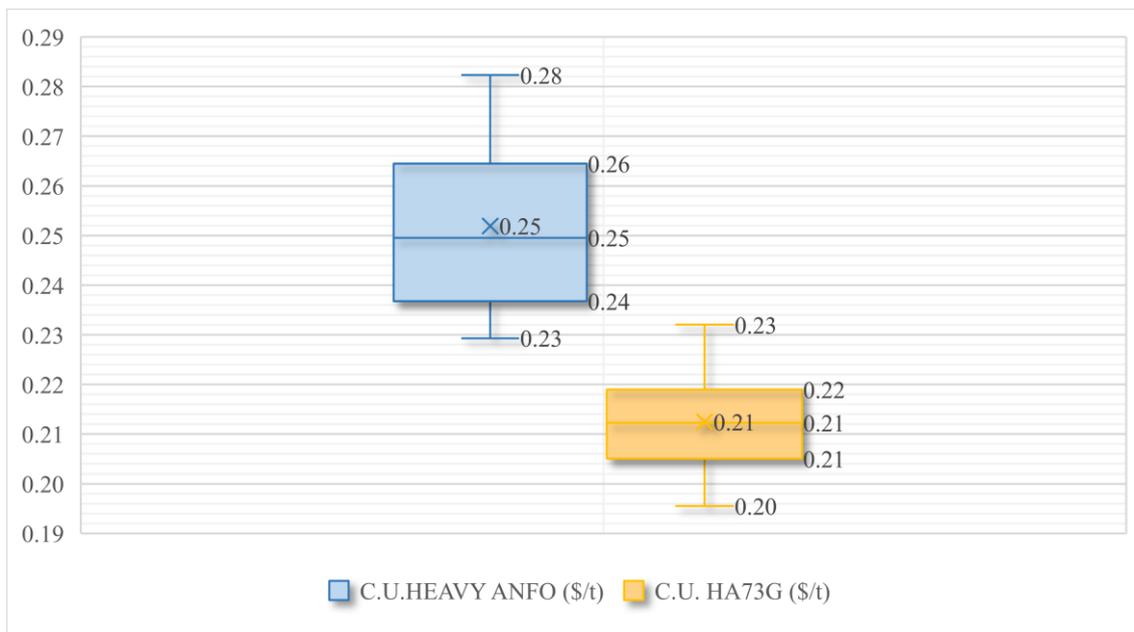
Como se observa en la figura 27, los resultados de costos unitarios de perforación en proyectos pre test es de 0.14 US\$/TM, y en proyectos post test realizados con HA73G mezcla explosiva en prueba es de 0.12 US\$/TM, obteniendo una reducción de 0.02 US\$/TM, y en voladura el costo unitario en proyectos pre test realizados con heavy anfo es de 0.25 US\$/TM y para proyectos post test realizados con mezcla explosiva HA73G el costo unitario es de 0.21 US\$/TM, obteniendo una reducción de costo unitario de 0.04 US\$/TM.



**Figura 27** Resultados de CU de perforación y voladura de heavy anfo y HA73G



**Figura 28** Distribución de costos unitarios de perforación de heavy anfo vs HA73G



**Figura 29** Distribución de costos unitarios de voladura de heavy anfo vs HA73G

## 4.5 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

### 4.5.1 Prueba estadística T-student de hipótesis 1

El contraste de hipótesis 1 se realizó haciendo uso de la técnica estadística paramétrica T-student, para la presente investigación se consideró pruebas de proyectos de pre test y proyectos post test, que se muestran en la tabla 28.

**Tabla 28**

*Cuadro comparativo de resultados de costos unitarios de perforación.*

N°	Alteración	Pre test			Post test		
		Banco-py	M.P. (m)	C. U. perforación heavy anfo (US\$/TM)	Banco-py	M.p. (m)	C. U. perforación HA73g (US\$/TM)
1	SGM	4048-16	2584	0.12	4016-14	2253	0.12
2	SGM	4048-17	2488	0.13	4048-18	2302	0.11
3	SGM	4040-18	1960	0.13	4040-20	1067	0.10
4	SGC	4040-17	2593	0.13	3960-02	1294	0.13
5	SGC	3976-05	3102	0.13	4008-13	2204	0.12
6	SGC	4032-15	1708	0.13	3952-01	2248	0.11
7	SGC	3976-06	2485	0.14	4040-19	1026	0.12
8	SM	3984-06	2983	0.14	4008-14	2221	0.13
9	SM	3984-07	1859	0.16	4048-19	1516	0.14
10	SM	3976-04	1589	0.17	4000-12	1982	0.12
11	SM	4016-13	2845	0.14	4040-21	1304	0.13
12	SM	3960-04	2979	0.14	3952-02	2337	0.13
Promedio				0.14			0.12

La distribución de costos unitarios de perforación está desde 0.12 US\$/TM hasta 0.17 US\$/TM para proyectos ejecutados con heavy anfo, sin embargo, para proyectos ejecutados con HA73G, se tiene costos unitarios distribuidos desde 0.10 US\$/TM hasta 0.14 US\$/TM, como se observa en la figura 28.

Las pruebas de hipótesis considerados son los siguientes:

$H_0$ = Aplicando el modelo matemático de Crosby & Pinco, no se optimiza los costos de perforación.

$$H_0: X_1 = X_2$$

$H_1$ = Aplicando el modelo matemático de Crosby & Pinco, se optimiza los costos de perforación.  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ ; es decir:

$$H_1: X_1 > X_2$$



**Donde:**

$H_0$ : Hipótesis nula

$H_1$ : Hipótesis alterna

$\mu_1$ : Promedio muestra 1

$\mu_2$ : Promedio muestra 2

**Estadístico de prueba.**

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_c^2}{n_1} + \frac{S_c^2}{n_2}}} \quad (32)$$

**Varianza común**

$$S_c^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (33)$$

**Donde:**

t: Estadístico Calculado

$\bar{X}_1$ ;  $\bar{X}_2$ : Medias muestrales

$S_c$ : Varianza Comun

$n_1$ ;  $n_2$  : Numero de elementos de las muestras

**Tabla 29**

*Análisis de resultados heavy anfo vs HA73G*

Medidas	Heavy anfo	HA73G
Media	0.138	0.122
Varianza	0.0001781	0.0001107
Muestra	12	12
Mínimo	0.12	0.10
Máximo	0.17	0.14

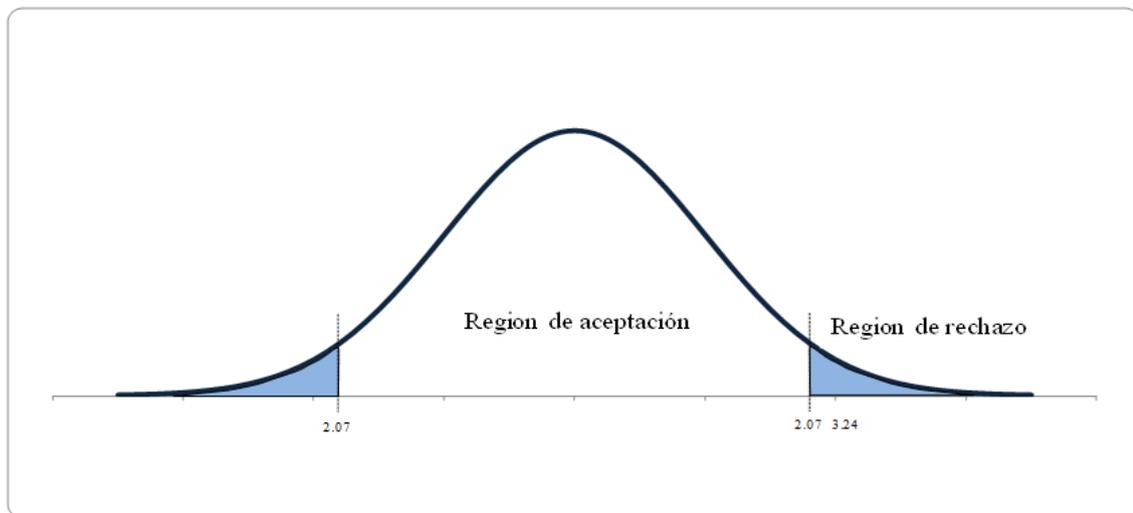
Haciendo el análisis de test estadístico T student, considerando al presente estudio con datos menores a 30, con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05, se tiene los siguientes resultados.

**Tabla 30**

*Resultados de la prueba estadística T Student.*

Prueba t student	Heavy anfo	HA73G
Media	0.138	0.122
Grados de libertad		22
Estadístico t		3.24
P(T<=t) una cola		0.0019
Valor crítico de t (una cola)		1.7171
P(T<=t) dos colas		0.0038
Valor crítico de t (dos colas)		2.07

Como se observa en la tabla 30, los resultados de la prueba de hipótesis 1, la T estadístico calculada es igual a 3.24, y este resultado se encuentra en la región de rechazo, como se presenta en la figura 30, por lo que se rechaza la hipótesis Nula  $H_0$  y se acepta la hipótesis alterna.



**Figura 30** Prueba de hipótesis 1 - región crítica

#### 4.5.2 Prueba estadística T-student de hipótesis 2

Los costos unitarios de voladura de los proyectos de pre test y proyectos con la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco post test, se presentan en la tabla 31:

**Tabla 31**

*Cuadro comparativo de resultados de CU de voladura*

N°	Alteración	Banco-py	Tonelaje (TM)	CU Heavy anfo (US\$/TM)	Banco-py	Tonelaje (TM)	CU HA73G (US\$/TM)
1	SGM	4048-16	108095	0.23	4016-14	94597	0.20
2	SGM	4048-17	100265	0.25	4048-18	106843	0.20
3	SGM	4040-18	78282	0.24	4040-20	53074	0.21
4	SGC	4040-17	98805	0.26	3960-02	51263	0.21
5	SGC	3976-05	126098	0.26	4008-13	92981	0.21
6	SGC	4032-15	65111	0.24	3952-01	103254	0.21
7	SGC	3976-06	90698	0.23	4040-19	42452	0.21
8	SM	3984-06	112149	0.26	4008-14	84549	0.20
9	SM	3984-07	60385	0.25	4048-19	55317	0.22
10	SM	3976-04	48364	0.27	4000-12	87203	0.22
11	SM	4016-13	103317	0.24	4040-21	53262	0.23
12	SM	3960-04	111202	0.28	3952-02	95699	0.23
Promedio				0.25			0.21

Los costos unitarios de voladura están distribuidos desde 0.23 US\$/TM hasta 0.28 US\$/TM para proyectos de voladura ejecutados con heavy anfo, y para proyectos ejecutados con HA73G se tiene costos unitarios desde 0.20 US\$/TM hasta 0.23 US\$/TM, como se observa en la figura 29, el análisis de resultados estadísticos de proyectos de voladura pre test y post test se muestran en la tabla 32.

**Tabla 32***Análisis de resultados de voladura heavy anfo vs HA73G.*

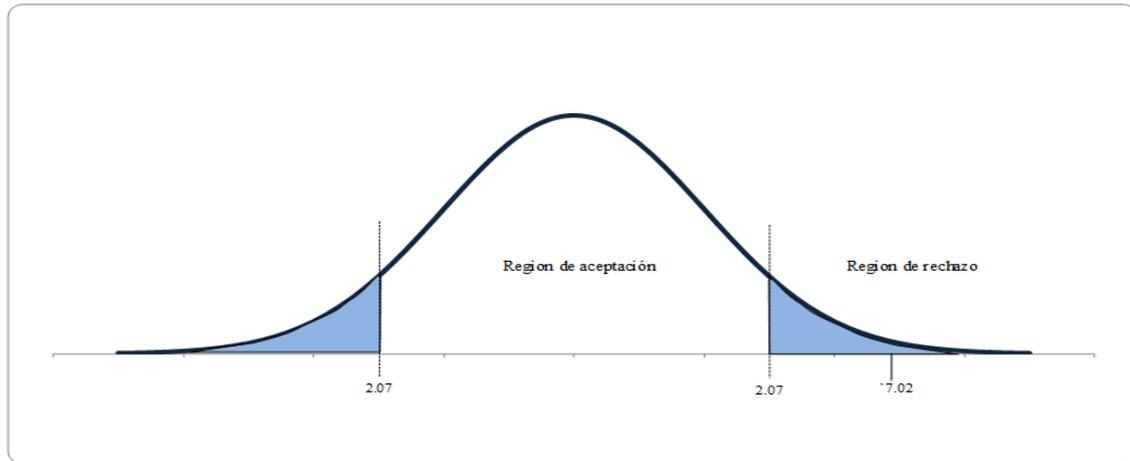
Medidas	Heavy anfo	HA73G
Media	0.252	0.212
Varianza	0.0002691	0.0001106
Muestra	12	12
Mínimo	0.23	0.20
Máximo	0.28	0.23

Realizando el análisis de test estadístico T Student, con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 5%, se tiene los siguientes resultados.

**Tabla 33***Resultados de la prueba estadística T student.*

Prueba t student	Heavy anfo	HA73G
Media	0.252	0.212
Grados de libertad		22
Estadístico t		7.02
P(T<=t) una cola		2.41995E-07
Valor crítico de t (una cola)		1.7171
P(T<=t) dos colas		0.0000
Valor crítico de t (dos colas)		2.07

Como se observa en la tabla 33, los resultados de la prueba de hipótesis 2, la T estadístico calculada es igual a 7.02, y este resultado se encuentra en la región de rechazo como se presenta en la figura 31, por lo que se rechaza la hipótesis Nula  $H_0$  y se acepta la hipótesis alterna.



**Figura 31** Prueba de hipótesis - región crítica

#### 4.5.2.1.1 PRUEBA ESTADÍSTICA T-STUDENT DE HIPÓTESIS GENERAL

En la tabla 34 se muestra el cuadro comparativo de resultados de costos unitarios de perforación y voladura de proyectos de pre test (pre test) y resultados de proyectos con la aplicación del modelo matemático de Crosby & Pinco (post test).

**Tabla 34**

*Resultados de costos unitarios de perforación y voladura*

N	Alteración	Banco-py	Tonelaje (TM)	CU Heavy anfo (US\$/TM)	Banco-py	Tonelaje (TM)	CU HA73G (US\$/TM)
1	SGM	4048-16	108095	0.35	4016-14	94597	0.32
2	SGM	4048-17	100265	0.38	4048-18	106843	0.31
3	SGM	4040-18	78282	0.37	4040-20	53074	0.31
4	SGC	4040-17	98805	0.39	3960-02	51263	0.34
5	SGC	3976-05	126098	0.39	4008-13	92981	0.34
6	SGC	4032-15	65111	0.37	3952-01	103254	0.32
7	SGC	3976-06	90698	0.37	4040-19	42452	0.34
8	SM	3984-06	112149	0.40	4008-14	84549	0.34
9	SM	3984-07	60385	0.41	4048-19	55317	0.36
10	SM	3976-04	48364	0.44	4000-12	87203	0.34
11	SM	4016-13	103317	0.39	4040-21	53262	0.36
12	SM	3960-04	111202	0.42	3952-02	95699	0.35
Promedio				0.39			0.33

Los costos unitarios acumulados de perforación y voladura para proyectos de pre test están distribuidos desde 0.35 US\$/TM hasta 0.44 US\$/TM, con costo unitario

promedio de 0.39 US\$/TM ejecutados con Heavy Anfo, y para proyectos post test ejecutados con HA73G los costos unitarios están distribuidos desde 0.31 US\$/TM hasta 0.36 US\$/TM, con costo unitario promedio de 0.33 US\$/TM, como se presenta en la tabla 34.

Los resultados del análisis estadístico T Student de los costos unitarios de perforación y voladura de proyectos pre test y post test se presentan en las tablas 35 y 36.

### Tabla 35

*Resultados estadísticos de CU de perforación y voladura pre y post test*

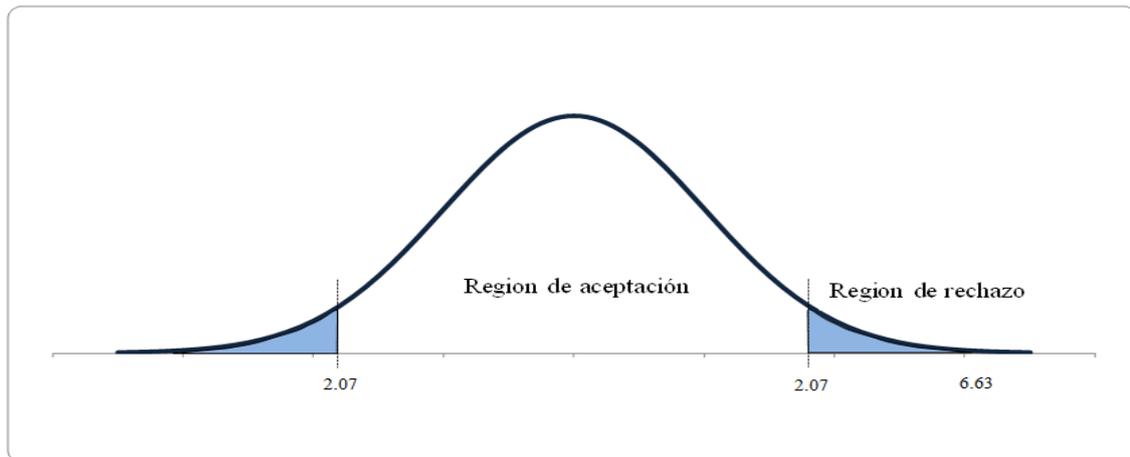
Indicadores	Heavy anfo	HA73G
Media	0.390	0.335
Varianza	0.0005731	0.0002634
Muestra	12	12
mínimo	0.35	0.31
máximo	0.44	0.36

### Tabla 36

*Prueba T-student de resultados de costos unitarios de pre y post test.*

Prueba T-student	Heavy anfo	HA73G
Media	0.390	0.335
Grados de libertad		22
Estadístico t		6.63
P(T<=t) una cola		5.71824E-07
Valor crítico de t (una cola)		1.7171
P(T<=t) dos colas		0.0000
Valor crítico de t (dos colas)		2.07

Como se observa en la tabla 36, los resultados de la prueba de hipótesis general, el T estadístico calculada es igual a 6.63, este resultado se encuentra en la región de rechazo como se presenta en la figura 32, por lo que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.



**Figura 32** *Región crítica de costos unitarios de proyectos pre y post test*

#### 4.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El promedio del costo unitario de perforación de los 12 proyectos pre test fue de 0,14 US\$/TM, una vez aplicado un nuevo diseño de malla de perforación con el modelo matemático de Crosby & Pinco se logró una reducción en el costo unitario de perforación a 0,12 US\$/TM, estos resultados son similares a los de Music (2007) porque su nuevo diseño de malla de perforación le permitió una reducción de taladros de 53 a 49 taladros el cual representó el 8% de reducción. Por otra parte, Iparraguirre (2017) señala que el modelo matemático de Crosby & Pinco permite ampliar las dimensiones del burden y espaciamiento hasta en 10 cm.

El promedio del costo de voladura en la malla de perforación anterior usando heavy anfo fue de 0,25 US\$/TM, una vez aplicado un nuevo diseño de la malla de perforación con el modelo matemático de Crosby & Pinco y el cambio de explosivo a heavy anfo 73 gasificado se logró reducir a 0,21 US\$/TM, de la misma forma Palma (2009) logró hacer una comparación en el costo de voladura usando heavy anfo 73 gasificado siendo igual a 0,22 US\$/TM, sin embargo, usando heavy anfo es igual a 0,24 US\$/TM lo cual representó un ahorro del 7,22%.



Respecto a nivel general el promedio del costo unitario de perforación y voladura usando heavy anfo y con el diseño de malla de perforación anterior fue de 0.39 US\$/TM, el cual se logra reducir a 0.33 US\$/TM con el nuevo diseño de malla de perforación aplicando el modelo matemático de Crosby & Pinco y realizando el cambio de explosivo a heavy anfo 73 gasificado. De la misma forma Calderón (2018) logró resultados favorables logrando reducir los costos de perforación y voladura de 0,023 US\$/TM a 0,021 US\$/TM; también, Gómez (2016) afirma que realizando el cambio de explosivo de anfo por heavy anfo se logra optimizar los costos de perforación y voladura en mineral en un 5,1% y en desmante el 3,6%.



## V. CONCLUSIONES

A nivel general se concluye que el costo unitario de perforación y voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C. se logró optimizar de 0.39 US\$/TM a 0.33 US\$/TM, que significa una reducción de 15,38 % del costo unitario de perforación y voladura, aplicando un nuevo diseño de malla de perforación mediante el modelo matemático de Crosby & Pinco, realizando el cambio de explosivo de heavy anfo a HA73G.

Por otra parte, se concluye que el costo unitario de perforación en la Unidad Minera Apumayo S.A.C. se logró optimizar de 0,14 US\$/TM a 0,12 US\$/TM, que representa una reducción de 14,29 % del costo de perforación, aplicando el nuevo diseño de malla de perforación según al modelo matemático de Crosby & Pinco.

De forma similar se concluye que el costo unitario de voladura en la Unidad Minera Apumayo S.A.C. se logró optimizar de 0,25 US\$/TM a 0,21 US\$/TM, que representa una reducción de 16% del costo de voladura una vez realizado el cambio de explosivo de heavy anfo a HA73G.



## VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el monitoreo permanente de los parámetros durante el proceso de carguío de HA73G con camión fabrica, para obtener una densidad final requerida, y una longitud de esponjamiento de acuerdo a la inyección de N30 y temperatura de la Emulsión, para no generar contingencias en la mezcla explosiva inyectada en los taladros.

Se recomienda realizar la capacitación permanente al personal involucrado en el proceso de carguío de HA73G, para un adecuado manipulación y control de parámetros de la mezcla explosiva.

Se recomienda continuar con la aplicación de los nuevos parámetros de burden y espaciamiento de perforación y voladura aplicando el modelo matemático de Crosby & Pinco, que considera la energía generada por la mezcla explosiva para la optimización de costos de perforación y voladura.



## VII. REFERENCIAS

- Ames Lara, V. A. (2008). *Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/635>
- Beraun Anco, K. A. (2019). *Análisis comparativo y evaluación técnica económica de los explosivos Heavy Anfo y Emulsion Fortis Advantage 100 gasificada para la fragmentación en el tajo norte del nivel 4336-Sociedad Minera El Brocal Colquijirca 2018*. Universidad Continental. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12394/7112>
- Bernaola Alonso, Jose, Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. Universidad Politecnica de Madrid. obtenido de <https://oa.upm.es/21848/>
- Calderon Alayo, A. A. (2018). *Optimización de costos mediante modificación de variables controlables de perforación y voladura en mina el toro [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/11036>
- CESAR, Q. A. (2018). *Evaluacion del Rendimiento de la Emulsion Gasificada en la Voladura de Rocas de la Minera las Bambas – Cotabambas, Apurimac*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/3684>
- Chambergu Guillermo, I. (2013). *Estructura de costos en las operaciones de la empresa minera*.



- Crosby , W., & Pinco, M. (1992). *More Power the Pop. When to use aluminum in bulk explosives*. E&MJ-Engineering and Mining Journal.
- Echegaray Palma, F. A. (2015). *Estudio de costos operacionales en la U.E.A. recuperada – Huancavelica [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12672/4399>
- Exsa. (2005). *Manual Practico de Voladura*. Exsa editorial.
- Gomez Mamani, W. F. (2016). *Diseño de malla de perforación basado en la energía de mezclas explosivas, para optimizar costos de perforación y voladura en Aruntani SAC 2015 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Moquegua]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/17>
- Hernandez Sampieri, R. (2014). *Metodologia de la Investigacion*. Mc Graw Hill.
- Iparraguirre Galvez, E. E. (2017). *Diseño De Mallas De Perforación Y Voladura Utilizando La Potencia Relativa Por Volumen Para Mejorar La Fragmentación En Tajo Chalarina-Minera Shahuindo - 2017*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO, Trujillo. Obtenido de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/10017>
- Jáuregui Aquino, O. A. (2011). *Reducción de los costos operativos en mina, mediante la optimización de los estándares de las operaciones unitarias de perforación y voladura[Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Catolica del Peru]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/696>
- Llaique Nuñoncca, Á. A., & Sánchez Guevara, W. O. (2015). *Determinación del costo total de perforación para optimizar esta operación unitaria en mina modelo a tajo*



- abierto, Cajamarca - Perú, 2015 [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/5284>
- Lopez Jimeno, C. (2014). *Manual de Perforacion y Voladura de Rocas*. COMPOBELL S.A.
- López Sánchez, L. M. (2003). *Evaluación de la energía de los explosivos mediante modelos termodinámicos de detonación [Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Madrid]*. Archivo Digital UPM. Obtenido de <https://oa.upm.es/82/>
- McKenzie, C. (1994). *Estado del Arte de la Tronadura*. Film editor.
- Mendieta Britto, L. A. (2015). *Optimización de los costos operativos en la unidad Cerro Chico [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Catolica del Peru]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5946>
- Mendoza Muñoz , N. (2014). *Optimización de la Voladura Controlada Aplicando un Modelo Matemático en la Unidad Minera Paraiso-Ecuador. Tesis*. Universidad Nacional del Centro del Peru, Huancayo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1339>
- Mendoza Tumbaco, Á. V., & Vargas Bermúdez, D. V. (2017). *Optimización Del Proceso Productivo Para Incrementar La Utilidad En Mundo Verde. Tesis*. Universidad De Guayaquil, Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/22541/1/TESIS%20ANGELA%20MENDOZA%20Y%20DANIELA%20VARGAS.pdf>
- Music Garrido, A. A. (2007). *Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal, Mina El Teniente [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104674>



Otaño Noguel, J. (1984). *Introducción a la especialidad de Minería*. Pueblo y Educación.

Palma Jambo, N., & Tenorio Acuña, E. M. (2019). *Influencia de la emulsión gasificable SAN-G y HA 73g en la fragmentación de la roca en Chaviña, Ayacucho - 2018*.

Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/21191>

Santana Orellana, L. (2014). *Diseño de Malla para Perforación y Voladura de Frentes Utilizando Modelo Matemático de Holmberg e Índice de Volabilidad De Lylli [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]*. Repositorio

Institucional. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/1340>

Tamayo, M. (1997). *Tesis de Investigación*. Obtenido de <http://tesisdeinvestig.blogspot.com/2011/06/poblacion-y-muestra-tamayo-y-tamayo.html>

# ANEXOS

## Anexo A

### Proyectos de pre test banco 4048 py 16

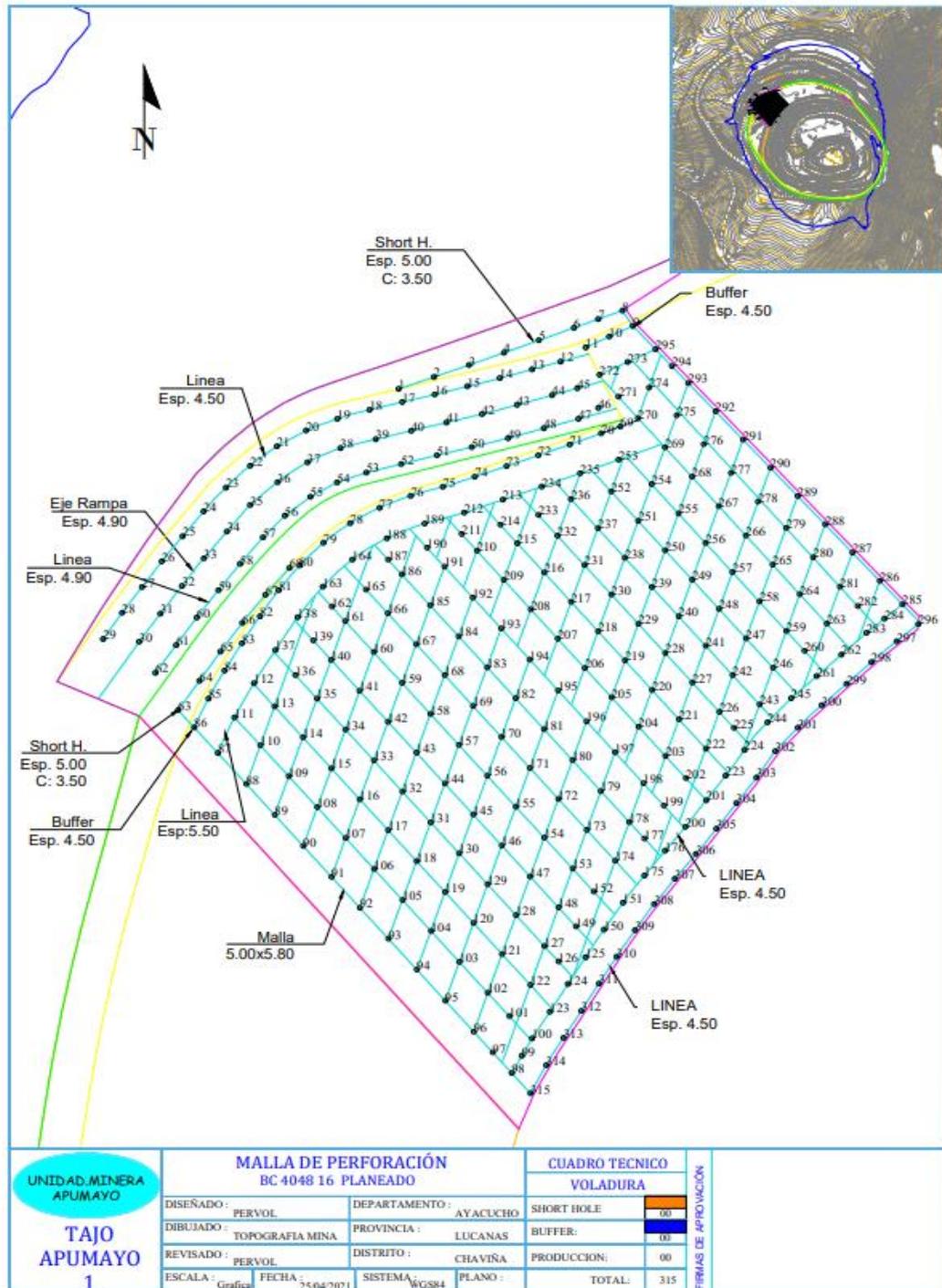


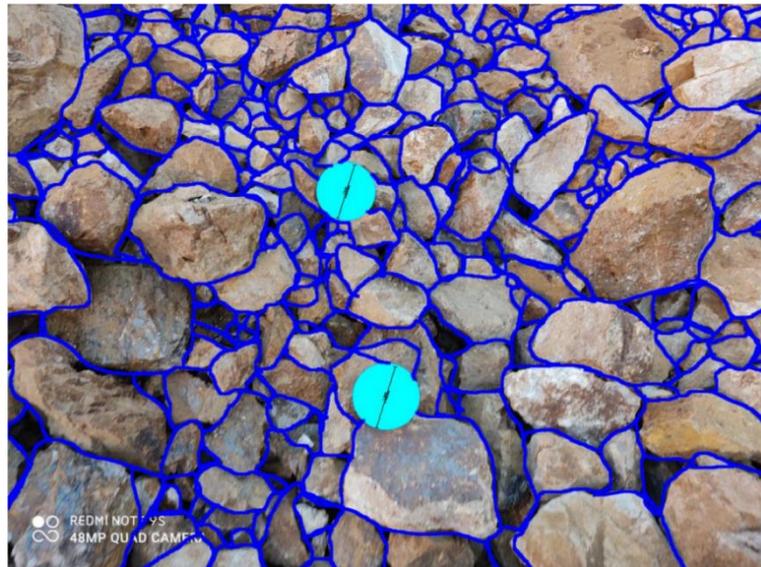
Figura A. 1 Diseño de malla de perforación banco 4048 py 16



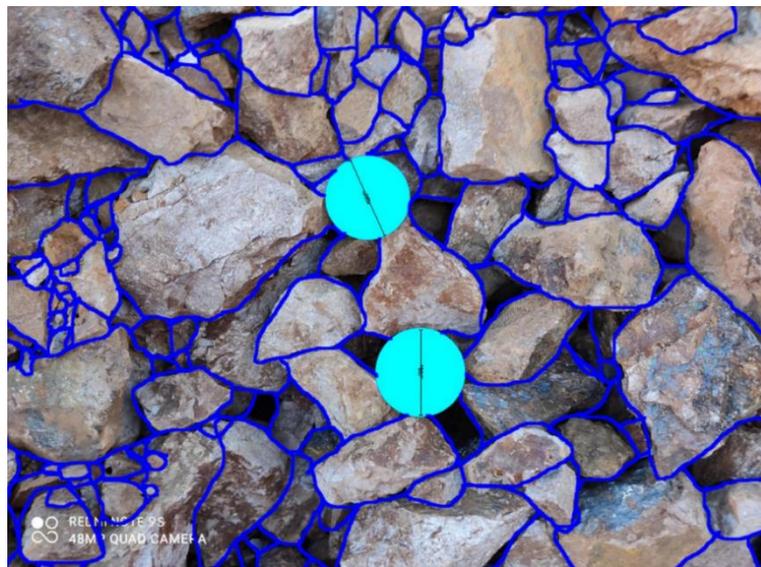
**Figura A. 2** Fotografía 01 fragmentación del proyecto banco 4048 py 16



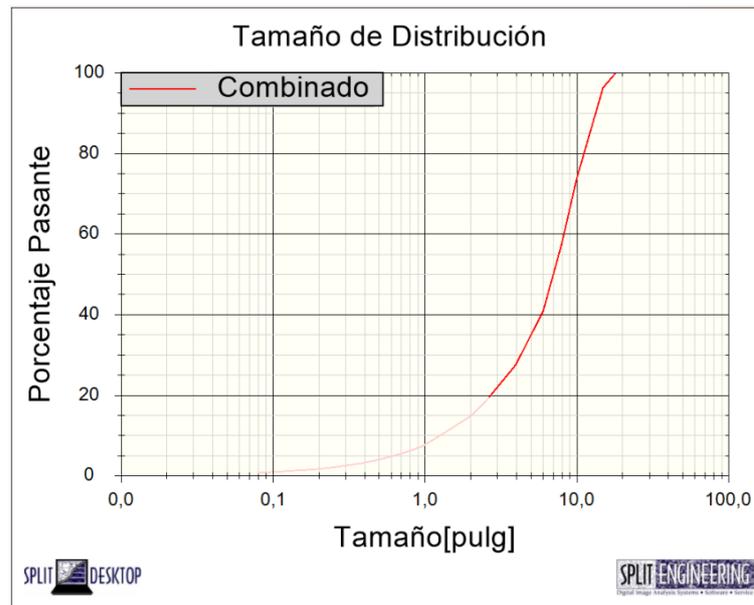
**Figura A. 3** Fotografía 2 fragmentación del proyecto banco 4048 py 16



**Figura A. 4** Muestra de fragmentos - software Split banco 4048 py 16



**Figura A. 5** Muestra de fragmentos software - Split banco 4048 py 16

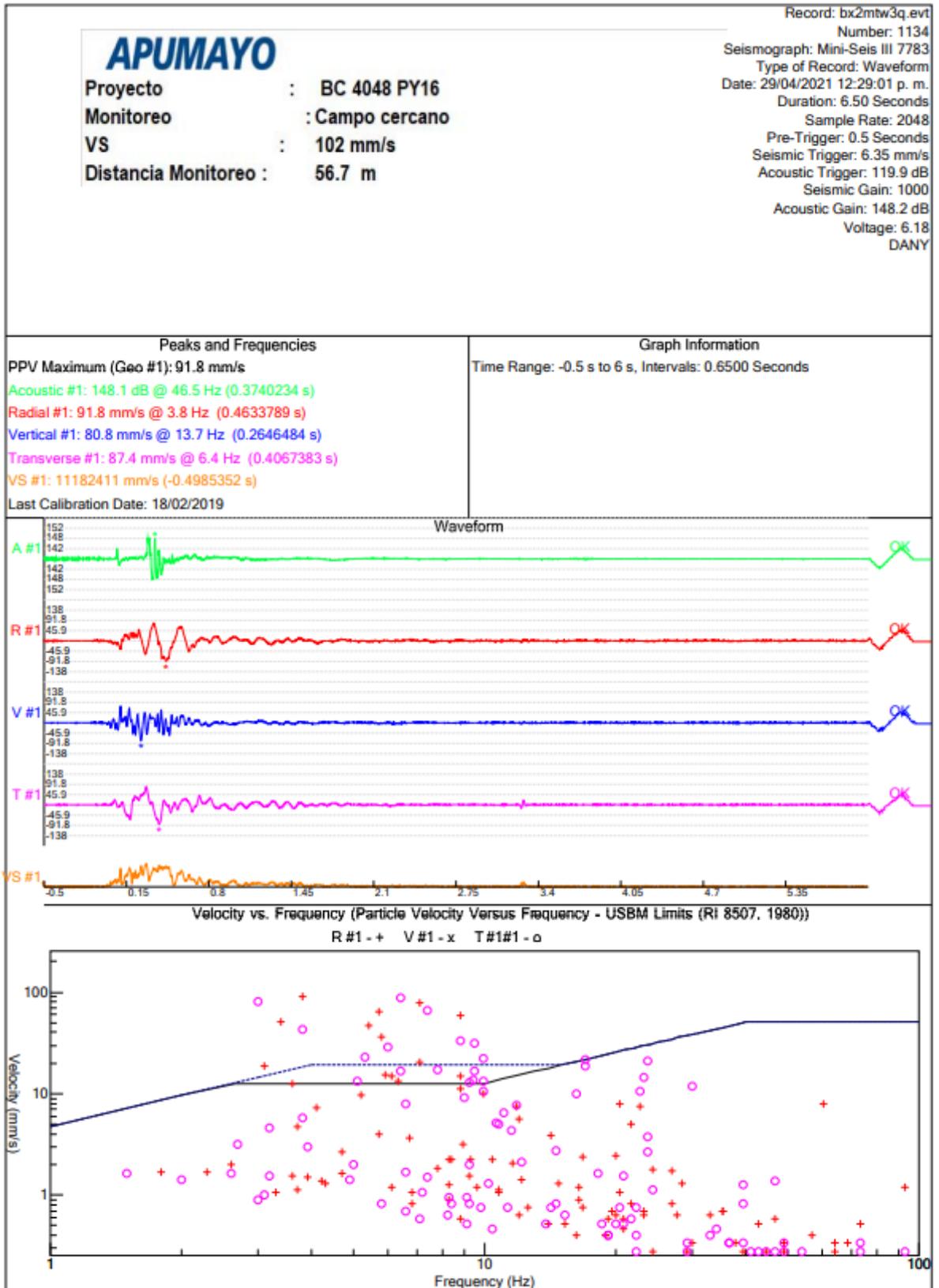


**Figura A. 6** Curva de distribución granulométrica acumulado software Split banco 4048 py 16

**Tabla A. 1**

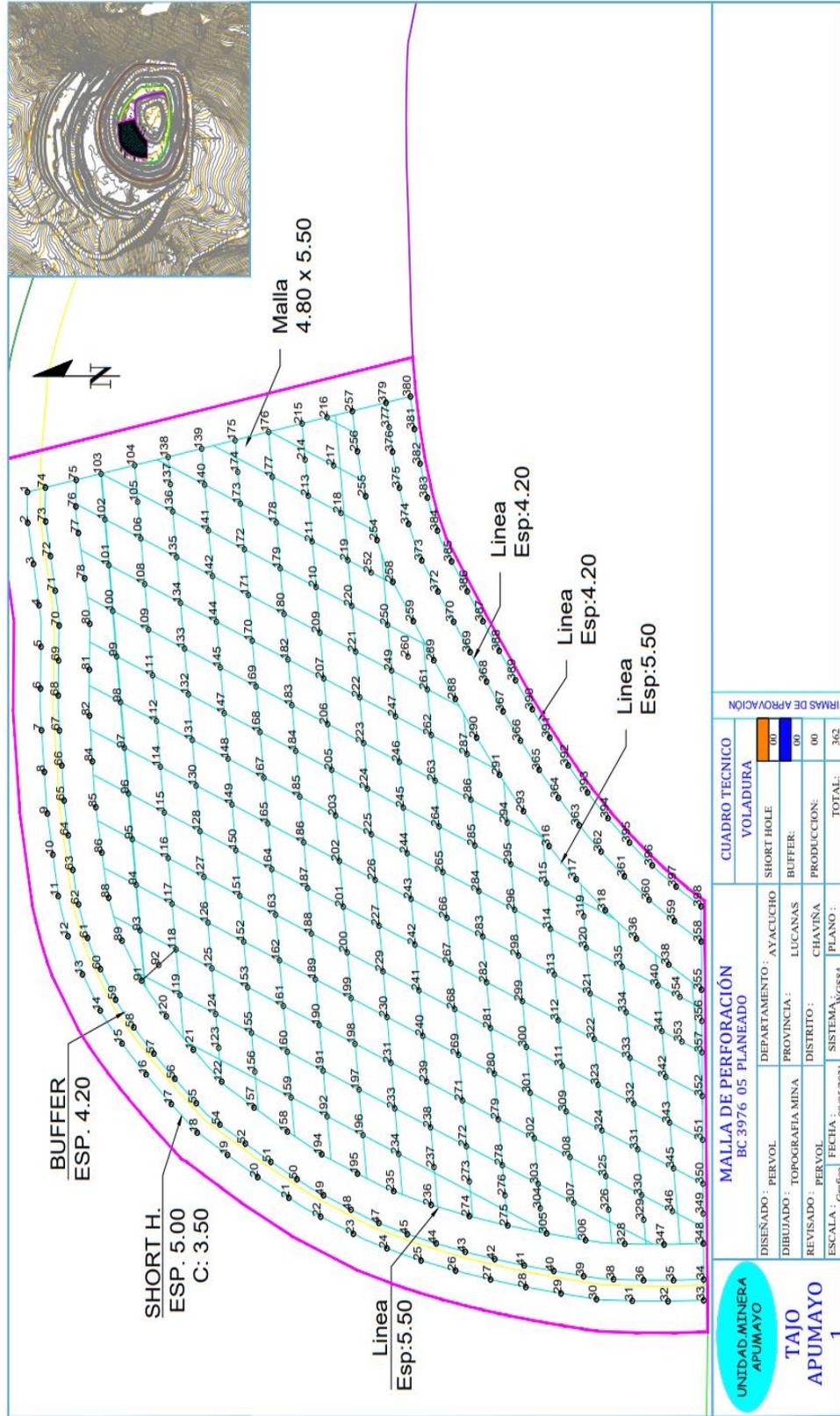
*Distribución granulométrica de fragmentación banco 4048 py 16.*

Pasante (%)	Tamaño fragmento (in)		
	Acumulado	Fotografía 01	Fotografía 02
F10	1.31	1.06	1.73
F20	2.73	2.40	3.42
F30	4.43	3.94	4.90
F40	5.89	5.76	6.00
F50	7.14	7.30	6.99
F60	7.90	7.81	7.93
F70	8.30	8.70	7.99
F80	8.52	8.75	8.52
F90	13.02	13.53	12.08
Top size (99.95 %)	18.11	18.18	17.23



Anexo B

Proyectos de pre test Banco 3976 py 5



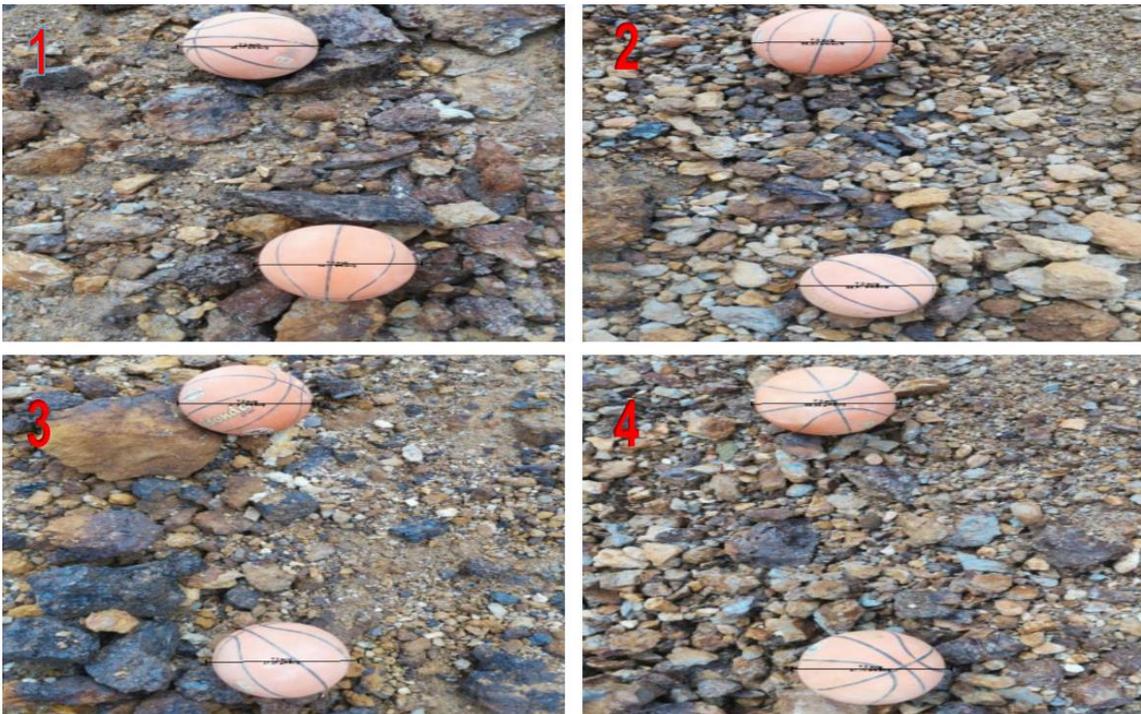
<b>UNIDAD MINERA</b> APUMAYO		<b>MALLA DE PERFORACION</b> BC 3976 05 PLANEADO		<b>CUADRO TECNICO</b> VOLADURA	
DISEÑADO: PERVOL	DEPARTAMENTO: AYACUCHO	SHORT HOLE	00	PRODUCCION:	00
DIBUJADO: TOPOGRAFIA MINA	PROVINCIA: LUCANAS	BUFFER:	00	TOTAL:	362
REVISADO: PERVOL	DISTRITO: CHAVINA				
ESCALA: Grafical	FECHA: 08/05/2021	SISTEMA: WGS84	PLANO:		

<b>TAJO</b> APUMAYO		<b>FRMAS DE APROVACION</b>	
1			

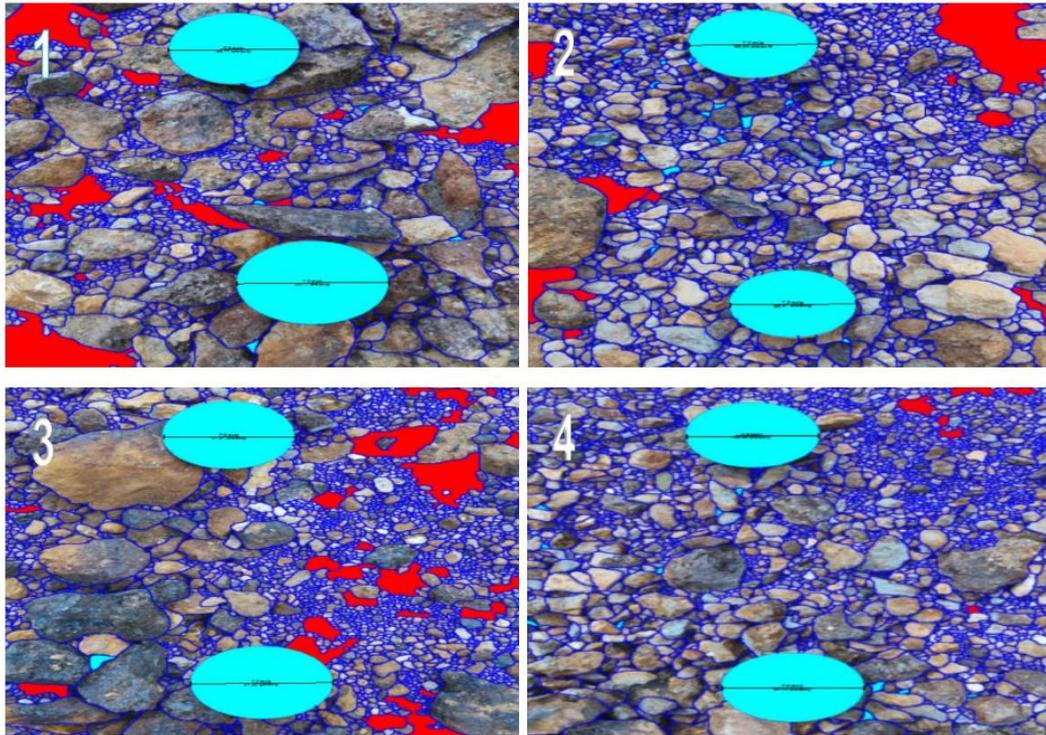
Figura B. 1 Diseño de malla de perforación banco 3976 py 05



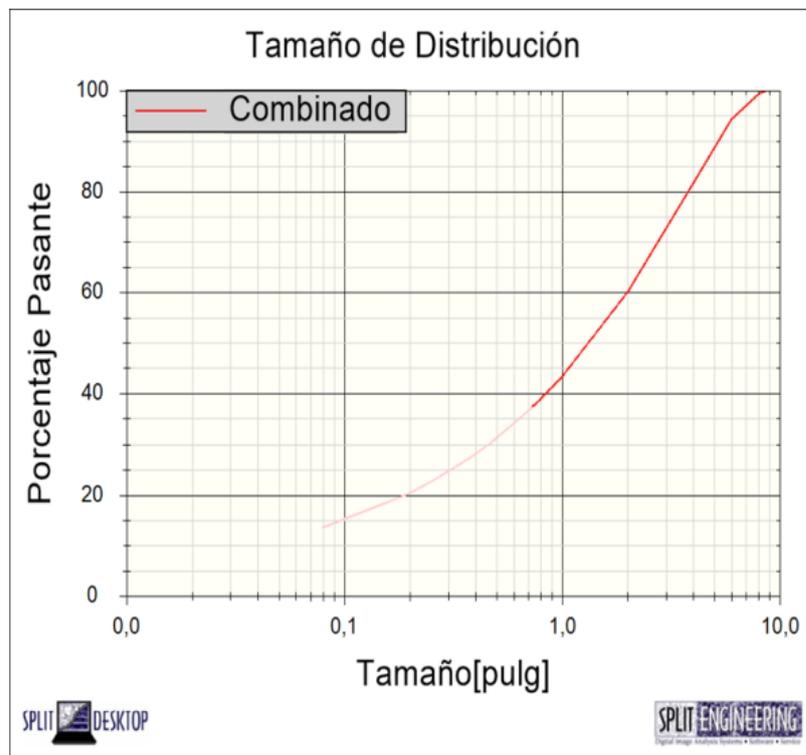
**Figura B. 2** Frente de carguío banco 3976 py 05



**Figura B. 3** Fotografías de fragmentación banco 3976 py 05



**Figura B. 4** Muestra de fragmentación software - Split banco 3976 py 12



**Figura B. 5** Curva de distribución granulométrica acumulado software - Split banco

3976 py 05



**Tabla B. 1**

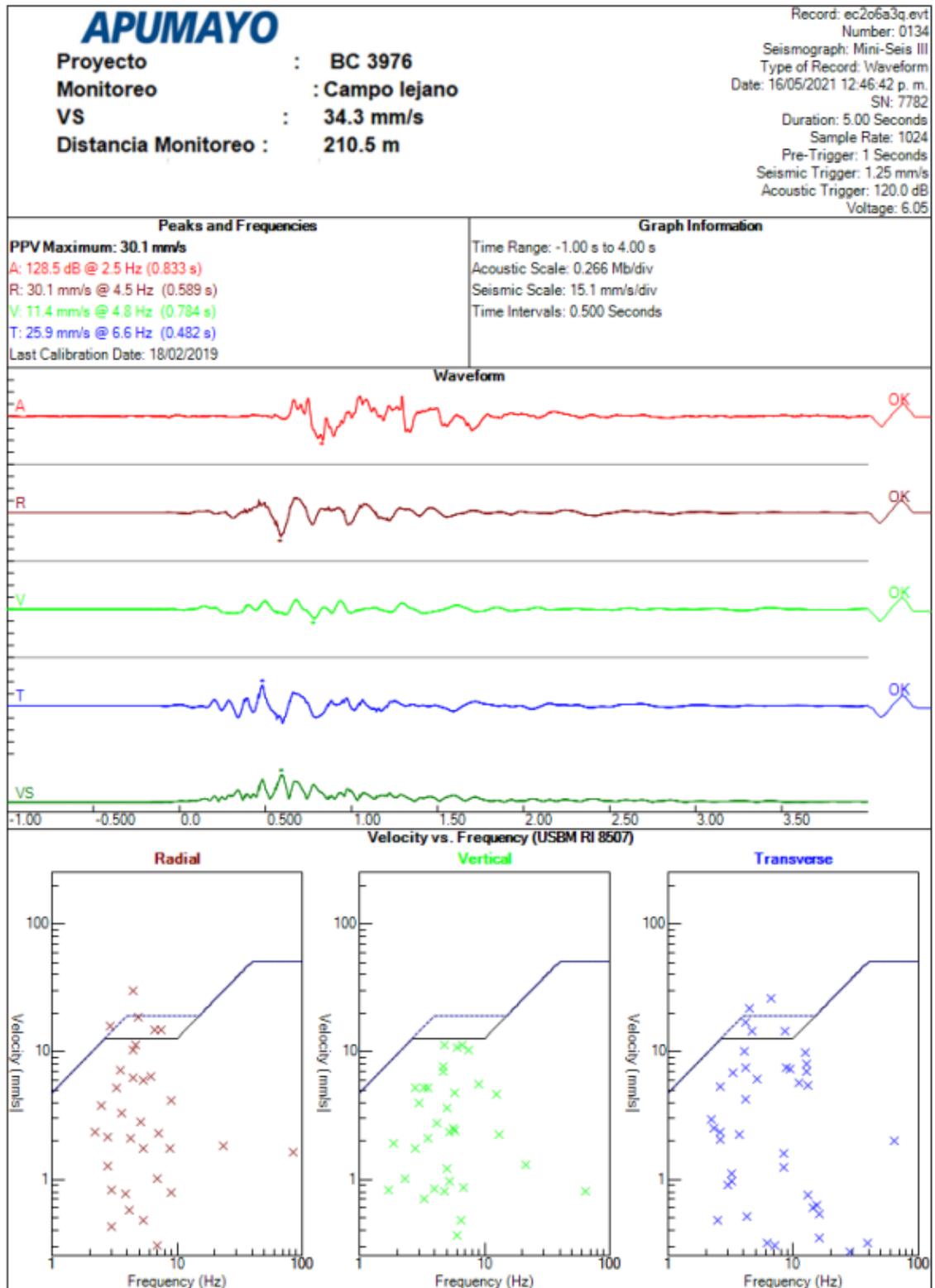
*Distribución granulométrica % pasante banco 3976 py 05*

Tamaño fragmentos (in)	Pasante (%)				
	Acumulado	Fotografía 01	Fotografía 02	Fotografía 03	Fotografía 04
10.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
8.00	99.40	100.00	99.19	98.45	100.00
6.00	94.31	96.37	89.43	91.75	100.00
4.00	81.58	80.28	77.96	75.55	92.73
2.00	60.19	50.22	63.40	59.42	67.25
1.00	43.11	31.93	45.06	50.42	44.44
0.75	37.78	26.39	39.66	46.12	38.34
0.50	31.31	20.16	32.75	40.66	31.06
0.38	27.42	16.65	28.58	37.17	26.67
0.25	22.77	12.71	23.57	32.75	21.50
0.19	19.97	10.47	20.53	29.92	18.42
0.08	13.60	5.86	13.60	22.86	11.62

**Tabla B. 2**

*Distribución granulométrica tamaño de fragmentos banco 3976 py 05*

Pasante (%)	Tamaño fragmento (in)				
	Acumulado	Fotografía 01	Fotografía 02	Fotografía 03	Fotografía 04
F10	0.04	0.17	0.04	0.01	0.06
F20	0.19	0.49	0.18	0.05	0.22
F30	0.46	0.91	0.42	0.19	0.47
F40	0.85	1.41	0.76	0.47	0.82
F50	1.36	1.98	1.25	0.97	1.22
F60	1.99	2.63	1.78	2.08	1.65
F70	2.80	3.23	2.61	3.38	2.15
F80	3.81	3.98	4.39	4.49	2.77
F90	5.15	4.96	6.10	5.70	3.66
Topsize (99.95 %)	8.59	7.20	8.32	8.66	5.93



### Anexo C

### Proyecto de post test Banco 4000 py 12

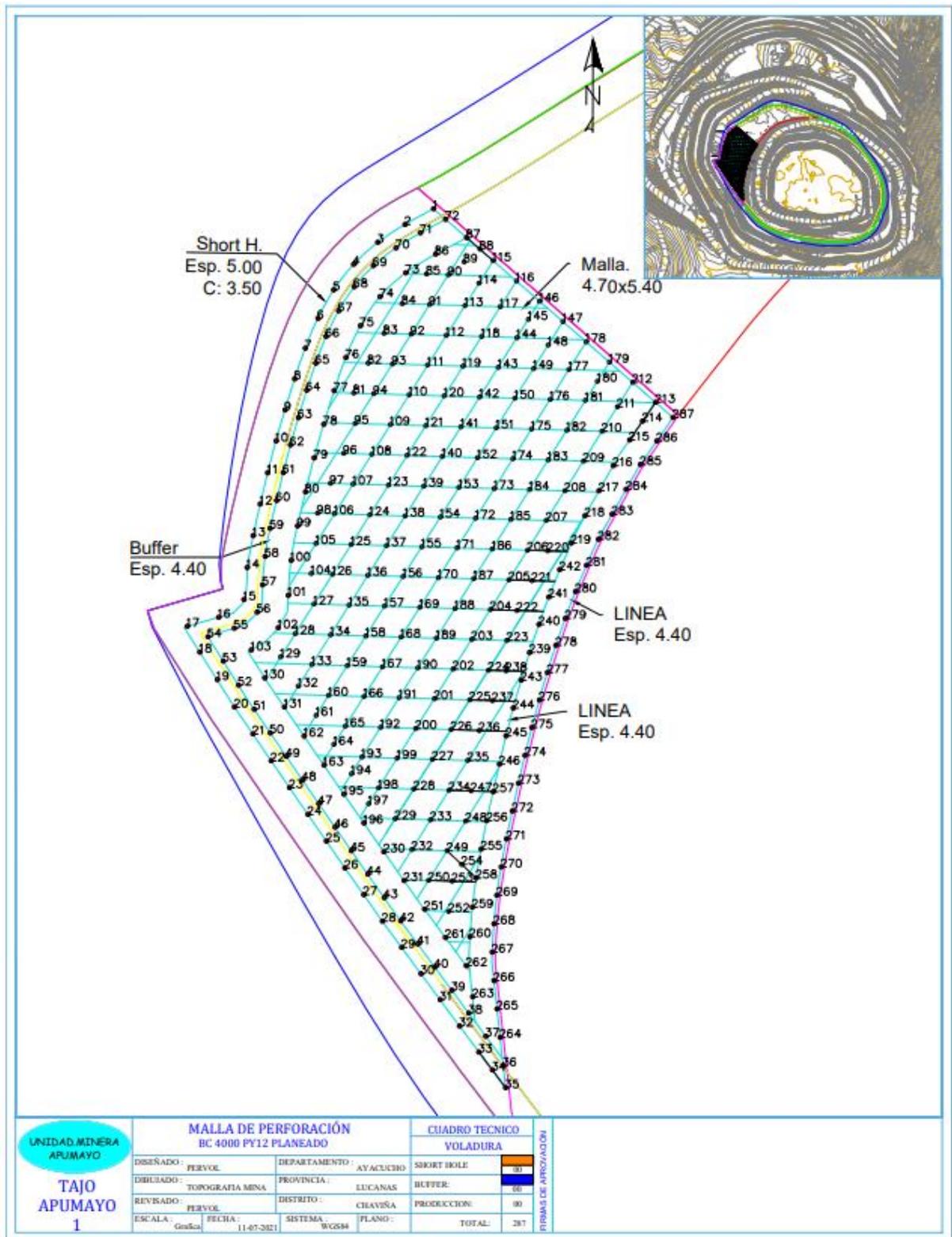
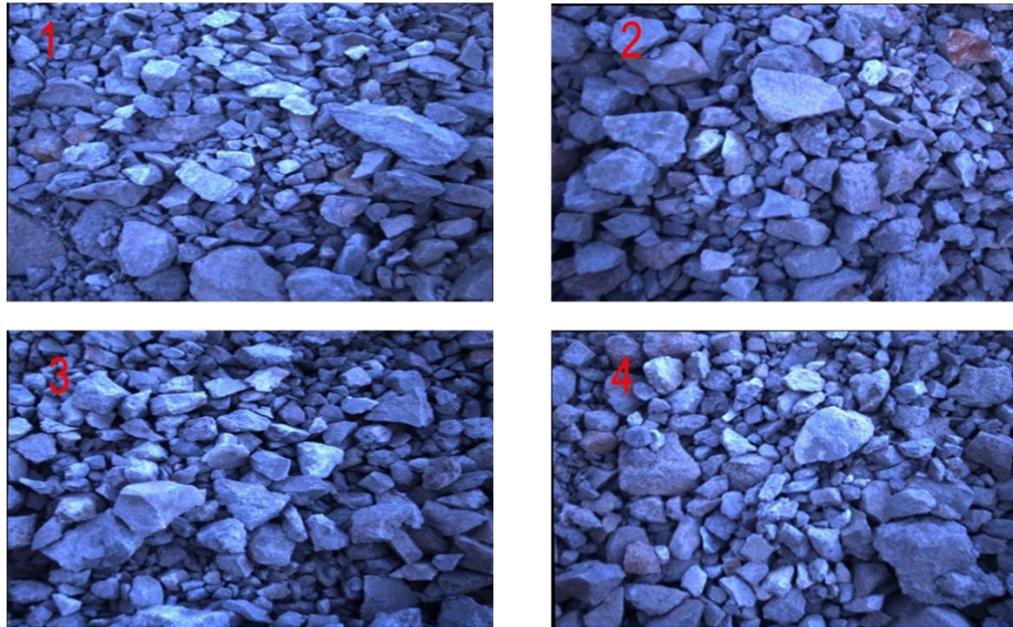
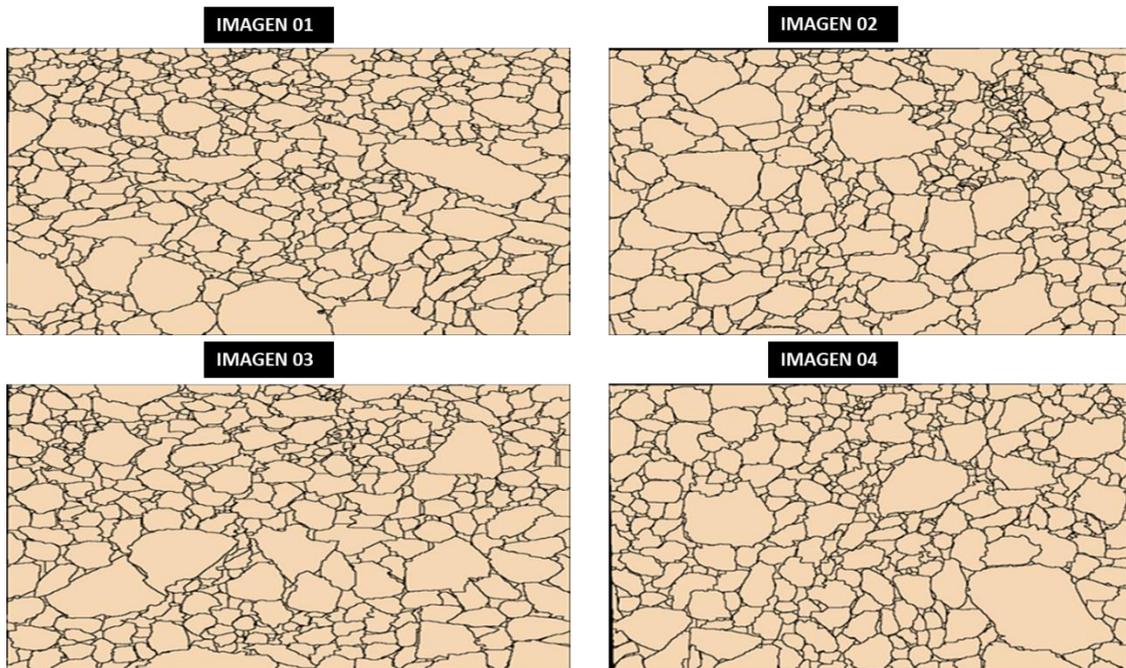


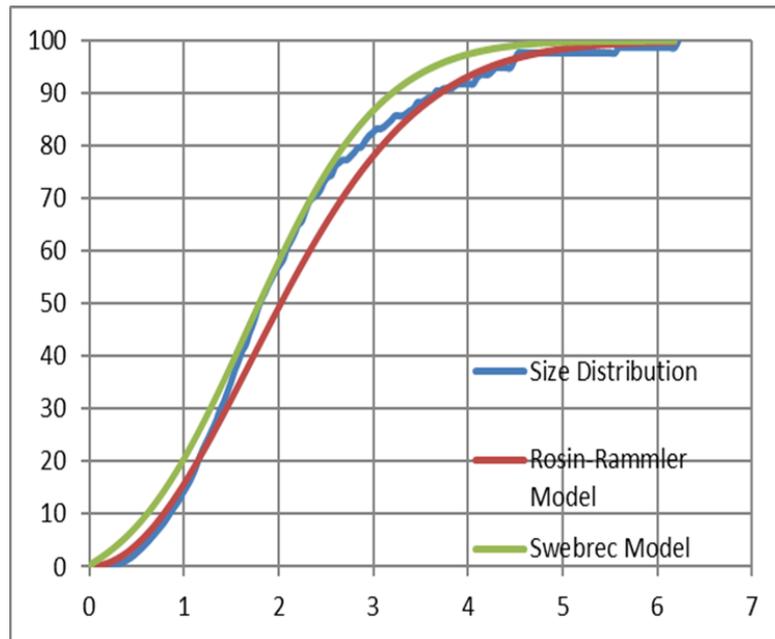
Figura C. 1 Diseño de malla de perforación banco 4000 py 12



**Figura C. 2** Imágenes de fragmentación banco 4000 py 12



**Figura C. 3** Muestra de fragmentos banco 4000 py 12

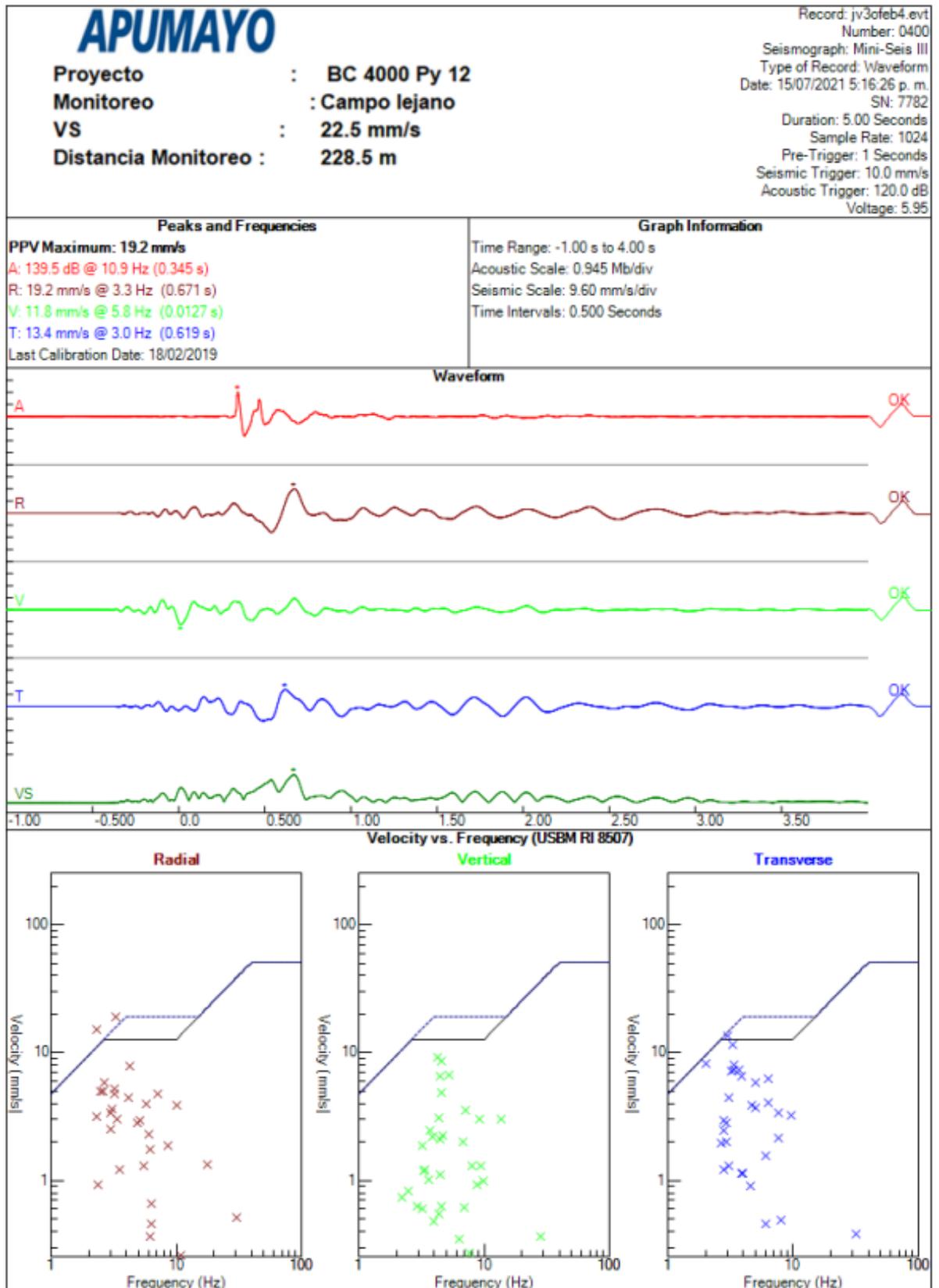


. **Figura C. 4** Curva de distribución granulométrica banco 4000 py 12

**Tabla C. 1**

*Distribución granulométrica de fragmentación banco 4000 py 12*

P - values	Tamaño fragmento (in)
	Acumulado
P10	0.87
P20	1.18
P30	1.42
P40	1.61
P50	1.81
P60	2.09
P70	2.36
P80	2.91
P90	3.66
P100	6.33



White Seismograph Data Analysis V12 - Version 12.0.0.156

. **Figura C. 5** Registro de vibraciones banco 4000 py 12



## Anexo D

### Indicadores de perforacion y voladura

**Tabla D. 1**

*Resumen de indicadores de gestión de perforación y voladura pre test*

Banco-Py	B (m)	S (m)	Factor de Ruptura kg/m	Índice de Perforación t/tal	Factor de potencia kg/t
4048-16	5.00	5.80	18.33	332	0.44
4048-17	5.00	5.80	19.00	315	0.47
4040-18	5.00	5.80	17.83	311	0.45
4040-17	4.80	5.50	19.15	353	0.50
3976-05	4.80	5.50	20.44	348	0.50
4032-15	4.80	5.50	16.14	253	0.42
3976-06	4.80	5.50	15.51	290	0.42
3984-06	4.60	5.30	19.28	347	0.51
3984-07	4.60	5.30	12.39	257	0.38
3976-04	4.60	5.30	16.09	205	0.53
4016-13	4.60	5.30	16.18	290	0.45
3960-04	4.60	5.30	17.96	341	0.48
Promedio			17.36	304	0.47

**Tabla D. 2**

*Resumen de indicadores de perforación y voladura post test*

Banco-Py	B (m)	S (m)	Factor de Ruptura kg/m	Índice de Perforación t/tal	Factor de potencia kg/t
4016-14	5.40	6.20	14.78	329.61	0.35
4048-18	5.40	6.20	16.80	310.59	0.36
4040-20	5.40	6.20	20.39	333.80	0.41
3960-02	5.00	5.80	14.17	332.88	0.36
4008-13	5.00	5.80	16.30	305.86	0.39
3952-01	5.00	5.80	17.96	319.67	0.39
4040-19	5.00	5.80	16.28	365.96	0.39
4008-14	4.70	5.40	14.43	308.57	0.38
4048-19	4.70	5.40	14.69	329.27	0.40
4000-12	4.70	5.40	19.17	317.10	0.44
4040-21	4.70	5.40	17.36	322.80	0.43
3952-02	4.70	5.40	16.92	326.62	0.41
Promedio			16.60	325.23	0.39

**Anexo E****Resultados de fragmentación y VVP de perforación y voladura****Tabla E. 1***Resultados de VVP y fragmentación de proyectos pre test*

Banco-Py	Distancia de monitoreo (m)	VVP (mm/s)	Fragmentación (in)
4048-16	49.50	102.0	8.52
4048-17	160.00	23.2	6.51
4040-18	186.60	19.4	7.38
4040-17	192.40	21.3	7.62
3976-05	210.50	34.3	3.81
4032-15	195.50	24.5	4.57
3976-06	325.90	23.7	3.13
3984-06	197.10	19.3	2.94
3984-07	253.10	28.5	2.83
3976-04	224.60	17.5	3.49
4016-13	173.40	42.1	5.54
3960-04	192.8	13.5	2.96

**Tabla E. 2***Resultados de VVP y fragmentación de proyectos de post test*

Banco-Py	Distancia de monitoreo (m)	VVP (mm/s)	Fragmentación (in)
4016-14	212.40	15.4	4.52
4048-18	151.10	55.8	2.87
4040-20	153.80	25.9	2.91
3960-02	276.90	16.6	3.52
4008-13	198.80	12.8	3.85
3952-01	221.90	25.6	1.38
4040-19	160.50	22.5	6.52
4008-14	208.30	13.4	7.56
4048-19	103.00	72.3	4.49
4000-12	228.50	22.5	2.91
4040-21	139.40	43.1	3.54
3952-02	335.1	18.7	2.81