

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Análisis del uso de cámaras de aire para la  
reducción de costos en voladura en una mina  
a tajo abierto - Nazca 2021**

Jose Luis Cuchula Rodriguez  
Dilmer Adilio Huari Chulluncuy

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres y hermanos por brindarme todo su apoyo y confianza a lo largo de los años, por motivarme siempre a ser mejor en todo aspecto, a ser mejor persona en el ámbito personal y académico.

A mi universidad y a mis asesores por su constante esfuerzo por conseguir calidad en cada paso de esta tesis.

***Jose Luis***

A mi madre Silvia, a mi padre Justo y a mis hermanos, por darme el cariño y fuerza necesaria para superar dificultades y a Dios por guiarme en el camino del amor, apreciando cada proceso de mi vida profesional.

A nuestros docentes por compartir conocimientos y encender interés por buen desempeño profesional en servicio de la sociedad.

***Dilmer***

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de investigación lo dedico a mi familia, por apoyarme en mi andar académico y servirme de ejemplo en situaciones adversas.

***Jose Luis***

A mis padres y hermanos por educarme con valores y principios para poder convertirme en mi mejor versión cada día.

***Dilmer***

# ÍNDICE

Agradecimiento .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Índice.....	iv
Lista de tablas .....	viii
Lista de figuras.....	x
Resumen.....	xii
Abstract.....	xiii
Introducción.....	xiv
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>15</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....</b>	<b>15</b>
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	15
1.1.1. Planteamiento del problema.....	15
1.1.2. Formulación del problema .....	16
1.2. Objetivos.....	16
1.2.1. Objetivo general .....	16
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Justificación .....	17
1.3.1. Justificación.....	17
1.4. Hipótesis y descripción de variables .....	18
1.4.1. Hipótesis general de investigación .....	18
1.4.2. Hipótesis específicas.....	18
1.4.3. Variables .....	19
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>20</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
2.1. Antecedentes del problema .....	20
2.1.1. Antecedentes internacionales .....	20
2.1.2. Antecedentes nacionales .....	21
2.2. Generalidades de la mina .....	23
2.2.1. Ubicación y generalidades .....	23
2.2.2. Accesibilidad .....	24
2.3. Geología general .....	24

2.3.1. Geología regional .....	25
2.3.2. Geología local.....	25
2.3.3. Geología económica.....	27
2.4. Métodos de explotación .....	28
2.4.1. Tajo abierto .....	28
2.4.2. Ventajas .....	29
2.4.3. Desventajas.....	29
2.5. Ciclo de minado .....	29
2.5.1. Perforación .....	29
2.5.2. Voladura .....	30
2.5.3. Carguío.....	31
2.5.4. Acarreo.....	31
2.5.5. Equipos auxiliares .....	32
2.6. Bases teóricas .....	33
2.6.1. Cámara de aire.....	33
2.6.2. Optimización de voladura .....	35
2.7. Ciclo de minado .....	37
2.7.1. Perforación y voladura.....	37
2.7.2. Carguío.....	39
2.7.3. Acarreo.....	39
2.8. Análisis de la fragmentación .....	39
2.9. Costos perforación (resúmenes por mes) .....	40
2.10. Definición de términos básicos .....	42
2.10.1. Altura de banco .....	42
2.10.2. ANFO .....	42
2.10.3. ANFO pesado .....	43
2.10.4. Booster .....	43
2.10.5. Carga de fondo .....	44
2.10.6. Carguío .....	44
2.10.7. Desmonte.....	44
2.10.8. Diámetro de perforación.....	44
2.10.9. Emulsión .....	44
2.10.10. Equipos auxiliares .....	45
2.10.11. Espaciamiento.....	45

2.10.12. Explosivo de voladura .....	46
2.10.13. Fanel .....	46
2.10.14. Fragmentación .....	46
2.10.15. Iniciador.....	46
2.10.16. JK <i>Simblast</i> .....	47
2.10.17. Litología.....	47
2.10.18. Malla de perforación .....	47
2.10.19. Perforadora .....	48
2.10.20. Preminado .....	48
2.10.21. Roca.....	48
2.10.22. SF <i>WipFrag</i> .....	48
2.10.23. Sobreperforación.....	48
2.10.24. Taco .....	49
2.10.25. <i>Taponex</i> .....	49
2.10.26. Taladro .....	49
2.10.27. Voladura.....	49
2.10.28. Yacimiento.....	49
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>50</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>50</b>
3.1. Método y alcance de la investigación .....	50
3.1.1. Método de la investigación .....	50
3.1.2. Alcances de la investigación .....	51
3.2. Diseño de la investigación .....	51
3.2.1. Tipo de diseño de investigación .....	51
3.3. Población y muestra .....	52
3.3.1. Población.....	52
3.3.2. Muestra .....	52
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>53</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
4.1. Voladura mediante el método convencional .....	53
4.1.1. Voladura 1 (701-10).....	53
4.1.2. Voladura 2 (701-13).....	58
4.1.3. Voladura 3 (725-25).....	63
4.1.4. Voladura 4 (689-10).....	68

4.2. Voladuras mediante el uso de cámara de aire .....	73
4.2.1. Voladura 5 (689-06).....	73
4.2.2. Voladura 6 (689-05).....	78
4.2.3. Voladura 7 (689-07).....	82
4.2.4. Voladura 8 (677-07).....	87
4.3. Comparación de voladuras línea base (taladros sin cámara de aire) con línea mejorada (taladros con cámara de aire) .....	92
4.3.1. Análisis del factor potencia .....	92
4.3.2. Análisis de la granulometría (fragmentación) .....	94
4.3.3. Análisis de costos.....	95
Conclusiones.....	97
Recomendaciones.....	99
Lista de referencias .....	100
Anexos .....	102

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	19
Tabla 2. Perforación.....	37
Tabla 3. Malla de perforación estándar.....	37
Tabla 4. Malla de perforación estándar.....	38
Tabla 5. Insumos de voladura.....	38
Tabla 6. Resultados por taladro malla estándar.....	38
Tabla 7. Resultados por taladro malla con cámara de aire.....	38
Tabla 8. Capacidad de camiones fábrica.....	39
Tabla 9. Parámetros de carguío.....	39
Tabla 10. Acarreo.....	39
Tabla 11. Parámetros de perforación.....	41
Tabla 12. Costos unitarios de equipamiento.....	41
Tabla 13. Costos de perforación.....	42
Tabla 14. Datos de la columna explosiva (voladura 1).....	54
Tabla 15. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 1).....	56
Tabla 16. Datos de la columna explosiva (voladura 2).....	59
Tabla 17. Densidades de material y de la mezcla explosiva (voladura 2).....	61
Tabla 18. Datos de la columna explosiva (voladura 3).....	64
Tabla 19. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 3).....	65
Tabla 20. Datos de la columna explosiva (voladura 4).....	69
Tabla 21. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 4).....	70
Tabla 22. Datos de la columna explosiva (voladura 5).....	74
Tabla 23. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 5).....	75
Tabla 24. Datos de la columna explosiva (voladura 6).....	78
Tabla 25. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 6).....	80
Tabla 26. Datos de la columna explosiva (voladura 7).....	83
Tabla 27. Densidades del material de la mezcla explosiva (voladura 7).....	84
Tabla 28. Datos de la columna explosiva (voladura 8).....	88
Tabla 29. Densidades del material de la mezcla explosiva (voladura 8).....	90
Tabla 30. Costos fijos de voladura.....	95
Tabla 31. Costos de accesorios de voladura.....	95

Tabla 32. Costos de perforación .....	95
Tabla 33. Resumen de costos.....	95
Tabla 34. Costo por voladura .....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la unidad minera .....	24
Figura 2. Columna geológica generalizada del distrito de Marcona. ....	26
Figura 3. Explotación a tajo abierto .....	28
Figura 4. Perforadora Sandvik DR412i.....	30
Figura 5. Camión Kenworth T800.....	30
Figura 6. Pala de la marca Caterpillar del modelo 6040 fs .....	31
Figura 7. Camión de la marca Caterpillar de modelo 777 .....	31
Figura 8. Camión de la marca Caterpillar de modelo 785 C.....	32
Figura 9. Motoniveladoras de la marca Caterpillar del modelo 18H.....	32
Figura 10. Ubicación de cámaras de aire .....	33
Figura 11. Análisis de la fragmentación de roca. ....	36
Figura 12. Estructura del ANFO pesado. ....	43
Figura 13. Fases de la emulsión. ....	45
Figura 14. Modelo prototipo con JK Simblast.....	47
Figura 15. Taladro de producción (voladura 1).....	55
Figura 16. Plano de amarre (voladura 1).....	56
Figura 17. Análisis de fragmentación (voladura 1) .....	57
Figura 18. Taladro de producción (voladura 2).....	60
Figura 19. Planos de amarre (voladura 2) .....	61
Figura 20. Análisis de fragmentación (voladura 2) .....	62
Figura 21. Taladro de producción (voladura 3).....	65
Figura 22. Plano de amarre (voladura 3).....	66
Figura 23. Análisis de fragmentación (voladura 3) .....	67
Figura 24. Taladro de producción (voladura 4).....	70
Figura 25. Parámetros de perforación (voladura 4).....	71
Figura 26. Análisis de fragmentación (voladura 4) .....	72
Figura 27. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 5).....	75
Figura 28. Plano de amarre (voladura 5).....	76
Figura 29. Análisis de fragmentación (voladura 5) .....	77
Figura 30. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 6).....	79
Figura 31. Plano de amarre (voladura 5).....	80
Figura 32. Análisis de fragmentación (voladura 6) .....	81

Figura 33. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 7).....	84
Figura 34. Plano de amarre (voladura 7).....	85
Figura 35. Análisis de fragmentación (voladura 7) .....	86
Figura 36. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 8).....	89
Figura 37. Plano de amarre (Voladura 8) .....	90
Figura 38. Análisis de fragmentación (voladura 8) .....	91
Figura 39. Tonelaje roto vs. kilogramos de explosivo.....	93
Figura 40. Factor de potencia vs. kilogramos de explosivo.....	93
Figura 41. Fragmentación por cada voladura.....	94
Figura 42. Carguío de taladro.....	103
Figura 43. Perforadora Sandvik.....	103
Figura 44. Pala mecánica.....	104
Figura 45. Carguío de taladro.....	104
Figura 46. Uso del taponex .....	105
Figura 47. Taladros perforados .....	105
Figura 48. Minicargador .....	106

## RESUMEN

La tesis tiene como objetivo principal analizar el impacto del uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto en la ciudad de Nazca. Se utilizó como método la recopilación de informes anteriores, la medición de taladros como trabajo de campo y el análisis de fragmentación con el software *WipFrag*. Esta investigación fue de tipo aplicativo, teniendo un diseño experimental; asimismo, este estudio corresponde a uno cuantitativo. Se tomaron como muestra ocho voladuras en los meses de enero y febrero del 2021; la mitad de estas fueron realizadas mediante el método convencional, mientras que la otra mitad fueron con el uso de cámaras de aire *taponex*. Para la recolección de datos se tomaron lo registrado por el área de voladura. En todas las voladuras se midieron el factor potencia, la fragmentación y la cantidad de explosivos utilizados. Los resultados obtenidos indican que el uso de cámaras de aire *taponex* permite la optimización del proceso debido a que mejora el factor de potencia, permite obtener una fragmentación correspondiente a lo solicitado por el área de mina y, finalmente, reduce costos a la compañía. Esto significa que realizar una voladura con cámara de aire es favorable en términos económicos para la empresa minera, ya que representa un ahorro superior a \$ 1,400,000.00 anuales.

**Palabras claves:** cámara de aire, fragmentación, voladura

## ABSTRACT

The main objective of this research was to analyze the impact of the use of air chambers in the optimization of blasting in an open pit mine in the city of Nazca. The collection of previous reports, the measurement of holes as field work and the fragmentation analysis with the WipFrag software were used as methods. This research was of an applicative type, having an experimental design; likewise, this study corresponds to a quantitative one. Eight blasts were taken as a sample in the months of January and February 2021; half of these were carried out using the conventional method, while the other half were with the use of taponex air chambers. For data collection, what was recorded by the blasting area was taken. In all the blasts, the power factor, the fragmentation and the number of explosives used were measured. The results obtained indicate that the use of taponex air chambers allows the optimization of the process because it improves the power factor, allows obtaining a fragmentation corresponding to what is requested by the mine area and finally reducing costs to the company. This means that carrying out an air chamber blasting is favorable in economic terms for the mining company since it represents a saving of more than \$ 1,400,000.00 per year.

**Keywords:** air chamber, blastings, fragmentation

## INTRODUCCIÓN

Todos los procesos en el minado son importantes y complementarios para lograr el objetivo empresarial trazado, si se logra eficiencia en toda la actividad productiva se benefician todos los *stakeholders*. La tesis busca optimizar una parte esencial del ciclo de minado, que es la voladura mediante el uso de cámaras de aire *taponex*. La importancia de llevar a cabo un estudio de este tipo es que es necesario optar por la mejor opción que conlleven a optimizar recursos.

Se ha revisado bibliografía y existen varios estudios donde se usan cámaras de aire en voladuras, pero no fueron realizadas en minas de hierro y a tajo abierto. Por lo que, este trabajo precisa cuál sería el beneficio y efecto en los costos del uso de *taponex* en los taladros.

En el primer capítulo se plantea la problemática para definir cuáles serán los objetivos, se remarca la justificación que define los motivos para realizar la tesis y también se plantean las hipótesis. En el segundo capítulo se realiza la revisión bibliográfica y de antecedentes, se presentan las principales teorías y conceptos necesarios, así como la definición de términos. En el tercer capítulo se detalla la metodología empleada, especificando el tipo y diseño de investigación, también se detalla la población y muestra. En el cuarto capítulo se muestran los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones alcanzadas con la investigación, recomendaciones de los tesisistas, la lista de referencias y los anexos.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

#### **1.1.1. Planteamiento del problema**

A lo largo de la historia, la minería ha sido uno de los principales motores de la economía, y uno de los argumentos más poderosos de la riqueza del Perú. De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (Minem), a nivel mundial y latinoamericano, el Perú se ubica entre los primeros productores de oro, plata, cobre, plomo, zinc, hierro, estaño, molibdeno, entre otros, que tienen gran demanda en el mercado internacional. A nivel macroeconómico, esto representa una cifra significativa en las exportaciones, tributos y en la generación de empleo en el Perú (1).

El sector minero es responsable de 10% del PBI, de 60% de las exportaciones, 20% de ingresos fiscales, 16% de la inversión privada y 19% de los tributos pagados por empresas, según la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) (2).

Ica es una de las regiones más productivas del país. La región exporta minerales (hierro, zinc), la empresa minera en estudio produce 20 millones t/año de hierro (ISEM) (3). Las exportaciones de minerales en la

región Ica son de 40.8% del total, de las que 24.2% pertenecen a la exportación de hierro que equivale a \$ 978 millones para el 2019 (4). Siendo China el principal destino de exportación de hierro (4).

En la empresa minera Shougang Hierro Perú para el proceso de voladura, en mineral, se viene empleando el explosivo *Heavy Anfo 37* que es una mezcla de 30% emulsión y 70% ANFO, con una densidad de 1 gr/cc (5).

### **1.1.2. Formulación del problema**

#### **1.1.2.1. Problema general**

¿De qué manera influye el uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021?

#### **1.1.2.2. Problemas específicos**

¿Cómo influye el uso de cámaras de aire en el factor potencia para la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021?

¿Cuál es la influencia del uso de cámaras de aire en el grado de fragmentación para la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021?

¿De qué forma se reducen los costos de voladura con el uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nazca 2021?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Analizar la influencia del uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar la influencia del uso de cámaras de aire en el factor de potencia para la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto-Nasca 2021.
  
- b) Analizar el grado de fragmentación mediante el uso de cámaras de aire para la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021.
  
- c) Estimar la reducción de costos de voladura con el uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nazca 2021.

## **1.3. Justificación**

### **1.3.1. Justificación**

#### **1.3.1.1. Justificación social – práctica**

La tesis posee justificación social, debido a que presenta un aporte a la economía nacional, a través de una propuesta de cambio de método en un proceso esencial que permita mejores resultados económicos al sector minero, cuyos beneficios se trasladarían a los trabajadores, pobladores y ciudadanos en general.

Al mismo tiempo, tiene justificación práctica, ya que la empresa en estudio es una de las más grandes en el Perú. Entonces existe la necesidad de mejorar el desempeño de las voladuras para una mejor toma de decisiones en la etapa de perforación minera.

#### **1.3.1.2. Justificación metodológica**

La tesis presenta resultados que van a contribuir con métodos para analizar un5 proceso operativo en una empresa minera para servir de referencia a estudios posteriores validando la forma en que fueron realizados. Facilitará a futuros estudiantes y

profesionales con datos sobre el uso de cámaras de aire en operaciones de voladura en mineras a tajo abierto.

#### **1.3.1.3. Justificación para ingeniería**

La tesis se justifica debido a la importancia que presenta el proceso de voladura dentro de la primera etapa de trabajo en minas, siendo esta una de las principales actividades en la extracción. Por lo tanto, su optimización es esencial para el área de Operaciones. La utilización de cámaras de aire es una alternativa que permite la reducción de cantidad de mezcla explosiva; consecuentemente, se tendría una reducción de costos en explosivos y en costos de perforación. Asimismo, el uso de cámaras de aire en taladros ayuda a sostener columnas de explosivos o material inerte con absoluta seguridad, logrando mantener una fragmentación homogénea y que el rendimiento de equipos de acarreo no se vea afectado.

### **1.4. Hipótesis y descripción de variables**

#### **1.4.1. Hipótesis general de investigación**

El uso de cámaras de aire influye positivamente en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021.

#### **1.4.2. Hipótesis específicas**

- El uso de cámaras de aire influye positivamente en el factor potencia para la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021.
- El grado de fragmentación se mantiene con el uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nasca 2021.
- Los costos de voladura se reducen significativamente con el uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto - Nazca 2021.

### 1.4.3. Variables

#### 1.4.3.1. Variable dependiente

Optimización de voladura

#### 1.4.3.2. Variable independiente

Uso de cámaras de aire (*taponex*)

**Tabla 1. Operacionalización de variables**

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>
Cámaras de aire ( <i>taponex</i> )	El <b>taponex</b> <sup>®</sup> es un accesorio de plástico (polietileno) que cuenta con un diseño particular, esto permite crear las cámaras de aire en un taladro de voladura, su exclusivo diseño permite ser instalado sin la necesidad de aire comprimido, su forma es autosoportante.	Es un accesorio de voladura que forma un espacio de aire generado por medio del "taponamiento" del taladro, el que se puede ubicar en distintas partes dentro del taladro de la voladura.	- Altura - Ubicación - Dimensión
Optimización de voladura	Conjunto de procesos que se llevan a cabo con la finalidad de mejorar la voladura.	La optimización de la voladura implica un diagnóstico de las condiciones iniciales de cada pit y las restricciones de sus diferentes áreas. Se debe establecer una evaluación del diseño, así como unos controles de campo exhaustivos.	- Factor de potencia - Grado de fragmentación - Costos

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes del problema**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

En la tesis “*Aplicación de cámaras de aire en tronadura de producción de una mina de hierro*” (6), el objetivo fue mostrar cuantitativamente la variación en los parámetros de la detonación (velocidad y presión de detonación) producto de la presencia de una cámara de aire en el pozo, la idea de este trabajo es sentar bases para estudios posteriores y demostrar la factibilidad de la utilización de cámaras de aire en tronaduras de producción para mejorar los resultados de fragmentación y disminuir las eyecciones de taco, vibraciones y emanación de polvo, a medida que se disminuye el costo en utilización de explosivos. Para esto se plantea demostrar cuantitativamente que la velocidad de detonación y presión cambian a lo largo de este espacio, incluyendo mediciones de estas variables, además de resultados de fragmentación, eyecciones y vibraciones. A modo de conclusión, se refuerzan algunas teorías propuestas gracias a las mediciones de los parámetros de velocidad y presión. Se demuestra la factibilidad de la aplicación (al menos en minería de hierro) de cámaras de aire en los pozos de tronadura, en base a los resultados obtenidos (6).

En la tesis *“Evaluación del desempeño de los CAT en las tronaduras de escondida”* (7), el objetivo fue cuantificar el desempeño de las tronaduras con los conos activadores de tacos (CAT), en adelante **activadores**, la tesis, para superar esta limitación, se desarrolló y aplicó un modelo del comportamiento de las tronaduras basado en el desplazamiento de los tacos durante el tiempo de proceso. Su aplicación permitió correlacionar las distribuciones de fragmentación medidas en terreno con los niveles de energía efectiva disponible, en función del comportamiento de los tacos. El modelo desarrollado requirió para su conceptualización de algunos supuestos, siendo los más relevantes los que se indican a continuación: los sistemas explosivos de roca pierden energía al exterior debido, solamente, a la expansión de la cámara que contiene los gases generados por la detonación del explosivo. El trabajo de fragmentación de la roca es proporcional a la energía efectiva total disponible. Las pérdidas de energía se van dando a medida que avanza el frente de quiebre. Los resultados teóricos, en cuanto a la energía efectiva total entregada por el modelo, indicaron una buena correlación con los tamaños característicos de las distribuciones de fragmentación medidas en terreno. Esto avala al modelo como una herramienta promisoría para evaluar el desempeño de las tronaduras, y se pudo concluir, a partir de un ejercicio teórico realizado con una de las tronaduras de prueba, suponiendo condiciones de entrada similares que la energía efectiva total disponible en las tronaduras con activadores CAT, supera en una cifra del orden de un 35% a la del caso base. Asimismo, se puede inferir un 25% de menor consumo de explosivo, disponiendo de la misma energía efectiva total. Las ventajas técnicas y económicas detectadas en las pruebas con los CAT los convierte en una herramienta eficaz para mejorar el desempeño de las operaciones de tronadura (7).

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

En la tesis *“Reducción de costos de perforación y voladura aplicando la técnica de cámaras de aire en mina Shougang Nazca - Ica”* (8), el problema principal identificado dentro de esta operación unitaria es la baja productividad y, como consecuencia, el alto costo unitario en la

perforación de rocas de alta resistencia compresiva tales como la cuarcita, mineral primario (magnetita) y actinolita. El autor identificó tres grandes causas que son el alto consumo de brocas, baja eficiencia del proceso y bajo rango de penetración en las tres perforadoras eléctricas Sandvik 1190E. El autor, para reducir estos impactos y contribuir con un menor costo unitario de perforación en rocas de alta resistencia compresiva, se evaluó el comportamiento de estas variables según el tipo de roca perforada y se obtuvo un modelo matemático orientado a la geología de Marcona, que tiene como estructura base el modelo matemático realizado por el PhD Alan Bauer. Posteriormente al investigar el comportamiento de la perforación rotativa con broca tricónica, se efectuó la mejora en la aplicación de variables operativas (*pulldown*, velocidad de rotación, diámetro de perforación, etc.), la selección conveniente de los barrenos de perforación (brocas) y la reducción de horas improductivas de las perforadoras (8).

En la tesis “*Efecto de la cámara de aire en la voladura a tajo abierto para incrementar la tasa de excavación (Dig rate) en el tajo tapado oeste de minera Yanacocha, Cajamarca 2017*” (9), se explica y determina el efecto de la cámara de aire en la voladura a tajo abierto para incrementar la tasa de excavación (*Dig rate*) en el tajo tapado oeste de minera Yanacocha. Para el desarrollo de la investigación se utilizó el método científico, posteriormente, se comparó el costo por taladro usando *aquadeck*, *cartuflex* vs. taladro sin cámaras de aire, tomando en cuenta las consideraciones generales de altura de banco, mezcla explosiva, taco y diámetro del taladro; al no emplear cámaras de aire el costo / taladro es de US\$ 275.81, US\$246.94 y US\$244.84 para *cartuflex* y *aquadeck*, respectivamente. Anualmente se planifica volar 5000 taladros ahorrando con *cartuflex* US\$144,350.00 y con *aquadeck* US\$154,850.00 (9).

En la tesis “*Reducción del factor de potencia en el proceso de voladura mediante la aplicación de cámaras de aire en columna explosiva, en la compañía minera aurífera Santa Rosa S. A. - Comarsa*” (10), se infiere que con el uso de cámaras de aire en columna explosiva se

reducirá el factor de potencia en kg/t en el proceso de voladura en la compañía minera aurífera Santa Rosa S. A. Comarsa. Para el desarrollo de la investigación se utilizó el método científico y se determinó que se logró reducir el factor de potencia con la implementación de la cámara de aire en el taladro y se redujo el costo de voladura en US\$/TM (10).

En la tesis *“Efecto de las cámaras de aire en taladros de producción para mejorar la fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones por voladura en minería a tajo abierto en el norte del Perú, 2016”*, se determinó el efecto de las cámaras de aire en el fondo del taladro de producción, para mejorar la fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones en minería a tajo abierto, llegándose a concluir que el disparo con *taponex* obtuvo entre 20.83% a 24.96% de mejoras en la fragmentación del material para las mallas entre P20 a P80; por lo tanto, se concluye que existe un efecto del uso de la cámara de aire sobre la fragmentación del material, también se concluyó que el disparo con el uso de cámaras de aire en la columna explosiva reduce las vibraciones hasta un 58.30% frente a la voladura convencional que no utiliza cámaras de aire; por lo tanto, se concluye que existe un efecto del uso de la cámara de aire en la reducción de las vibraciones. Esta importante reducción de las vibraciones es fundamental porque evita la percepción de las comunidades aledañas sobre el daño de sus viviendas (11).

## **2.2. Generalidades de la mina**

### **2.2.1. Ubicación y generalidades**

La unidad minera donde se desarrolló la investigación está ubicada en la región de Ica, provincia de Nazca, distrito de Marcona a 420 km al norte de Lima y está situada a una altura de 800 m s. n. m.



**Figura 1. Localización de la unidad minera**

### **2.2.2. Accesibilidad**

Los accesos a la unidad minera en estudio, es por vía terrestre desde la ciudad de Nazca, a unos 52 km por la antigua Panamericana Sur, también se puede acceder a esta unidad partiendo desde el puerto de San Juan de Marcona, la distancia desde este punto es de 29.7 km.

### **2.3. Geología general**

El área donde se desarrolló el estudio está compuesta por yacimientos de grandes magnitudes de Fe y por yacimientos medianos de Cu, estas están incrustadas en rocas pelíticas de la formación Marcona, pertenecientes al Precámbrico Superior a Paleozoico Inferior y también se encuentran en rocas volcano sedimentarias de la formación Río Grande del Caloviano – Oxfordiano.

La geología que se puede encontrar en la zona está compuesta por dolomías y pelitas de la formación Marcona, superpuestas en discordancia angular con intrusiones magmáticas y rocas volcano sedimentarias

pertenecientes al grupo Río Grande, volcánicos de formación Jahuay que pertenece a la formación Kimmeridgiano Titoniano. Los volcánicos de la formación Río Grande, Jahuay y los intrusivos subvolcánicos que se presentan en la zona tiene afinidades alcalinas con shoshonítica, que es un fraccionamiento de clinopiroxeno, hornblenda y plagioclasa.

Los yacimientos de hierro pertenecientes a esta zona se distribuyen en 9 depósitos de grandes dimensiones y de 30 a 45 depósitos con pequeñas dimensiones, que están estratoligados de rumbo EW a NE, buzan de 35° a 65°. Los cuerpos mineralizados son mantos de magnetita, de grano fino, menores a 1 mm, hábito dodecaédrico y cuentan con una textura sacaroide.

### **2.3.1. Geología regional**

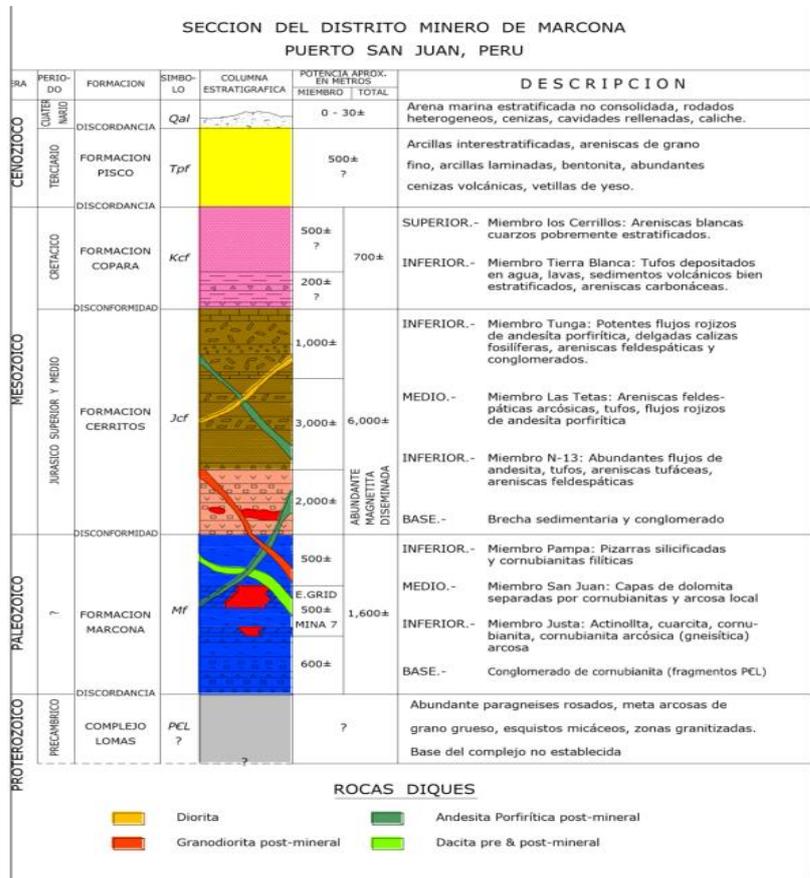
El área de estudio es una amplia meseta que forma una plataforma de erosión marina, la que se encuentra en la cadena costera, por el Oeste se encuentran 27 terrazas litorales, se formaron por el movimiento costanero desarrollado en el Tercio superior y Cuaternario. Por haber sido una zona de sedimentación no se presenta grandes variaciones topográficas, es así como se puede calificar como una penillanura donde se encuentran pequeñas colinas de altitudes mínimas y cubierto en su gran mayoría por encapado aluvial no consolidado.

La zona se encuentra dentro de la cordillera de la costa que es parte del gran batolito de granodiorita del Cretácico Superior, estos llegaron a intruir a metamórficos precámbricos, metasedimentos del carbonífero inferior y Jurásica.

### **2.3.2. Geología local**

El área está dentro de la cordillera de la costa que es formada por el batolito de granodiorita perteneciente al Cretácico Superior la que intruye en su mayoría a metamórficos que pertenecen al Precámbrico, en el lugar también existen variadas rocas intrusivas en forma de diques o capas, las que cortan las formaciones existentes, las intrusiones son generalmente postmineral, estas estructuras al combinarse con las fallas

generan estructuras complejas, todo esto gracias al movimiento orogénico andino perteneciente al cretácico superior y terciario inferior.



**Figura 2. Columna geológica generalizada del distrito de Marcona. Tomada del Área de Ingeniería**

### 2.3.2.1. Petrología

La composición de la roca caja es de hornfels filítico cuarzoso, filitas negras y colomítica. También se encuentra la presencia de cuerpos intrusivos como granodioritas, dacitas, diques básicos y andesitas que serán descritos a continuación.

### 2.3.2.2. Andesitas

Se presentan como *stok* y *sill*, con los siguientes rumbos NS, SE y NW, estas estructuras son posmineralización, petrográficamente se describen como andesitas porfíricas compuestas por plagioclasas de gran tamaño de un color negruzco grisáceo y en ocasiones ligeramente rosáceo.

#### **2.3.2.3. Diorita**

Estas rocas están presentes como diques con un rumbo NW, está compuesto por cuarzo y plagioclasas y su formación es posmineral.

#### **2.3.2.4. Granodiorita**

También se presenta en forma de diques con un rumbo NW, SE y NS tiene una textura fina, compuesta por plagioclasas, cuarzo y ortosa; como minerales secundarios se presenta epidotitas y clorita.

#### **2.3.2.5. Dacitas**

Se presenta como capas intrusivas y diques, es una roca de color rosado verdusco, compuesta por minerales opacos, andesina, clinopiroxenos y en una mínima cantidad hornblenda. Esta roca presenta una diferencia en comparación con las antes mencionadas, ya que es de formación pre y posmineral.

### **2.3.3. Geología económica**

En el distrito de Marcona existen 117 cuerpos de mineral en un territorio de 10 x 15 km, estos cuerpos mineralizados están en formaciones de sedimentarias del Jurásico y Paleozoico, los cuerpos mineralizados tienen zonamiento vertical; el mineral, inicialmente compuesto por magnetita y diseminados de sulfuros, ha sufrido oxidación y lixiviación por los diferentes climas y la presencia de aguas subterráneas.

El material lixiviado tiene una composición de 70% a 80% de hematita y en los lugares donde se contaba con abundante pirita la oxidación hizo que se formara magnetita residual y hematita ferrosa; por otro lado, donde había una presencia media de pirita se presenta hematita de color negro y, finalmente, en zonas donde la presencia de la pirita fue mínima la oxidación fue casi despreciable.

## 2.4. Métodos de explotación

### 2.4.1. Tajo abierto

El método de explotación por tajo abierto se caracteriza por tener un método de trabajo superficial y por los grandes volúmenes a mover, teniendo en cuenta que se debe mover una mayor cantidad de material estéril para obtener mineral, esta relación se llama *stripping ratio*. La relación antes mencionada es diferente en cada mina, ya que el departamento de ingeniería deberá analizar hasta qué punto la relación será beneficiosa para la operación minera.

Este tipo de explotación se desarrolla cuando el yacimiento mineral se encuentra a pocos metros de la superficie, tiene una cobertura pequeña o la estructura del yacimiento no permite que se desarrolle una explotación subterránea. Para desarrollar este tipo de explotación se emplea el uso de gran maquinaria minera como camiones mineros, perforadoras, palas cargadoras, camiones fábrica (donde se producen las mezclas de explosivo según sea el requerimiento), motoniveladoras, cargadores frontales, etc.



**Figura 3. Explotación a tajo abierto**

#### **2.4.2. Ventajas**

- Proporción baja de costos de extracción
- Condiciones más seguras de trabajo
- Eliminación de la acumulación de gases de voladura
- Eliminación de costosos métodos de soporte estructural
- Mayor volumen de producción

#### **2.4.3. Desventajas**

- Genera impacto visual
- Trabajo en la intemperie
- Trabajo en grandes extensiones de terreno
- Genera polvo tóxico
- Genera vibraciones

### **2.5. Ciclo de minado**

En la unidad minera donde se desarrolló la investigación, se despliegan cuatro actividades principales en el ciclo de minado, que son la perforación, voladura, carguío y limpieza, estas actividades son fundamentales en el ciclo de minado, ya que gracias a estos procesos se lleva a cabo la extracción de los minerales.

#### **2.5.1. Perforación**

En la unidad minera se utilizan cuatro perforadoras de la marca Sandvik DR412i que está diseñada para dar una penetración de confiabilidad y un retorno de la inversión para orificios rotatorios y con una broca tricónica de entre 216 y 311 mm (8,5 a 12,25 pulgadas), con una cabida de primera pasada de 18,3 m o 60 pies y una profundidad máxima de 33,5 o 110 pies. Para el mástil de una sola pasada, el mástil de múltiples pasadas ofrece una profundidad de primera pasada de 12 m o 39,5 pies con una profundidad máxima de 76 m o 245 pies en todos los diámetros de tubería recomendados.



**Figura 4. Perforadora Sandvik DR412i**

### **2.5.2. Voladura**

En la unidad minera se utilizan dos camiones *Kenworth T800*, módulo mezclador de explosivos marca *Tread Corporation*, modelo *Unibodi DCC +*. Con una capacidad de carga de 9 toneladas de emulsión matriz, 8 toneladas de nitrato de amonio y 340 galones de petróleo.



**Figura 5. Camión Kenworth T800**

### 2.5.3. Carguío

En la unidad minera se utilizan tres palas de la marca Caterpillar del modelo 6040 fs con una capacidad del cucharón de 22 metros cúbicos.



*Figura 6. Pala de la marca Caterpillar del modelo 6040 fs*

### 2.5.4. Acarreo

En la unidad minera se utilizan cuatro camiones de la marca Caterpillar de modelo 777 con una capacidad de carga 89.4 toneladas y con una velocidad máxima de 58 km/h.



*Figura 7. Camión de la marca Caterpillar de modelo 777*

También, en la unidad minera se cuenta con 36 camiones de la marca Caterpillar de modelo 785 C con una capacidad de carga de 136 toneladas y con una velocidad máxima de 56 km/h.



**Figura 8. Camión de la marca Caterpillar de modelo 785 C**

#### **2.5.5. Equipos auxiliares**

En la unidad minera se utilizan dos tractores de la marca Caterpillar del modelo 18H con una gama de potencia al volante 447 kW. En la unidad minera se utilizan dos motoniveladoras de la marca Caterpillar del modelo 18H con una gama de potencia neta 93 kW.



**Figura 9. Motoniveladoras de la marca Caterpillar del modelo 18H**

## 2.6. Bases teóricas

### 2.6.1. Cámara de aire

La cámara de aire se define como el espacio vacío generado en el interior del taladro, esto se genera gracias a la instalación del *taponex* en una ubicación estratégica dentro del taladro, puede estar ubicado en la parte alta, media o baja, esto depende del propósito que tendrá la voladura, se puede usar una o dos cámaras de aire dentro de un mismo taladro.

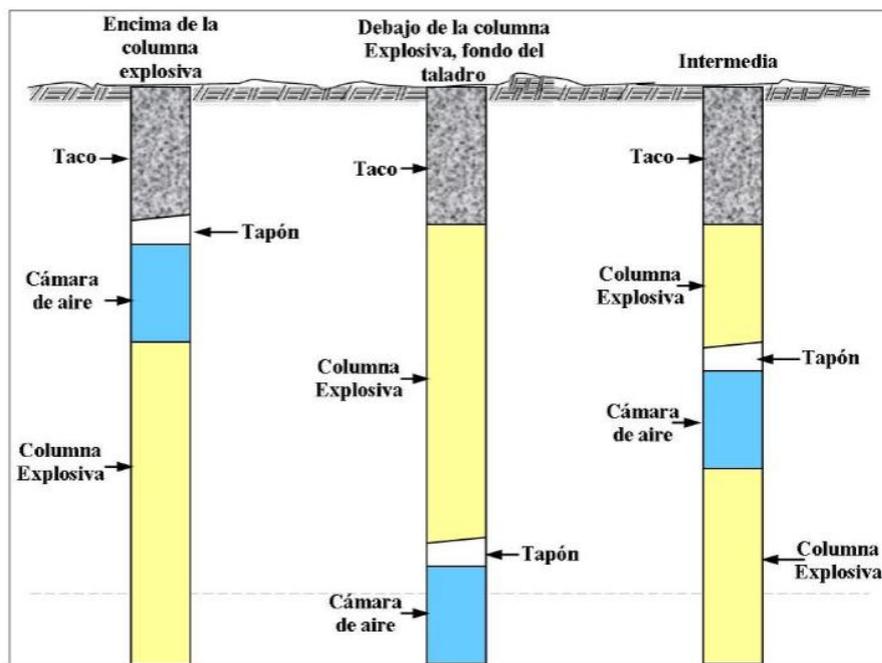


Figura 10. Ubicación de cámaras de aire

#### 2.6.1.1. Tipos o clasificación de cámara de aire

##### A) Neumáticos

En este tipo se tendrá que ubicar la cámara de aire en una zona estratégica para, posteriormente, inyectar aire desde la superficie o, de lo contrario, en el interior del taladro se instalará un tanque de aire comprimido, que se activa antes de bajar al taladro y se detendrá cuando alcance la altura requerida. Este método está en desuso en la actualidad.

## **B) Químicos**

En este tipo la cámara de aire será generada por reacciones químicas, que producirán gases al interior del taladro.

### **Ventajas:**

- No se necesita el compresor de aire, las bolsas se inflarán automáticamente gracias a la reacción química.
- No hay fugas de aire gracias a que la bolsa viene sellada herméticamente desde su fabricación.
- No hay elevadas temperaturas durante el proceso de inflado.
- No es un producto cancerígeno.

## **C) Aerosoles**

En este caso se usa un atomizador, que se infla del tamaño del taladro, son elaborados con materiales de alta excelencia que se ensamblan según las normas de cuidado comprometido del medio ambiente. El promotor de aerosoles está clasificado como no explosivo por las exigencias de la ONU, a discrepancia de los gases refrigerantes del tipo que emiten gases de efecto invernadero de gran importancia cuando se expone al calor, como el encontrado en la limpieza. Los tamaños de bolsas se han calculado para reducir el stock al imperceptible de los límites permisibles. El taladro se llena según las indicaciones de ingeniería, asimismo, se calculan para avalar un beneficio superior de la inflación y cuenta con un precio pequeño para los usuarios.

## **D) Mecánicos**

Los taladros de tipo mecánico son los que utilizan un medio adicional para generar las cámaras de aire, en la presente investigación se utilizó el *taponex* como medio físico para generar cámaras de aire al interior del taladro, es decir, gracias a este accesorio se puede separar la columna de explosivo con el taco.

La disposición del *taponex* dentro del taladro se dará de acuerdo a los estudios que realice el área de Ingeniería, podrán ser distribuidos para generar una, dos o hasta tres cámaras de aire.

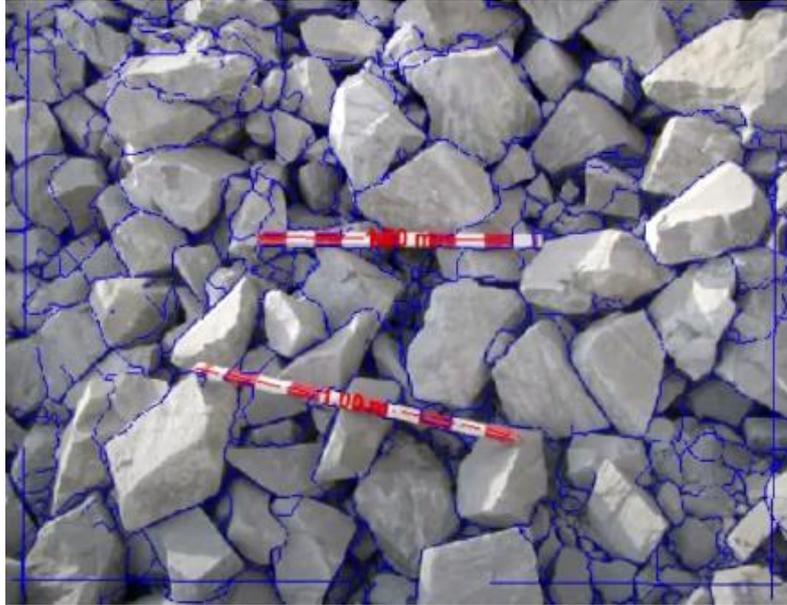
### **2.6.2. Optimización de voladura**

Se da cuando se implementan procesos que ayuden a la mejora de la voladura, esta deberá cumplir con los siguientes parámetros:

- El proceso de voladura está relacionado directamente con los trabajos de perforación, es aquí donde se debe tener un adecuado consumo de explosivos y una buena disposición de estos, esto se conseguirá gracias a las aplicaciones de ingeniería donde se hace un análisis detallado de la malla de perforación, el tipo y cantidad de explosivo a usarse.
- Otro parámetro de voladura es el carguío de la columna explosiva, es en este proceso donde se emplean las cámaras de aire para generar un ahorro del consumo de explosivo, ya que se tendrá un menor volumen cubierto por explosivo

#### **2.6.2.1. Fragmentación**

La fragmentación de la roca inicia con el ciclo de minado para la recuperación del mineral o desmonte, al reducir el tamaño de roca se está contribuyendo a que las siguientes etapas de minado se den con facilidad, ya que se podrá transportar la roca de una manera óptima para luego pasar a una etapa de molienda. Para fragmentar una roca se podrá hacer uso de ANFO, ANFO pesado, dinamita, emulsión, etc. Para la tesis se hizo uso de ANFO pesado en una mezcla de 37 y para el análisis de la fragmentación se usa el programa SFT *WipFrag*.



**Figura 11. Análisis de la fragmentación de roca. Tomada del Programa WipFrag**

#### **2.6.2.2. Factor de potencia**

Según el manual de perforación y voladura de exsa la relación existente entre la carga total de explosivo usado en la voladura versus la cantidad de toneladas métricas extraídas, cuya fórmula se detalla a continuación.

$$FP = \frac{ExpTl}{TNtl}$$

**Donde:**

FP: factor de potencia (kg/t)

ExpTl: cantidad de explosivo utilizado por taladro (kg)

TNtl: toneladas extraídas por taladro (t)

#### **2.6.2.3. Costos de voladura**

La voladura es un proceso elemental dentro de la minería, ya que gracias a este proceso se logra reducir de tamaño la roca para lograr optimizar el carguío, acarreo y el chancado. En el proceso de minado en una mina superficial, los costos de voladura representan un porcentaje significativo en los gastos

operacionales, ya que se invierte en mano de obra especializada, materiales y equipos.

El costo de voladura se refleja en el valor monetario que se invierte para producir el bien deseado, este valor se calcula con la suma de todos los costos inmersos entre los bienes totales producidos, estos costos son fundamentales para conocer los siguientes parámetros:

- Control y planeamiento
- Control de administración
- Producción
- Elección de alternativas alternas

## 2.7. Ciclo de minado

### 2.7.1. Perforación y voladura

El proceso de perforación y voladura en la unidad minera se desarrolla bajo los siguientes parámetros:

**Tabla 2. Perforación**

Maquinaria	Sandvik DR412i
Guardia	12 horas
Horas efectivas	10.2 horas
Taladros perforados	24 tal/guardia
Metros perforados	324 m/guardia
Eficiencia de perforación	85%

**Tabla 3. Malla de perforación estándar**

Diámetro de perforación	11 in
Altura de banco	12 m
Burden	6.5 m
Espaciamiento	7.5 m
Sobreperforación	1.2 m
Taco	7 m
Altura de carga de fondo	6.2 m
Densidad del material	2.74

**Tabla 4. Malla de perforación estándar**

Diámetro de perforación	<b>11 in</b>
Altura de banco	12 m
Burden	6.5 m
Espaciamiento	7.5 m
Sobreperforación	1.2 m
Taco	6.5 m
Altura de cámara de aire	1 m
Densidad del material	2.74
Altura de carga de fondo	5.7 m

**Tabla 5. Insumos de voladura**

Explosivo	<b>Heavy ANFO 37</b>
Porcentaje de emulsión	30%
Porcentaje de ANFO	70%
Densidad de mezcla	1.04 g/cm <sup>3</sup>
Carga lineal de la mezcla	63.8 kg/m
Iniciador	Booster 1Lb

**A) Cálculo de factor de potencia (FP)**

$$FP = \frac{ExpTl}{TNtl}$$

ExpTl: cantidad de explosivo utilizado por taladro (kg)

TNtl: toneladas extraídas por taladro (t)

**Tabla 6. Resultados por taladro malla estándar**

Explosivo utilizado	<b>349.92 kg</b>
Toneladas extraídas	1603 t
Factor potencia	0.27

**Tabla 7. Resultados por taladro malla con cámara de aire**

Explosivo utilizado	<b>321.70 kg</b>
Toneladas extraídas	1603 t
Factor potencia	0.23

### 2.7.2. Carguío

El proceso de carguío en la unidad minera se desarrolla mediante el uso de camiones fábrica de explosivos, que mezclan los insumos necesarios en las proporciones correctas para obtener una adecuada proporción. A continuación, se presentan los valores correspondientes:

**Tabla 8. Capacidad de camiones fábrica**

Emulsión matriz	9 t
Petróleo	340 gal
Nitrato de amonio	8 t

**Tabla 9. Parámetros de carguío**

Velocidad de descarga	450 kg/min
Carguío por taladro	1.2 min
Tiempo de posicionamiento	1 min

### 2.7.3. Acarreo

El proceso de acarreo en la unidad minera se desarrolla con la ayuda de la pala frontal modelo CAT 6040 fs y se da bajo los siguientes parámetros:

**Tabla 10. Acarreo**

	CAT 777D	CAT 785C
Capacidad	60.5 m <sup>3</sup>	91 m <sup>3</sup>
Carga completa	3 cucharadas	4 cucharadas
Tiempo de carga	2.5 min	3.5 min
Ciclo (tajo - botadero)	50 min	50 min

## 2.8. Análisis de la fragmentación

En la gran minería el análisis de la fragmentación resulta ser un parámetro muy importante, ya que genera mayores rendimientos en los equipos o retrasos en ellos, por lo que para la presente investigación se trabajó con el modelo de Kuz Ram, este modelo relaciona los parámetros de burden y granulometría. El tamaño medio de la roca se expresa por la siguiente ecuación:

Tamaño medio de roca  $X_{50}$

$$X_{50} = A \left( \frac{V_0}{Q} \right)^{0.8} Q^{\frac{1}{6}} \left( \frac{1.15}{E_r} \right)^{\frac{19}{30}}$$

Tomada del análisis de fragmentación

**Donde:**

$X_{50}$ : tamaño medio de la roca fragmentada (cm)

A: factor de roca

$V_0$ : volumen de roca removida por una perforación ( $m^3$ )

Qt: kilogramos de explosivos de TNT en el pozo

Q: kilos de explosivo

$E_r$ : potencia relativa al ANFO en peso

Para poder desarrollar la ecuación antes planteada se tendrá que relacionar las siguientes ecuaciones:

$$A = 0,06 * (RMD + JF + RDI + HF)$$

**Donde:**

A: factor de roca

RMD: descripción del macizo rocoso

JF: JPS + JPA

JPS: espaciamiento de juntas verticales

JPA: ángulo plano de inclinación

RDI: influencia de la densidad

HF: factor de dureza

## 2.9. Costos perforación (resúmenes por mes)

Los costos de perforación son un parámetro fundamental en el proceso de voladura, los costos son valores financieros destinados para la producción en un determinado tiempo. El costo de perforación resulta ser uno de los más

influyentes, ya que aquí se combinan relaciones de costos fijos y variables, además, a raíz de esta operación se da inicio al planeamiento de corto y largo plazo.

La perforación se realiza con una cantidad de taladros determinados por el área de Ingeniería, en ubicación estratégica y con una cantidad de explosivo óptima, la actividad de perforación es la que llega a tener un costo más elevado, ya que se ven involucrados diversos factores, que incluyen costos variables, una de las variables aleatorias es el macizo rocoso. La perforación tiene que ser óptima, cumpliendo los requerimientos indicados, porque de no elaborarse de la forma correcta, el resultado final saldrá defectuoso.

Los accesorios de voladura forman parte de los costos variables, estos están relacionados con las dimensiones del taladro, el tipo de roca y el método de voladura.

A continuación, se presentan los valores obtenidos en la unidad minera:

**Tabla 11. *Parámetros de perforación***

	<b>Taladro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cant.</b>
1	Burden m	m	6.5
2	Espaciamiento m	m	7.5
3	Altura de banco m	m	12
4	Sobreperforación m	m	1.2
5	Densidad de la roca gr/cc	Gr/cc	2.74
6	Toneladas rotas / taladro	Un	1603

**Tabla 12. *Costos unitarios de equipamiento***

<b>Costos fijos</b>			
<b>Ítem</b>		<b>Unidad</b>	<b>Precio (\$)</b>
1	Perforación	ML	4.4
2	Promedio del costo del explosivo <i>Heavy-ANFO 37</i>	kg	0.8
3	Iniciador booster de pentolita 2 lb	Pza.	7
4	Detonador no eléctrico 800 m / 18 m	Pza.	2.8

**Tabla 13. Costos de perforación**

Perforación			
Ítem		Unidad	Precio (\$)
1	Costo taladro perforado	m	58080
2	Toneladas rotas/taladro	un	1603
3	Costo perf. / t		0.0362

## 2.10. Definición de términos básicos

### 2.10.1. Altura de banco

“Distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso). La altura es en función del equipo de excavación y carga, del diámetro de perforación, de la resistencia de la roca de la estructura geológica y estabilidad del talud, de la mineralización y de aspectos de seguridad. En un equipo de carga y acarreo son determinantes la capacidad volumétrica (m<sup>3</sup>) y la altura máxima de elevación del cucharón, además de su forma de trabajo (por levante en cargadores frontales y palas rotatorias o por desgarrar hacia abajo en retroexcavadoras)” (12).

Se puede hallar con la siguiente fórmula:

$$H = 10 + (0,57 \times (C - 6))$$

**Donde:**

H: altura de banco

C: es la capacidad de cucharón de la excavadora (m<sup>3</sup>)

### 2.10.2. ANFO

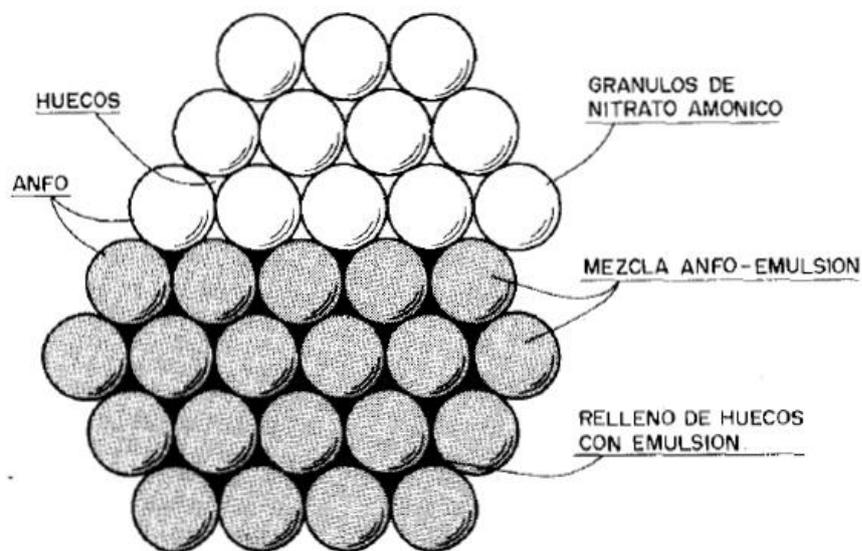
“En su generalidad se componen de nitrato de amonio sensibilizado por un agregado orgánico, líquido o sólido generalmente no explosivo. El nitrato debe ser perlado y suficientemente poroso para garantizar la absorción y retención del agregado combustible” (12).

“Su velocidad de detonación es relativamente baja por lo que son poco brisantes, pero la natural lentitud de su reacción les permite generar

un buen volumen de gases, por lo que son preferentemente expansores o empujadores. Su mayor limitación es la nula resistencia al agua” (12).

### 2.10.3. ANFO pesado

“En la tecnología actual de voladuras es indudable que el ANFO representa el explosivo básico, por ello se han realizado diversos intentos hacia la mayor energía de este compuesto y es así como nace el ANFO pesado, que es una mezcla de emulsión base con ANFO” (13).



**Figura 12. Estructura del ANFO pesado. Tomada del Manual de perforación y voladura**

### 2.10.4. Booster

“Basadas en el principio Monroe de cargas cónicas que al detonar forman un dardo que penetra al suelo con velocidades de 5 000 a 7 000 m/s, fabricados con alto explosivo, denso, colado, moldeado con su base ahuecada, todo dentro de un envase plástico. Se colocan sobre el suelo en lugares donde no se puede perforar y, usualmente, en la disposición de pozos múltiples (donde varias cargas superficiales distribuidas ordenadamente sustituyen a un taladro normal). Detonan directamente con el fulminante, ya que llevan su propio cebo interior” (12).

### **2.10.5. Carga de fondo**

“Es la carga explosiva de mayor densidad y potencia requerida al fondo del taladro para romper la parte más confinada y garantizar la rotura al piso, que junto con la sobreperforación, mantener la razante, evitando la formación de resaltos o lomos y también limitar la fragmentación gruesa con presencia de bolones” (12).

### **2.10.6. Carguío**

“Una vez realizada la voladura de un material, y establecidas las características de dicho material en el polígono correspondiente, el polígono queda dispuesto para su minado en correspondencia con el plan de corto plazo” (13).

### **2.10.7. Desmonte**

“El desmonte de mina es el material estéril o mineral de baja ley (con una ley de mineral que se encuentra por debajo del nivel económico conocido en minería como *cut off* que se obtiene al momento de realizar el corte de mineral en la operación de mina o que es obtenido como material de desbroce para acceder al mineral. La relación entre los volúmenes de desmonte y mineral se denomina *stripping*, de manera que si se trata de un *stripping* 3:1 representa 3 TM de desmonte por TM de mineral y esa es la nomenclatura que se usa normalmente en la industria” (14).

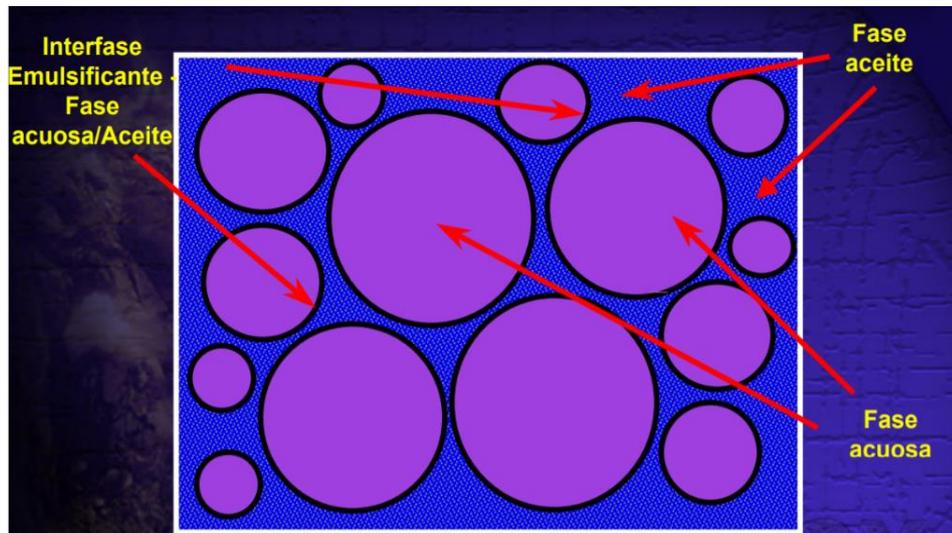
### **2.10.8. Diámetro de perforación**

Es el tamaño del diámetro de los taladros de la malla de perforación, estos son realizados con diferentes equipos de perforación mecanizada, que hacen agujeros en la roca con un área circular, a una profundidad que el área de Ingeniería lo indique.

### **2.10.9. Emulsión**

“Sistema que contiene dos fases líquidas inadmisibles entre sí, una de las que se dispersa como pequeñas gotas (fase discontinua) dentro de

la otra (fase continua). Este sistema requiere además otras sustancias (emulsificantes) para mejorar su estabilidad” (15).



*Figura 13. Fases de la emulsión. Tomada de Enaex*

#### **2.10.10. Equipos auxiliares**

“Se incluyen equipos auxiliares que no son directamente responsables de la producción, pero se necesita su programación regular en la mina para trabajos de mantenimiento de vías de acarreo, mitigación del polvo, perfilado de taludes, conformación o empuje en las zonas del WRF y TMF, etc.” (16).

#### **2.10.11. Espaciamiento**

“Es la distancia entre taladros de una misma fila que se disparan con un mismo retardo o con retardos diferentes y mayores en la misma fila. Se calcula en relación con la longitud del burden, a la secuencia de encendido y el tiempo de retardo entre taladros” (12).

“Al igual que con el burden, espaciamentos muy pequeños producen exceso de trituración y craterización en la boca del taladro, lomos al pie de la cara libre y bloques de gran tamaño en el tramo del burden. Por otro lado, espaciamentos excesivos producen fracturación inadecuada, lomos al pie del banco y una nueva cara libre frontal muy irregular” (12).

#### **2.10.12. Explosivo de voladura**

“Sustancias explosivas detonantes usadas en minería, construcción y tareas similares. Los explosivos de voladura pueden contener componentes inertes tales como diatomita y otros ingredientes menores, como agentes colorantes y estabilizadores” (17).

#### **2.10.13. Fanel**

“El fanel es un sistema eficaz de iniciación para uso en minería subterránea, superficial y obras civiles, que ofrece los beneficios de sincronización sin riesgo, eliminando toda posibilidad de conexiones erróneas. Está compuesto por el fulminante 12, un tubo de choque etiqueta y un conector plástico tipo J” (18).

#### **2.10.14. Fragmentación**

“La fragmentación de rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción”. Este mecanismo aún no está plenamente definido, existiendo varias teorías que tratan de explicarlo entre las que se mencionan (12):

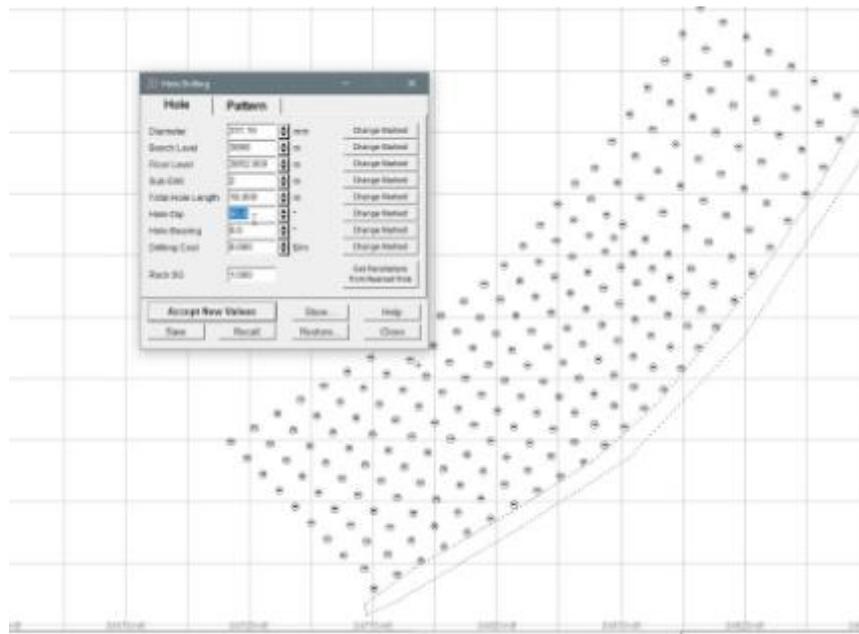
- Por reflexión
- Por expansión de gases
- Por ruptura flexural
- Por cizallamiento
- Por craterización
- Liberación súbita de gases
- Nucleación de fracturas en fallas

#### **2.10.15. Iniciador**

“Son aquellos cuya misión es iniciar la detonación de una masa explosiva, ejemplos de este tipo de explosivos son los detonadores (a fuego o eléctricos) e iniciadores (*boosters*)” (19).

### 2.10.16. JK Simblast

“Es una potente herramienta para desarrollar trabajos de simulación asociados a perforación y voladura. Es de mucha importancia manejar este tipo de herramientas hoy en día, ya que la tecnología pasa a ser una ayuda importante en el desarrollo y análisis de diversas operaciones mineras y por lo que su uso se hace indispensable para alcanzar objetivos en forma rápida y eficiente” (20).



**Figura 14. Modelo prototipo con JK Simblast. Tomada de JK Simblast**

### 2.10.17. Litología

“Conjunto de caracteres petrográficos de una masa de rocas que se caracterizan por formaciones, estratos y otros” (13).

### 2.10.18. Malla de perforación

“La malla de perforación y voladura se refiere a la distribución de los taladros con carga, en esta distribución se toman las dimensiones del burden x espaciamiento. En el trazo de los taladros en una voladura de bancos la secuencia de salida puede generar mallas del tipo cuadrada, rectangular y alterna. También se toma en cuenta las diferentes formas del amarre de los accesorios de voladura y diferentes tiempos de

encendido, de modo que permita tener como resultado la fragmentación adecuada” (21).

#### **2.10.19. Perforadora**

Agujereador hidráulico para perforar las rocas formando agujeros de diámetro pequeño o grande, que serán utilizados para la deposición de explosivo o a la instalación de pernos de anclaje para la roca.

#### **2.10.20. Preminado**

“La etapa del preminado consiste en la remoción del material sin valor, con la finalidad de exponer el mineral. Para ello, se aplican las operaciones unitarias de perforación, voladura, carguío y acarreo” (22).

#### **2.10.21. Roca**

Cualquier agregado o masa mineral formado naturalmente en la corteza terrestre (23).

#### **2.10.22. SF *WipFrag***

“*WipFrag* es un software versátil de análisis de la fragmentación para tener a la mano en la computadora de escritorio, el dispositivo móvil o la tableta. Tiene las herramientas necesarias para recopilar datos históricos, establecer una línea de base estadística y hacer un seguimiento de los cambios sutiles a lo largo del proceso de optimización para que pueda tomar decisiones basadas en hechos en lugar de en la teoría” (20).

#### **2.10.23. Sobreperforación**

La sobre perforación “J” es la longitud de barreno por debajo del nivel del piso que se necesita para romper la roca a la altura del banco y lograr una fragmentación y desplazamiento adecuado que permita al equipo de carga alcanzar la cota de excavación prevista (10).

#### **2.10.24. Taco**

“El taco es el colmado de la porción superior del taladro con material estéril. Su tarea es la de contener los gases, producto de la detonación, fracciones de segundos; suficientes para impedir que los gases fuguen por la entrada del taladro, y que de esta manera, trabaje por completo en el proceso de la fragmentación de la roca” (10).

#### **2.10.25. *Taponex***

Es un accesorio especialmente diseñado para asegurar la creación y aplicación de ondas tensionales en el medio rocoso circundante al taladro cargado con explosivo, dando como origen el método de voladura tensional. Su peculiar diseño producto de numerosas pruebas en campo y su construcción en plástico de alta resistencia, aseguran que el *taponex* quede finalmente en la posición deseada, esto garantiza una instalación simple y rápida (10).

#### **2.10.26. Taladro**

“Es el espacio que se crea en la roca gracias al proceso de perforación, este espacio cuenta con una inclinación, diámetro y longitud” (11).

#### **2.10.27. Voladura**

“Se define a la voladura como la disposición de un grupo de barrenos que luego serán cargados con una cantidad de explosivos para poder realizar la fragmentación de las rocas, con una granulación deseada, también se puede acotar que voladura también es conocido con el nombre de tronadura en otros países” (11).

#### **2.10.28. Yacimiento**

Es una acumulación natural de una sustancia mineral o fósil, cuya concentración excede el contenido normal de una sustancia en la corteza terrestre (que se encuentra en el subsuelo o en la superficie terrestre) y cuyo volumen es tal que resulta interesante desde el punto de vista económico, utilizable como materia prima o como fuente de energía (22).

## **CAPÍTULO III METODOLOGÍA**

### **3.1. Método y alcance de la investigación**

#### **3.1.1. Método de la investigación**

##### **3.1.1.1. Método general**

Este método se usa para medir cuantitativamente las variables de una población con el fin de obtener índices matemáticos, correlación, porcentajes y frecuencias. Para el desarrollo de la tesis se utilizó el método científico y es de enfoque cuantitativo.

##### **3.1.1.2. Métodos específicos**

###### **A) Recopilación de informes anteriores**

Este estudio tomó trabajos realizados sobre este tema para obtener teoría relacionada.

###### **B) Trabajo de campo**

Se realizó la medición de taladros; luego de ello, el primado de taladros, el carguío de taladros con explosivo; después, se hizo la instalación de la cámara de aire y finalmente se realizó el tapado de taladros.

### **C) Trabajo de gabinete**

Como primer paso se hizo el diseño de carguío de taladros con explosivos, utilizando los siguientes programas: el JKSimBlast para la realización de diseño de amarre o la conexión de taladros. Posteriormente, se utilizó el software *WipFrag* para analizar fragmentación postvoladura.

### **D) Resultados**

Los resultados se analizaron con los datos obtenidos mediante el software *WipFrag*, ya que mostró los resultados de ambos métodos de voladura estudiados (sin cámara de aire / mediante el uso de cámara de aire). También, se analizaron los reportes de factibilidad de excavación de los equipos de carguío a los camiones de acarreo.

## **3.1.2 Alcances de la investigación**

### **3.1.2.1. Tipo de investigación**

La teoría existente sobre el uso de cámaras de aire en la columna explosiva en el proceso de voladura sirvió para responder el planteamiento específico en una mina que extrae hierro. Conforme a la teoría revisada, esta investigación se clasifica como tipo aplicada.

### **3.1.2.2. Nivel**

Este estudio es aplicativo, ya que se tomaron datos del antes y después de aplicar cierto conocimiento sobre algo buscando una solución práctica a un problema.

## **3.2. Diseño de la investigación**

### **3.2.1. Tipo de diseño de investigación**

Una investigación experimental es aquella que se realiza mediante la manipulación deliberada de variables, para posteriormente analizarlos. Este estudio es experimental.

### **3.3. Población y muestra**

#### **3.3.1. Población**

La población está conformada por la cantidad de 192 voladuras que se realizan en todo el año (16 voladuras al mes).

#### **3.3.2. Muestra**

Es no probabilística, teniendo un muestreo por conveniencia, que es de la siguiente manera: se tomaron datos de 8 voladuras en un lapso de 15 días. Las cuatro primeras voladuras fueron realizadas de manera convencional, es decir, sin el uso de cámaras de aire; mientras que las cuatro siguientes voladuras fueron con cámaras de aire.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos después de haber realizado la investigación correspondiente en la unidad minera ubicada en Marcona – Nazca. Detallando las mejoras o cambios de los siguientes ítems: factor de potencia, fragmentación y costos.

#### **4.1. Voladura mediante el método convencional**

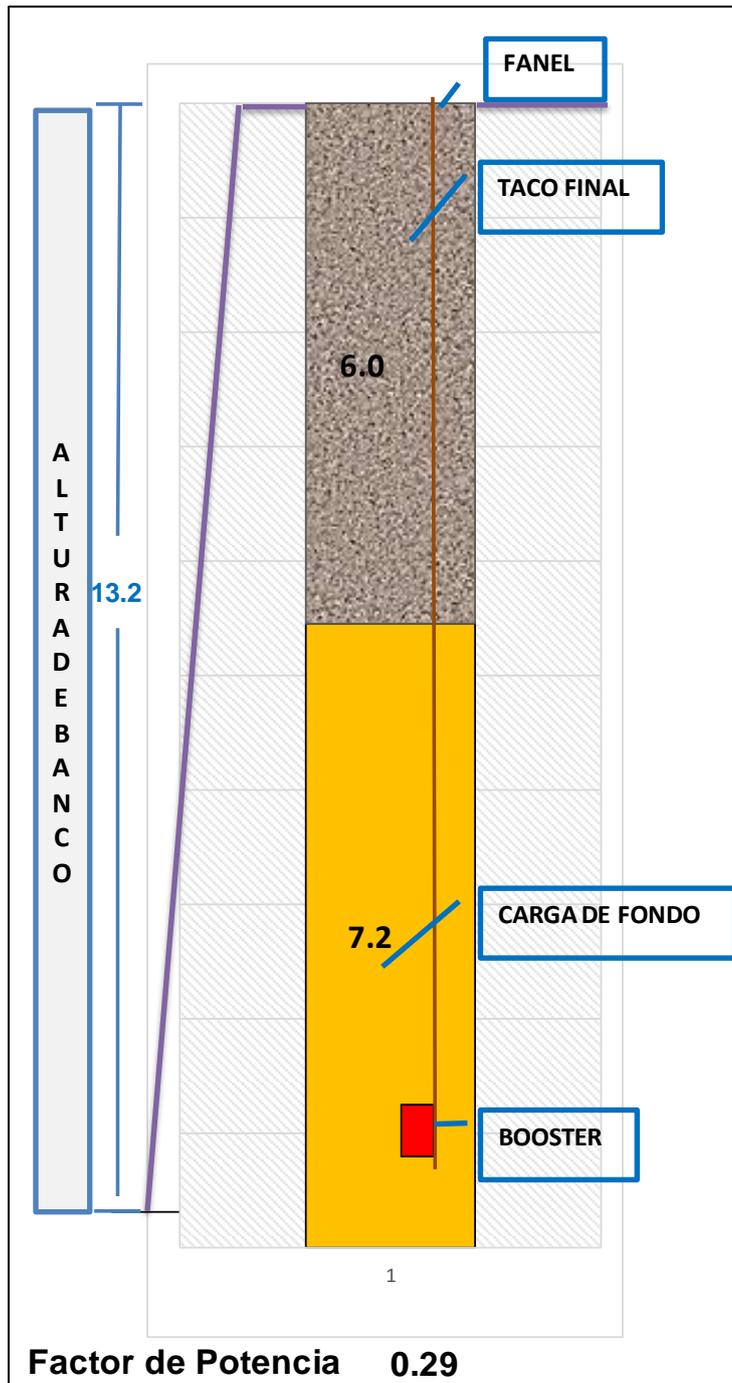
##### **4.1.1. Voladura 1 (701-10)**

###### **4.1.1.1. Antecedentes**

Esta voladura se realizó el 29 de enero del 2021. Se cargaron 225 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos y se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 103 356 kg; además, se usó 225 *boosters* de 1 lb. La columna explosiva está compuesta por 7.5 metros de carga de explosivo y un taco de 6 metros, cabe especificar que se utilizó de taco el detrito de la misma perforación.

**Tabla 14. Datos de la columna explosiva (voladura 1)**

DISEÑO DE CARGA			
Diámetro de perforación(plg.)	<b>11</b>		
Altura de banco(mts.)	<b>12</b>		
Burden(mts.)	<b>6.5</b>		
Espaciamiento(mts.)	<b>7.5</b>		
Sobreperforación(mts.)	<b>1.2</b>		
Taco final(mts.)	<b>6.0</b>		
Taco intermedio(mts.)			
Altura de carga de fondo(mts.)	<b>7.2</b>		
Altura de carga de columna			
Densidad del material	<b>2.74</b>		
Toneladas por taladro(tn)	1603		
Metro cúbicos por taladro(m3)	585		
Densidad de Mezcla(g/cm3)	<b>1.04</b>		
Carga Lineal Mezcla(kg./m)	63.8		
MEZCLA	EMULSION	ANFO	
ANFO	0%	0%	
HA-19	10%	90%	
HA-28	20%	80%	
HA-37	30%	70%	459.37
HA-46	40%	60%	
HA-55	50%	50%	
HA-64	60%	40%	
Booster			<b>1</b>
Fanel			<b>1</b>
Factor de Potencia (kg/tn)			<b>0.29</b>



*Figura 15. Taladro de producción (voladura 1)*

Tabla 15. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 1)

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-

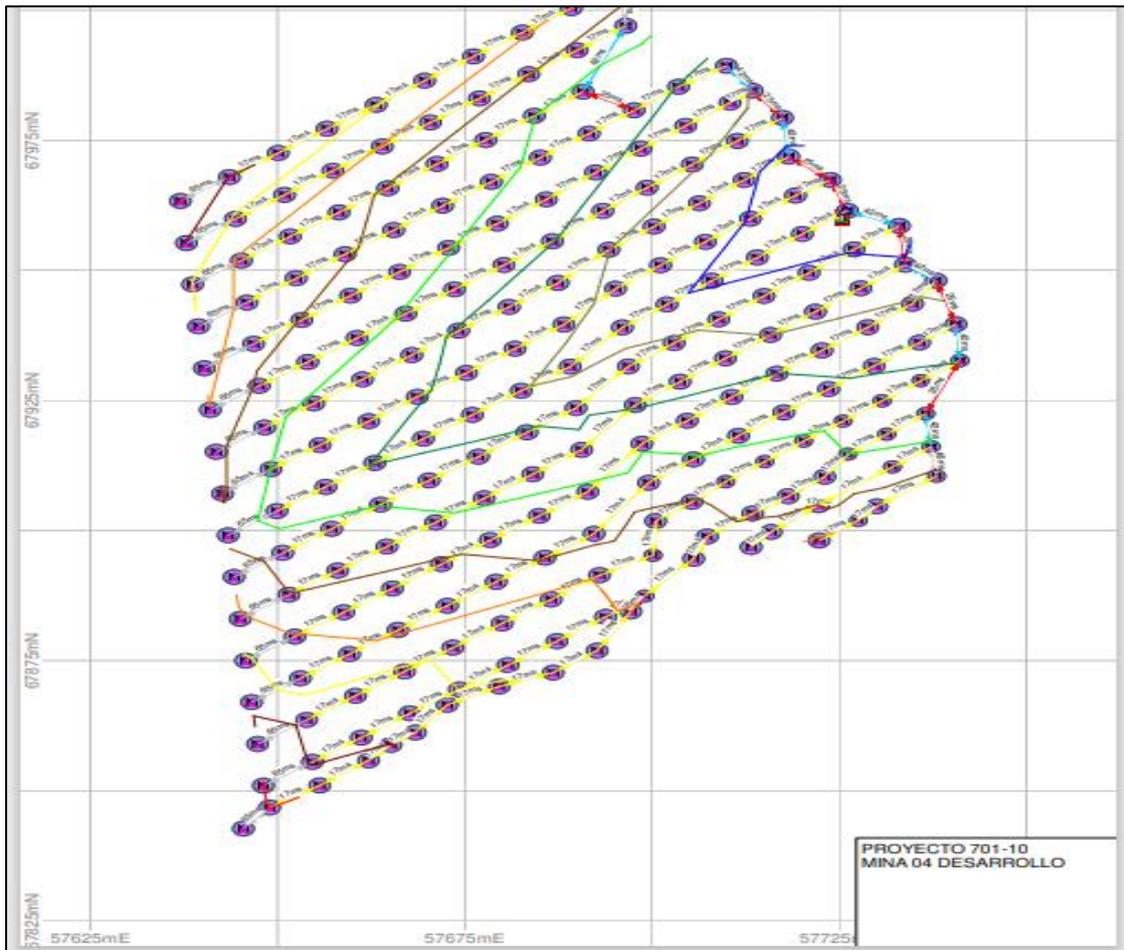


Figura 16. Plano de amarre (voladura 1)

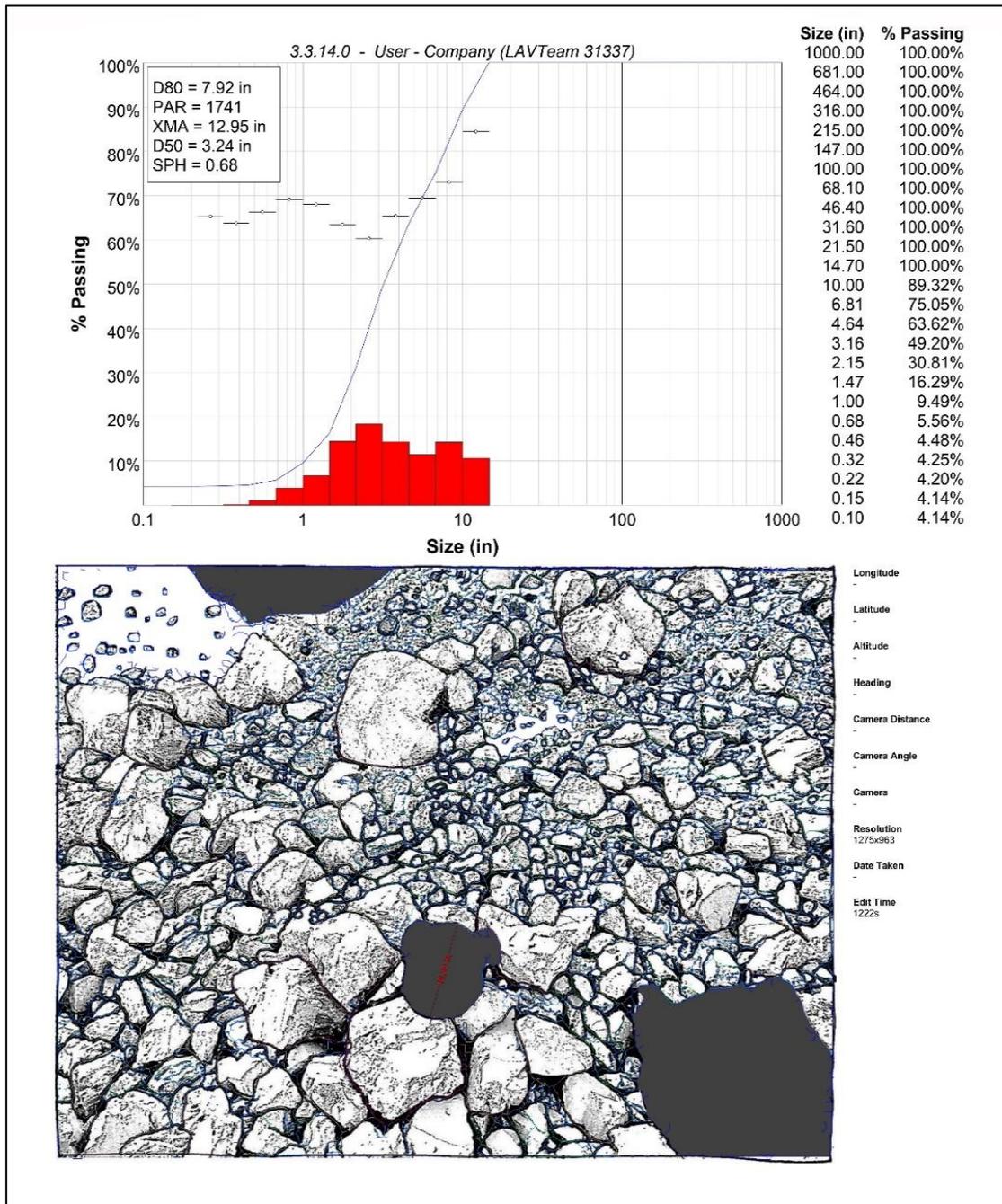


Figura 17. Análisis de fragmentación (voladura 1)

#### 4.1.1.2. Resultados

##### A) Análisis de factor potencia sin cámara de aire

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 459.36 kg de explosivo, este taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura, se determinó que el factor potencia es igual a 0.29, este valor

demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

### **B) Análisis de fragmentación**

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag*, muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 7.92 pulgadas estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

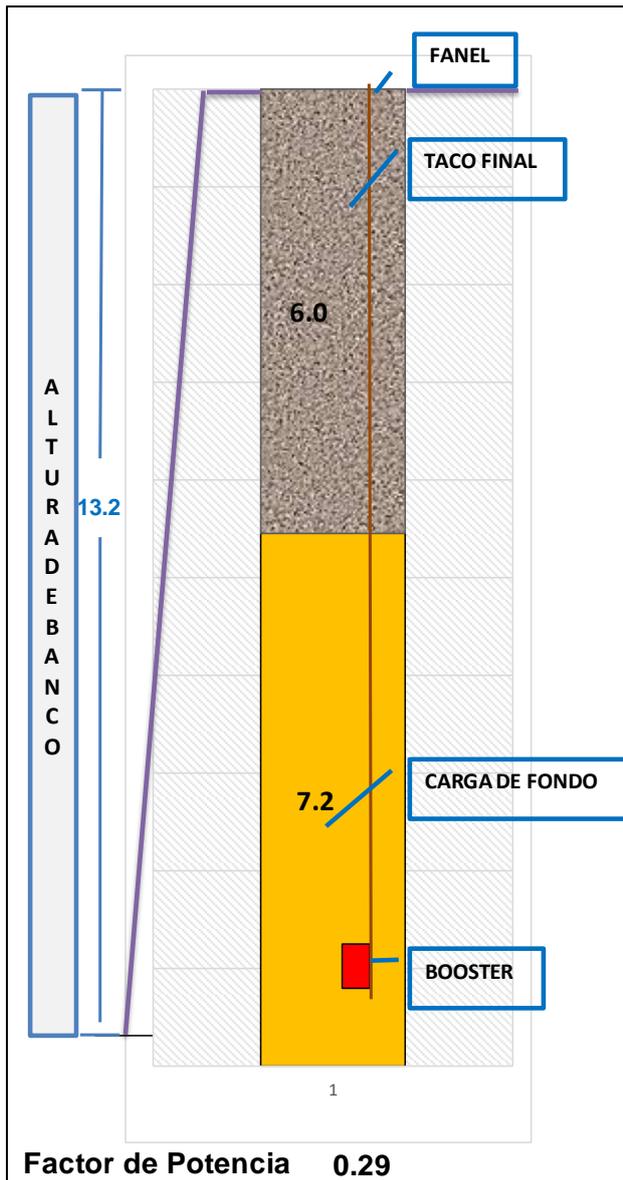
#### **4.1.2. Voladura 2 (701-13)**

##### **4.1.2.1. Antecedentes**

Esta voladura se realizó el 31 de febrero del 2021. Se cargaron 144 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos, también se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 66 147.84 kg; además, se usó 144 *boosters* de 1 lb. La columna explosiva está compuesta por 7.5 metros de carga de explosivo y un taco de 6 metros donde se utilizó el detrito de la misma perforación.

**Tabla 16. Datos de la columna explosiva (voladura 2)**

DISEÑO DE CARGA			
Diámetro de perforación(plg.)	11		
Altura de banco(mts.)	12		
Burden(mts.)	6.5		
Espaciamiento(mts.)	7.5		
Sobreperforación(mts.)	1.2		
Taco final(mts.)	6.0		
Taco intermedio(mts.)			
Altura de carga de fondo(mts.)	7.2		
Altura de carga de columna			
Densidad del material	2.74		
Toneladas por taladro(tn)	1603		
Metro cúbicos por taladro(m3)	585		
Densidad de Mezcla(g/cm3)	1.04		
Carga Lineal Mezcla(kg./m)	63.8		
MEZCLA	EMULSION	ANFO	
ANFO	0%	0%	
HA-19	10%	90%	
HA-28	20%	80%	
HA-37	30%	70%	459.37
HA-46	40%	60%	
HA-55	50%	50%	
HA-64	60%	40%	
Booster			1
Fanel			1
Factor de Potencia (kg/tn)			0.29



Factor de Potencia 0.29

Figura 18. Taladro de producción (voladura 2)

Tabla 17. Densidades de material y de la mezcla explosiva (voladura 2)

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-

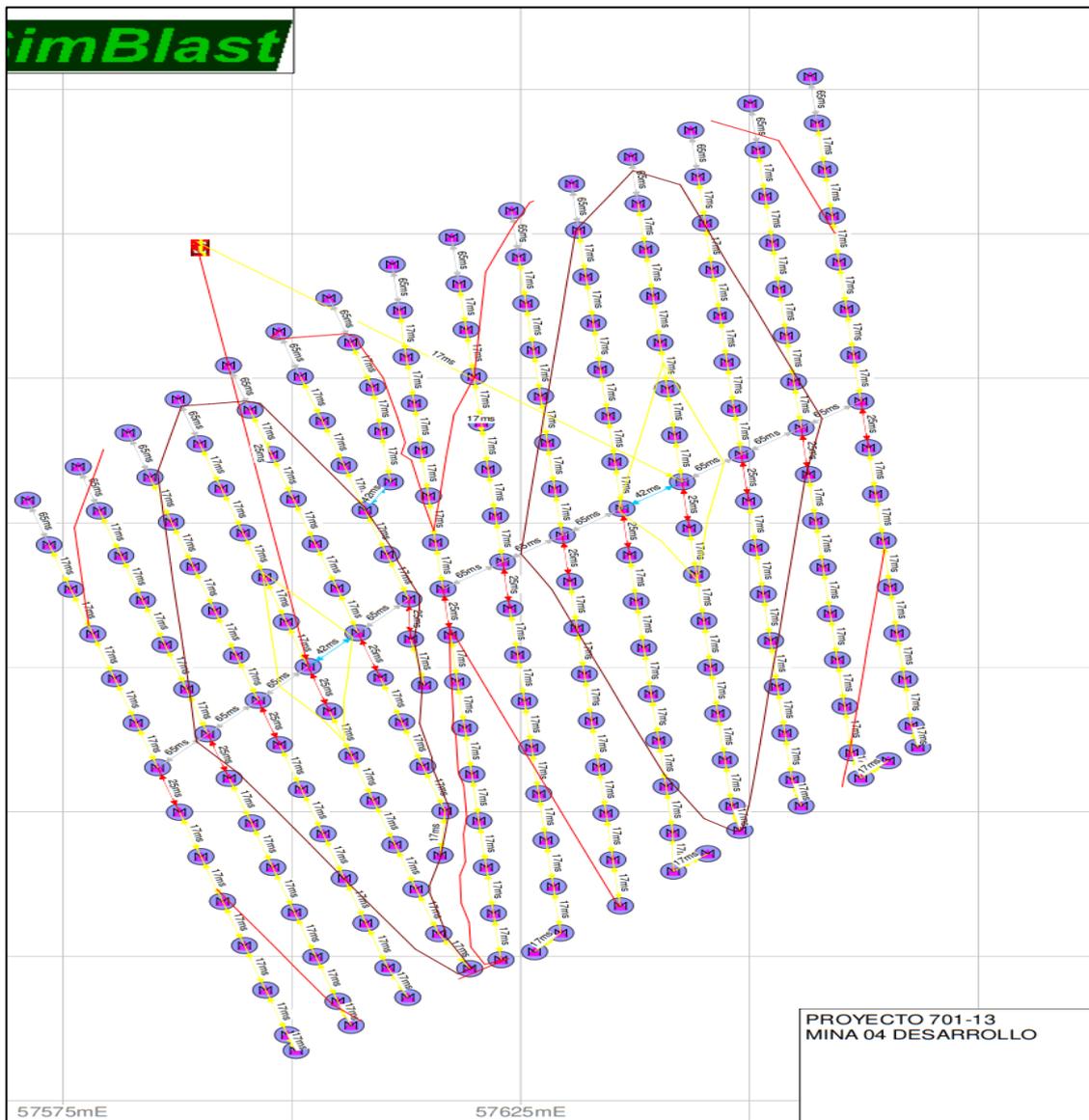
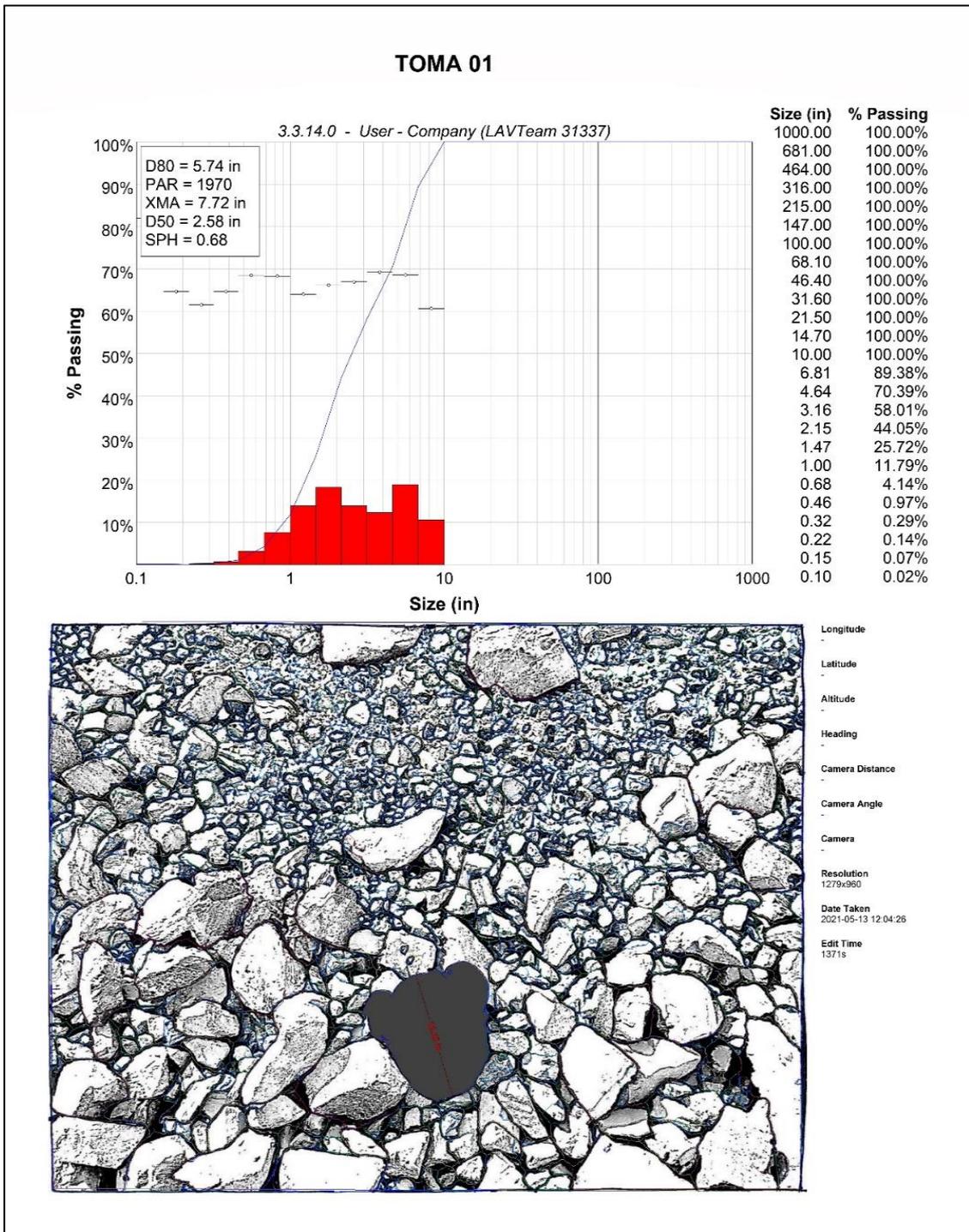


Figura 19. Planos de amarre (voladura 2)



**Figura 20. Análisis de fragmentación (voladura 2)**

#### 4.1.2.2. Resultados

##### A) Análisis de factor potencia sin cámara de aire

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 459.36 kg de explosivo, el taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de

banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura, se concluyó que el factor potencia es igual a 0.29, este valor demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

### **B) Análisis de fragmentación**

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag* muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 5.74 pulgadas, estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

#### **4.1.3. Voladura 3 (725-25)**

##### **4.1.3.1. Antecedentes**

Se realizó el 31 de febrero del 2021, se cargaron 39 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos, también se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 17 915.04 kg, además se usaron 39 *boosters* de 1 lb, la columna explosiva está compuesta por 7.5 metros de carga de explosivo y un taco de 6 metros, se utilizó de taco el detrito de la misma perforación.

**Tabla 18. Datos de la columna explosiva (voladura 3)**

DISEÑO DE CARGA			
Diámetro de perforación(plg.)	11		
Altura de banco(mts.)	12		
Burden(mts.)	6.5		
Espaciamiento(mts.)	7.5		
Sobreperforación(mts.)	1.2		
Taco final(mts.)	6.0		
Taco intermedio(mts.)			
Altura de carga de fondo(mts.)	7.2		
Altura de carga de columna			
Densidad del material	2.74		
Toneladas por taladro(tn)	1603		
Metro cúbicos por taladro(m3)	585		
Densidad de Mezcla(g/cm3)	1.04		
Carga Lineal Mezcla(kg./m)	63.8		
MEZCLA	EMULSION	ANFO	
ANFO	0%	0%	
HA-19	10%	90%	
HA-28	20%	80%	
HA-37	30%	70%	459.37
HA-46	40%	60%	
HA-55	50%	50%	
HA-64	60%	40%	
Booster			1
Fanel			1
Factor de Potencia (kg/tn)			0.29

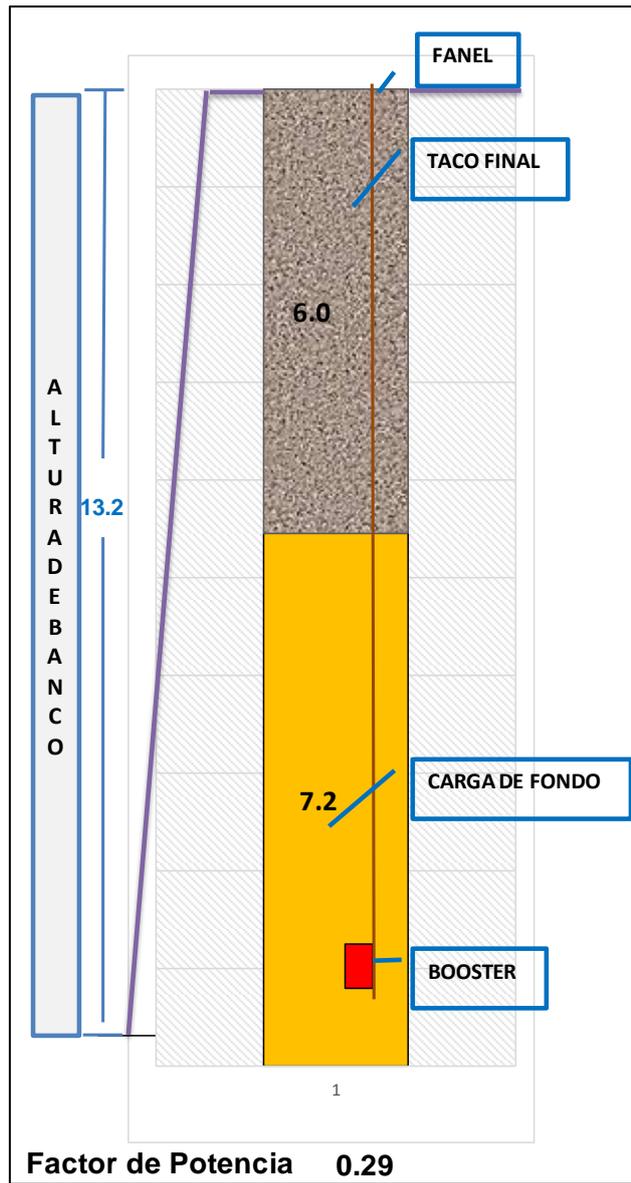
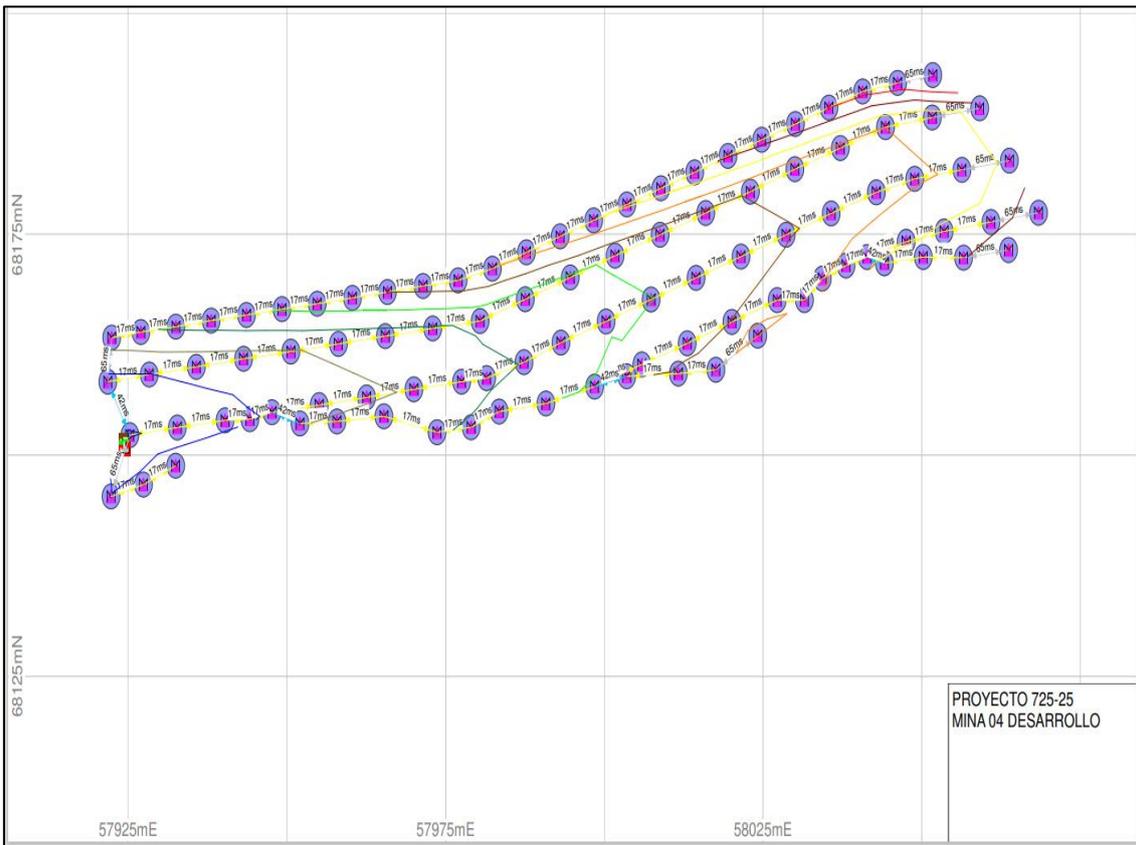


Figura 21. Taladro de producción (voladura 3)

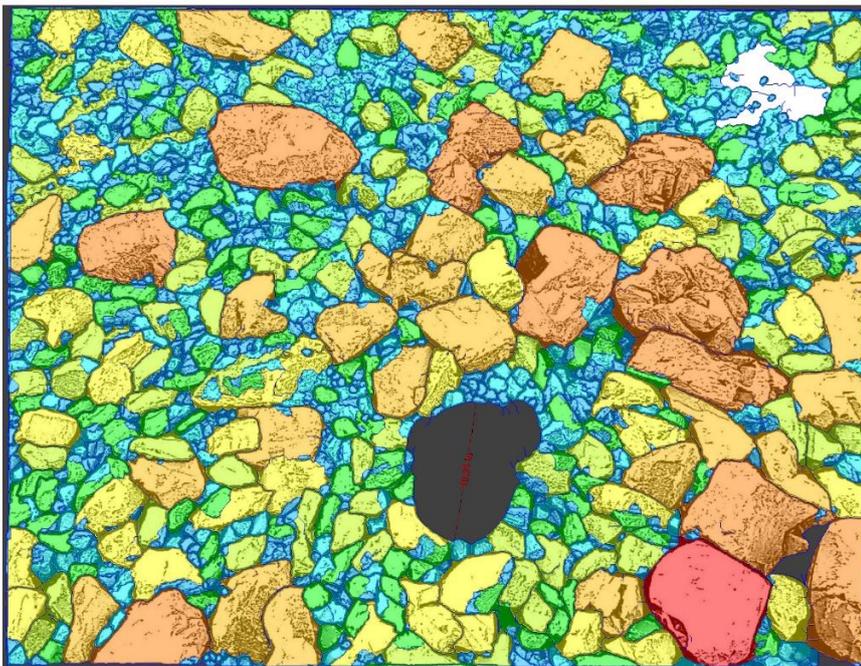
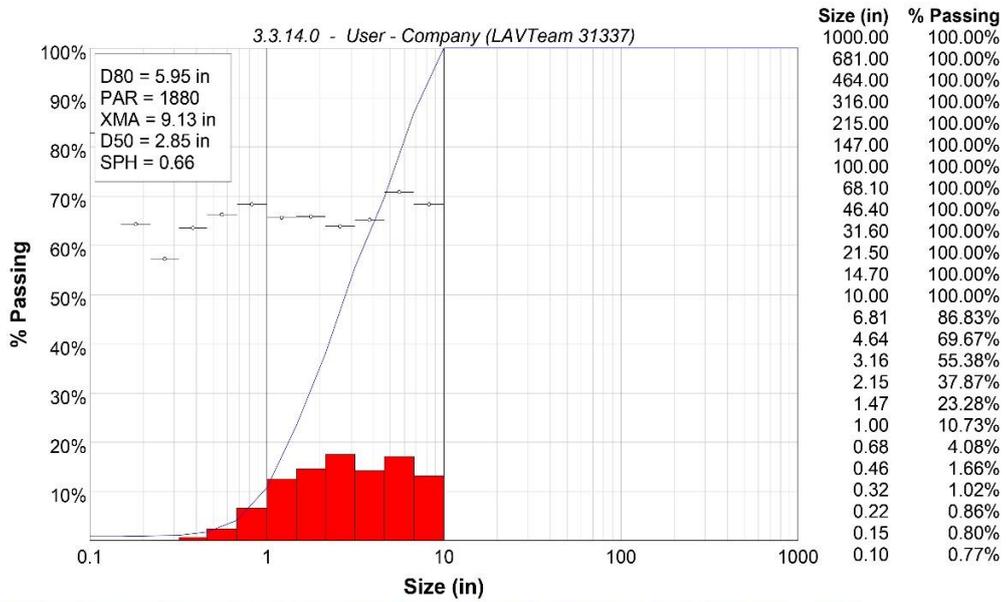
Tabla 19. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 3)

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-



**Figura 22. Plano de amarre (voladura 3)**

**TOMA 03**



Longitude  
 Latitude  
 Altitude  
 Heading  
 Camera Distance  
 Camera Angle  
 Camera  
 Resolution  
 1277x961  
 Date Taken  
 2021-05-13 12:04:27  
 Edit Time  
 928s

**Figura 23. Análisis de fragmentación (voladura 3)**

#### **4.1.3.2. Resultados**

##### **A) Análisis de factor potencia sin cámara de aire**

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 459.36 kg de explosivo, el taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura, se concluyó que el factor potencia es igual a 0.29, este valor demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

##### **B) Análisis de fragmentación**

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag* muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 5.95 pulgadas, estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

#### **4.1.4. Voladura 4 (689-10)**

##### **4.1.4.1. Antecedentes**

Se realizó el 15 de marzo del 2021, se cargaron 175 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos, también se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 80 388 kg, además se usó 175 *boosters* de 1 lb, la columna explosiva está compuesta por 7.5 metros de carga de explosivo y un taco de 6 metros, se utilizó de taco el detrito de la misma perforación.

**Tabla 20. Datos de la columna explosiva (voladura 4)**

DISEÑO DE CARGA			
Diámetro de perforación(plg.)	11		
Altura de banco(mts.)	12		
Burden(mts.)	6.5		
Espaciamiento(mts.)	7.5		
Sobreperforación(mts.)	1.2		
Taco final(mts.)	6.0		
Taco intermedio(mts.)			
Altura de carga de fondo(mts.)	7.2		
Altura de carga de columna			
Densidad del material	2.74		
Toneladas por taladro(tn)	1603		
Metro cúbicos por taladro(m3)	585		
Densidad de Mezcla(g/cm3)	1.04		
Carga Lineal Mezcla(kg./m)	63.8		
MEZCLA	EMULSION	ANFO	
ANFO	0%	0%	
HA-19	10%	90%	
HA-28	20%	80%	
HA-37	30%	70%	459.37
HA-46	40%	60%	
HA-55	50%	50%	
HA-64	60%	40%	
Booster			1
Fanel			1
Factor de Potencia (kg/tn)			0.29

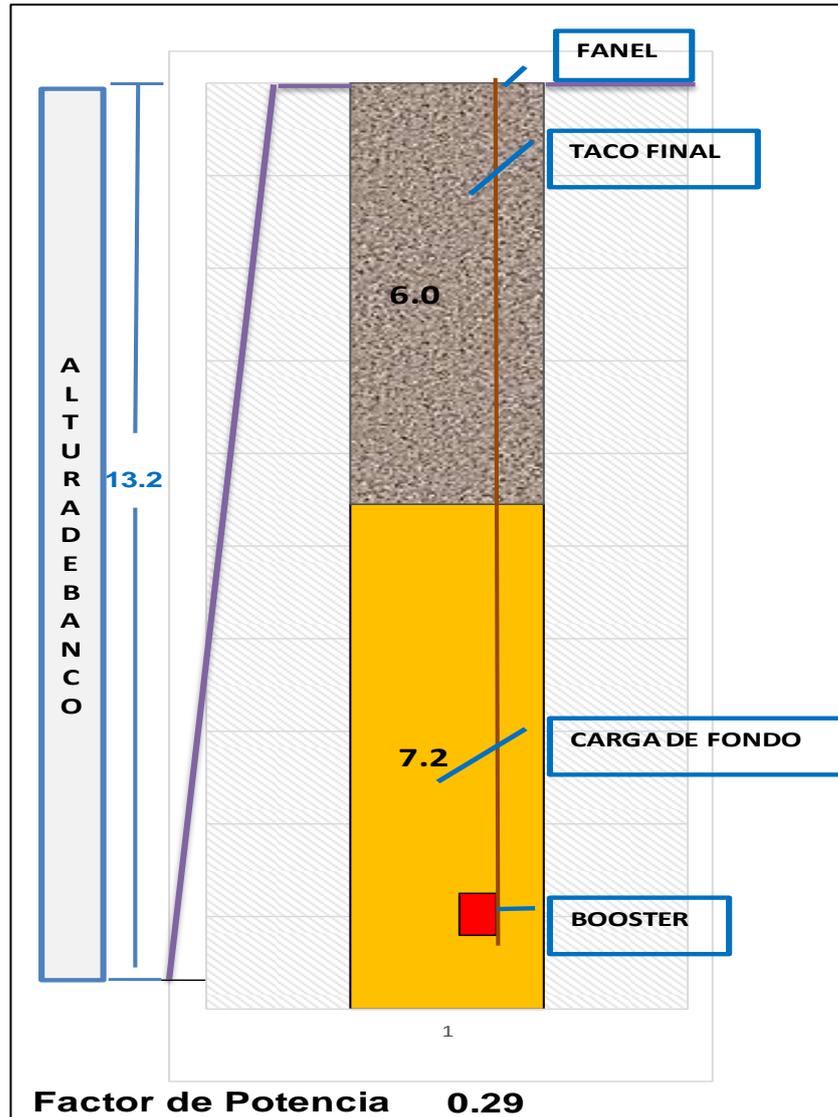
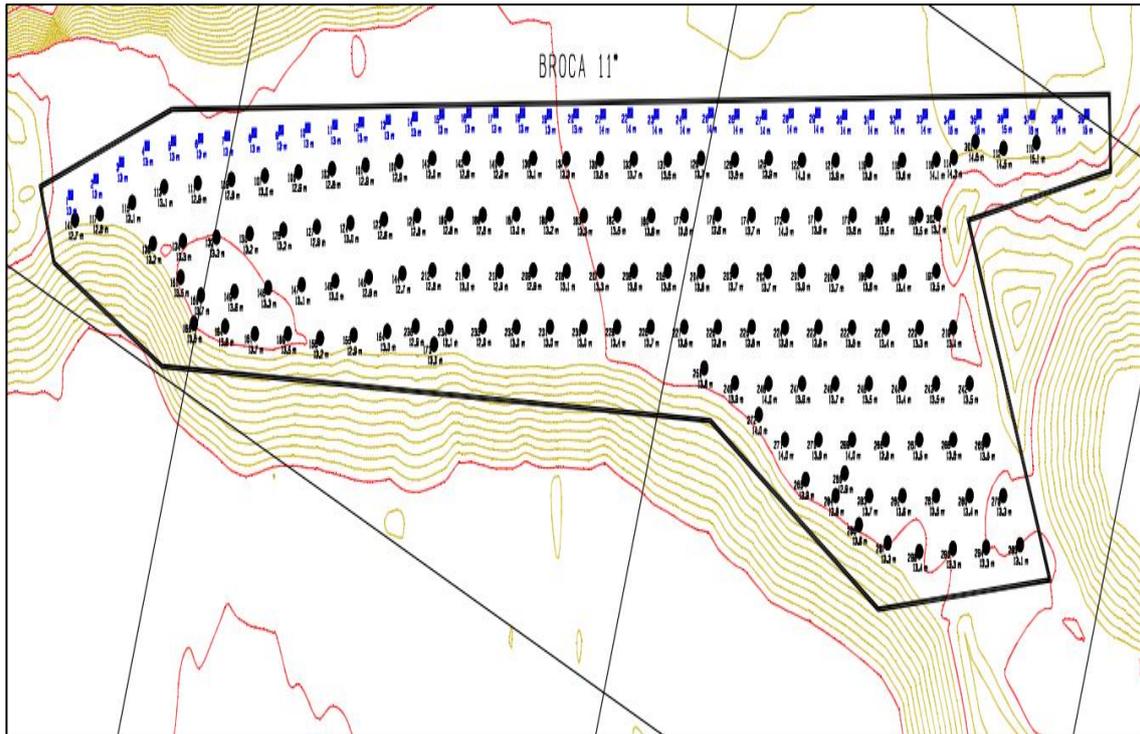


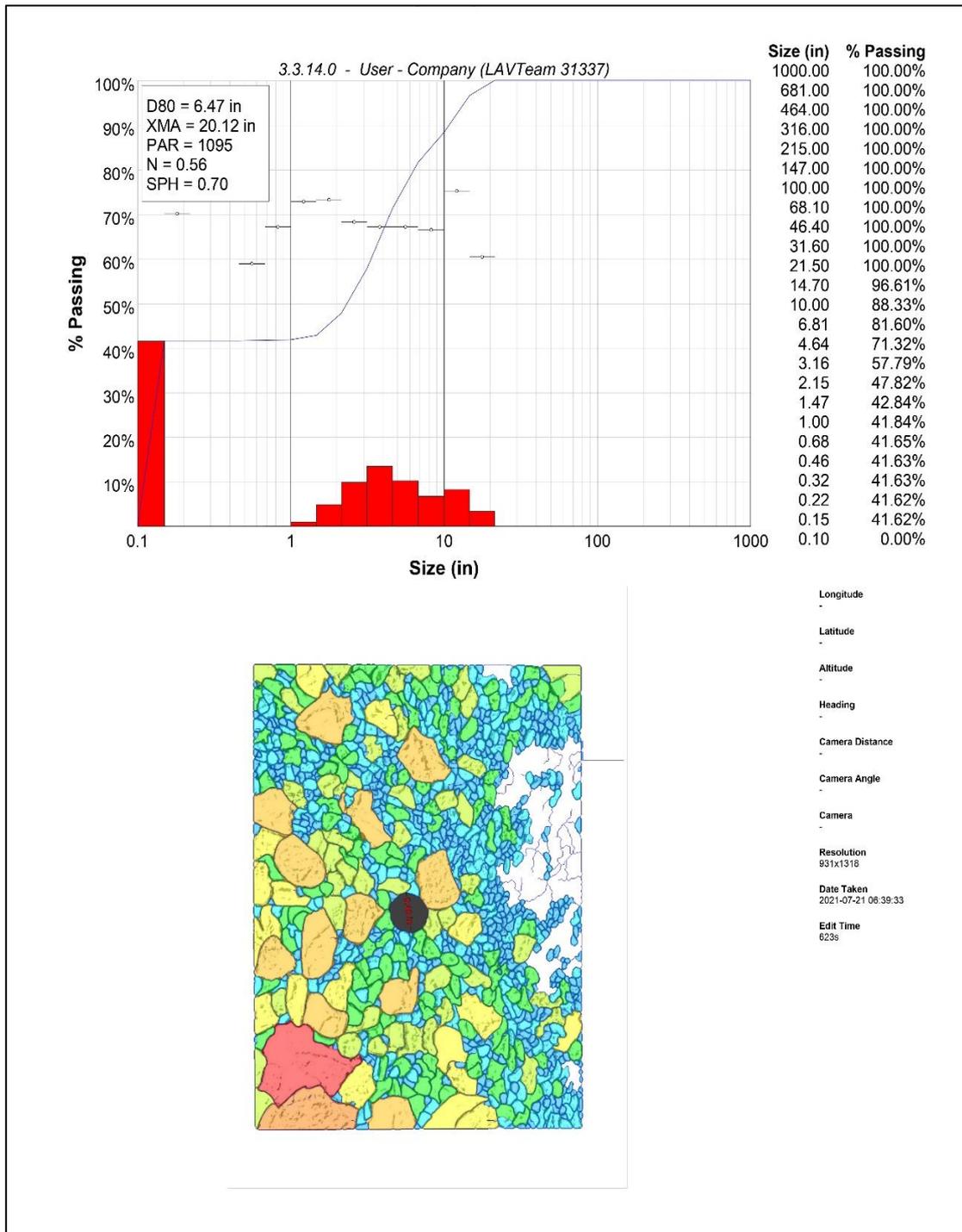
Figura 24. Taladro de producción (voladura 4)

Tabla 21. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 4)

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-



**Figura 25. Parámetros de perforación (voladura 4)**



**Figura 26. Análisis de fragmentación (voladura 4)**

#### **4.1.4.2. Resultados**

##### **A) Análisis de factor potencia sin cámara de aire**

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 459.36 kg de explosivo, el taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura, se concluyó que el factor potencia es igual a 0.29, este valor demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

##### **B) Análisis de fragmentación**

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag* muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 6.47 pulgadas, estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

#### **4.2. Voladuras mediante el uso de cámara de aire**

A continuación, se detallan los resultados de 4 voladuras realizadas en el mes de febrero usando cámaras de aire.

##### **4.2.1. Voladura 5 (689-06)**

Se realizó el 21 de febrero del 2021.

###### **4.2.1.1. Antecedentes**

Se cargaron 106 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos, también se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 41 929.36 kg en total, además se usaron 106 *boosters* de 1 lb, asimismo, la columna explosiva en este caso está compuesta por 6.2 metros de carga explosiva, 1 metro de cámara de aire y un taco final de altura de 6 m.

**Tabla 22. Datos de la columna explosiva (voladura 5)**

DISEÑO DE CARGA			
Diámetro de perforación(plg.)			<b>11</b>
Altura de banco(mts.)			<b>12</b>
Burden(mts.)			<b>6.5</b>
Espaciamiento(mts.)			<b>7.5</b>
Sobreperforación(mts.)			<b>1.2</b>
Taco final(mts.)			<b>6.0</b>
Camara de aire			<b>1.0</b>
Altura de carga de fondo(mts.)			<b>6.2</b>
Altura de carga de columna			
Densidad del material			<b>2.74</b>
Toneladas por taladro(tn)			1603
Metro cúbicos por taladro(m3)			585
Densidad de Mezcla(g/cm3)			<b>1.04</b>
Carga Lineal Mezcla(kg./m)			63.8
MEZCLA	EMULSION	ANFO	
ANFO	0%	0%	
HA-19	10%	90%	
HA-28	20%	80%	
HA-37	30%	70%	395.57
HA-46	40%	60%	
HA-55	50%	50%	
HA-64	60%	40%	
Booster			<b>1</b>
Fanel			<b>1</b>
Factor de Potencia (kg/tn)			<b>0.25</b>

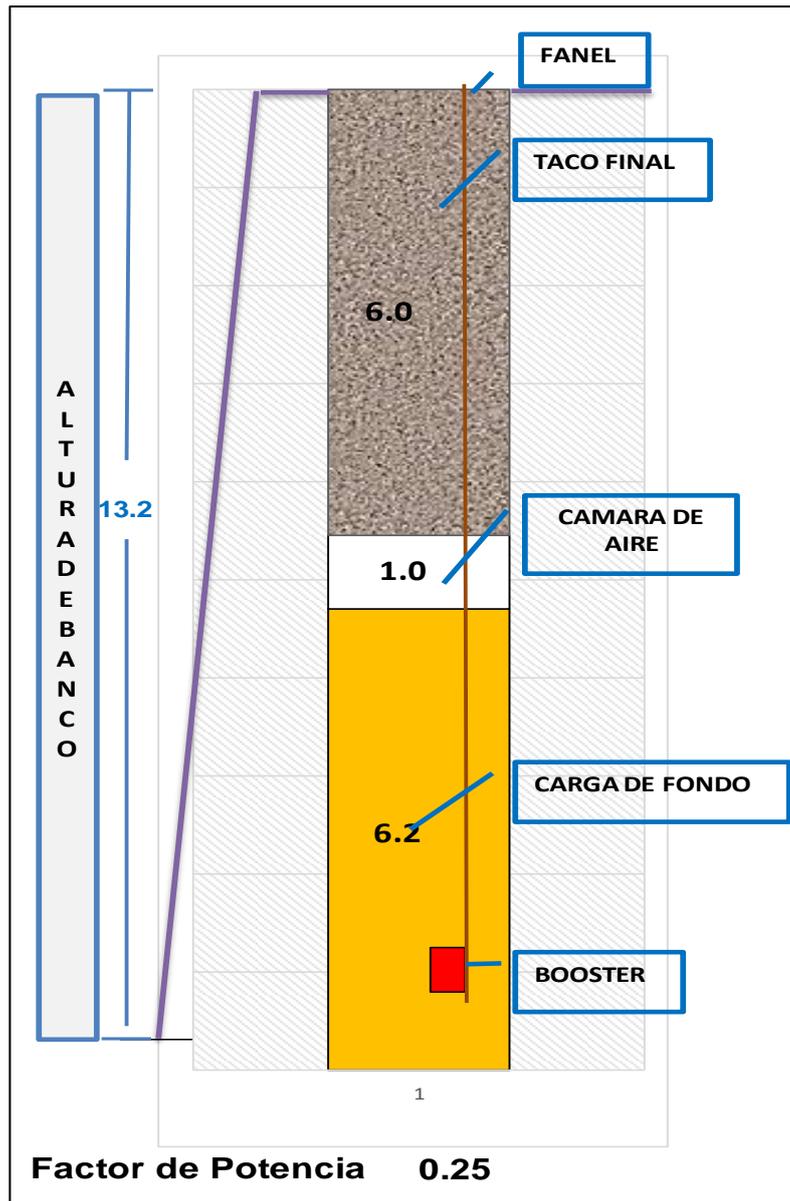
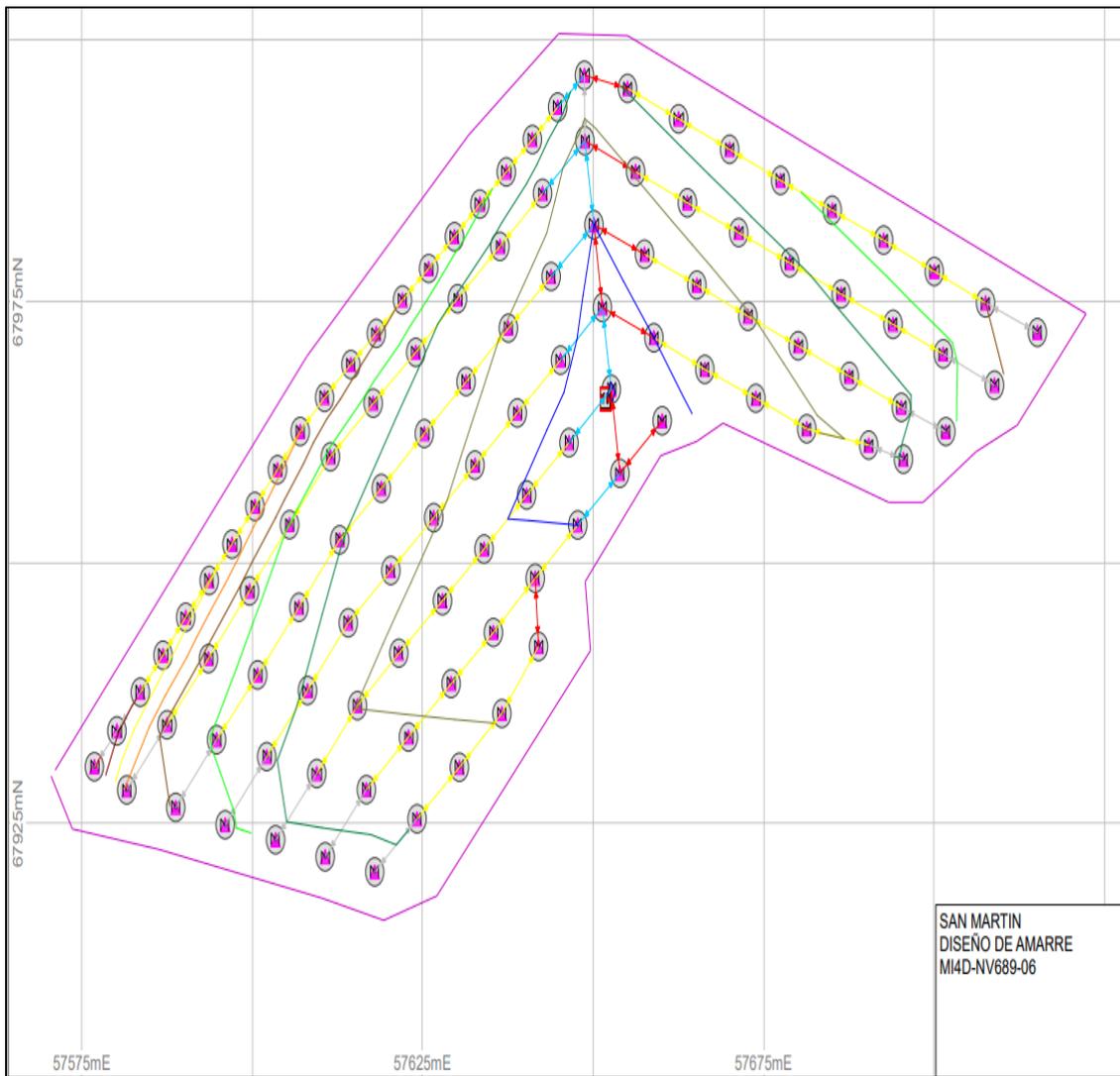


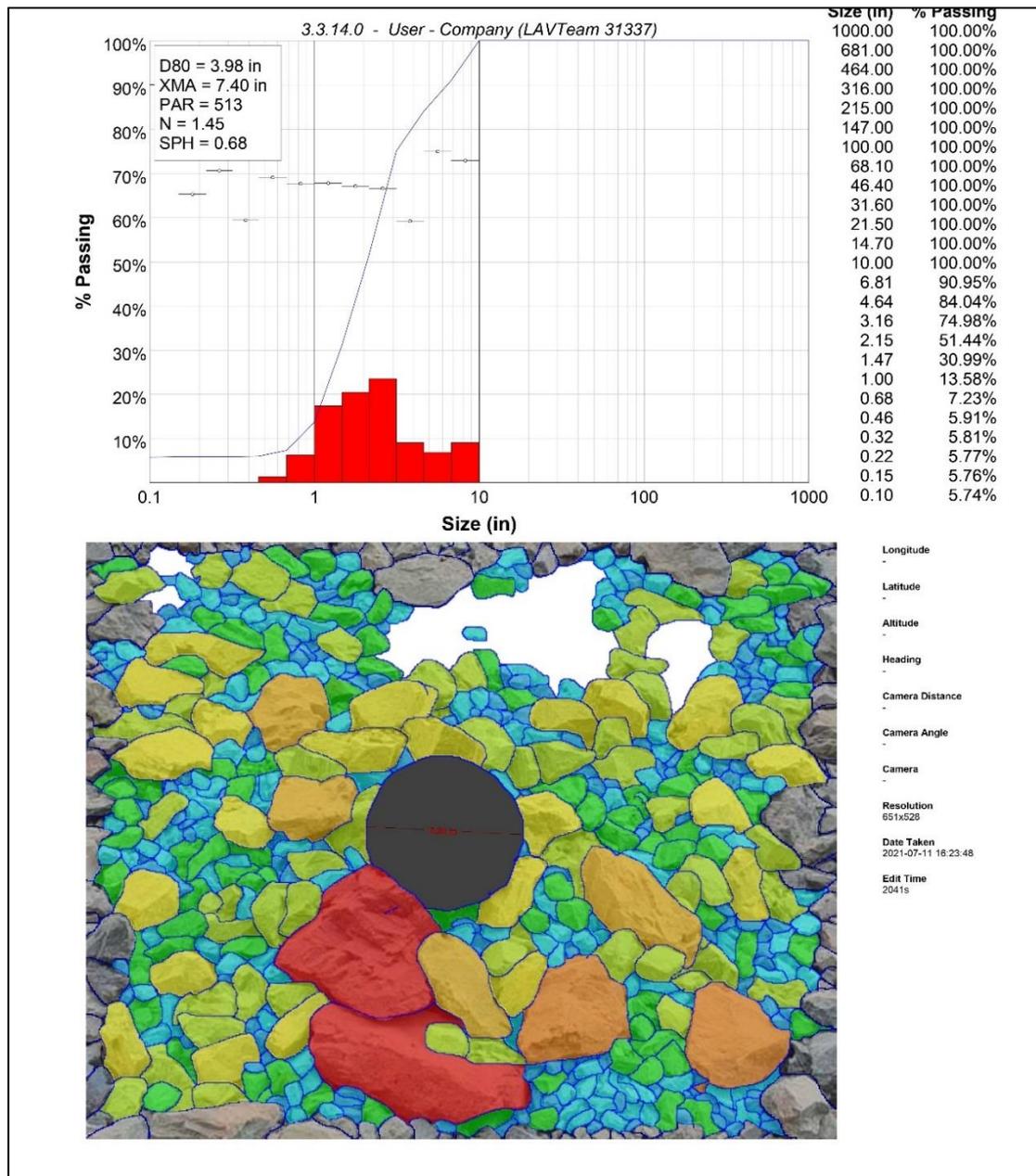
Figura 27. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 5)

Tabla 23. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 5)

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-



**Figura 28. Plano de amarre (voladura 5)**



**Figura 29. Análisis de fragmentación (voladura 5)**

#### 4.2.1.2. Resultados

##### A) Análisis de factor potencia con cámara de aire

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 395.57 kg de explosivo, el taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura, se concluyó que el factor potencia es igual a 0.25, este valor

demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

## B) Análisis de fragmentación

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag* muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 3.98 pulgadas, estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

### 4.2.2. Voladura 6 (689-05)

Se realizó el 22 de febrero del 2021.

#### 4.2.2.1. Antecedentes

Se cargaron 286 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos, también se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 113 130.16 kg, además se usó 286 *boosters* de 1 lb, asimismo, la columna explosiva en este caso está compuesta por 6.2 metros de carga explosiva, 1 metro de cámara de aire y un taco final de altura de 6 m.

**Tabla 24. Datos de la columna explosiva (voladura 6)**

DISEÑO DE CARGA		MEZCLA		
Diámetro de perforación(plg.)	11	EMULSION	ANFO	
Altura de banco(mts.)	12	ANFO	0%	0%
Burden(mts.)	6.5	HA-19	10%	90%
Espaciamiento(mts.)	7.5	HA-28	20%	80%
Sobreperforación(mts.)	1.2	HA-37	30%	70%
Taco final(mts.)	6.0	HA-46	40%	60%
Camara de aire	1.0	HA-55	50%	50%
Altura de carga de fondo(mts.)	6.2	HA-64	60%	40%
Altura de carga de columna		Booster		1
Densidad del material	2.74	Fanel		1
Toneladas por taladro(tn)	1603	Factor de Potencia (kg/tn)		0.25
Metro cúbicos por taladro(m3)	585			
Densidad de Mezcla(g/cm3)	1.04			
Carga Lineal Mezcla(kg./m)	63.8			

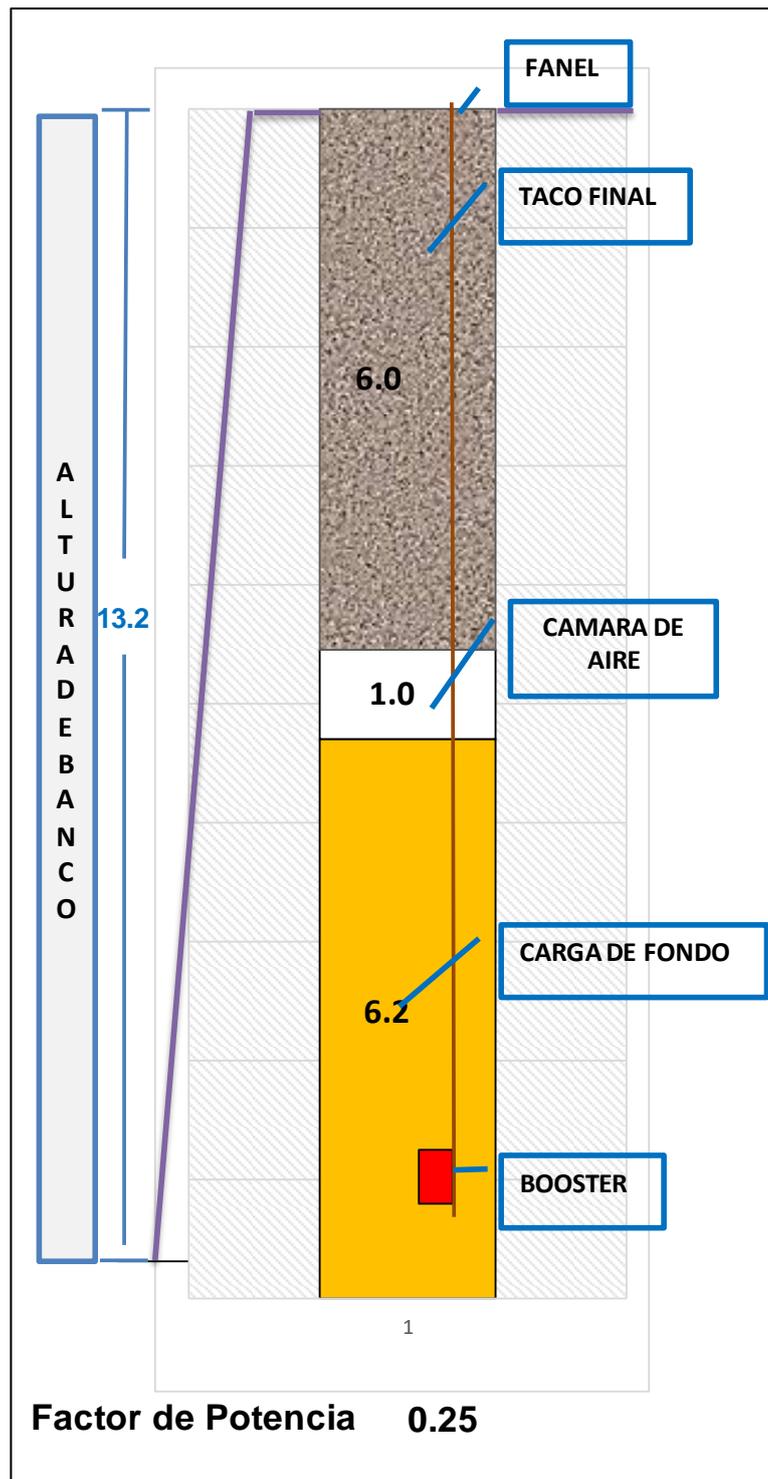
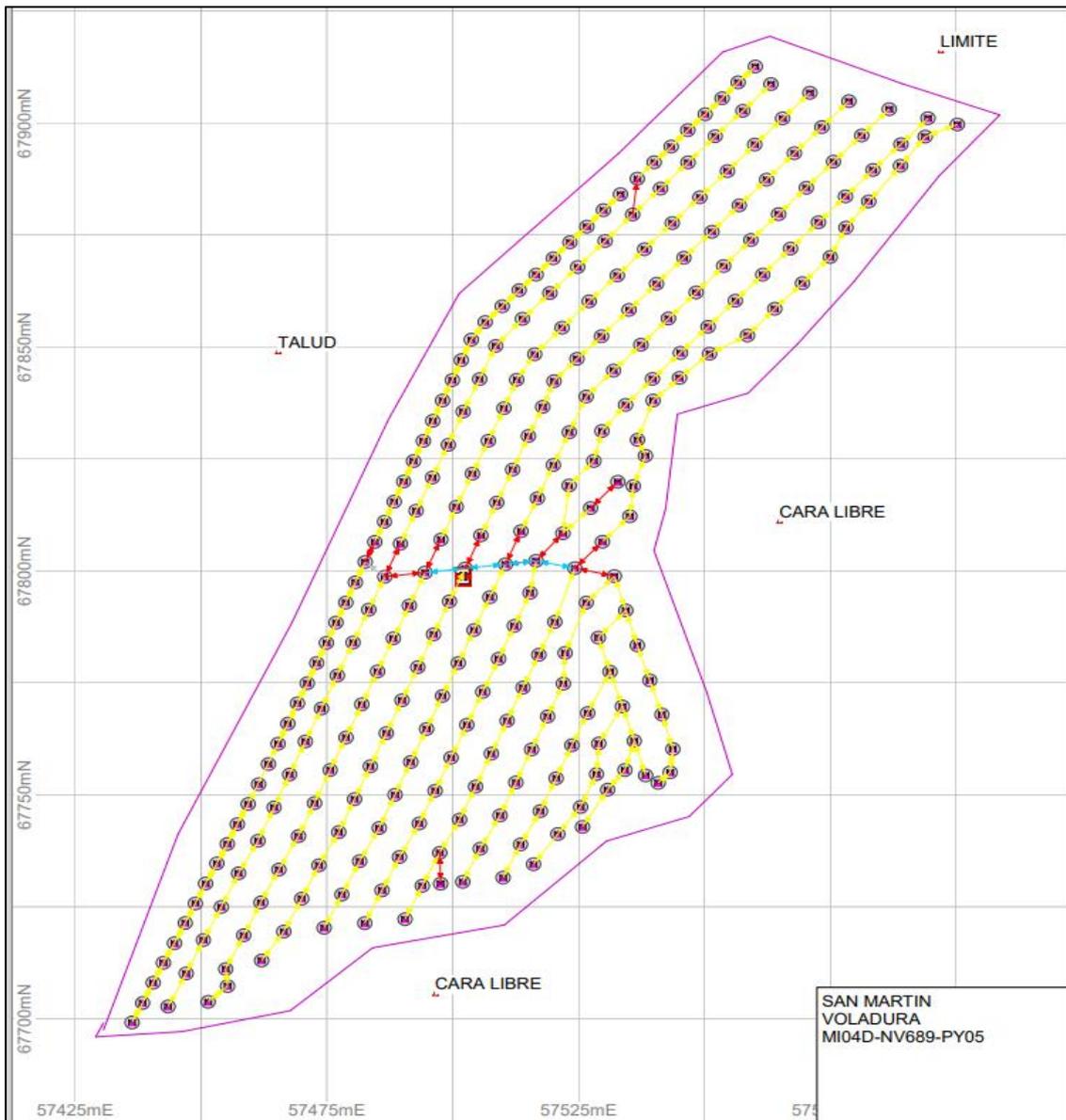


Figura 30. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 6)

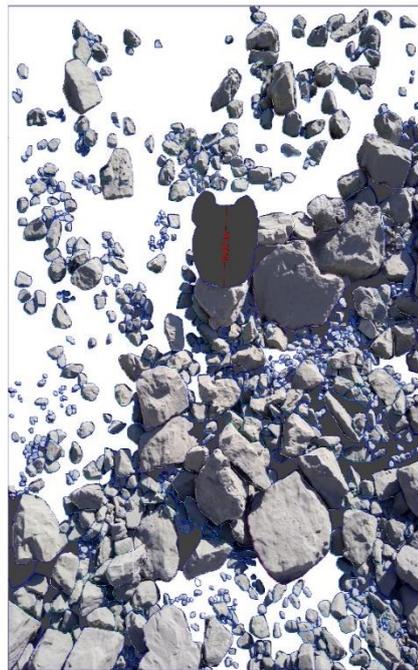
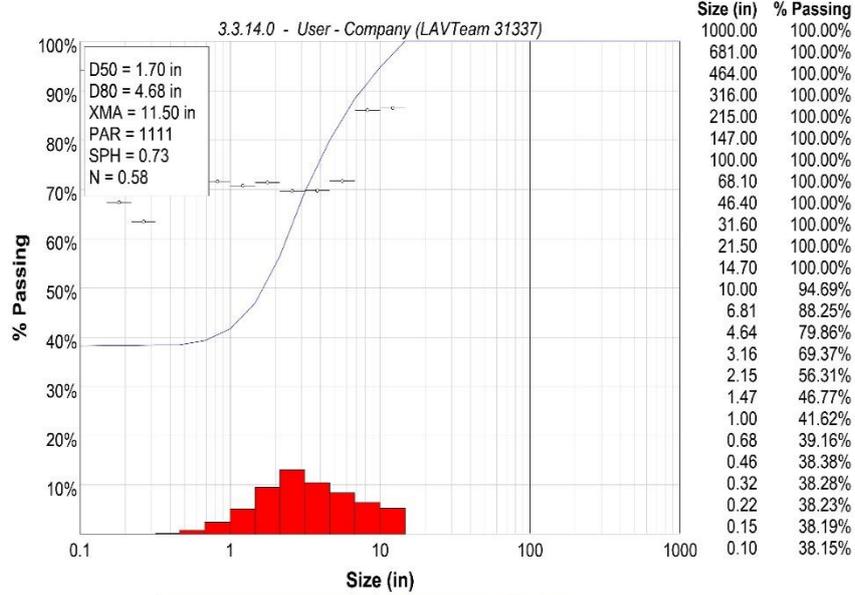
**Tabla 25. Densidades del material y de la mezcla explosiva (voladura 6)**

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-



**Figura 31. Plano de amarre (voladura 5)**

### WIP FRAG 02



Longitude  
-

Latitude  
-

Altitude  
-

Heading  
-

Camera Distance  
-

Camera Angle  
-

Camera  
-

Resolution  
960x1280

Date Taken  
2021-07-18 15:31:21

Edit Time  
13200s

**Figura 32. Análisis de fragmentación (voladura 6)**

#### **4.2.2.2. Resultados**

##### **A) Análisis de factor potencia con cámara de aire**

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 395.57 kg de explosivo, el taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura, se concluyó que el factor potencia es igual a 0.25, este valor demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

##### **B) Análisis de fragmentación**

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag* muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 4.68 pulgadas, estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

#### **4.2.3. Voladura 7 (689-07)**

Se realizó el 25 de febrero del 2021.

##### **4.2.3.1. Antecedentes**

Se cargaron 184 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos, también se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 72 783.04 kg, además se usaron 184 *boosters* de 1 lb, asimismo, la columna explosiva en este caso está compuesta por 6.2 metros de carga explosiva, 1 metro de cámara de aire y un taco final de altura de 6 m.

**Tabla 26. Datos de la columna explosiva (voladura 7)**

DISEÑO DE CARGA			
Diámetro de perforación(plg.)			<b>11</b>
Altura de banco(mts.)			<b>12</b>
Burden(mts.)			<b>6.5</b>
Espaciamiento(mts.)			<b>7.5</b>
Sobreperforación(mts.)			<b>1.2</b>
Taco final(mts.)			<b>6.0</b>
Camara de aire			<b>1.0</b>
Altura de carga de fondo(mts.)			<b>6.2</b>
Altura de carga de columna			
Densidad del material			<b>2.74</b>
Toneladas por taladro(tn)			1603
Metro cúbicos por taladro(m3)			585
Densidad de Mezcla(g/cm3)			<b>1.04</b>
Carga Lineal Mezcla(kg./m)			63.8
MEZCLA	EMULSION	ANFO	
ANFO	0%	0%	
HA-19	10%	90%	
HA-28	20%	80%	
HA-37	30%	70%	395.57
HA-46	40%	60%	
HA-55	50%	50%	
HA-64	60%	40%	
Booster			<b>1</b>
Fanel			<b>1</b>
Factor de Potencia (kg/tn)			<b>0.25</b>

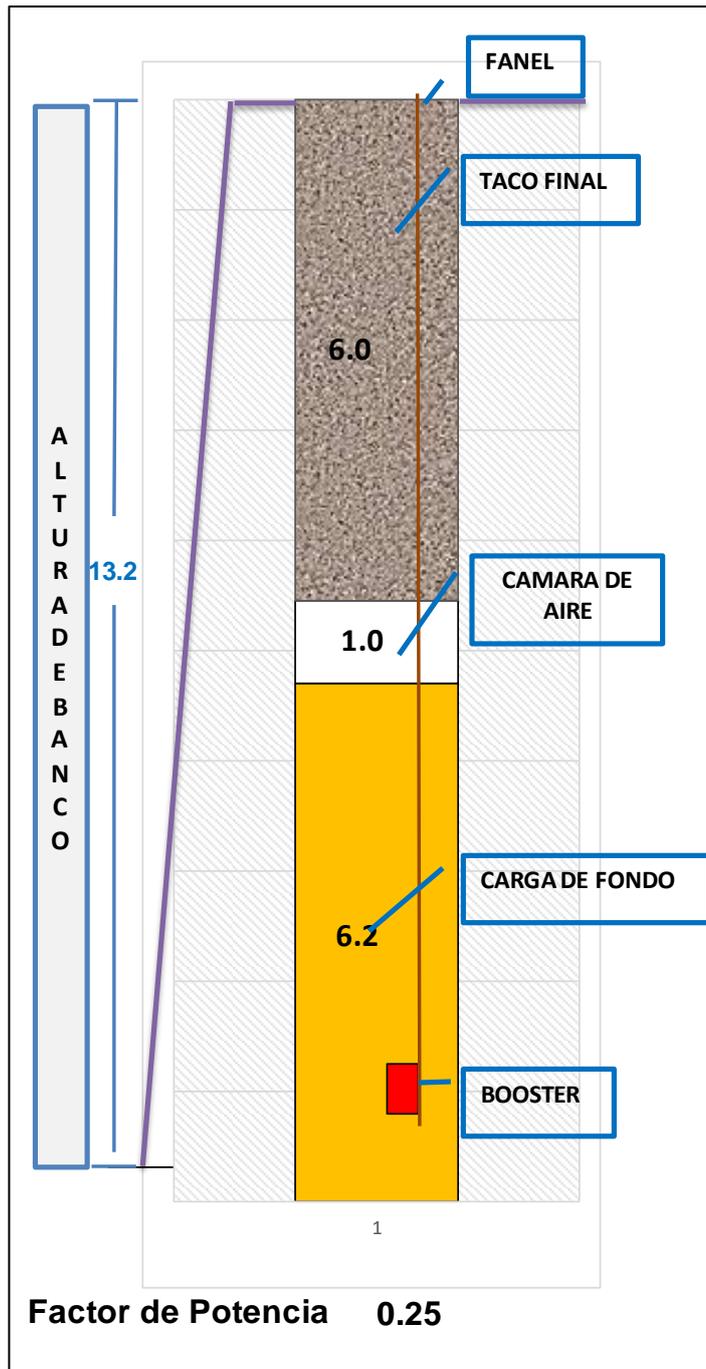
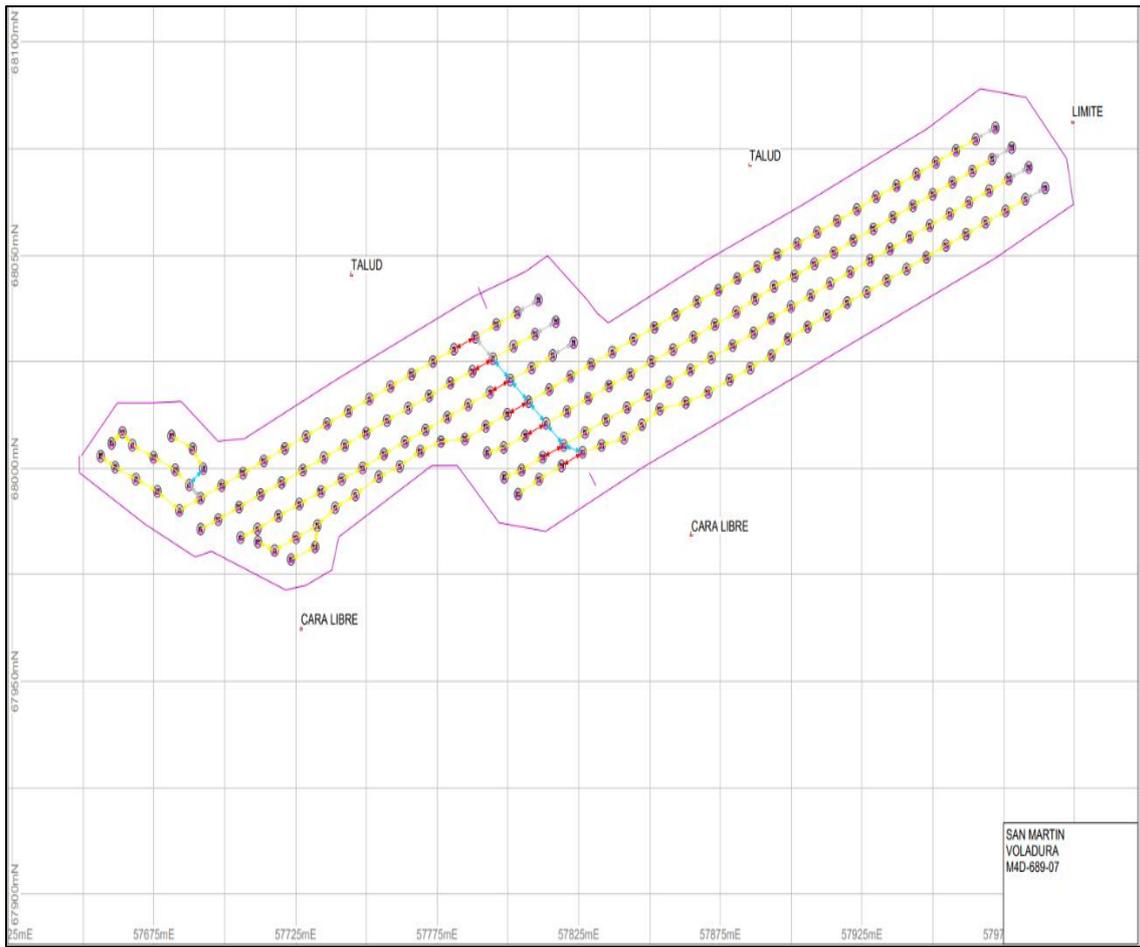


Figura 33. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 7)

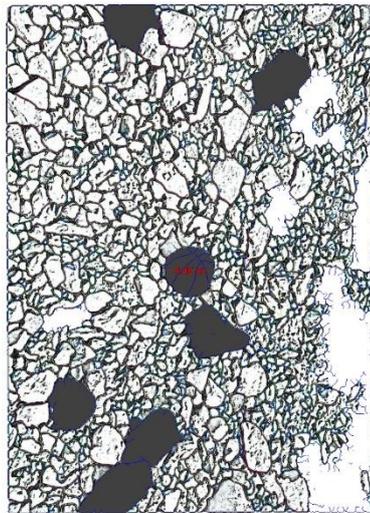
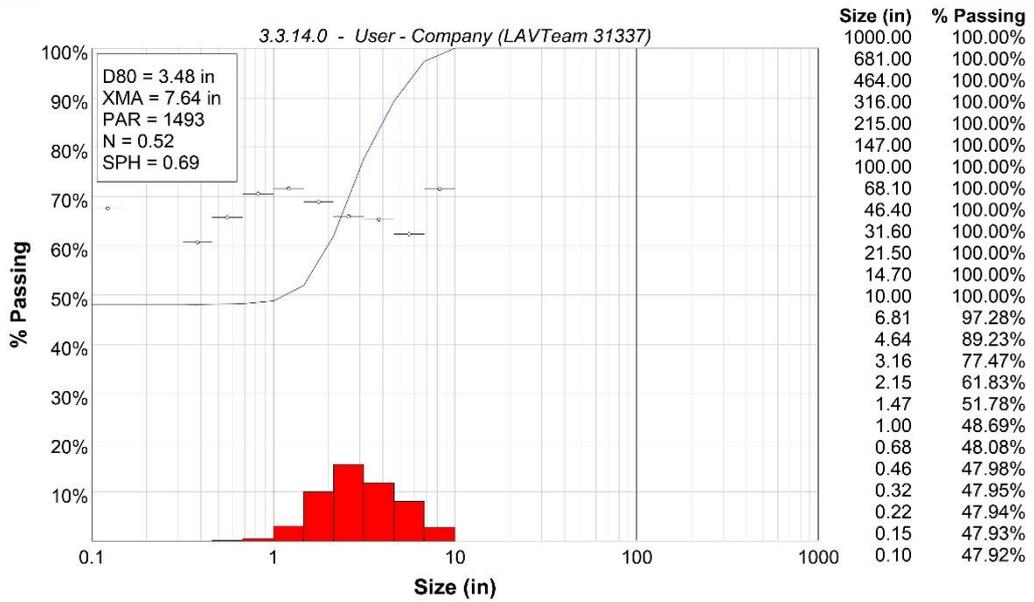
Tabla 27. Densidades del material de la mezcla explosiva (voladura 7)

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-



**Figura 34. Plano de amarre (voladura 7)**

### TOMA02



Longitude  
-  
Latitude  
-  
Altitude  
-  
Heading  
-  
Camera Distance  
-  
Camera Angle  
-  
Camera  
-  
Resolution  
931x1318  
Date Taken  
2021-07-21 06:45:26  
Edit Time  
1590s

**Figura 35. Análisis de fragmentación (voladura 7)**

#### **4.2.3.2. Resultados**

##### **A) Análisis de factor potencia con cámara de aire**

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 395.57 kg de explosivo, el taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura se concluyó que el factor potencia es igual a 0.25, este valor demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

##### **B) Análisis de fragmentación**

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag* muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 3.48 pulgadas, estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

#### **4.2.4. Voladura 8 (677-07)**

Se realizó el 25 de febrero del 2021.

##### **4.2.4.1. Antecedentes**

Se cargaron 155 taladros de producción, se utilizaron disparadores con detonadores no eléctricos, también se utilizó *Heavy ANFO 37* como explosivo en una cantidad de 61 311.8 kg, además se usaron 155 *boosters* de 1 lb, asimismo, la columna explosiva en este caso está compuesta por 6.2 metros de carga explosiva, 1 metro de cámara de aire y un taco final de altura de 6 m.

**Tabla 28. Datos de la columna explosiva (voladura 8)**

DISEÑO DE CARGA			
Diámetro de perforación(plg.)			<b>11</b>
Altura de banco(mts.)			<b>12</b>
Burden(mts.)			<b>6.5</b>
Espaciamiento(mts.)			<b>7.5</b>
Sobreperforación(mts.)			<b>1.2</b>
Taco final(mts.)			<b>6.0</b>
Camara de aire			<b>1.0</b>
Altura de carga de fondo(mts.)			<b>6.2</b>
Altura de carga de columna			
Densidad del material			<b>2.74</b>
Toneladas por taladro(tn)			<b>1603</b>
Metro cúbicos por taladro(m3)			<b>585</b>
Densidad de Mezcla(g/cm3)			<b>1.04</b>
Carga Lineal Mezcla(kg./m)			<b>63.8</b>
MEZCLA	EMULSION	ANFO	
ANFO	0%	0%	
HA-19	10%	90%	
HA-28	20%	80%	
HA-37	30%	70%	<b>395.57</b>
HA-46	40%	60%	
HA-55	50%	50%	
HA-64	60%	40%	
Booster			<b>1</b>
Fanel			<b>1</b>
Factor de Potencia (kg/tn)			<b>0.25</b>

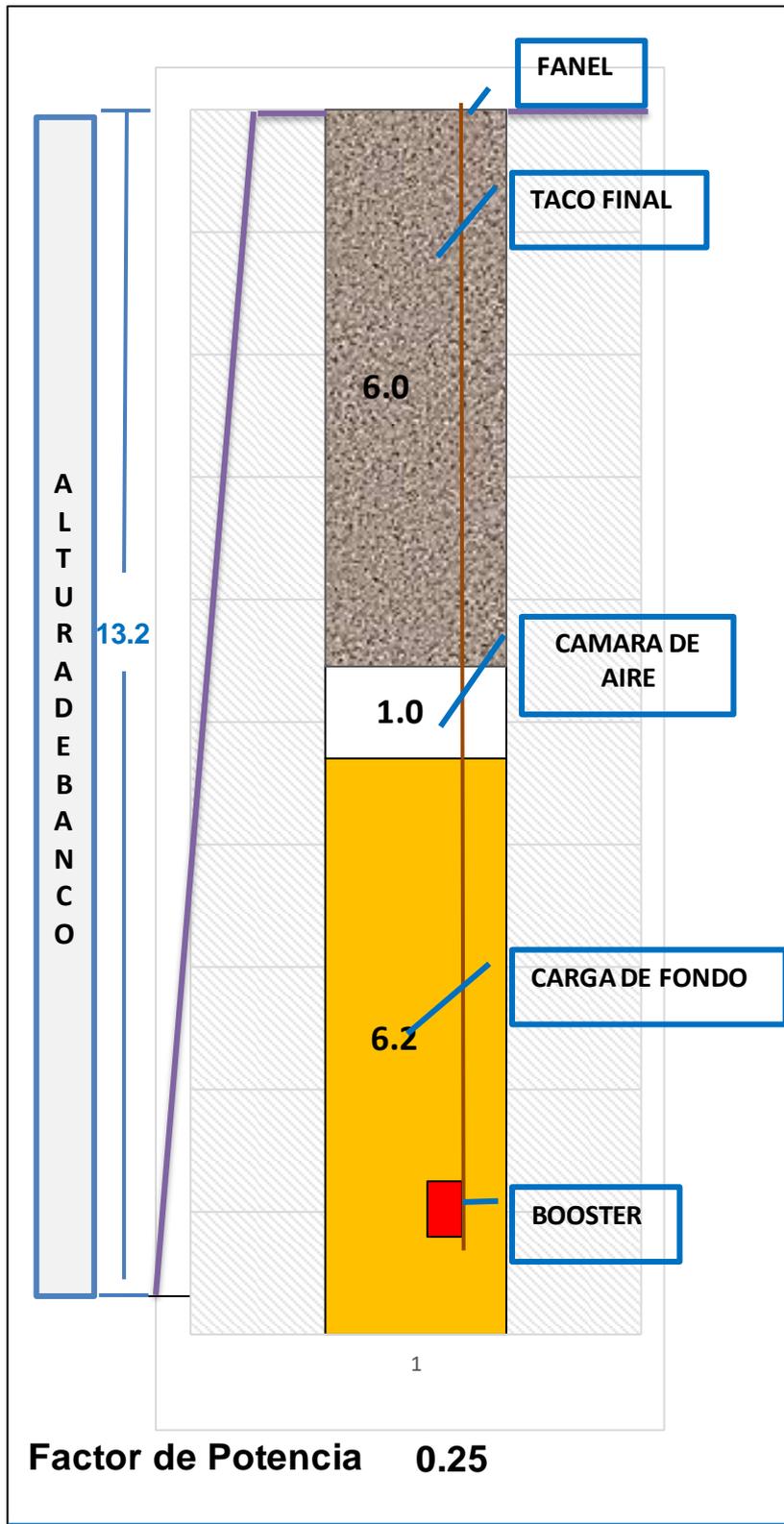
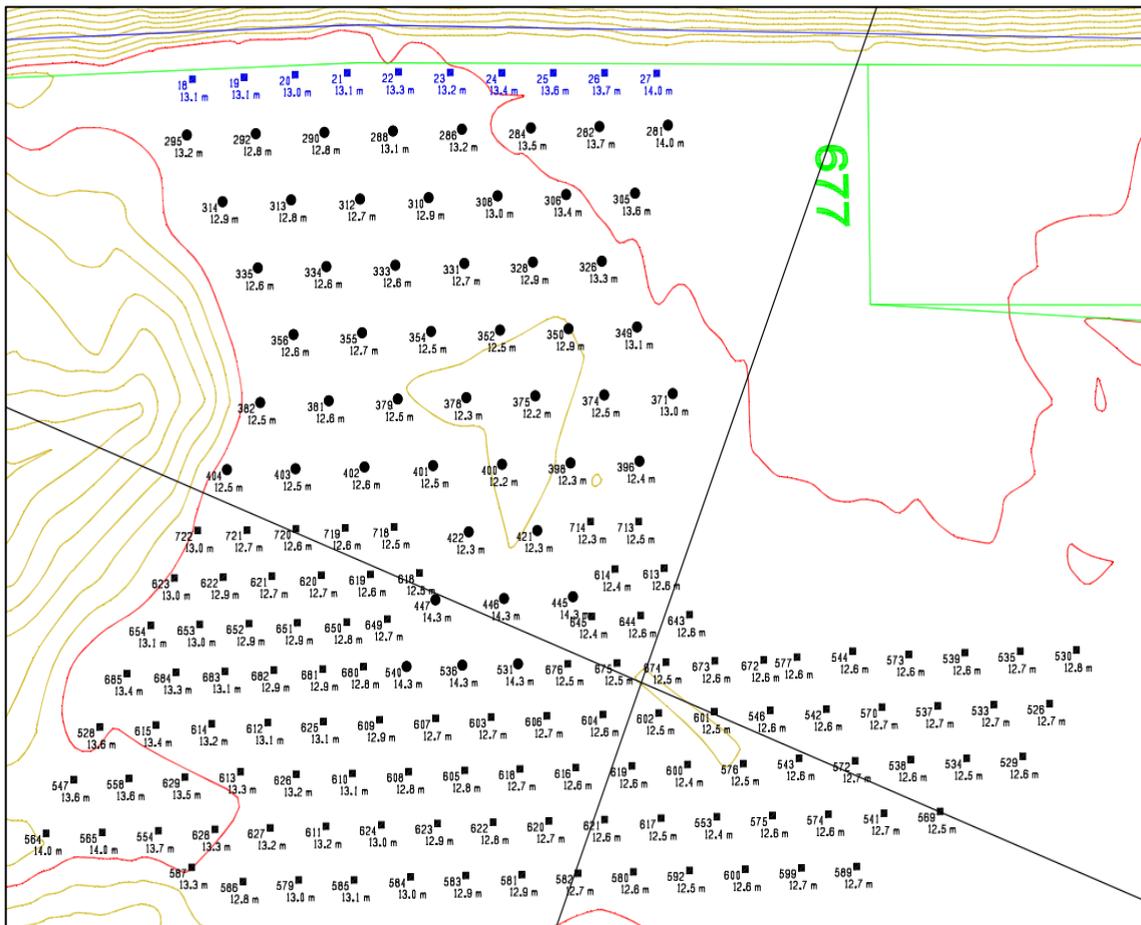


Figura 36. Taladro con cámara de aire intermedia (voladura 8)

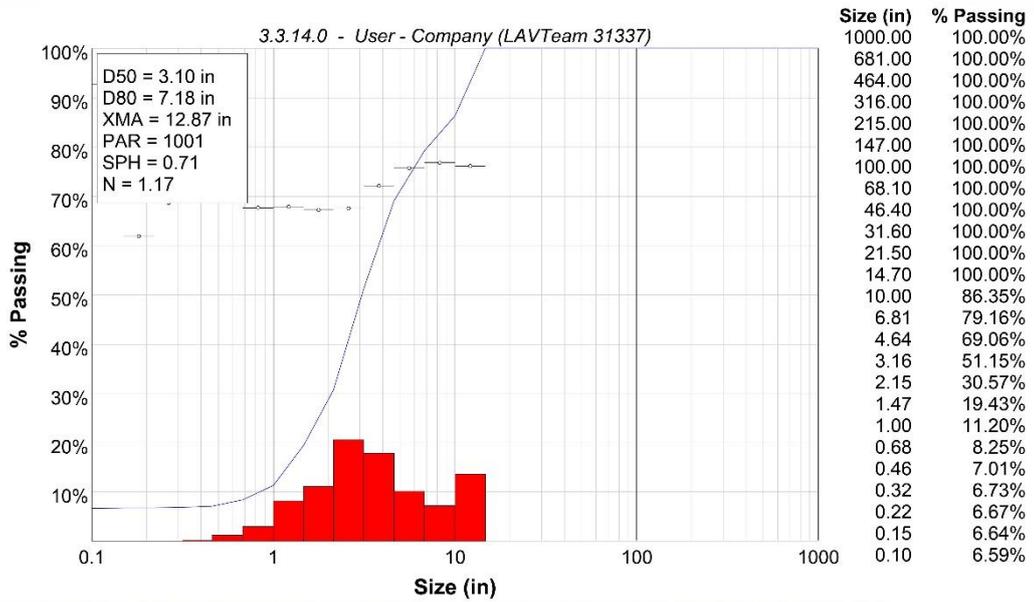
**Tabla 29. Densidades del material de la mezcla explosiva (voladura 8)**

TABLA DE DENSIDAD DEL MATERIAL		TABLA DE DENSIDAD DE MEZCLA	
DESMONTE	2.74	ANFO	0.78
ANDESITA	2.74	HA-19	0.86
ACTINOLITA	2.74	HA-28	0.92
BL. M. PRIMARIO	3.96	HA-37	1.04
OXIDADO	4.27	HA-46	1.21
MINERAL	4.47	HA-55	1.3
		HA-64	-



**Figura 37. Plano de amarre (voladura 8)**

### WIP FRAG 01



Longitude  
-  
Latitude  
-  
Altitude  
-  
Heading  
-  
Camera Distance  
-  
Camera Angle  
-  
Camera  
-  
Resolution  
1280x960  
Date Taken  
2021-07-18 15:31:21  
Edit Time  
7479s

Figura 38. Análisis de fragmentación (voladura 8)

#### **4.2.4.2. Resultados**

##### **A) Análisis de factor potencia con cámara de aire**

Hora de la voladura programada: 12:00, hora de la voladura ejecutada: 12:02, se dispararon 1603 toneladas por taladro de desmonte y por cada taladro se utilizaron 395.57 kg de explosivo, el taladro cuenta con un diámetro de 11 pulgadas y una altura de banco de 12 m. Después de procesar los datos de la voladura se concluyó que el factor potencia es igual a 0.25, este valor demuestra la relación que se tiene entre toneladas removidas por taladro con la cantidad de explosivo utilizado por taladro.

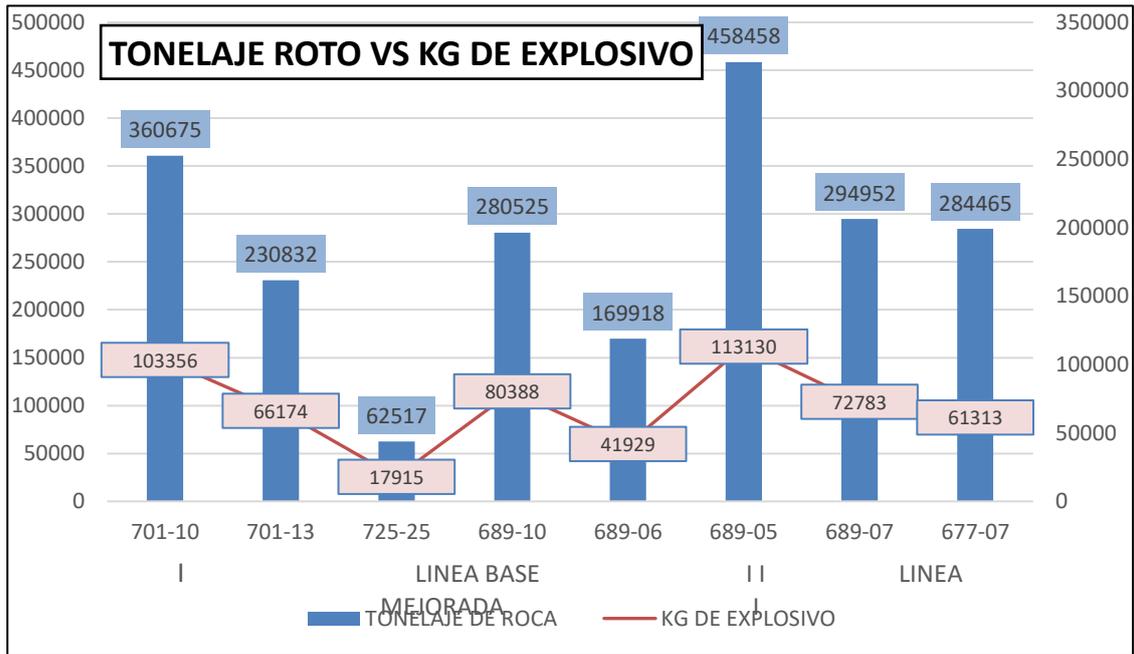
##### **B) Análisis de fragmentación**

El análisis de fragmentación realizado con el software *WipFrag* muestra que se obtuvo un resultado en el p 80 de 7.92 pulgadas, estando dentro del parámetro que pide el área de operaciones (menor a 8 pulgadas).

#### **4.3. Comparación de voladuras línea base (taladros sin cámara de aire) con línea mejorada (taladros con cámara de aire)**

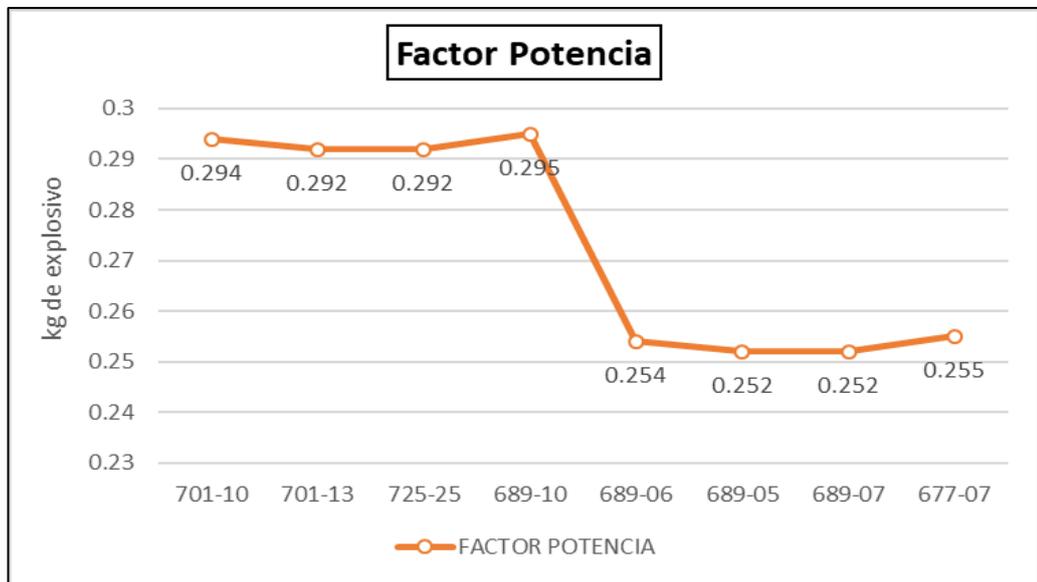
##### **4.3.1. Análisis del factor potencia**

En la siguiente figura se detalla el consumo de explosivo total por cada voladura comparado con la cantidad total de toneladas rotas; es decir, esta relación da el resultado de factor potencia. En los taladros de línea mejorada se hizo uso de la cámara de aire lo que produjo una reducción de explosivo.



**Figura 39. Tonelaje roto vs. kilogramos de explosivo**

A continuación, se presenta el análisis de factor potencia por cada voladura ejecutada.



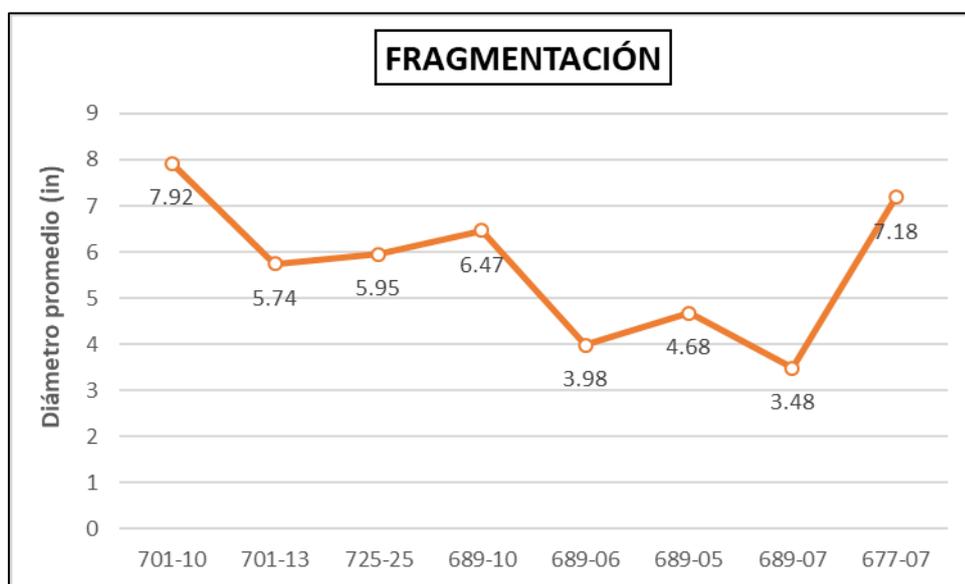
**Figura 40. Factor de potencia vs. kilogramos de explosivo**

Después de comparar los resultados obtenidos con los dos tipos de voladura, se concluyó que las cámaras de aire influyen positivamente en el factor potencia para optimización de la voladura en una mina a tajo abierto.

#### 4.3.2. Análisis de la granulometría (fragmentación)

Para obtener los resultados de este parámetro se tuvo que realizar un trabajo minucioso, ya que las fotografías tienen que estar muy nítidas, donde se pueda diferenciar los distintos tamaños de roca, así se obtienen mejores resultados con el análisis del programa. Las fotografías pueden ser tomadas con una cámara profesional o con cualquier dispositivo móvil que tenga una alta resolución.

En la siguiente figura se hace una relación del tamaño de fragmentación por cada voladura.



**Figura 41. Fragmentación por cada voladura**

La fragmentación debe tener un valor menor a las 8 in, para que no se altere la producción, entonces al obtener resultados por debajo del límite máximo, se concluye que el grado de fragmentación se mantiene con el uso de cámaras de aire en la optimización de la voladura en una mina a tajo abierto.

### 4.3.3. Análisis de costos

**Tabla 30. Costos fijos de voladura**

Ítem	Producto	Unidad	Precio (\$)
1	Perforación	ML	4.4
2	Promedio del costo del explosivo <i>Heavy-ANFO 37</i>	kg	0.8
3	Iniciador <i>booster</i> de pentolita 2 lb	Pza.	7
4	Detonador no eléctrico 800 m/18 m	Pza.	2.8

En la tabla 30 se aprecian los costos fijos en voladura en la mina de hierro de Marcona, se detallan los precios en dólares de cada uno de los ítems necesarios para una voladura.

**Tabla 31. Costos de accesorios de voladura**

Iniciador y accesorios de voladura	Unidad	Sin cámara	Con cámara
<i>Booster</i> de pentolita 2 lb costo   \$	Pza.	7	7.00
Detonador no eléctrico 800 m/18 m costo \$	Pza.	2.8	2.80
Costo de accesorios \$/taladro		9.8	9.80
Costo de accesorios \$/t		0.006113537	0.0061

**Tabla 32. Costos de perforación**

Perforación	Sin cámara de aire	Con cámara de aire
Costo taladro perforado \$	58.080	58.080
Toneladas rotas/taladro	1603	1603.000
Costo perf./t \$	0.0362	0.0362

**Tabla 33. Resumen de costos**

Voladura	Sin cámara de aire	Con cámara de aire
Toneladas rotas/taladro	1603	1603.00
F P kg/t	0.29	0.25
Kg. Explosivo por taladro (promedio)	439.2	378.20
Promedio del costo del explosivo \$/kg.	0.8	0.80
Costo de explosivo / taladro \$	351.36	302.56
Costo de explosivo/t \$	0.219189021	0.19
Costo de <i>taponex</i> por taladro \$	0	4

**Tabla 34. Costo por voladura**

<b>Costo total/voladura</b>	<b>Sin cámaras de aire</b>	<b>Con cámara de aire</b>
Costo perf./t \$	0.036	0.036
Costo de explosivo/t \$	0.219	0.189
Ton removido / taladro	1603	1603
Taladros / voladura	150	150
Voladuras / año	192	192
t/ año	46166400	46166400
Costo / año	11791872	10386432

<b>Ahorro/ año</b>	<b>\$1,405,440.00</b>
--------------------	-----------------------

Referente al costo de voladura en U\$/TM con cámara de aire se obtuvo un valor de 0.21 versus 0.19, con la línea mejorada esto demuestra un ahorro en el costo de explosivo, gracias al uso de cámara de aire se optimizan los costos de voladura.

## CONCLUSIONES

- En la tesis se pudo establecer que el uso de cámaras de aire en las voladuras en una mina a tajo abierto permite una optimización en el proceso, puesto que permite mejorar el factor de potencia; además, permite lograr la fragmentación adecuada que cumpla los requerimientos de mina. Y permite reducir costos de manera eficiente en cada una de las voladuras en las que se emplea este recurso.
- En la tesis se determinó que, en los casos donde se realizó voladura convencional, es decir sin cámara de aire, se obtuvo un factor de potencia de 0.29; en este tipo de voladura la columna explosiva estuvo compuesta por 7.2 metros de *Heavy ANFO 30/70* y 6 metros de taco, lo que indica la relación de la cantidad de explosivo y el tonelaje removido por taladro. Del mismo modo, se pudo observar una disminución del uso de explosivo para el removido de la misma cantidad de material en la voladura con cámara de aire, siendo que esta columna explosiva está compuesta por 6.2 metros de *Heavy ANFO 30/70* y un accesorio llamado *taponex* que ayuda a la formación de la cámara de aire, que tiene una altura de 1 metro; se logró que el factor de potencia sea de 0.25, lo que indica que hubo una disminución en el factor de potencia de 0.29 a 0.25.
- La fragmentación debería tener un máximo de 8 in para que el transporte no tenga inconvenientes, por lo tanto, en la voladura convencional y en las voladuras con el uso de la cámara de aire, el valor oscila entre 7.92 y 3.47 in, siendo un resultado similar en ambos métodos, logrando ser favorable para los objetivos de producción, ya que no supera el tamaño máximo indicado que solicita las operaciones de mina.
- Respecto a los costos de voladura, se tiene que las voladuras que no usan cámara de aire, tienen un costo por TM de \$ 0.219, mientras que las voladuras mediante el uso de cámara de aire tienen un costo por TM de \$ 0.189. Generando un ahorro de \$ 0.03/t, considerando que cada proyecto de

perforación es de 150 taladros y al año se realizan 192 voladuras aproximadamente; se tiene que al año se fragmenta un total de 46166400 TM. Por lo tanto, significa un ahorro total anual de \$ 1,405,440.00.

## RECOMENDACIONES

- Seguir realizando voladuras con el uso de cámaras de aire, afinando los parámetros de perforación y voladura, como una posible ampliación de malla de perforación.
- Respecto al factor de potencia, se recomienda realizar estudio de análisis comparativo de acuerdo al tipo de litología.
- Hacer un mayor y detallado estudio con relación a los equipos de carguío y acarreo producto del grado de fragmentación.
- Realizar pruebas de campo para lograr una mejor distribución de explosivo, insertando una segunda cámara de aire en el fondo del taladro y mantener o mejorar el grado de fragmentación.
- Realizar pruebas con otras marcas de cámara de aire, realizando previamente una evaluación de costos de adquisición. Estas pueden ser *Explodeck*, *Paraplug* y otros con el fin de analizar su efecto en factor de potencia, fragmentación y, finalmente, en los costos de voladura y perforación.
- Realizar capacitación especial para el manejo de cámara de aire con el fin de obtener eficiencia en su colocación y lograr un beneficio mayor con el uso de estos aparatos.

## LISTA DE REFERENCIAS

1. **Ministerio de Energía y Minas.** La generación de empleo en el Perú . [En línea] [Citado el: 25 de febrero de 2021.]  
[http://www.minem.gob.pe/\\_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159](http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159).
2. **Diario Gestión.** Economía. *Minería puede ser el salvavidas para economía peruana en recesión.* 2020.
3. **TALLEDO, Roberto.** *Sistemas Integrado de Gestión Seguridad y Salud Ocupacional.* 2, Nazca : ISEM, 2014.
4. **Ministerio de Comercio Exterior y Turismo.** *Reporte de Comercio Regional Ica.* Ica : s.n., 2020.
5. **ALCALDE, Jorge.** *Emulsión gasificada en reemplazo de Heavy ANFO para reducir el P80 en la fragmentación e incrementar la productividad en carguío, acarreo y chancado en mina Shougang Hierro Perú.* Trujillo : s.n., 2019.
6. **GARRIDO, Cristhian.** *Aplicación de cámaras de aire en tronadura de producción de una mina de hierro.* Concepcion - Chile : s.n., 2020.
7. **NAVARRO, Sergio.** *Evaluación del desempeño de los CAT en las tronaduras de escondida.* Santiago de Chile : s.n., 2012.
8. **MENDIVIL, Jayro.** *Reducción de costos de perforación y voladura aplicando la técnica de cámaras de aire en mina Shougang Nazca - Ica.* Cuzco : s.n., 2020.
9. **MACHUCA, Paola.** *Efecto de la cámara de aire en la voladura a tajo abierto para incrementar la tasa de excavación (Dig rate) en el tajo tapado oeste de minera Yanacocha, Cajamarca 2017.* Cajamarca : s.n., 2018.
10. **VÁSQUEZ, Abelardo.** *Reducción del factor de potencia en el proceso de voladura mediante la aplicación de cámaras de aire en columna explosiva, en la compañía minera aurífera Santa Rosa S. A. - Comarsa.* Trujillo : s.n., 2017.
11. **CUMPA, Jorge.** *Efecto de las cámaras de aire en taladros de producción para mejorar la fragmentación del material y reducir el nivel de vibraciones por voladura en minería a tajo abierto en el norte del Perú, 2016.* Cajamarca : s.n., 2016.

12. **EXSA S. A. A.** *Manual práctico de voladura*. Lima : s.n., 2001.
13. **LÓPEZ JIMENO et al.** *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid : Etimsa, 1997.
14. **SCHWARZ, Max.** Gestión de operaciones y proyectos mineros. [En línea] 8 de 4 de 2013. [Citado el: 8 de 4 de 2021.]  
<http://max-schwarz.blogspot.com/2013/03/que-es-un-botadero-de-desmante-de-mina.html>.
15. **RODRÍGUEZ, Mauricio.** *Emulsiones explosivas en Colombia*. 39, Barranquia : s.n.
16. **POMA, José.** *Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso Gold Mill*. Lima : Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012.
17. **Ministerio de Energía y Minas.** *Guía ambiental para la perforación y voladura en operaciones mineras*. Lima : s.n., 1995.
18. **FAMESA Explosivos.** *Sistemas de iniciación*. Lima : s.n., 2013.
19. **Ministerio de Minería de Chile.** Manejo de explosivos. [aut. libro] Enami. *Guía de operación para la minería*. Santiago de Chile : Ograma, 2014.
20. **Universidad Tecnológica de Chile.** Manual software 2D face. [aut. libro] INACAP. Santiago de Chile : s.n., 2014.
21. **PALACIOS, Luis.** *Diseño de malla de perforación - voladura y extracción de rocas para escolleras - Cantera - Christopher - Carabayllo 2019*. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.
22. **Ministerio de Energía y Minas.** *Glosario técnico minero*. Bogotá - Colombia : s.n., 2015. 167.
23. **DUARTE, Raúl.** *Colección de términos técnicos y vocablos propios de los trabajadores que laboran en la mina El Teniente*. Rancagua - Chile : s.n., 1993.

## **ANEXOS**



**Figura 42. Carguío de taladro**



**Figura 43. Perforadora Sandvik**



**Figura 44. Pala mecánica**



**Figura 45. Carguío de taladro**



**Figura 46. Uso del taponex**



**Figura 47. Taladros perforados**



**Figura 48. Minicargador**