



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

“MODELO PREDICTIVO DE FRAGMENTACIÓN EN VOLADURA EN FUNCIÓN DEL MACIZO ROCOSO Y EL EXPLOSIVO UTILIZADO EN UNA MINA OPEN PIT EN AYACUCHO”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Franshesca Nikol Tafur Ruiz

Fernando Mautino Ruiz

Asesor:

Ing. Rafael Napoleón Ocas Boñón

<https://orcid.org/0000-0001-9519-2532>

Cajamarca - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Miguel Ricardo Portilla Castañeda	45209190
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Daniel Alejandro Alva Huamán	43006890
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Oscar Vásquez Mendoza	01080575
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

INFORME DE SIMILITUD

Tesis

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	core.ac.uk Fuente de Internet	6%
2	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	4%
3	vdocumento.com Fuente de Internet	3%
4	repositorio.unamba.edu.pe Fuente de Internet	3%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 3%

Excluir bibliografía

Apagado

DEDICATORIA

A mis padres.

Que sin ellos no se hubiera logrado una meta más en mi vida profesional.

Mamá, gracias por estar a mi lado en esta etapa de mi posgrado, tu apoyo moral y entusiasmo que me brindaste para seguir adelante en mis propósitos.

Franshesca

A mi madre.

Por todos los ánimos, motivación y sentido de perseverancia que siempre me brinda, por acompañarme y haberme dado todo para que yo pueda lograr esta meta, Gracias.

Fernando

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en esta gran decisión y proyecto. Gracias por creer en mí y gracias a Dios por permitirme vivir y disfrutar esto.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero con perseverancia he podido lograr esta gran meta. Les agradezco, y hago presente mi afecto hacia todos ustedes, mi hermosa familia.

Franshesca

Gracias a mi madre por ser la principal promotora de mis sueños, gracias a ella por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas. Gracias por cada consejo y por cada palabra que me guió en mi vida. A nuestros mentores y maestros, que se enfocaron en hacernos grandes profesionales. Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis

Fernando

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR	2
INFORME DE SIMILITUD	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
TABLA DE CONTENIDO	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	15
1.3. Objetivos	15
1.1.1. Objetivo Principal	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
1.4. Hipótesis	16
1.4.1. Hipótesis general	16
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	17
2.1. Tipo de investigación	17
2.2. Población y muestra	18
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	18
2.4. Procedimiento	18
2.5. Aspectos éticos de la investigación	23
CAPÍTULO III: RESULTADOS	24
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	32
REFERENCIAS	35
ANEXOS	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diseño de voladura.....	22
Tabla 2: Datos del Taladro	22
Tabla 3: Diseño de Perforación	22
Tabla 4: Características del explosivo	23
Tabla 5: Características del iniciador	23
Tabla 6: Resultados de la fragmentación en los bancos de estudio.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Plano de ubicación de los bancos en el frente de minado.....	18
Figura 2: Intrumento 01 - Portal Metric	19
Figura 3: Pre Voladura - BN033	20
Figura 4: Diseño de malla de perforación	23
Figura 5: Diseño de Perforación y Carguío.....	24
Figura 6: Diseño de amarre y secuencia de salida	24
Figura 7: Desplazamiento del material.....	25
Figura 8: Análisis estadístico de la fragmentación BN-033.....	27
Figura 9: Registro Porta metric - BN-033.....	28
Figura 10: Análisis estadístico de la fragmentación BN-036.....	29
Figura 11: Registro Porta metric - BN-036.....	30
Figura 12: Análisis estadístico de la fragmentación BN-052.....	31
Figura 13: Registro Porta metric - BN-052.....	32
Figura 14: Análisis estadístico de la fragmentación BN-054.....	33
Figura 15: Registro Porta metric - BN-054.....	34

RESUMEN

En la mina en estudio de Ayacucho, se viene desarrollando operaciones a tajo abierto y uno de los objetivos de la empresa es dar a conocer los beneficios que existen al predecir la fragmentación empleando un modelo propio en función de las propiedades del macizo rocoso y del explosivo con los parámetros de perforación y explosivos utilizados en la mina. La investigación es aplicada del tipo no experimental con diseño descriptivo. La población consistió en todos los proyectos de voladura, detonados durante el mes de enero y febrero del año 2020, las técnicas utilizadas son la observación, el análisis documental y la experimentación. El diseño del modelo predictivo de fragmentación de voladura fue realizado con los registros en los cuatro proyectos de voladura, detonados durante el mes de enero y febrero del año 2020, el cuál presenta exponentes significativos con intervalos de confianza del 95%, esto se traduce a que el modelo es confiable, los cuales son asociados al costo estimado, necesario para realizar dicha voladura. Los parámetros de perforación y explosivos utilizados en la mina open pit en Ayacucho. Se concluye que en la operación minera se trabaja con diámetros de perforación de 9 7/8”. Asimismo el carguío de los taladros se realiza con ANFO, ANFO PESADO y emulsión encartuchada. El primado se realiza con booster 450 gramos, detonador electrónico y pirotécnico. Los parámetros geomecánicos del macizo rocoso se indican que, la densidad de la roca es de 2.45 TM/m³, la resistencia compresiva es de 149 Mpa, RMR de 45, por lo que se considera una roca clase III, de calidad media con calificación de resistente.

PALABRAS CLAVES: Factor de roca, RMR, Booster, ANFO.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En las operaciones unitarias de un proyecto minero, una de las actividades más importantes en la explotación minera a cielo abierto es la perforación y voladura para la extracción de los recursos minerales, ya que de ellos va depender todo el proceso de la operación, el presente proyecto de investigación tiene como propósito la predicción de la granulometría de roca mediante el diseño de modelos matemáticos tomando como función las características del macizo rocoso y del explosivo el cual juegan un papel muy importante para poder determinar el tamaño óptimo del fragmento.

Al diseñar un modelo de fragmentación en voladura se podrá mejorar la granulometría del mineral volado, de esta manera se optimizará en los siguientes procesos de la operación como carguío, acarreo y chancado.

La preocupación en muchos trabajos de investigación ha sido la fragmentación de la roca, ya que es considerada como es aspecto de mayor importancia de la producción por lo que afecta el valor de las labores de perforación, voladura y la capacidad de todo subsistema, como, el transporte, la carga y otras actividades de las labores mineras; describe en su investigación (Faramarzi & Mansouri, 2013).

Refiere en su investigación, (Esen, 2013) en “Fragmentation Modelling and the Effects of ROM Fragmentation on Comminution Circuits”, En un estudio realizado y demostrado por (Sheikh & Chung, 1987), en la Mina Denison, Ontario, Canadá, que la fragmentación puede tener un impacto de gran importancia en la economía de la recuperación de lixiviación en pilas.

Los presentes avances realizados en diseño de las mallas para voladura, los cuales se desarrollan a partir de múltiples exámenes realizadas y cuyos resultados son ajustados a ecuaciones matemáticas, por ende, de forma previa es muy conveniente conocer de manera precedente, la granulometría de una pila de material volado. Así mismo, determina que el propósito de una voladura, es la cual en la que se buscan rendimientos óptimos en la fragmentación y desplazamiento controlado del material. Para alcanzar este propósito y estimar la adecuada rentabilidad de una voladura, se deben tener en cuenta tres elementos fundamentales, que son sujetos para un correcto diseño y control de las voladuras, es decir son correcta cantidad y distribución y confinación de energía. (La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid , 2013)

El estudio de diseños de modelos de fragmentación, en la predicción de la fragmentación del material volado, lleva a nombrar a diversos personajes como. Larsson, Kuznetsov, Svedefo, Dinis da Gama, Cunningham Claude., que según el Instituto Geológico y Minero de España han realizado estudios y pruebas. Las investigaciones, demuestra lo importante que es el mundo científico y académico, para realizar en la actualidad la fragmentación en los procesos de voladura de rocas en referencia a la ingeniería.

(Rojas Linares, 2018). En una investigación, menciona que el parámetro que define el resultado de la voladura es la granulometría de la pila de un material volado y la para conocerlo de una manera más exacta, es mediante el índice de fragmentación medio X 50, el cual se obtiene mediante diferentes técnicas, la más usual se determina mediante distintas fracciones que ingresan a la planta de tratamiento, y que pueden ser separados por medio de sub procesos y mallas en las diferentes fracciones.

No existe fórmula o un método de modelo predictivo de fragmentación de rocas que sea exacta. Sin embargo, un gran número de investigadores han establecido desde simples fórmulas empíricas hasta modelos con ordenador en los últimos años. Dichos modelos predictivos de fragmentación de rocas son: fórmulas de Larsson, modelo de SVEDEFO, Abaco de Gustafsson, Kuz-Ram, (Kuznetsov y Rosinn Rammler), Modelo informatizado bidimensional, Fórmula de DINIS DA GAMA. Por último, el modelo híbrido es un modelo teórico basado en algoritmo imperial competitivo y red neuronal. (Falcon Marín, 2019).

La fragmentación de la roca está afectada por parámetros que están en función a las características del macizo rocoso (incontrolables) y del explosivo.

(Fisne & Hudaverdy, 2012). Usando el tamaño medio de la fragmentación y el índice de la fragmentación, en base a un análisis multivalente realizan una investigación de la fragmentación de la voladura.

(Archorena López, 2017), en su investigación " Aplicación del Modelo predictivo de fragmentación en una matriz de decisión", menciona que diseñar un modelo Predictivo de Fragmentación es simular la pila de material volado, para lo cual se debe emplear una base experimental obtenida del análisis de voladuras realizadas en el tajo. La fragmentación de material será prevista en relación con sus costos estimados con el fin de obtener múltiples alternativas de diseño.

Dentro de la fragmentación y sus modelos; el modelo de fragmentación de Kuz-Ram es la abreviación de dos principales contribuyentes a las ecuaciones que forman la base del modelo: Kuznetsov y Rosin-Rammler. Se apoyó en las antiguas publicaciones rusas que

abrieron una relación simple entre el tamaño medio de fragmentación y parámetros de tronadura.

La curva de Rosin-Rammler tanto en minería como en procesamiento de minerales ha sido generalmente reconocida porque entrega una buena descripción de la distribución de tamaño de las rocas tronadas y trituradas mientras que la ecuación de Kuznetsov muestra que la estimación del X50, después de la tronadura presta una estimación del tamaño medio de partícula de roca, Donde X50 en el fragmento es el tamaño medio (en función a A, V₀, Q); A es el factor de roca, V₀ es el volumen de roca quebrado por hoyo y Q es la masa de TNT que es equivalente en energía al de la carga de cada hoyo. La ecuación de Kuznetsov, por lo tanto, establece que el tamaño medio de partícula de una tronadura depende de las propiedades de la roca y del explosivo concluye (Choqueña Ccallata , 2017).

Proporciona una estimación del tamaño medio la ecuación de Kuznetsov, o sea, el tamaño del tamiz por el cual pasa el 50% de la roca. Puesto que la ecuación de Rosin Rammler se puede definir completamente por un punto de la curva y la pendiente de la línea Rosin Rammler, todo lo que se necesita después de la determinación del tamaño medio, es una estimación de n en la ecuación de Rosin Rammler y se puede calcular una distribución completa de tamaño de la pila.

El parámetro más importante en el modelo Kuz-Ram es el factor de roca. Los últimos desarrollos en la aplicación del modelo usan una ligera modificación al índice de tronabilidad de Lilly para calcular el factor de roca. Adicional a esto es muy importante conocer cada uno de las propiedades y explosivo.

Las ecuaciones que necesitamos en la presente investigación son Kuznetsov (1973), dicha ecuación es reparametrizada mediante ajuste no lineal, las “Ecuaciones Tipo

Kuznetsov" obtenidas de tamaños de fragmentos X50 y X80, son incorporadas como parámetros en la Función Weibull Rosin Rammler Ordinaria (WRRO), la cual es utilizada como función descriptora de la pila de material volado.

La función WRRO, es usada por existir dificultad de estimar las colas de las distribuciones, debido a que hay pocos ejemplares para su muestreo. Así como el Sistema Split tiene un rango de estimación de medida, entre el 50% hasta 85%, la función WRRO da buenos ajustes en la "zona central" ($20% < p < 80%$). Las variables que utiliza este modelo son: factor de roca (A); consumo específico (q), en Kg/ m³; carga media del taladro (Q), en Kg; energía Media (E), en KJ/Kg.

Finalmente, muchas investigaciones comprueban que, al tener una mejor fragmentación del macizo rocoso, en las actividades posteriores se maximizará costos. Por ejemplo: En carguío se tendrá mejor los tiempos de carguío para optimizar el rendimiento de los equipos; en transporte se tendrá un buen apilamiento del mineral en la tolva de los volquetes y mejorar su centro de gravedad o evitando tener vacíos en la tolva de equipo de transporte; en Chancado, aumentara el rendimiento de la chancadora o evitara el uso de este equipo llegando al tamaño máximo, obteniéndose una granulometría buena, el mineral será transportado directamente hacia el pad de lixiviación y también se ahorrará energía en la chancadora.

1.2. Formulación del problema

¿Será posible hacer un modelo predictivo de fragmentación en voladura en función a las propiedades del macizo rocoso y el explosivo utilizado en una mina open pit en Ayacucho?

1.3. Objetivos

1.1.1. Objetivo Principal

Diseñar un modelo predictivo de fragmentación en voladura para una mina open pit en función a las propiedades del macizo rocoso y su interacción con el explosivo utilizado, en Ayacucho.

1.1.2. Objetivos Específicos

Determinar los parámetros de perforación y explosivos utilizados en la mina open pit en Ayacucho.

Determinar los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y estimar el factor de roca.

Predecir tamaños de fragmentos X80 con un intervalo de confianza del 95%. asociados al costo estimado utilizando las ecuaciones del modelo predictivo

Realizar el análisis comparativo de fragmentación del modelo y el estimado del Split.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Evaluando las propiedades del macizo rocoso y el explosivo utilizado, es posible diseñar un modelo predictivo de fragmentación de la voladura en la mina open pit en Ayacucho.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación es aplicada del tipo no experimental con diseño descriptivo. El tipo de investigación aplicada se centra en el análisis y solución de problemas de varias índoles de la vida real, así como también se sostiene de avances científicos y se define por su interés en la aplicación de los conocimientos. Según Vargas (2009), docente de la maestría en Orientación de la Universidad de Costa Rica. Muestra que el tipo de investigación Aplicada es una forma de conocer las realidades con una prueba científica; requiere obligatoriamente de un marco teórico, sobre el cual se basará para generar una solución al problema específico que se quiera resolver.

Según Palella y Martins, (2012) "El diseño No experimental es el cual es realizado sin manipular en forma deliberada ninguna variable. El investigador no sustituye intencionalmente las variables independientes. Se observan los hechos tal y como se presentan en su contexto real y en un tiempo determinado o no, para luego analizarlos. Por lo tanto, en este diseño no se construye una situación específica, sino que se observan las existentes. Las variables independientes ya han ocurrido y no pueden ser manipuladas.

Según Sampieri (1998. Pág. 60), los estudios descriptivos permiten detallar situaciones y eventos, es decir, como es y cómo se manifiesta determinado fenómeno y busca especificar propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis. En esta investigación se busca describir el diseño de un modelo predictivo de fragmentación en voladura a tajo abierto

que describa la distribución granulométrica de la pila y determine el X80 de material volado.

2.2. Población y muestra

Población

Todos los proyectos de voladura, detonados durante el mes de enero y febrero del año 2020

Muestra

Cuatro proyectos de voladura, detonados durante el mes de enero y febrero del año 2020:

BCO 4120_07 BCO 4120_10 BCO 4128_01 BCO 4136_06

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Las técnicas utilizadas son la observación, el análisis documental y la experimentación.

La Observación

Se realizó la observación directa en campo, mediante la visita a los bancos dónde se viene realizando la voladura.

El Análisis documental

Se investigó antecedentes previos de trabajos de investigación relacionados a modelos predictivos de fragmentaciones en diversas partes del Mundo.

2.4. Procedimiento

2.4.1. Primera etapa: Gabinete

Inicialmente se procede a la revisión de antecedentes, estudios previos, realizados respecto al tema, en los diferentes ámbitos, tanto local, nacional como internacional, para lo cual se recurrió a los repositorios virtuales de varias

universidades, de la misma forma se recolecto información correspondiente a la fragmentación y a los 2 tipos de explosivos utilizados en este trabajo de investigación.

2.1.1. Segunda etapa: Campo

En primer lugar, se tomaron las medidas de seguridad necesarias en contraste con los peligros que se encuentren en los niveles (BCO 4120_07, BCO 4120_10, BCO 4128_01, BCO 4136_06) y se tuvo el EPP necesario para evitar cualquier tipo de incidentes. Posteriormente la toma de datos se realizó diariamente, con la finalidad de registrar las características de cada uno de los bancos de voladura y los taladros correspondientes para posteriormente recolectar la información de la fragmentación mediante el uso del wipfrag.

Para desarrollar el análisis de los datos obtenidos se tuvo que hacer una comparación con los modelos de fragmentación existentes y a través de ellos predecir con los datos reales de los bancos analizados en función a las características del macizo rocoso y el explosivo utilizado.

Finalmente, después de haber realizado los análisis, discusiones y comparaciones necesarias y habiendo llegado a una conclusión definitiva se pudo evidenciar que los objetivos e hipótesis planteado (s) han sido desarrollados y solucionados.

Se realizaron diversos procedimientos en campo para procesar la información in situ con el programa Split para determinar la curva granulométrica de todas las voladuras planteadas en la muestra. También se procesó la información con los explosivos utilizados.

Ecuaciones Tipo Kuznetsov

Los tamaños de la distribución de roca fragmentada por voladura se puede expresar mediante fórmulas del tipo Kuznetsov. Lo importante es emplear las tendencias de Kuznetsov y aplicarlos al yacimiento.

$$X_{\alpha} = A q^a Q^b E^{(a+b)}$$

Donde:

Factor de Roca (A): Cunningham 1987

Consumo Específico (q): Kg/m³

Carga Media del Taladro (Q): Kg

Energía Media (E): KJ/Kg

1. Factor de roca

El modelo utiliza el Factor de Roca propuesto por Cunningham en 1987.

PARÁMETRO	RANKING
Descripción de la Masa Rocosa (RMD)	
Pulverulento/Quebradizo	10
Diaclasado verticalmente	JPS + JPA
Masiva	50
Espaciamiento de Fracturas (JPS)	
0.1 m	10
0.1 a sobre tamaño	20
Sobre tamaño a tamaño de la malla	50
Angulo del Plano entre Fracturas (JPA)	
Buza fuera de la cara	20
Rumbo perpendicular a la cara	30
Buza hacia la cara	40
Influencia de la Densidad (RDI)	$RDI=25*SG - 50$
Factor Dureza (HF)	E/3 para $E < 50$ GPa, UCS/5 para $E > 50$

Figura 1. Tabla para determinar el Factor de roca

Fuente: Cunningham, 1987.

2. Consumo específico (q)

Es el dato de kilogramos de explosivo por metro cúbico.

$$q = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} q_i}{n * B * S * H}$$

3. Carga media (Q)

Es el dato de kilogramos de explosivo por taladro.

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} q_i}{n}$$

4. Energía media (E)

Es la energía total: Kilo joule por kilogramo de explosivo

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_i * E_i}{\sum_{i=1}^{i=n} m_i}$$

Parámetro de Forma ni

El objetivo del modelo es representar la granulometría mediante una función.

$$R = e^{-\ln(2) * \left(\frac{X}{X_{50}}\right)^n}$$

Si R = 0.2 la ecuación anterior se presenta de la siguiente manera;

$$ni = \frac{\ln\left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)}\right)}{\ln\left(\frac{X_{80}}{X_{50}}\right)}$$

Concentración de carga lineal

0.000785 *Densidad Explosivo (gr/cm³) *(Diámetro Taladro (mm))²

Altura de carga

Altura de Carga (m) = Altura de Banco (m)+ Sobre Perforación (m) -
Altura de Taco (m)

Carga del taladro

$$\text{Carga del Taladro (Kg)} = \text{Altura de Carga (m)} * \text{Concentración de carga lineal (kg/m)}$$

Volúmen de material fragmentado

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = \text{Burden (m)} * \text{Espaciamiento (m)} * \text{Altura de Banco (m)}$$

2.5. Aspectos éticos de la investigación

Los aspectos éticos siempre se deben considerar en una investigación ya que se debe tener en cuenta todas las fuentes de información que se requiera y contener una adecuada cita y referencia para cada una.

La conciencia con respecto a la responsabilidad científica y profesional ante la sociedad. En particular, es deber y responsabilidad personal del investigador considerar cuidadosamente las consecuencias que la realización y la difusión de su investigación implican para los participantes en ella y para la sociedad en general. Este deber y responsabilidad no pueden ser delegados en otras personas (Universidad Católica los Ángeles, 2016).

La Universidad Católica los Ángeles, 2016. Dentro de las buenas prácticas éticas considera: Las fuentes bibliográficas utilizadas en el trabajo de investigación serán citadas cumpliendo las normas APA respetando los derechos de autor, en la publicación de los trabajos de investigación se debe cumplir lo establecido en el Reglamento de Propiedad Intelectual Institucional y demás normas de orden público referidas a los derechos de autor, se aplicará un rigor científico asegurando la validez, la fiabilidad y credibilidad de sus métodos, fuentes y datos y además se debe garantizar estricto apego a la veracidad de la investigación en todas las etapas del proceso.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y EXPLOSIVOS UTILIZADOS EN EL YACIMIENTO A TAJO ABIERTO EN AYACUCHO

Tabla 1

Parámetros de la perforación

DIÁMETROS DE PERFORACIÓN		3.5 "	4.5 "	5 "	6 "	7 7/8"	9 7/8"
PERFORADORAS	DP-1500 I						
	FLEXI ROCK						
	RANGER 700						
	DMM-2						
	CAT MD 6420						
	SKS-12						
TALADROS	SECUNDARIO						
	PRE CORTE						
	CONTORNO						
	BUFFER						
	PRODUCCIÓN						

Fuente: Empresa Minera en estudio

Tabla 2

Explosivos utilizados

PRODUCTO	DENSIDAD (g/cm ³)	ENERGÍA TOTAL (Kj/kg)
ANFO	0.75	3820
HA-28	0.9	3570
HA-37	1	3450
HA-46	1.16	3330
HA-45/55	1.27	3250
HA-55	1.27	3200
HA-64	1.31	3000
HA-73	1.31	2960

Fuente: Empresa Minera en estudio

En la tabla 2 se observa que la energía media para el HA-37 es 3450 KJ/Kg

El Carguío de los taladros se realiza con ANFO, ANFO PESADO y emulsión encartuchada. El primado se realiza con booster 450 gramos, detonador electrónico y pirotécnico.

Tabla 3

Parámetro de diseño

Parámetros de diseño	
Diámetro del taladro (mm)	251
Altura del taco (m)	5
Altura de banco (m)	10
Sobre perforación (m)	1
Factor de roca (A)	3.6
Burden (m)	5.2
Espaciamiento (m)	6

El explosivo utilizado es HA-37

Fuente: Empresa Minera en estudio

Tabla 4

Concentración de carga lineal y carga del taladro

Densidad explosivo (g/cm ³)	Diametro del taladro (mm)	Concentración de carga lineal (kg/m)	Altura de banco (m)	Sobre perforación (m)	Altura de taco (m)	Altura de carga (m)	Carga del taladro (kg)
0.99	251	48.96	10	1	5	6	293.77

Fuente: Empresa Minera en estudio

3.2 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL MACIZO ROCOSO Y ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE ROCA

Tabla 5

Parámetros geomecánicos del macizo rocoso

Parámetros geomecánicos	
Densidad de la roca (TM/m ³)	2.45
Resistencia Compresiva (Mpa)	149
Módulo de young (Gpa)	11.9
Espaciamiento de fracturas (JPS)	0.3 m a 0.5 m
Orientación del plano entre fractura:	75° buza afuera de la cara

Fuente: Empresa Minera en estudio

Tabla 6

Estimación del factor de roca (A)

Factor de roca (A)	
RMR	45
JPS	20
JPA	25
HF	4
RDI	11.25
Factor de roca estimado:	3.6

Fuente: Empresa Minera en estudio

3.3 PREDICIÓN TAMAÑOS DE FRAGMENTOS X80 ASOCIADOS AL COSTO ESTIMADO

Tabla 7

Concentración de carga lineal y carga del taladro

Burden (m)	Espaciamiento (mm)	Altura de banco (m)	Volúmen (m ³)	Carga del taladro (kg)	Consumo específico (kg/m ³)
5.2	6	10.00	312	293.77	0.94

Fuente: Empresa Minera en estudio

Las ecuaciones del modelo predictivo son:

$$X_{50} = A * (q)^{-1.1559} * (Q)^{0.8785} * E^{-0.2774} \quad \text{I.C:} \quad \begin{matrix} \text{a: [-1.7762,-0.5356]} \\ \text{b: [0.5176, 1.2345]} \end{matrix}$$

$$X_{80} = A * (q)^{-1.1051} * (Q)^{0.9274} * E^{-0.1777} \quad \text{I.C:} \quad \begin{matrix} \text{a: [-1.6267,-0.5836]} \\ \text{b: [0.6239, 1.2310]} \end{matrix}$$

Los exponentes son significativos con intervalo de confianza del 95%.

El Modelo Predictivo de Fragmentación del yacimiento es representado por la siguiente expresión:

$$P(X) = 1 - e^{-\ln(2) * \left(\frac{X}{X_{50}}\right)^{\left(\frac{\ln\left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)}\right)}{\ln\left(\frac{X_{80}}{X_{50}}\right)}\right)}$$

El modelo predice tamaños de fragmentos X80, los cuales son asociados al costo estimado, necesario para realizar dicha voladura.

Costo de perforación:

$$\frac{CPm \left(\frac{\$}{m}\right) * (H(m) + SD(m))}{B(m) * Es(m) + H(m) * De \left(\frac{TM}{m^3}\right)}$$

Costo de voladura:

$$\frac{C(m) * DCL \left(\frac{Kg}{m}\right) * CM \left(\frac{\$}{Kg}\right) + CPr(\$)}{B(m) * Es(m) + H(m) * De \left(\frac{TM}{m^3}\right)}$$

Fragmentación X80:

$$X_{80} = A * (q)^{-1.1051} * (Q)^{0.9274} * E^{-0.1777}$$

Reemplazando los interceptos en la ecuación anterior se tiene:

$$X_{50} = 3.6 * (0.94)^{-1.1559} * (293.77)^{0.8785} * (3450)^{-0.2774} = 59.5 \text{ mm}$$

$$X_{80} = 3.6 * (0.94)^{-1.1051} * (293.77)^{0.9274} * (3450)^{-0.1777} = 176.6 \text{ mm}$$

Luego para calcular el exponente ni, se tiene:

$$ni = \frac{\ln\left(\frac{\ln(5)}{\ln(2)}\right)}{\ln\left(\frac{176.6}{59.5}\right)} = 0.77$$

Se tiene que la Función que describe la distribución granulométrica de la pila de material a volar:

$$P(x) = 1 - e^{-\ln(2)\left(\frac{x}{59.5}\right)^{0.77}}$$

3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE FRAGMENTACIÓN DEL MODELO Y EL ESTIMADO DEL SPLIT.

Tabla 8

Resultados de Análisis granulométrico predictivo de las voladuras

Pulgadas	% pasante del modelo	% pasante split
0.25	111.5	14.13
0.5	18.9	21.66
0.75	24.9	27.53
1	30.1	32.48
1.5	38.8	40.68
2	45.8	47.44
3	56.8	58.01
4	65.0	65.31
5	71.3	71.59
6	76.2	76.91
7	80.2	81.48
8	83.4	85.17
9	86.0	88.29
10	88.2	90.77
12	91.4	94.40
15	94.6	97.46
20	97.4	98.85
24	98.5	99.21
25	98.7	99.26
30	99.3	99.50
36	99.7	99.67
40	99.8	99.75
42	99.8	99.84
45	99.9	99.89
P80 =	6.27	6.68

pulgadas

Luego se realizó la gráfica Tamaño X (pulgadas) vs % pasante (del modelo y split) para comparar los dos X80, se obtiene que el X80 del modelo es de 6.27” y el X80 estimado por Split de 6.68”.

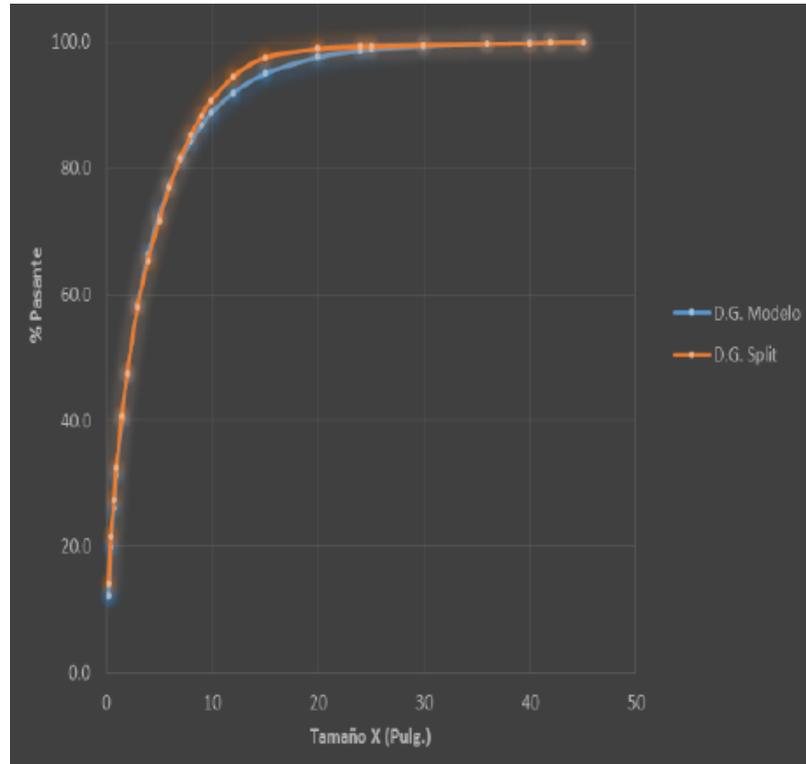


Figura 2. Análisis granulométrico predictivo de las voladuras

El modelo de regresión con un ajuste es de 99.6%, el X80 del modelo es de 6.5” y el X80 estimado por Split de 7”

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

En la investigación se tiene como objetivo general “Diseñar un modelo predictivo de fragmentación en voladura para una mina a tajo abierto en función a las propiedades del macizo rocoso y su interacción con el explosivo utilizado, en un yacimiento a tajo abierto en Ayacucho”; y los resultados obtenidos tienen como antecedente el realizado por Anchorena López (2017), el cuál menciona que diseñar un modelo Predictivo de Fragmentación es simular la pila de material volado, para lo cual se debe emplear una base experimental obtenida del análisis de voladuras realizadas en el tajo. Las predicciones en fragmentación de material serán relacionadas con sus costos estimados con el fin de obtener múltiples alternativas de diseño; asimismo y en base a resultados reales de las fragmentaciones p80 de los cuatro proyectos de voladura detonados durante el mes de enero y febrero del año 2020, se puede observar que el X80 del modelo es de 6.27” y el X80 estimado por Split de 6.68”. Teniendo una afinidad a esto (Rojas Linares, 2018) llegaron a los mismos resultados ya que menciona que “el parámetro que va a definir el resultado de una voladura es la granulometría de la pila de un material volado y la manera más exacta de conocerlo, es mediante el índice de fragmentación medio X 50, que se obtiene mediante diferentes técnicas, la más usual se determina mediante las distintas fracciones que ingresan a la planta de tratamiento, y que pueden ser separados por medio de sub procesos y mallas en las diferentes fracciones.

Para el primer objetivo específico, donde se quiere determinar los parámetros de perforación y explosivos utilizados en el yacimiento a tajo abierto en Ayacucho,

en la tabla 1 y 2 se indican que para los taladros de producción se trabaja con diámetros de perforación de 9 7/8”. Asimismo el carguío de los taladros se realiza con ANFO, ANFO PESADO y emulsión encartuchada. El primado se realiza con booster 450 gramos, detonador electrónico y pirotécnico. Para el segundo objetivo específico, donde se quiere determinar los parámetros geomecánicos del macizo rocoso y estimar el factor de roca, en la tabla 5 y 6 se indican que la densidad de la roca es de 2.45 TM/m³, la resistencia compresiva es de 149 Mpa, RMR de 45, por lo que se considera una roca clase III, de calidad media con calificación de resistente. Para el tercer objetivo específico, donde se quiere predecir tamaños de fragmentos X80 con un intervalo de confianza del 95%. asociados al costo estimado utilizando las ecuaciones del modelo predictivo, el modelo predice tamaños de fragmentos X80, los cuales son asociados al costo estimado, necesario para realizar dicha voladura. Los resultados concuerdan con la investigación de (Choqueña Ccallata , 2017), quién menciona “El parámetro más importante en el modelo Kuz-Ram es el factor de roca. Los últimos desarrollos en la aplicación del modelo usan una ligera modificación al índice de tronabilidad de Lilly para calcular el factor de roca. Adicional a esto es muy importante conocer cada uno de las propiedades y explosivo.

4.2. Conclusiones

De los resultados del modelamiento matemático en los cuatros proyectos de voladura, detonados durante el mes de enero y febrero del año 2020, se obtuvo el modelo predictivo de fragmentación en voladura para la mina a tajo abierto en función a las propiedades del macizo rocoso y su interacción con el explosivo utilizado, en un yacimiento a tajo

$$P(x) = 1 - e^{-\ln(2)\left(\frac{x}{59.5}\right)^{0.77}}$$

abierto en Ayacucho, representado por la siguiente formula:

Con respecto a los parámetros de perforación y explosivos utilizados en el yacimiento a tajo abierto en Ayacucho, se concluye que en la operación minera se trabaja con diámetros de perforación de 9 7/8". Asimismo el carguío de los taladros se realiza con ANFO, ANFO PESADO y emulsión encartuchada. El primado se realiza con booster 450 gramos, detonador electrónico y pirotécnico.

Los parámetros geomecánicos del macizo rocoso se indican que, la densidad de la roca es de 2.45 TM/m³, la resistencia compresiva es de 149 Mpa, RMR de 45, por lo que se considera una roca clase III, de calidad media con calificación de resistente.

El modelo Predictivo de Fragmentación desarrollado presenta exponentes significativos con intervalos de confianza del 95%, esto se traduce a que el modelo es confiable, los cuales son asociados al costo estimado, necesario para realizar dicha voladura. El modelo Predictivo realizado gana confiabilidad en el tiempo por lo que es necesario analizar más voladuras, incorporarlas al modelo que se tiene, generando variabilidad en los datos que se incorporen.

REFERENCIAS

- Choqueña Ccallata , J. J. (2017). "*Optimización de la fragmentación de la roca mediante las características geomecánicas y doble iniciación no electrónica en la perforación y voladura de bancos*". 32-40. En línea, recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4675>
- Archorena López, A. E. (2017). "*Modelo predictivo de Fragmentación y su aplicación en una matriz de decisión*." INSTITUTO DE INGENIEROS DE MINAS DEL PERÚ, 1-17. En línea, recuperado de <https://www.academia.edu/35914933/modelo/predictivo/de/fragmentación>
- Esen, S. (2013). "*Fragmentation Modelling and the Effects of ROM Fragmentation on Comminution Circuits*". INTERNATIONAL MINING CONGRESS & EXHIBITION OF TURKEY, 2-11. En línea, recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/288128319-Fragmentation-modellin>
- Falcon Marín, A. R. (2019). "*Revisión en modelos predictivos de fragmentación de rocas y equilibrio de las impedancias de explosivos y macizo rocoso en tajo abierto*". En línea, recuperado de <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/03-08/2.pdf>
- Faramarzi, F., & Mansouri, H. (2013). "*International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*". 82-84. En línea, recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160913000087>.
- Rojas Linares, E. L. (2018). "*Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas. Industrial Data*", 2-11. En línea, recuperado de <http://dx.doi.org/10.15381/idata.v21i1.14907>

Fisne, A., & Hudaverdy, T. (2012). *"Investigation of the blast fragmentation using the mean fragment size and fragmentation index"*. En línea, recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/257550412>

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid . (2013). *"Perforación y Voladura de Rocas en minería"*. España. En línea, recuperado de <http://oa.upm.es/21848/1/20131007PERFORACIONYVOLADURA.pdf>

Poma, J. (2012). “Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso gold mill (caso - minera yanacocha)-año 2012”. (tesis pre grado). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Quispe, C. (2018). “Análisis de la fragmentación resultante de voladura para la evaluación de la expansión de las mallas de perforación aplicando sistema de iniciación electrónico en Minera Coimolache-2016”. (tesis pre grado). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú.

Villanueva, R. (2015). “La emulsión gasificada: Un explosivo eficiente para reducir los costos de voladura a tajo abierto”. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/romelvillanuevalujan/la-emulsion-gasificada>

ANEXOS

ANEXO N°01: Ubicación de los frentes de minado en estudio



Fuente: Área de Perforación y Voladura.

ANEXO N°02: Velocidad de detonación del explosivo

Características técnicas

Densidad relativa de la matriz (g/cm ³)	1,32 ± 3%
Densidad relativa de la matriz sensibilizada (g/cm ³)	0,80 a 1,20
Viscosidad de la matriz en condiciones normales, (cP) (*)	Min. 12 000
Velocidad de detonación de la matriz sensibilizada (m/s) (**)	4 800 a 5 800
Presión de detonación (kbar)	51 a 98
Energía (kcal/kg)	805
Volumen normal de gases (L/kg)	1 025
Potencia relativa en peso (%) (***)	90
Potencia relativa en volumen (%) (***)	152
Resistencia al agua	Excelente
Categoría de humos	Primera
Diámetro crítico (mm)	76 (3 pulgadas)
Tiempo de permanencia en el taladro (días)	7

Fuente: Área de Perforación y Voladura.

ANEXO N°03: Ficha técnica del explosivo Sang Apu 100%



AGENTES DE VOLADURA

SAN-G APU®

EMULSIÓN / HIDROGEL A GRANEL NO SENSIBILIZADA

Descripción y composición

La SAN-G APU® es una emulsión gasificable formada por una solución microscópica oxidante dispersa en una fase combustible continua y estabilizada por un emulsificante.

La SAN-G APU® puede ser sensibilizada en las operaciones mineras antes de su carguío en los taladros con la solución gasificante, produciendo una mezcla explosiva de menor densidad, resistente al agua, muy viscosa y de mayor velocidad de detonación que el ANFO, también puede ser sensibilizada con ANFO en diferentes proporciones y ser gasificada.

Tipos y usos

La SAN-G APU® se ha diseñado especialmente para ser usado en minería superficial en macizos rocosos cuya temperatura esté comprendida entre 0 °C y 40 °C.

La SAN-G APU® debe ser cargada por camiones fábrica de FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C. que a diferencia de las unidades convencionales que cargan ANFO pesado, están provistos de un sistema de gasificación de la emulsión matriz, constituido por una unidad de programación lógica (PLC) que permite programar la cantidad de emulsión matriz, Anfo, solución gasificante y agua a

dosificar; así como controlar en tiempo real la temperatura del agente y la presión de bombeo. Posee un sistema de seguridad que detiene automáticamente el proceso de bombeo y gasificación cuando la presión de la bomba de trabajo alcanza 160 psi.

La SAN-G APU® puede ser cargado mediante bombeo o por gravedad directamente desde los camiones fábrica hacia el interior de los taladros. Una vez cargado los taladros se deja transcurrir unos 20 minutos para la colocación del “taco” en el taladro.

Entre las ventajas de usar la SAN-G APU® se tiene:

- Puede utilizarse en terrenos secos, húmedos o inundados y con rocas de diferente dureza.
- Al cargar los taladros, las columnas explosivas se acoplan por completo, desarrollando con dicha condición toda la energía que se deposita en ellas.
- Su uso representa un trabajo seguro, toda vez que la emulsión matriz se sensibiliza al final de la unidad mecanizada; vale decir que se trata de un producto no explosivo antes de ingresar en los taladros.
- Puede ser cargado a diferentes densidades y energías, para cumplir siempre con el objetivo de producir una buena fragmentación y mejorar la productividad desde la mina hasta su molienda en la planta o su disposición en las canchas de lixiviación.
- Por su alto poder rompedor es posible ampliar las plantillas de perforación y de reducir los costos involucrados.
- Permite reducir el tiempo del carguío por su practicidad.

- La SAN-G APU® sensibilizado debe ser iniciado por una prima conformada por un Booster HDP, de un peso concordante con el peso de las columnas explosivas usadas y con un detonador FANEL®.
- También puede ser sensibilizado con ANFO en diferentes proporciones para formar ANFO PESADO y ANFOS PESADOS GASIFICABLES.

Características técnicas

Densidad relativa de la matriz (g/cm ³)	1,32 ± 3%
Densidad relativa de la matriz sensibilizada (g/cm ³)	0,80 a 1,20
Viscosidad de la matriz en condiciones normales, (cP) (*)	Min. 12 000
Velocidad de detonación de la matriz sensibilizada (m/s) (**)	4 800 a 5 800
Presión de detonación (kbar)	51 a 98
Energía (kcal/kg)	805
Volumen normal de gases (L/kg)	1 025
Potencia relativa en peso (%) (***)	90
Potencia relativa en volumen (%) (***)	152
Resistencia al agua	Excelente
Categoría de humos	Primera
Diámetro crítico (mm)	76 (3 pulgadas)
Tiempo de permanencia en el taladro (días)	7

(*) Medido en el viscosímetro BROOKFIELD HA DVII a 50 RPM.

(**) Confinado en tubo de PVC de 6 pulgadas de diámetro.

(***) Potencias relativas referidas al ANFO, con potencia convencional de 100.

Presentación

La SAN-G APU® es presentada a granel y transportada en forma segura en camiones cisternas.

Transporte

Clase: 5
División: 5.1
N° ONU: 3218



Fuente: Famesa (2022)