



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio del tamaño de
fragmentación por voladura
en minería a cielo abierto**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniera de minas y metalurgista

P R E S E N T A

Perla María Sánchez Ortiz

ASESOR DE INFORME

Ing. Roberto Zenil Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de pertenecer a ella, otorgándome una formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería por darme los conocimientos necesarios para enfrentar el mundo laboral y por mantener constantes programas de desarrollo que fomentan el aprendizaje.

A mi asesor de informe el Ing. Roberto Zenil por resolver mis dudas y hacer las correcciones pertinentes, a la Ing. Viridiana Guzmán por apoyarme para que se llevara a cabo este trabajo, a la Ing. Guadalupe Ochoa por sus comentarios y sugerencias. Al Ing. Israel Ortega Casillas y al M.I. Roberto Ascencio por la revisión del informe.

A mis padres por guiarme, por ayudarme siempre para que yo pudiera estudiar y ser un ejemplo de superación, a mi hermana Vania por impulsar mis decisiones y estar presente en todo momento.

A mis amigos de la universidad, en especial a Silvia Fernández por compartir una de mis mejores etapas de la vida.

ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Objetivos	3
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación	3
CAPITULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1. Principios básicos.....	4
2.2. Propiedades de los explosivos.....	5
2.3. Uso de explosivos en minería a cielo abierto.....	7
2.4. Mecanismos de fragmentación de la roca	12
2.5. Voladura de rocas en minería a cielo abierto	14
2.5.1. Factores determinantes en la voladura de rocas	14
2.5.2. Diseño de voladuras	16
2.6. Efectos de la fragmentación en la operación minera	19
CAPITULO 3. METODOLOGIA EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN ...	21
3.1. Evaluación de la voladura	21
3.2. Análisis de la fragmentación por voladura	21
CAPITULO 4. ESTUDIO DE CASO	27
4.1. Antecedentes	27
4.2. Pruebas en campo	31
4.2.1. Cargado con doble iniciador	31
4.2.2. Variables de entrada.....	32
4.2.3. Desarrollo de la prueba	33
4.3. Análisis de resultados	33
4.4. Control del proceso	35
4.5. Relación de variables	36
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	38
LISTA DE REFERENCIAS	39
ANEXOS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de reacciones en función de velocidad de reacción. (Bernaola Alonso, Castilla, y Herrera Herbert, 2013).....	5
Figura 2 Tabla de densidades típicas de explosivos más usados. (Konya C. , 1998)	6
Figura 3 Mezcla Emulsión-ANFO (Izquierda), Camión mezclador (Derecha).....	9
Figura 4 Sistema de iniciación electrónico utilizado en las pruebas.....	11
Figura 5 Booster (Dyno Nobel, 2019)	11
Figura 6 Mecanismo de fracturas radiales en barreno (López Aburto, 2014).....	13
Figura 7 Propagación de la onda de choque en un barreno en banco. (EXSA, 2015)	13
Figura 8 Parámetros empleados en voladuras de banco. (EXSA, 2015).....	17
Figura 9 Carga después de la voladura	22
Figura 10 Equipo portamétrico	23
Figura 11 Identificación de sólidos en equipo	23
Figura 12 (Izquierda) Gráfico de distribución granulométrica. (Derecha) Tabla con valores acumulados	24
Figura 13 Gráfico con valores objetivo según el proceso (Izquierda). Histograma con porcentaje de finos (Derecha).....	25
Figura 14 Plano de banco: Puntos de muestreo (Letras y puntos). Voladuras cargadas (cuadrículas)	26
Figura 15 Barreno con cargado empleado inicialmente.....	28
Figura 16 Distribución granulométrica. Histograma del porcentaje de finos presente en la granulometría del cargado empleado inicialmente.....	29
Figura 17 Histograma de valores individuales en el software Miinitab.....	30
Figura 18 Relación de variables P80 vs Llenado de bote	30
Figura 19 Observaciones realizadas.....	31
Figura 20 Distribución de cargas empleando doble iniciador.....	32
Figura 21 Distribución granulométrica en sulfuros después del uso del doble iniciador. Histograma con porcentaje de finos	33
Figura 22 Distribución granulométrica en óxidos después del uso del doble iniciador. Histograma con porcentaje de finos	34
Figura 23 Relación de variables P80 vs Llenado de bote	34
Figura 24 Distribución granulométrica promedio al aplicar el cargado con doble iniciador. Histograma del porcentaje de finos presente en la granulometría.....	35
Figura 25 Comparación llenado de bote	35
Figura 26 Comportamiento del P80 al implementar el doble iniciador	36
Figura 27 Gráfico de la ecuación cuadrática propuesta	37

RESUMEN

El tamaño de fragmentación por voladura es un elemento clave para medir el rendimiento de la operación minera, ya que se relaciona directamente con la recuperación metalúrgica del proceso influyendo directamente con los costos de producción. Por lo que, buscar un tamaño de fragmentación óptimo en las voladuras se vuelve un factor de gran importancia.

Para evaluar el proceso es necesario realizar un análisis de la fragmentación y tener el conocimiento de las variables que intervienen, con la finalidad de identificar en qué paso está la mayor afectación y buscar una mejora si es que aplica.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar el comportamiento del tamaño de fragmentación bajo parámetros establecidos y debido a que los procesos siguientes de beneficio así lo requieren, se pretende reducir el factor P80 a través de la implementación del cargado con doble iniciador.

Finalmente, se muestran los resultados alcanzados donde después de realizar el análisis de fragmentación correspondiente se observa que existe una mejora en la reducción del tamaño de roca y por consiguiente en el rendimiento de los equipos de carga.

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN

La barrenación y voladura son procesos complejos que requieren especial énfasis en su desarrollo ya impactan directamente en el control de costos. Por ejemplo, la forma de efectuar la voladura dicta la configuración de pila afectando de manera significativa al factor de llenado de los equipos de carga.

Por otra parte, el tamaño de fragmentación también interfiere en los procesos subsecuentes, por tal motivo se requiere evaluar la técnica empleada a fin de identificar que variables influyen directamente.

En la práctica se puede realizar un análisis de fragmentación que cumpla con este objetivo, midiendo el tamaño de roca in situ a través del factor P80 y a su vez relacionarlo con las variables de los equipos de carga. Aunque en muchas ocasiones esto dependerá del grado de tecnología y los recursos que se dispongan para ello, sin embargo, siempre es recomendable monitorear constantemente esta variable.

Para llevar a cabo un buen análisis se debe comprender las variables que forman parte del proceso e ir modificando una a la vez para saber realmente cuál es la de mayor impacto. Por ejemplo, uno de los elementos que juega un papel importante en las voladuras es el tipo de explosivo junto con su respectivo procedimiento de cargado, por lo que, en el presente trabajo se busca realizar un análisis de la fragmentación bajo la influencia de estos factores prestando particular atención en como interfiere el doble iniciador en el tamaño final de la roca.

Cabe mencionar que los datos mostrados en esta investigación formaron parte de un proyecto de mejora para la empresa minera en cuestión, en consecuencia, dicha información fue recabada y estudiada con este fin.

1.1. Objetivos

- Dar a conocer el efecto que causa la voladura en el tamaño de fragmentación bajo parámetros establecidos y su impacto en la operación minera.
- Comparar la efectividad lograda a través de dos diferentes distribuciones de carga explosiva dentro del barreno.
- Reducir el tamaño de fragmentación presente en los bancos específicos de producción.

1.2. Planteamiento del problema

Las pruebas se llevaron a cabo en una unidad minera a cielo abierto, donde se observó que los resultados del P80 producto de la fragmentación de roca por voladura se encontraban fuera de los estándares establecidos por la empresa. Además, se encontró que existían sobretamaños puntuales en las frentes de ataque característicos por tipo de material.

Consecuencia de lo anterior, la efectividad de los equipos de cargado se vio afectada ya que el tamaño de material a rezagar no era el adecuado para ellos.

1.3. Justificación

El tamaño de fragmentación producto de la voladura, es un factor clave para la operación minera, ya que repercute de manera directa en el rezagado, acarreo del mineral y por ende en los costos de producción.

Al observarse continuamente sobretamaños y valores atípicos en el proceso de voladura, es necesario verificar los parámetros establecidos y realizar ajustes que garanticen la corrección del problema.

CAPITULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Principios básicos

Un explosivo es un compuesto o mezcla de sustancias, que incentivadas debidamente dan lugar a una reacción exotérmica a una alta velocidad (del orden de una fracción de microsegundos), la cual genera una serie de productos gaseosos y condensados a altas temperaturas y presiones, químicamente más estables pero que ocupan un volumen mayor al espacio original donde se alojó el explosivo.

Estas reacciones químicas son aprovechadas para lograr la fragmentación de roca constituyendo una técnica de voladura. Así, los explosivos forman parte de las herramientas básicas utilizadas en la minería y obra civil, principalmente.

Los procesos de reacción y descomposición de una sustancia explosiva, de acuerdo con (Bernaola Alonso, Castilla, & Herrera Herbert, 2013) son:

a) Combustión

Es una reacción química capaz de desprender una gran cantidad de energía en forma de calor a una velocidad de reacción lenta, menor de 1 m/s.

b) Deflagración

Proceso exotérmico o combustión súbita cuya cinética de reacción no supera los 1 000 m/s.

c) Detonación

Es una combustión supersónica que se caracteriza por generar una onda de choque, en la cual se generan altas presiones y temperaturas, ya que la reacción química se produce instantáneamente. La velocidad de reacción suele estar comprendida entre 1.500 y 9.000 m/s.

De tal forma que, tanto la deflagración y detonación son fenómenos de óxido-reducción, con la diferencia de que las ondas se propagan a velocidades diferentes, aunque en ambos casos se da lugar a la formación de una onda de choque. En la figura 1 se observa gráficamente el desarrollo de los tipos de reacciones mencionados en función de su cinética de reacción.

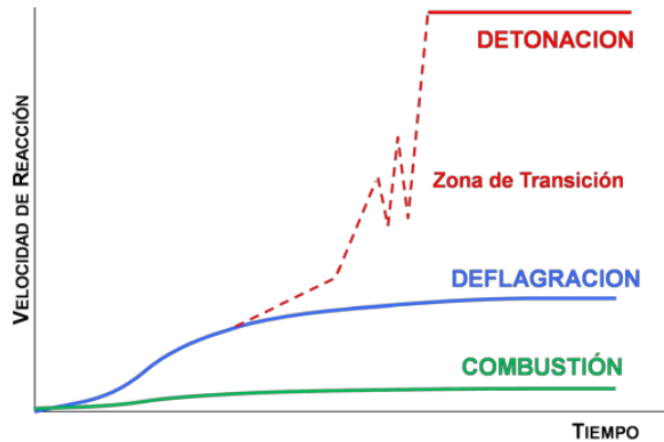


Figura 1 Tipos de reacciones en función de velocidad de reacción. (Bernaola Alonso, Castilla, & Herrera Herbert, 2013)

2.2. Propiedades de los explosivos

Se pueden aludir ciertas propiedades físicas y químicas que tienen relación directa con el tipo de explosivo, algunas están relacionadas con su aspecto y uso en determinadas condiciones de la roca, mientras que otras determinan el rendimiento del explosivo en su aplicación en voladuras. En conjunto deben garantizar la estabilidad del explosivo en cuanto a manipulación, transporte y seguridad.

Entre las propiedades que identifican a cada explosivo y que se emplean para la selección adecuada de acuerdo con el tipo de voladura se encuentran las siguientes:

Potencia

Es la capacidad del explosivo para fragmentar y proyectar la roca, aprovechando su propia energía. La potencia se ha clasificado por varios fabricantes en términos del peso o volumen del explosivo. Sin embargo, este concepto sólo se debe usar para identificar los resultados finales de una voladura y asociarlos a un producto específico.

Densidad

La densidad se expresa normalmente como gravedad específica, es decir, es la relación que existe entre la densidad del explosivo y la densidad del agua, bajo condiciones estándar. Esta propiedad es importante al trabajar bajo condiciones húmedas, ya que el explosivo seleccionado debe tener una densidad mayor a la densidad del agua 1.0 g/cm^3 para que pueda ser eficiente. La figura 2 muestra algunas densidades típicas de explosivos comunes.

TIPO	DENSIDAD g/cm³
Dinamita granulada	0.8-1.4
Emulsión encartuchada	1.0-1.7
Emulsión a granel	1.1-1.6
ANFO ¹ Pesado	1.1-1.4
ANFO cargado neumáticamente	0.8-1.0

Figura 2 Tabla de densidades típicas de explosivos más usados. (Konya C. , 1998)

Velocidad de detonación.

Es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo dentro del barreno o de un espacio confinado. Por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. La velocidad de detonación de un explosivo depende fundamentalmente de su densidad, ingredientes, tamaño de la partícula, diámetro de la carga y grado de confinamiento

Presión de detonación

Al detonar un explosivo se liberará una presión instantánea en forma de ondas de choque que fragmentará la roca en lugar de desplazarla, además está relacionada con la densidad del explosivo y la velocidad de la reacción.

Sensibilidad

Grado de energía que se debe transmitir para producir su iniciación y con ello su detonación. La sensibilidad de un producto define los requerimientos mínimos de cebado, potencia y respuesta del explosivo a la adición accidental de energía.

Resistencia al agua

Capacidad del explosivo a mantener sus propiedades intactas al entrar en contacto con agua, sin necesidad de una protección o barrera adicional.

Si se realizan voladuras bajo condiciones húmedas, el explosivo debe ser capaz de mantener su sensibilidad de iniciación y propagación en esas circunstancias. Si los barrenos presentan humedad controlada es posible utilizar cualquier tipo de explosivo, siempre y cuando se realice un enfundado o bien el tiempo de permanencia sea breve.

¹ ANFO: Por sus siglas en inglés Ammonium Nitrate Fuel Oil

2.3. Uso de explosivos en minería a cielo abierto

De acuerdo con el Manual Práctico de Voladura (EXSA, 2015), los explosivos químicos se pueden clasificar en dos grandes grupos según la velocidad de su onda de choque o velocidad de reacción:

- Explosivos rápidos o altos explosivos: de 2 500 a 7 000 m/s.
- Explosivos lentos o deflagrantes: menos de 2 000 m/s.

La mayoría de los explosivos utilizados en minería a cielo abierto o ingeniería civil se clasifican como explosivos rápidos o de alta velocidad, ya que la onda de choque es supersónica y constante lo que garantiza la detonación de toda su masa con un fuerte efecto triturador.

Agentes explosivos

Estas mezclas no contienen ingredientes explosivos, salvo en casos especiales. También se dice que son agentes explosivos o de voladura, no sensibles. Por nivel de consumo es posible distinguir dos grupos:

- a) Agentes de voladura acuosos
 - Hidrogeles o slurries
 - Emulsiones
 - Agentes mixtos (Emulsión/ANFO o ANFOs pesados)
- b) Agentes de voladura granulares, secos: ANFO y similares.

Altos explosivos sensibles al detonador

Por otra parte, se encuentran los llamados convencionales o altos explosivos sensibles al fulminante del número 8, entre ellos se encuentran:

- Dinamitas
- Explosivos permisibles o de seguridad para la minería de carbón
- Explosivos hidrogel y sensibilizados
- Explosivos especiales

Sin embargo, este capítulo estará enfocado en explicar las características básicas de los ANFOs y emulsiones, ya que son los que se emplearon en las pruebas.

Emulsiones

Una emulsión, químicamente hablando, es un sistema bifásico en forma de una dispersión estable de un líquido inmiscible en otro. Está compuesta básicamente de nitrato amónico (NH_4NO_3) o nitrato sódico (NaNO_3) con un contenido en agua entre el 14 y el 20 %, un 4 % aproximadamente de diésel o aceite, y menores cantidades de otras sustancias como agentes emulsificantes o ceras para aumentar la consistencia y el tiempo de almacenamiento. Algunos fabricantes incorporan también en su composición burbujas de aire llamadas microesferas, que incrementan la onda de detonación aumentando su sensibilidad.

Características

- Alta velocidad de detonación oscila entre 4500-5500 m/s
- Excelente resistencia al agua
- Menor sensibilidad al choque o fricción
- Densidad 1.25 g/cm^3 (emulsión a granel convencional)

Al ser la emulsión un agente de voladura carece de un elemento explosivo en su composición, por lo que requieren un cebo reforzador de alta presión de detonación. Para barrenos de gran profundidad y diámetro, como es el caso de los tajos a cielo abierto, se utiliza como carga de columna.

ANFO granular secos y similares

Este tipo de agentes explosivos están compuestos por nitrato de amonio (aproximadamente 94%) sensibilizado por un agregado orgánico líquido o sólido no explosivo (6%), presentado en forma granular tipo perlas, lo suficientemente poroso como para garantizar su absorción y retención del agregado combustible. Para que se inicie un proceso de detonación debe ser iniciado por una carga explosiva de alta intensidad o bien un cebo energético para arrancar.

Características

- Velocidad de detonación baja 2 500 a 3 000 m/s (ANFO convencional)
- Densidad 0.8 g/cm^3
- Nula resistencia al agua

Mezclas de emulsión/ANFO o ANFOs pesados

Son mezclas de emulsión y ANFO en diferentes proporciones que permiten reducir el costo y potencia de una emulsión pura, así como también brindar resistencia al agua comparado con el ANFO convencional.

Estas mezclas se pueden preparar en diferentes relaciones emulsión/ANFO de acuerdo con los requerimientos de la voladura y la presencia de agua. Los rangos más utilizados son 30/70, 50/50, 60/40 y 80/20, con densidades que oscilan entre 1.25- 1.10 gr/cm³. Se pueden cargar desde camión, con presentaciones encartuchadas o a granel. En la figura 3 se presentan fotografías tomadas en campo de la mezcla y el camión de explosivo utilizado en las pruebas mencionadas en el capítulo 5.



Figura 3 Mezcla Emulsión-ANFO (Izquierda), Camión mezclador (Derecha).

Sistemas de iniciación y cebado

Los agentes explosivos nombrados en el apartado anterior muestran insensibilidad, por lo que se requiere de una energía de iniciación para que la detonación se desarrolle y se mantenga en condiciones estables.

La iniciación de una voladura puede presentar diseños muy diferentes con el fin de formar una secuencia de disparo adecuada para lograr buenos resultados de fragmentación, el movimiento de la pila de material volado y el menor daño posible al entorno.

En términos generales un iniciador o también conocido como detonador, consta de una cápsula metálica de aluminio, o cobre, donde se aloja un explosivo iniciador, formando la llamada carga base. Esta carga explosiva se inicia por medio de una píldora inflamable para detonadores

eléctricos, no eléctricos o electrónicos, o bien directamente por efecto de una llama para detonadores ordinarios.

Los detonadores más comunes que se utilizan son:

a) Sistema elemental o convencional de mecha lenta

En este caso no es posible establecer ningún tipo de retardo en el detonador, por lo que una vez que llegue la llama propagada por la pólvora que lleva alojada la mecha en su interior, el detonador se inicia instantáneamente.

b) Sistema eléctrico convencional; con detonadores instantáneos y de retardo estándares (detonadores eléctricos)

El detonador eléctrico emplea la energía eléctrica para su iniciación, posee un inflamador pirotécnico a través del cual circula la corriente eléctrica, que provoca la iniciación de la carga explosiva.

Existen dos grandes grupos de detonadores eléctricos: los detonadores instantáneos y los temporizados.

c) Sistemas no eléctricos y los cordones detonantes regulados por retardadores

Los detonadores no eléctricos se caracterizan porque no interviene ningún tipo de corriente eléctrica en su iniciación. El funcionamiento de este sistema de iniciación es una onda de choque de baja velocidad canalizada a través de un tubo de plástico denominado tubo de choque o tubo trasmisor.

d) Detonadores electrónicos

Los detonadores electrónicos son la última evolución de los sistemas de iniciación para voladuras. En este caso, la pasta pirotécnica que determina el tiempo de retardo ha sido sustituida por un circuito electrónico, en el cual, un microchip es el encargado de realizar la descarga en el instante deseado. Además, cada detonador electrónico está identificado con un código único que sirve para su posterior programación y disparo.

En la figura 4 se presentan imágenes del sistema electrónico utilizado en las pruebas. En la izquierda, se observa la caja de disparo que se emplea para iniciar la voladura. Al centro se aprecia el dispositivo denominado tagger o logger, este aparato identifica el código otorgado a cada barreno y se programa el tiempo de detonación, guarda en su memoria esta información para luego comunicarla a la caja de disparo. A la derecha está el iniciador electrónico, el cual

posee unas pinzas que serán conectadas a un cable, este será el encargado de comunicar todos los barrenos con la caja de disparo para iniciar la voladura.



Figura 4 Sistema de iniciación electrónico utilizado en las pruebas.

El uso de estos accesorios debe ser previamente seleccionados y combinados para cada caso, ya que da lugar a los procedimientos empleados para iniciar la detonación de una voladura, conocidos como métodos de iniciación o de encendido de explosivos, para efectos de este trabajo se mencionarán los siguientes:

Cebado

Para explosivos sensibles a la acción de un detonador, la iniciación puede realizarse introduciendo un detonador en el interior de un cartucho (también llamado primer o booster), al que se denominará cartucho cebo o carga iniciadora, y que estará en contacto con el resto de la carga.

La función del booster o primer es iniciar la columna principal del barreno y al ser una carga de explosivo potente crea zonas de alta liberación de energía, es sensible al detonador y al cordón detonante. En la figura 5 se observa una imagen del booster empleado en las pruebas.



Figura 5 Booster (Dyno Nobel, 2019)

Por otra parte, existen también los hidrogeles y emulsiones que son sensibles al cordón detonante o al detonador y que pueden emplearse como iniciadores primarios o cartuchos, con la ventaja de que ocupan casi toda la sección del barreno y resultan muy eficientes.

2.4. Mecanismos de fragmentación de la roca

Durante la detonación de una carga de explosivo en el interior de la roca, se presentan dos fenómenos:

1. Un fuerte impacto debido a la onda de choque de mayor o menor velocidad de detonación, determinada en gran parte por el poder rompedor del explosivo utilizado
2. La influencia del volumen de los gases producidos que actúan a alta presión y temperatura.

La cantidad de energía liberada de un explosivo durante el proceso de detonación transforma al explosivo sólido o líquido en gases incandescentes con enorme presión, los cuales al estar confinados alcanzan altas presiones.

Durante la detonación se presentan varios fenómenos a los cuales se asocia la fragmentación de roca, entre los cuales se nombran los siguientes:

Trituración de la roca

Al inicio de la detonación, casi en los primeros instantes, la presión en el frente de la onda de choque se expande de forma cilíndrica alcanza valores que superan la resistencia dinámica a compresión de la roca provocando la destrucción de su estructura.

Así pues, se forma un anillo de roca triturada el cual aumenta con la presión de detonación del explosivo y con el acoplamiento de la carga a las paredes del barreno.

Agrietamiento radial

Al propagarse la onda de choque, la roca adyacente al barreno se somete a una intensa compresión radial que induce componentes de tracción en los planos tangenciales del frente de dicha onda. Cuando dichas tensiones superan la resistencia dinámica a la tracción de la roca se inicia la formación de grietas radiales alrededor de la zona triturada que rodea al barreno (figura 6), si la roca presenta fracturas naturales la extensión de las grietas estará relacionada con estas.

Por lo tanto, en las zonas adyacentes al barreno se producen los siguientes fenómenos:

- Ensanchamiento del barreno por el efecto de compresión de la onda de detonación
- Creación de fisuras tipo radial generadas por el efecto de tracción de la onda de detonación

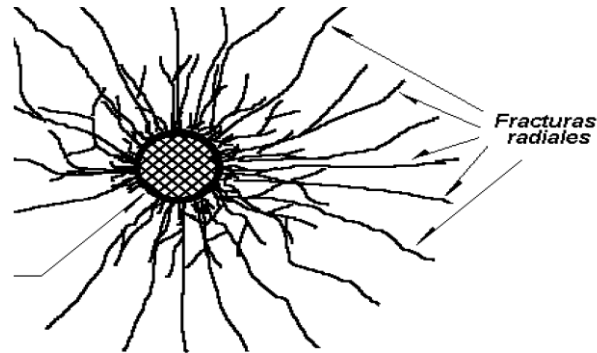


Figura 6 Mecanismo de fracturas radiales en barreno (López Aburto, 2014)

Reflexión de la onda de choque

Al existir una cara libre cercana al barreno, la onda de choque se reflejará en esa superficie produciendo un esfuerzo de tracción, encontrando la roca una libertad de desplazamiento lo que permite tener un radio mayor fisurado (figura 7).

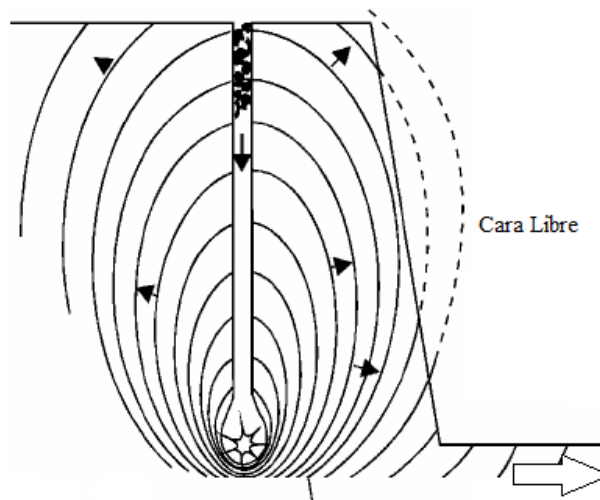


Figura 7 Propagación de la onda de choque en un barreno en banco. (EXSA, 2015)

En las fisuras formadas por la onda de detonación se penetran los gases del explosivo a elevada presión y temperatura, lanzando la roca hacia adelante en su frente libre.

2.5. Voladura de rocas en minería a cielo abierto

La voladura es la acción mediante la cual se logra alcanzar un tamaño fragmentación y desplazamiento deseados, mediante el uso de explosivos colocados al interior de un grupo de barrenos dispuestos bajo algún tipo de patrón. La fragmentación se refiere al tamaño de roca producida, a su distribución y porcentajes por tamaños, mientras que el desplazamiento se relaciona con el movimiento de la masa de roca triturada.

De tal manera que, las voladuras a cielo abierto son aquellas que se realizan en bancos mediante la detonación de barrenos verticales o inclinados, utilizando como escape una cara libre un frente paralelo a los mismos.

2.5.1. Factores determinantes en la voladura de rocas

Además de los mecanismos de rotura, existen diversos factores que tienen influencia directa en la fragmentación de la roca. Algunos como las propiedades de la roca o geología del sitio, no se pueden modificar, mientras que otros son controlables como las variables de diseño, barrenación o elección del explosivo a emplear. En este apartado se expondrán algunos que son propios del lugar y que por lo tanto no se pueden cambiar.

Propiedades de la roca

Algunas características propias de la roca resultan determinantes en la fragmentación de roca, por ejemplo:

- Dureza

Puede indicar la dificultad o resistencia al corte de la roca a ser perforada. Además, generalmente se relaciona con la cantidad de explosivo a usar, ya que una roca más dura exige una mayor cantidad de explosivo para ser volada. Esto no es exacto pues además deben evaluarse otros factores.

- Densidad

Indica la dificultad para que una roca se pueda volar. En el caso de rocas densas requerirán mayor cantidad de explosivo para lograr una fragmentación satisfactoria.

- Porosidad

Se define como la relación del volumen total de los huecos existentes en una roca conforme a su volumen aparente. Además, incluye la proporción de poros u oquedades y su capacidad de captar agua.

- Resistencia mecánica

Se refiere a la resistencia a las fuerzas de compresión y tensión. La resistencia a la compresión se define como la fuerza aplicada por unidad de área en la cual la roca fallará por corte, cizallamiento o bien rotura por presión. La resistencia a la tensión implica la capacidad de resistir bajo torsión o tensión hasta lograr el punto de rotura.

- Módulo de Young

Es la relación entre el esfuerzo unitario de compresión o tracción y la deformación longitudinal unitaria. Indica la capacidad de la roca para resistir a la deformación por lo que mide la resistencia elástica. Al incrementarse el módulo de Young la roca posee mayor dificultad para romperse.

- Índice de Poisson

Es la relación entre el cambio unitario del área de la sección con la deformación longitudinal unitaria.

Estos conceptos se emplean ya que las velocidades de propagación de las ondas sísmicas son función de las características elásticas de los materiales a través de las cuales se propagan.

Propiedades del macizo rocoso

- Litología

La litología es un factor geológico que debe considerarse en el diseño de las cargas de explosivo, sobre todo en las zonas donde se produce un cambio litológico brusco, ya que la variación de las propiedades de las rocas puede obligar a una reconsideración del diseño.

Al entrar en contacto materiales con distinta naturaleza y condiciones mecánicas diferentes, se puede producir una pérdida de presión de los gases de la voladura y por ende conseguir una mala fragmentación.

- Fracturas

Las rocas presentan discontinuidades en forma de fisuras y micro fisuras que influyen en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y por ende en los resultados de las voladuras.

Estas discontinuidades pueden ser cerradas, abiertas o rellenas, lo que provocará diferentes grados de transmisión de la energía del explosivo. En discontinuidades cerradas o bien cementadas, las grietas radiales inducidas por la detonación las cruzarán permitiendo su propagación a través del macizo. Cuando las discontinuidades están abiertas y sin material de relleno, la reflexión de la onda de choque puede permitir el prematuro escape de los gases producidos y la caída drástica de la presión de barreno.

Otro aspecto importante es el control geoestructural del macizo rocoso, es decir, cuidar la orientación relativa; rumbo y buzamiento de los estratos.

- Presencia de agua

La presencia de agua puede ocasionar ciertos problemas, especialmente en macizos rocosos intensamente fracturados, ya que pueden aumentar la velocidad de propagación de las ondas elásticas en terrenos porosos y agrietados, reducir la resistencia de las rocas a la compresión y tracción e incluso puede haber pérdida de barrenos por hundimientos internos. Además, al encontrarse esta condición se debe seleccionar un explosivo resistente al agua.

2.5.2. Diseño de voladuras

El diseño de voladuras forma parte de los parámetros controlables, los cuales hacen referencia a un grupo de factores que se pueden modificar según el grado de fragmentación que se requiera. Las variables que se pueden controlar son:

- a) Geométricas: altura, ancho y largo del banco, ángulo de talud, cara libre, disposición de barrenos, diámetro y largo de barrenación (diseño de plantilla).
- b) Cantidad de explosivo utilizada: densidad, columna explosiva, longitud de taco
- c) Secuencia de disparo: orden de detonación de barrenos

A continuación, se mencionarán algunas variables que juegan un papel importante en los resultados de las voladuras. La figura 8 muestra la representación gráfica de cada parámetro.

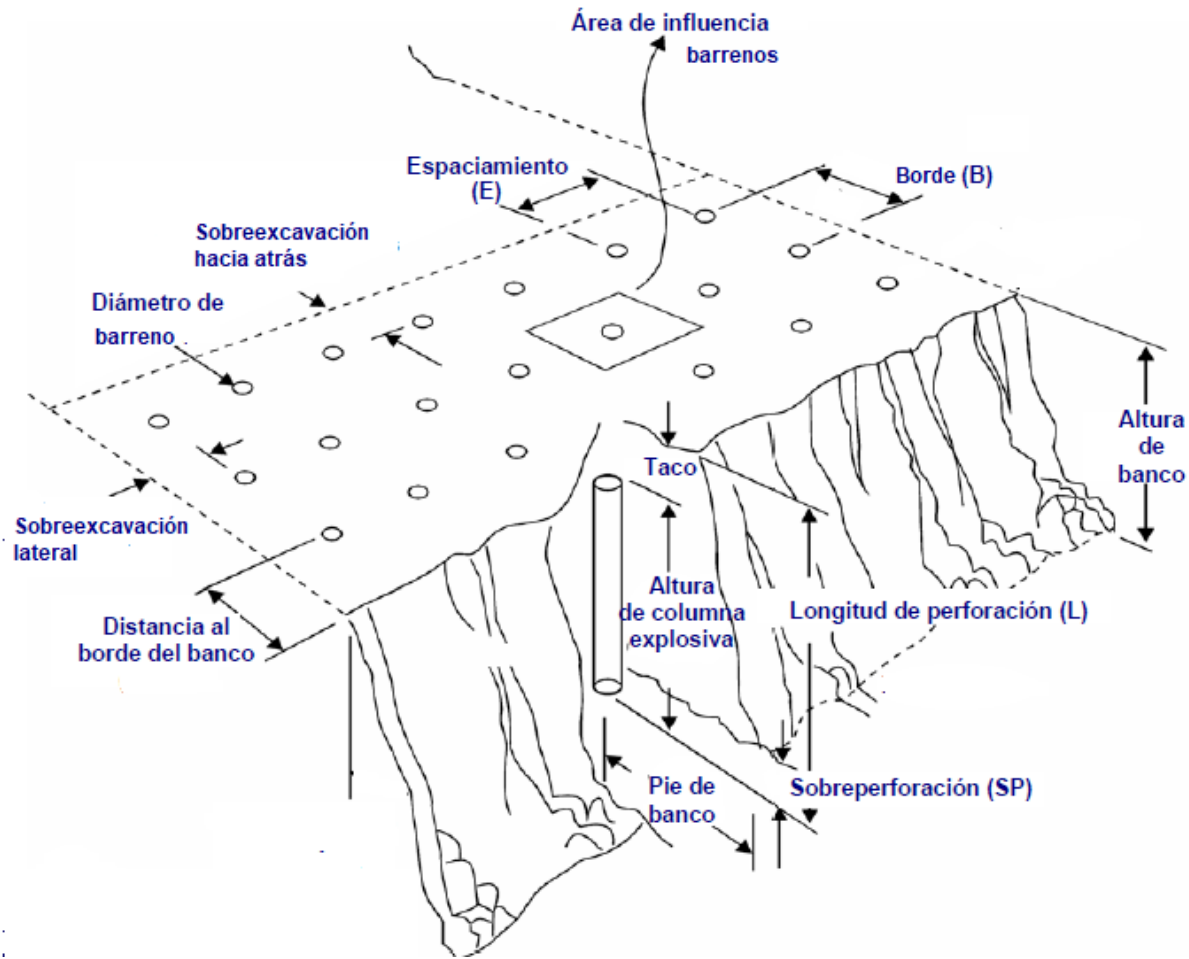


Figura 8 Parámetros empleados en voladuras de banco. (EXSA, 2015)

- Diámetro de barrenación

El diámetro de barreno es el espacio realizado por la máquina perforadora, su tamaño ideal dependerá de las características del macizo rocoso, la altura de banco, economía del proceso, dimensiones del equipo de cargado, sobre todo del grado de fragmentación requerido.

- Altura de banco

Un banco es la unidad o escalón explotable donde se ubican barrenos cargados para efectuar la voladura. La altura de banco se refiere a la distancia vertical que hay entre dos bancos adyacentes. Este factor se relaciona directamente con el alcance de la maquinaria y la dilución del mineral. Si la altura de banco es muy grande, se pueden presentar problemas de desviación de

barrenos que afectarán a la fragmentación, además traerá consigo fuertes vibraciones aumentando el riesgo de generar sobreexcavación.

- Taco

Se define como la longitud del barreno que se rellena con un material inerte, cuya función es confinar y retener los gases producidos en la detonación para permitir que se realice la fragmentación por completo de forma correcta. Si el taco es insuficiente se producirá un escape prematuro de los gases a la atmósfera, por el contrario, un taco lo sobradamente cargado puede producir un grado alto de vibraciones y sobre tamaño de roca provenientes de la cresta del banco.

- Sub-barrenación

Es la longitud del barreno que se encuentra por debajo del nivel del piso que se necesita para romper la roca a la altura del banco y así lograr los resultados de fragmentación y desplazamientos adecuados. Si la sub-barrenación es mínima o no se realiza pueden aparecer las llamadas patas o desnivel de piso, por lo tanto, se debe de cuidar que sea la adecuada para el tipo de terreno sobre el que se esté trabajando.

- Bordo y espaciamento

El bordo se define como la distancia mínima que existe entre una fila de barrenos y la cara libre del banco, mientras que el espaciamento es la distancia que existe entre barrenos de una misma línea. La selección de estas variables dependerá del diámetro de barrenación y de los criterios empleados para su cálculo.

- Plantillas de barrenación

En minería a cielo abierto, las configuraciones más utilizadas son la rectangular, cuadrada por su facilidad de marcación o bien la denominada tresbolillo, siendo esta última la más efectiva debido a que proporciona una mejor distribución de la energía del explosivo y mejor flexibilidad en el diseño de la secuencia de disparo y salida de la voladura.

En cuanto al tamaño de las voladuras es recomendable que se consiga volar grandes extensiones procurando que exista una sola cara libre y lo más simétrica posible, ya que puede haber dispersión de la energía.

- Configuración de la carga de explosivo

Se consideran dos tipos de cargas explosivas dentro del barreno: la carga de colocada en el fondo del barreno y la carga de columna que es el explosivo colocado consecuentemente

La distribución de la carga explosiva dependerá del diámetro y longitud del barreno, si estos son de pequeña longitud se recomiendan columnas continuas de explosivos, pero si los barrenos son de gran longitud, la mejor relación efectividad se obtendrá con cargas espaciadas. Esto se consigue utilizando el mismo explosivo distribuido a lo largo de la columna en diferentes proporciones y separándolo por medio de un taco.

El uso de este tipo de configuraciones dependerá de la diferencia del ahorro del explosivo, el tiempo empleado en el proceso, el grado de complejidad para su realización y del costo adicional que implica otorgar un accesorio más de retardo añadido a la columna seleccionada.

De acuerdo con diversos autores, se cree que al emplear este tipo de distribuciones es posible alcanzar un grado de fragmentación óptimo, observándose mejores resultados en terrenos difíciles de barrenar. No obstante, el uso de cargas espaciadas debe valorarse de acuerdo con la zona y a los costos de operación que genera.

- Tiempos de retardo y secuencia de disparo

La secuencia de disparo constituye el orden de detonación de barrenos en el banco, otorgando desfases de tiempo entre cada barreno, con ello también se controla la dirección de salida de la voladura.

La secuencia de disparo es posible mejorar la fragmentación y desplazamiento de la roca volada, reducir la sobre excavación y minimizar la intensidad de las vibraciones transmitidas al macizo rocoso. El empleo de iniciadores entre cargas ayuda a elevar la tensión en tramos de roca dura dentro del barreno.

2.6. Efectos de la fragmentación en la operación minera

La fragmentación resultante tiene un impacto significativo en las etapas posteriores a la voladura. El tamaño adecuado será aquel que permita que las operaciones metalúrgicas; trituración y molienda se lleven a cabo con el menor consumo de energía posible, logrando así una baja en el costo total.

El tamaño de fragmentación por voladura puede aumentar la recuperación del metal de interés, sobre todo en los casos donde se utiliza un proceso metalúrgico como la lixiviación donde el tamaño de partícula juega un papel importante.

Una adecuada fragmentación también es importante para facilitar la remoción y transporte del material volado. El desplazamiento y forma de acumulación de las cargas, se toman en cuenta para proyectar de la manera más conveniente el tipo y dimensión de los equipos de cargado y acarreo. Si la granulometría de la carga se encuentra distribuida uniformemente, contribuye a un mejor llenado de bote reduciendo los tiempos de cargado en la operación.

Por el contrario, una mala fragmentación hace necesario el empleo de voladuras secundarias (moneo y plasteo) o bien el uso de algún equipo mecanizado para el rompimiento de la roca, lo que añade un costo adicional.

El conocimiento del factor P80 de la fragmentación a través de técnicas digitalizadas combinadas es una etapa fundamental en el proceso de mejora continua de toda operación minera.

Debido a que la voladura tiene influencia directa en los resultados de la fragmentación y por ende en la configuración de la pila de material, es posible relacionar ambas variables con el fin de llevar a cabo un análisis que permita realizar modificaciones al proceso.

CAPITULO 3. METODOLOGIA EMPLEADA

3.1. Evaluación de la voladura

Una vez que se efectúa la voladura, es necesario analizar el tamaño de fragmentación resultante con la finalidad de realizar modificaciones sucesivas en los parámetros de diseño en los eventos posteriores optimizando así este proceso.

Para efectuar la evaluación de la voladura se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Diseño de la plantilla

Se consideraron aspectos del diseño original como la altura de banco, inclinación de barrenos, tipo de roca, espaciamiento, bordo y condiciones de cargado de explosivo, estos parámetros fueron establecidos previamente y se encontraban fijos.

- Valoración física del macizo rocoso

Una vez realizada la voladura es necesario valorar los daños causados al macizo rocoso y observar si existe sobre excavación, para ello se emplearon los métodos de caracterización geomecánica de macizos rocosos.

Para ello, se contaba con información de la resistencia a la compresión de los barrenos por cada plantilla a fin de clasificar a la zona en una escala de dureza.

3.2. Análisis de la fragmentación por voladura

El análisis de la fragmentación se realiza con la finalidad de verificar si la voladura se llevó a cabo bajo los parámetros adecuados o bien se debe realizar algún ajuste en las variables mencionadas anteriormente.

La granulometría presente en las pruebas se midió a través del factor P80, el cual es un indicador del tamaño de fragmentación existente en una muestra de material. En términos estrictos el P80 es el tamaño promedio de fragmentos en el 80% pasante de una muestra y se obtiene a través de la curva de distribución granulométrica.

Para poder obtener el P80 de las pruebas se llevó a cabo lo siguiente:

1. Análisis cuantitativo visual

Se realizó una inspección de tipo visual a la carga con el fin de otorgar un valor aproximado al tamaño de fragmentación. Si bien no permite tener un valor certero, al menos proporciona una idea subjetiva del tamaño de fragmentación de la carga.

Esta técnica debe usarse sólo para tener un acercamiento al valor de P80, aunque en algunos casos es la única manera de obtener el tamaño de fragmentación, se sugiere que luego se compruebe con algún otro método. Además, debe realizarse por una persona con experiencia.

La figura 9 nos muestra un aspecto general de una carga cuyo P80 oscila entre 6 pulgadas calculado de manera visual.



Figura 9 Carga después de la voladura

2. Análisis digital de imágenes

El valor real de P80 se obtuvo a través de un instrumento denominado equipo portamétrico el cual se muestra en la figura 10. Este aparato procesa directamente las fotografías tomadas de la frente de ataque, reconociendo y escalando los sólidos presentes en la carga (figura 11).

Siguiendo este proceso se adoptó un método de muestreo, tomando imágenes a cada 20 metros por toda la frente de ataque con el fin de recopilar la mayor de datos posibles y así obtener un valor más certero de P80.

Además, se cuidó que el equipo reconociera adecuadamente las fotografías de la carga, corrigiendo las imágenes que lo requirieran para evitar datos erróneos.



Figura 10 Equipo portamétrico

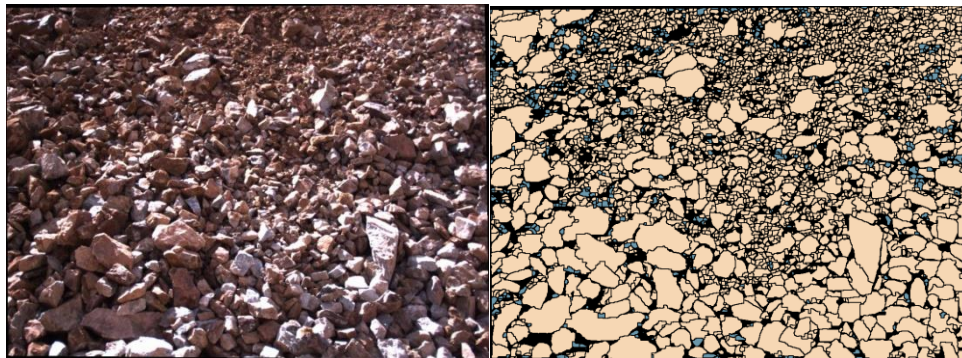


Figura 11 Identificación de sólidos en equipo

Cabe aclarar que las imágenes presentadas pertenecen a la unidad, la cual cuenta con dicho equipo para hacer este tipo de evaluaciones y su explicación se detallan en el capítulo 4 de este trabajo.

Las ventajas del uso de esta herramienta son:

- Permite medir la granulometría in situ de las voladuras
- Rapidez en los resultados
- Mayor precisión que el método visual
- Innovación al implementar en minería este tipo de herramientas
- Permite evaluar varios bancos simultáneamente

Asimismo, presenta los siguientes inconvenientes:

- Es un equipo costoso en comparación con la utilización de un software.
- Requiere que las imágenes se tomen en el día, ya que de otro modo no reconoce las figuras.
- Debe tomarse un cierto número de fotografías a la frente de trabajo para tener mayor confiabilidad en el P80.

Por otra parte, también existen diversos softwares que realizan el análisis de fragmentación, los más conocidos en el mercado son Wipfrag, Split Eng y CalFrag. En algunos casos se toma una fotografía de la carga junto a una escala de tamaño conocido después la imagen se edita y procesa en el software para que este arroje la curva de distribución granulométrica con el valor de P80.

3. Obtención de la distribución granulométrica

Luego de recopilar las imágenes de las frentes de ataque el equipo es capaz de arrojar una curva de distribución granulométrica y por ende un valor de P80, este dato se comparó con la inspección visual mencionada anteriormente.

La curva de distribución granulométrica constituye una herramienta básica dentro del proceso de optimización de voladuras. Además de la clasificación granulométrica por tamices hecha en laboratorio, no existe ningún método exacto para obtener el factor P80,

Las figuras 12 y 13 se mostrarán con la finalidad de ejemplificar los datos que arroja el equipo portamétrico los cuales serán de gran importancia para la investigación.

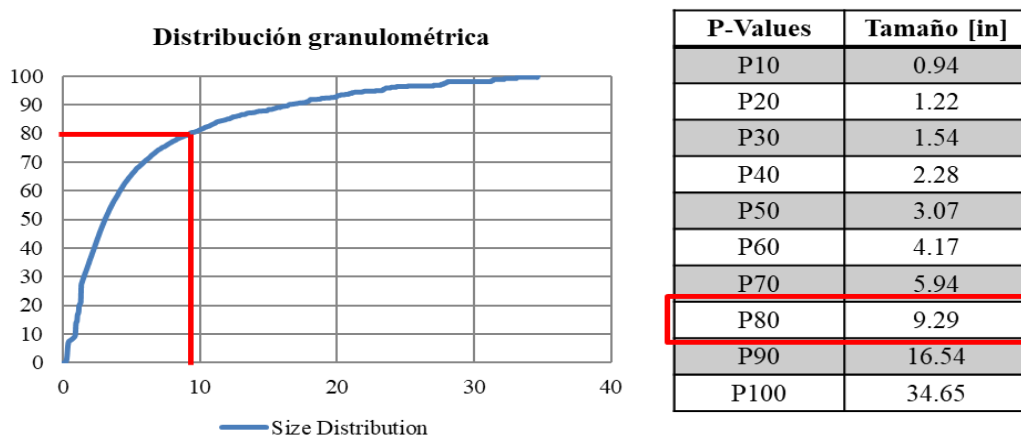


Figura 12 (Izquierda) Gráfico de distribución granulométrica. (Derecha) Tabla con valores acumulados

En la imagen anterior, podemos notar que procesa las fotografías de la carga tomada en campo y crea directamente la curva de distribución granulométrica.

Otra información que el equipo proporciona después de procesar la imagen es un gráfico de pastel que indica el porcentaje de la cantidad de tamaños que se aproximan al valor objetivo fijado por el usuario junto con un histograma con el porcentaje de finos encontrados en la muestra, ambos gráficos se muestran en la figura 13.

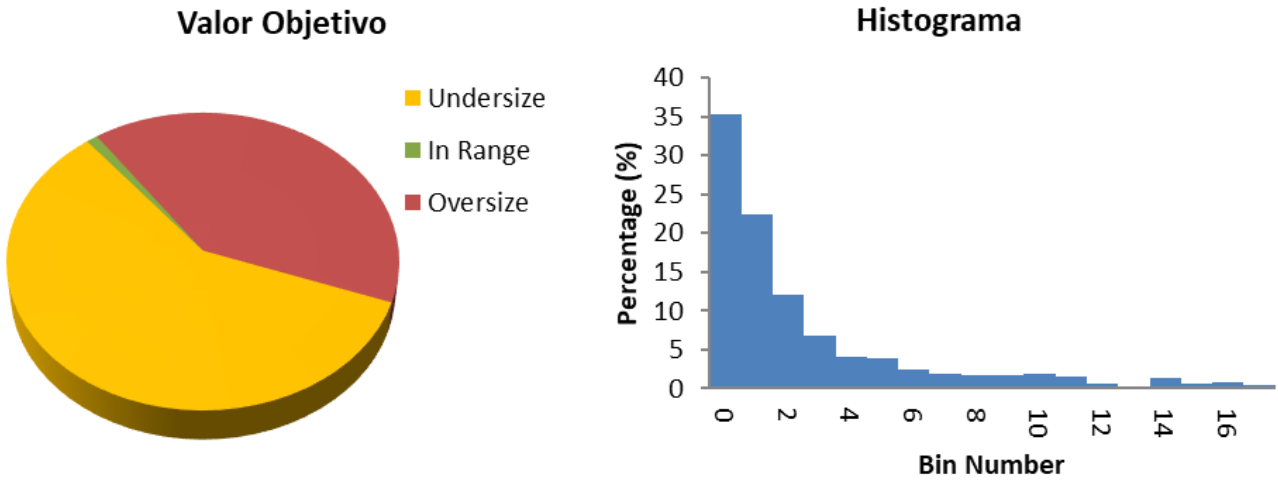


Figura 13 Gráfico con valores objetivo según el proceso (Izquierda). Histograma con porcentaje de finos (Derecha)

4. Clasificación de muestras por zona

Con base en el modelo geológico del tajo se identificaron las zonas por naturaleza de material y se relacionaron con el diseño de la voladura. La información anterior se recopiló en una base de datos en el software Excel y gráficamente en un plano como el que se muestra en la figura 14



Figura 14 Plano de banco: Puntos de muestreo (Letras y puntos). Voladuras cargadas (cuadrículas)

5. Relación de variables

Una vez que se localizaron los puntos de muestreo en el plano, los valores de P80 se relacionaron con el factor de llenado de bote de la pala.

Debido a que las muestras se tomaron directamente de las frentes de ataque, es posible relacionarlas con el factor de llenado de bote del equipo de carga, ya que cuenta con un software que contabiliza las toneladas que está rezagando y calcula un porcentaje de efectividad de carga. Lo anterior es presentado en gráficos en Excel, los cuales se muestran en la siguiente sección.

Finalmente se analizaron los datos estadísticamente con el software Minitab con el fin de proporcionar mayor certeza a esta investigación

CAPITULO 4. ESTUDIO DE CASO

4.1. Antecedentes

Los estudios se llevaron a cabo en una unidad minera a cielo abierto en el norte del país, donde se detectó que existían valores de P80 y sobretamaño en zonas específicas de producción. Para realizar el análisis de fragmentación, se decide realizar distintas pruebas bajo las siguientes consideraciones:

Condiciones geológicas

Este yacimiento está clasificado como un depósito mesotermal de oro orogénico hospedado en zonas de cizalla dentro de paquetes de rocas precámbricas.

La mineralización ocurre en vetas y sistemas de vetillas de cuarzo ubicadas en zonas de dilatación a lo largo de superficies de fallas desarrolladas preferentemente en gneis cuarzo feldespático. Las zonas mineralizadas se caracterizan por la presencia de cuarzo (SiO_2), hematita, especularita (Fe_2O_3) y wulfenita (PbMoO_4). (Romero, 2014).

De acuerdo con el modelo geológico con el que se cuenta, es posible distinguir por zonas de mineralización; óxidos, transición y sulfuros masivos.

Diseño de plantilla

Los parámetros establecidos inicialmente para las plantillas de producción fueron los siguientes:

- Bordo y espaciado de 5.5 x 6.50 m
- Diámetro de barrenación 8 ½ ''
- Sub-barrenación 1 m
- Altura de banco 8 m.

Calidad de la roca

Como parte de la caracterización de la zona, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión medidas en MPa, resultado de un muestreo geotécnico. De esta forma, se puede clasificar a la roca en función de su resistencia e identificar por voladura cual es el comportamiento general de la roca al aplicar una carga.

La escala que se utiliza es la mostrada en la Tabla 1.

ÍNDICE MPa	CLASE
<10	Muy Suave
10-15	Suave
15-20	Moderadamente Dura
20-40	Dura
40-100	Muy Dura
>100	Extremadamente Dura

Tabla 1 Clasificación geomecánica utilizada

Para la zona de estudio se encontró que los valores de resistencia a la compresión oscilaban entre 20-40 MPa lo que se clasifica como una zona DURA.

Tipo de explosivo y distribución de cargas

Inicialmente se empleaba un cargado como se ilustra en la imagen 15, que consistía en:

- Cebado: Colocar un booster en el fondo del barreno que serviría como carga detonante.
- Carga explosiva: Enseguida del cebo se colocaba una mezcla compuesta proporcionalmente por emulsión y nitrato de amonio, en proporción 48/52 respectivamente.
- Taco: La carga explosiva se cubría con gravilla fragmentada a ¾"

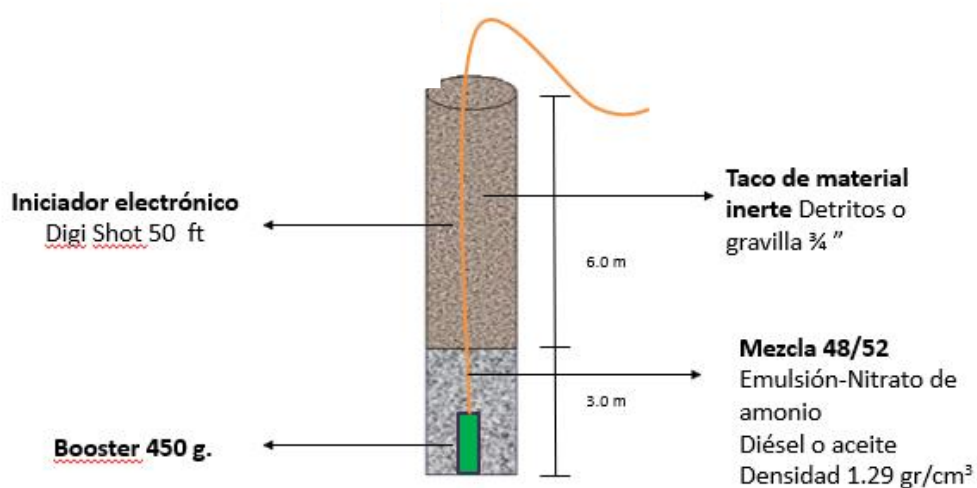


Figura 15 Barreno con cargado empleado inicialmente

Distribución granulométrica inicial

Se analizaron los datos de ambas zonas por naturaleza de materiales; óxidos y sulfuros al emplear este tipo de cargado. Los resultados obtenidos basados en este estudio y las condiciones del lugar revelan que para la zona de sulfuros hay un factor P80 de 10.71 pulgadas con un porcentaje de finos del 29.63%, mientras que para la zona de óxidos se tiene un P80 de 6.02 pulgadas, y un porcentaje de finos del 46.12% distribuidos en un intervalo de 0 a 2 pulgadas. Los gráficos anteriores se pueden consultar en la parte denominada ANEXO de este trabajo.

De acuerdo con estos datos, se asume que los óxidos y los sulfuros presentan una respuesta diferente al ser fragmentados, ya que los valores de P80 correspondiente difieren de manera significativa.

Como se puede observar en las gráficas de la figura 16, se obtiene una media general con ambos materiales de P80 de 9.8 pulgadas mostrando sobretamaños puntuales mayores a 24 pulgadas, con un porcentaje de finos del 27.29%. Estos datos servirán como línea base para el desarrollo de las pruebas siguientes.

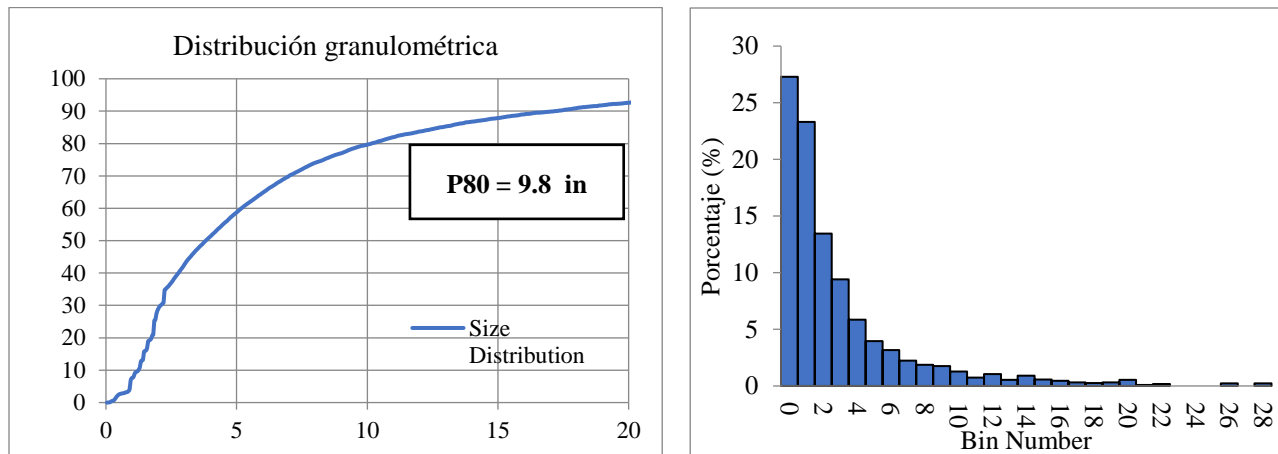


Figura 16 Distribución granulométrica. Histograma del porcentaje de finos presente en la granulometría Cargado empleado inicialmente

Adicionalmente, las condiciones existentes en el lugar son presencia de agua, y con base en el plano de cargas puntuales, la zona presenta valores de resistencia a la compresión en un rango de 13 a 30 MPa, lo cual la clasifica como una zona de alta dureza.

Se comprobó la confiabilidad de los datos de manera estadística en el software Minitab, tal como se observa en la figura 17 los datos en el histograma tienen un sesgo hacia la izquierda lo que ubica al P80 en el intervalo de 8.12 a 10.55 pulgadas con un intervalo de confianza del 95%.

Esta estimación nos confirma la certeza de los datos, ya que el P80 obtenido mediante el equipo se encuentra en 9.8 in, es decir dentro del intervalo para la media.

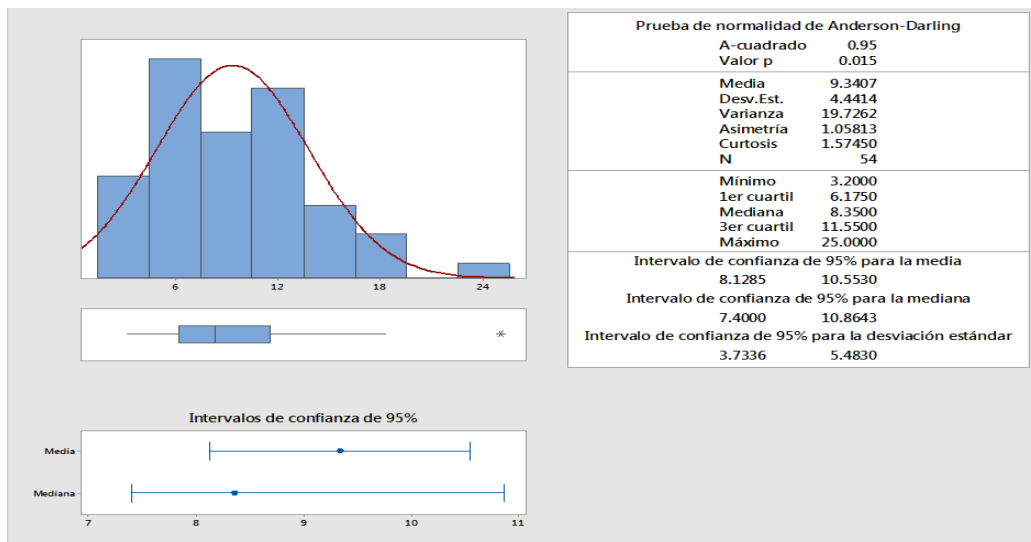


Figura 17 Histograma de valores individuales en el software Minitab

Comportamiento de llenado de bote

El tamaño de roca puede traer diferentes efectos en la eficiencia del rezagado, de tal forma es posible relacionar los valores de P80 de este estudio con el porcentaje del llenado de bote de los equipos de cargado, lo anterior se indica en la figura 18, donde podemos observar la relación de las variables.

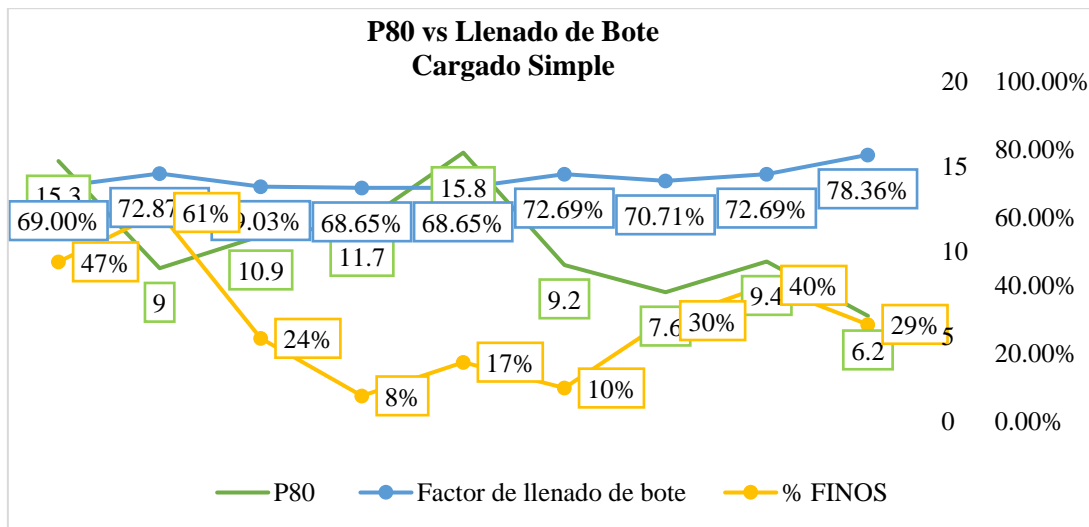


Figura 18 Relación de variables P80 vs Llenado de bote

Individualmente, los resultados del llenado de bote que se relacionaron en esta prueba muestran una media general del 72% cuyo comportamiento se puede observar en la figura 19. Esta medida también se tomó como línea base.

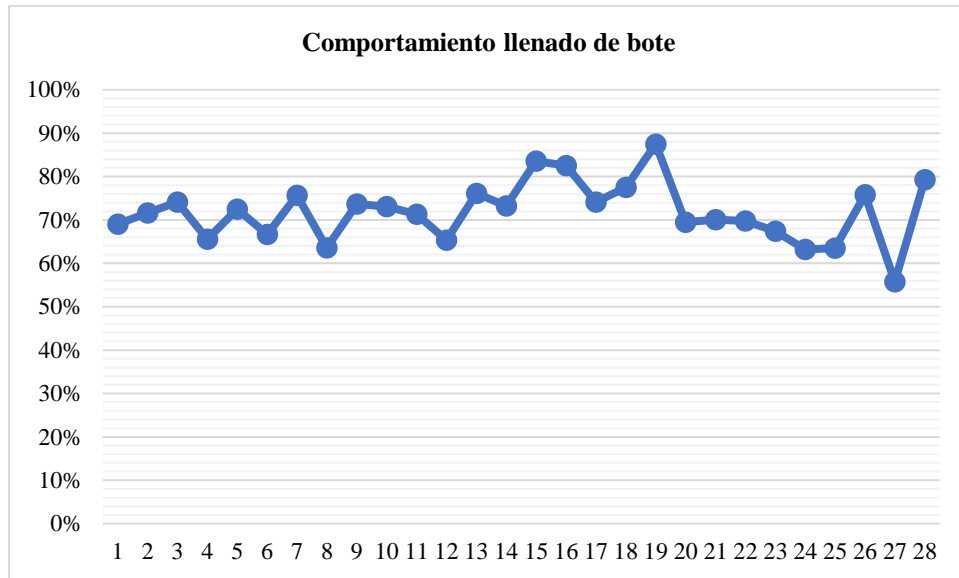


Figura 19 Observaciones realizadas

4.2. Pruebas en campo

Se determinó que el P80 en fragmentación por voladura ideal para el proceso de la unidad era de 3.0 pulgadas. Por lo tanto, se decide realizar una variación en la distribución de las cargas del barreno y usar doble iniciador con el fin de lograr este resultado.

4.2.1. Cargado con doble iniciador

Para conseguir la meta de P80 se decidió probar con el cargado con doble iniciador (también llamado cargado con doble deck), el cual consiste en dividir en dos partes la carga del barreno, empleando el mismo tipo de explosivo que se utilizaba comúnmente, teniendo así un factor de carga con una variación mínima.

La distribución de las cargas en el barreno y el procedimiento se explica a continuación, además se puede observar gráficamente en la figura 20.

- Primer Cebo: Se realizó insertando el iniciador electrónico dentro del booster y arrojándolo al fondo del barreno.

- Primera Carga Explosiva: Luego de colocar la primera carga iniciadora, se vació una mezcla compuesta por emulsión y nitrato de amonio 48/52, la cual fungió como primera carga explosiva.
- Primer Taco: Después de haber puesto la mezcla anterior se colocó gravilla fragmentada a $\frac{3}{4}$ " que sirvió como el primer taco en el barreno.
- Segunda Carga Iniciadora: Una vez conformada la primera carga de columna, se colocó el segundo iniciador con su respectivo booster, quedando por encima del material anterior.
- Segunda Carga Explosiva: Nuevamente se empleó la mezcla de nitrato amonio y emulsión, cubriendo el segundo cebo.
- Segundo Taco: Finalizada la segunda carga explosiva, restará por cubrir una distancia al cuello del barreno, dicho hueco se tapó con gravilla fragmentada a $\frac{3}{4}$ ", lo que funcionó como segundo taco.

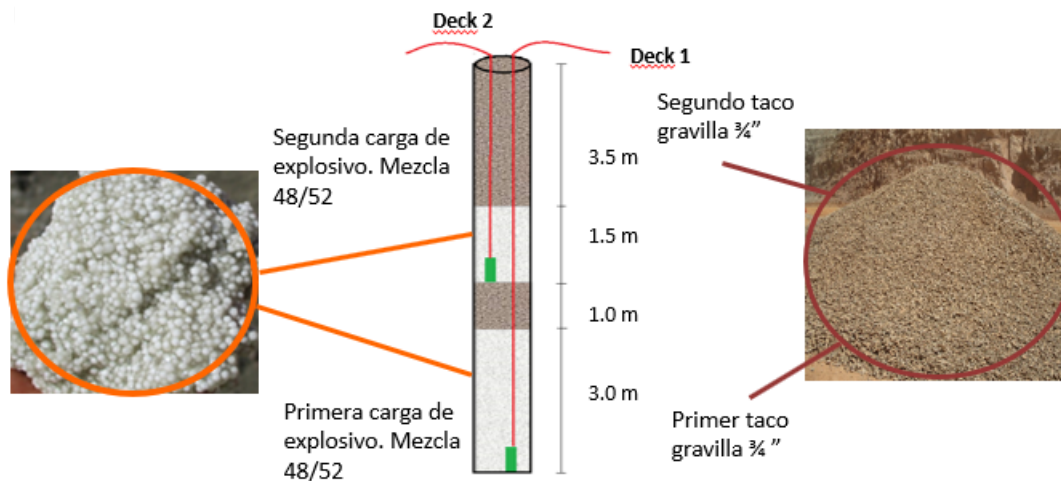


Figura 20 Distribución de cargas empleando doble iniciador

4.2.2. Variables de entrada

Las pruebas se llevaron a cabo bajo el siguiente esquema, tomando aproximadamente 50 puntos de muestreo en toda la frente de ataque.

- Diseño de la plantilla:

Bordo y espaciamiento: 5.5 x 6.50 m

Diámetro de barreno 8 $\frac{1}{2}$ "

Altura de banco: 8 m

- Tipo de roca presente: Gneis Cuarzo Feldespático, Gneis Cuarzo Biotita, mineralización sulfuros masivos y zona de transición.
- Clasificación geomecánica: Zona dura
- Cargado con doble iniciador donde tiempo entre barrenos 8 ms, tiempo entre líneas 120 ms, tiempo entre iniciadores 3 ms.

4.2.3. Desarrollo de la prueba

Se efectuó la voladura y nuevamente se identificaron distintas zonas de producción de acuerdo con el tipo de material.

Posteriormente, se midió el factor P80 nuevamente clasificado por zonas de material, siguiendo la metodología que se planteó en el capítulo 3. La carga se continuó monitoreando hasta que se terminó el banco.

4.3. Análisis de resultados

Para el caso de los sulfuros se obtuvo un valor de 6.71 pulgadas con un porcentaje de finos del 35.67%, mientras que para óxidos se obtuvo un valor de 4.65 pulgadas con un porcentaje de finos del 46.99%, ambos medidos en un rango de tamaño de 0-2 pulgadas. Las gráficas correspondientes a esta información se ilustran en las figuras 21 y 22. Además, la media general del P80 del proceso disminuyó en un 46.78%.

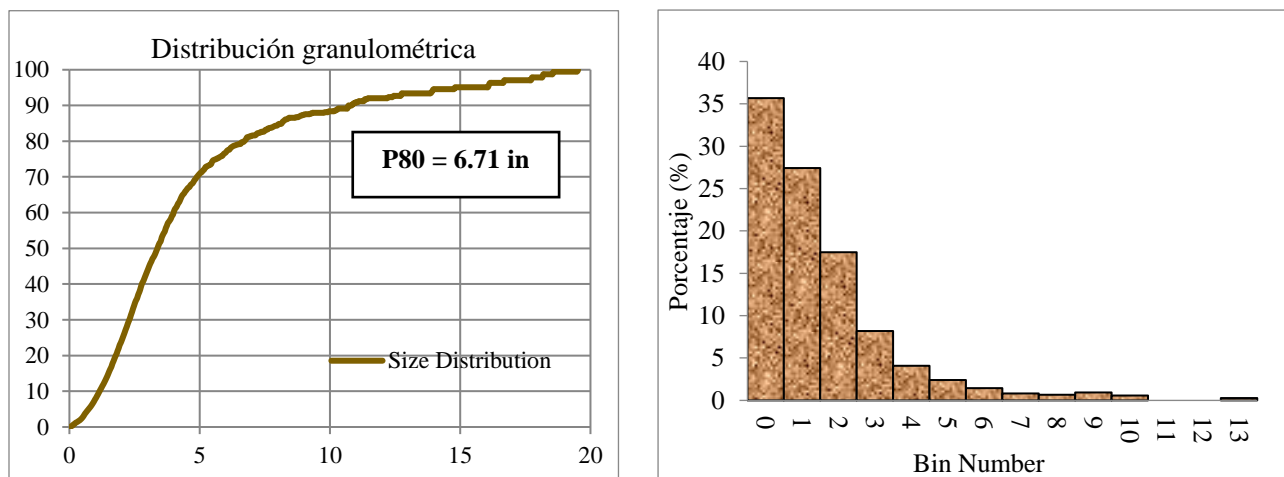


Figura 21 Distribución granulométrica en sulfuros después del uso del doble iniciador. Histograma con porcentaje de finos

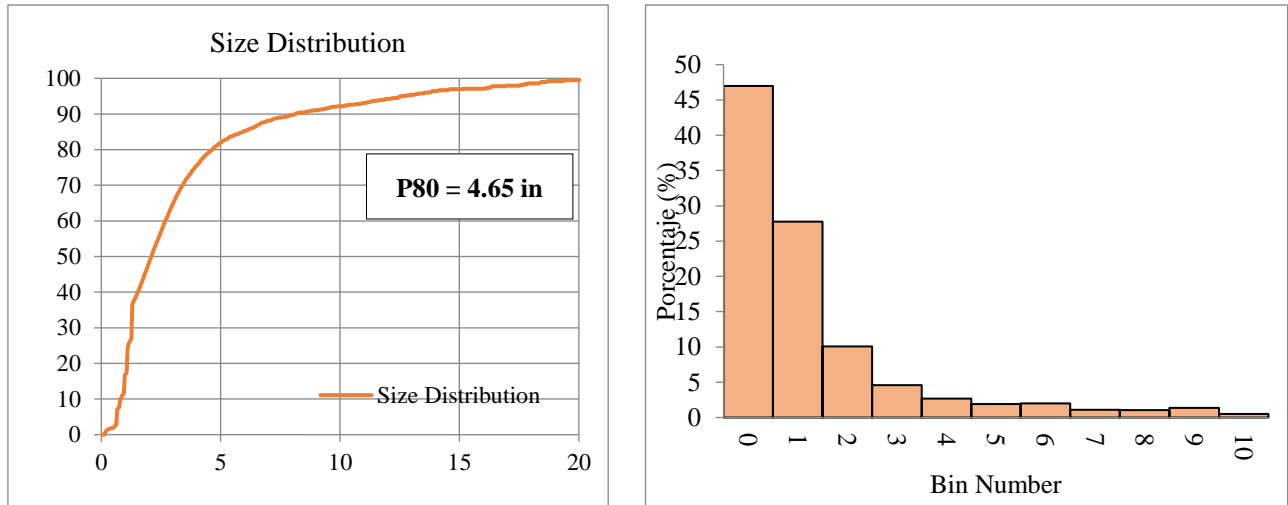


Figura 22 Distribución granulométrica en óxidos después del uso del doble iniciador. Histograma con porcentaje de finos

Asimismo, se relacionaron los valores de P80 con el factor de llenado de bote. La grafica mostrada en la figura 23 demuestra que a un valor de P80 menor se incrementa el factor de llenado de bote.

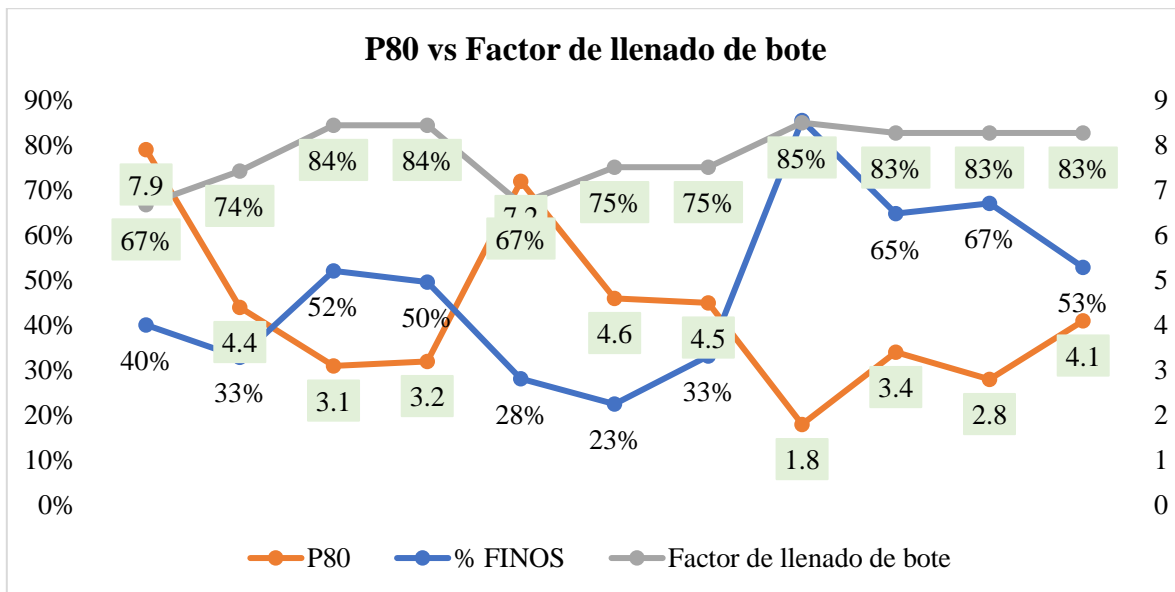


Figura 23 Relación de variables P80 vs Llenado de bote

Al calcular la media del factor de llenado de bote se obtiene un valor del 80%, lo cual nos indica que existe una mejora al implementar este cargado.

4.4. Control del proceso

Una vez que se observaron resultados favorables al variar la distribución de cargas en el barreno, se tomaron muestras de granulometría medida a través del factor P80 con el fin de monitorear la viabilidad del empleo del doble iniciador durante varios días, lo anterior dio como resultado una media aproximada de 4.29 pulgadas con un porcentaje de finos del 46.58% distribuidos en un rango de 0-2 pulgadas (figura 24).

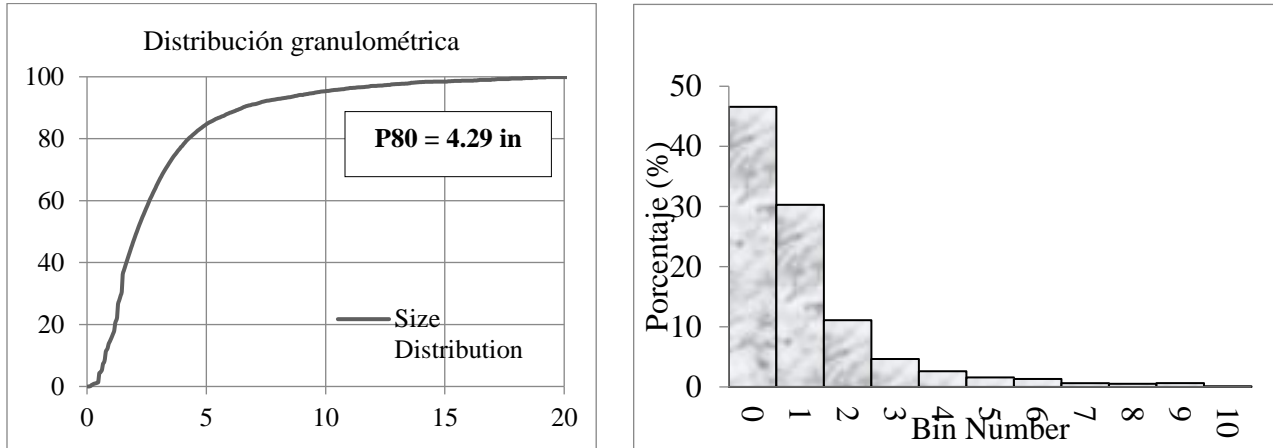


Figura 24 Distribución granulométrica promedio al aplicar el cargado con doble iniciador. Histograma del porcentaje de finos presente en la granulometría

Para poder comparar los resultados realizó un gráfico en el cual se observa que se obtuvo una mejora, con valor de la media del 80% de los valores de llenado de bote (figura 25), pero ahora con el efecto de la disminución del tamaño de fragmentación.

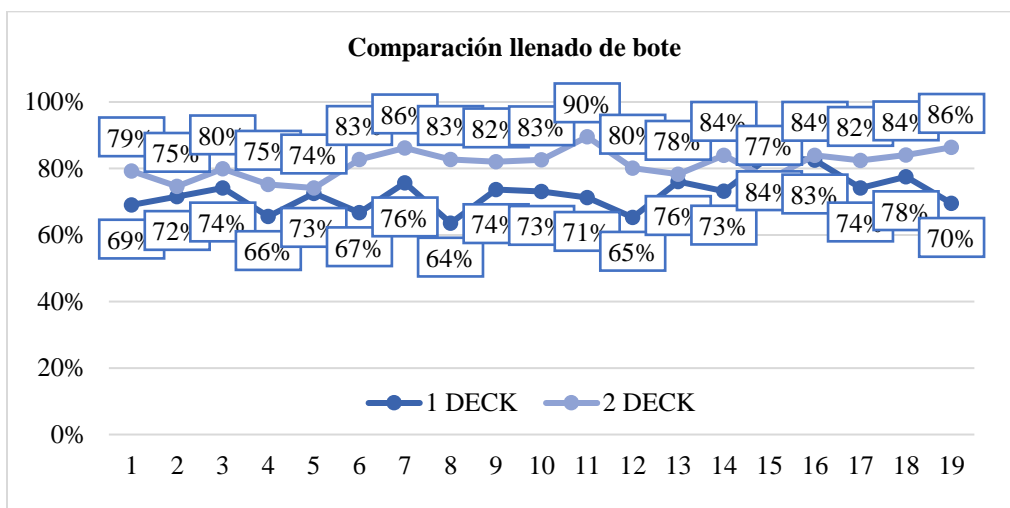


Figura 25 Comparación llenado de bote

De igual forma, se grafican valores de P80 en la figura 26 a fin de ilustrar una comparativa entre ambas pruebas, señalando claramente que el P80 ha disminuido al implementar el cargado con doble iniciador.

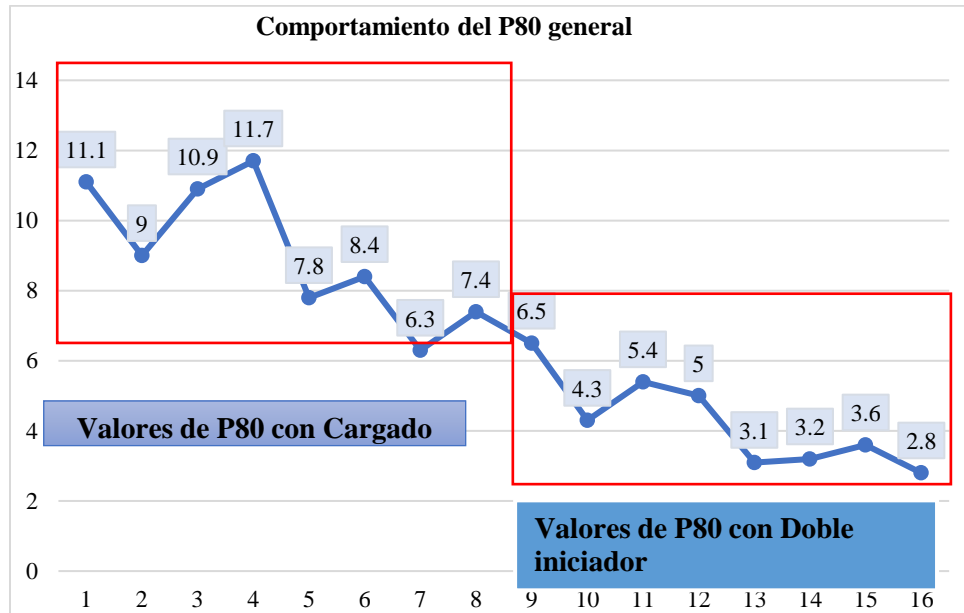


Figura 26 Comportamiento del P80 al implementar el doble iniciador

Al comparar ambas pruebas notamos que existe una disminución de la fragmentación medida a través del factor P80, en ambas zonas: sulfuros y óxidos. Por lo tanto, se observa una respuesta favorable de la fragmentación consecuencia del efecto del uso del doble iniciador.

4.5. Relación de variables

Al analizar los datos anteriores totales en software Minitab, se propone una ecuación con el fin de relacionar la eficiencia del llenado de bote con el factor P80. De acuerdo con el comportamiento de los datos, se observa que el modelo que mejor se ajusta es una ecuación cuadrática (R).

La figura 27 nos indica el modelo representado gráficamente (línea continua roja), el cual muestra una R ajustada del 89.1%, los valores se encuentran dentro de las bandas de confianza validadas a un 95% (líneas punteadas).

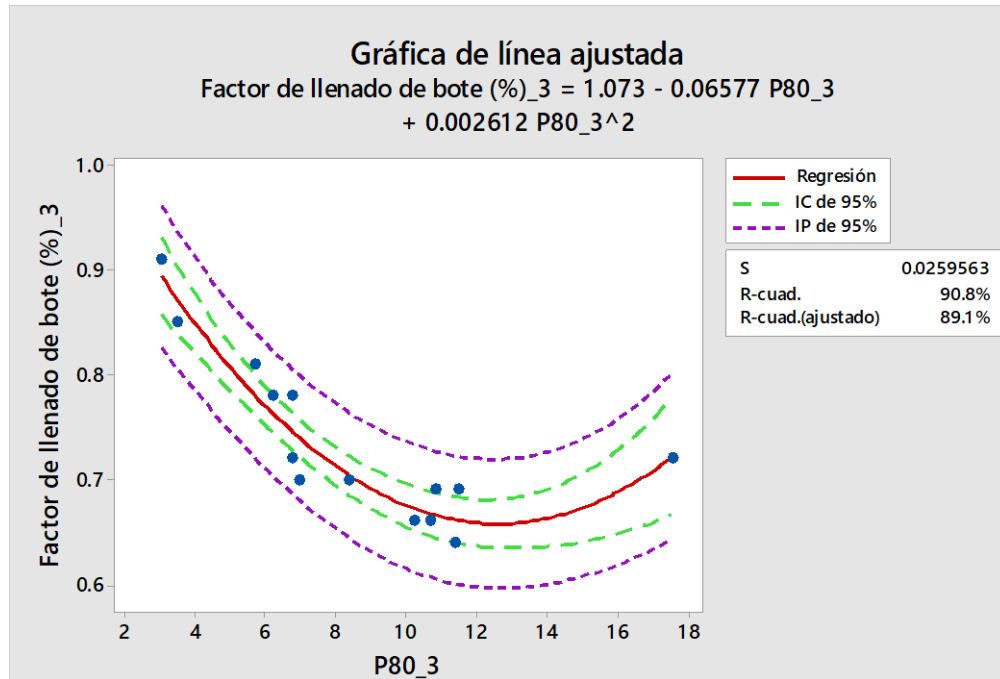


Figura 27 Gráfico de la ecuación cuadrática propuesta

La ecuación resultante es

$$FB = 1.073 - 0.06577P80 + 0.00261P80^2$$

Donde:

FB= Factor de llenado de bote medido en %
 P80= Factor P80 medido en pulgadas

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Luego de recopilar la información teórica y de realizar las pruebas se puede afirmar que se deben definir de manera cuidadosa los parámetros para ejecutar la voladura, ya que la modificación de alguno de ellos influye en el tamaño de fragmentación. Por consiguiente, el impacto más notable del tamaño de roca se refleja en la eficiencia de cargado, en el método de beneficio que aplique y por ende repercute en los costos.

Al comparar el cargado inicial con el cargado con doble deck, se puede decir que es posible seguir implementando el doble iniciador para zonas específicas del tajo, tomando en cuenta que la mejora más notable se tiene en el área de sulfuros.

El objetivo de este trabajo se cumplió ya que se demostró que al usar el cargado con doble iniciador se obtiene una reducción del P80 general en un 37% y un aumento del porcentaje de finos del 19%, siendo más eficiente.

Por otra parte, se observa que al mejorar el tamaño de la fragmentación se incrementó el rendimiento en el llenado de bote de un 72% a un 80% notando una mejora en las operaciones de cargado, de tal forma que el impacto de la disminución de partícula se ve reflejado en los costos directos de acarreo en la operación y por ende en el proceso de beneficio.

Si bien, se logró la reducción del P80 también se debe monitorear constantemente el proceso, verificando que el porcentaje de finos no sobrepase el 70%, ya que podría producir un empaquetamiento en el área de patios.

Otro de los aspectos a cuidar y que forman parte del éxito del proceso es la distribución de las cargas de las cargas en el barreno, por lo que se debe cuidar que su colocación se lleve a cabo bajo las especificaciones requeridas.

LISTA DE REFERENCIAS

- Anchorena López, A. E. (2016). Modelo predictivo de fragmentación y su aplicación en una matriz de decisión. *Convención Minera Perumin*, 2-17.
- Barrera Palacios, L. D. (2017). *Validación del modelo Kuz-Ram para optimizar la fragmentación de roca por voladura*. Ciudad de Mexico: Tesis.
- Bernola Alonso, J., Castilla, G. J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid, España.
- Bustillo Revuelta, M. y. (1997). *Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras*. Madrid, España: ISBN 84-921708-2-4 .
- Dyno Nobel*. (2019). Recuperado el Mayo de 2019, de www.dynonobel.com
- EXSA. (2015). *Manual Práctico de Voladura*. Perú.
- Hexagon, M. (2019 de Febrero de 22). *Rock Size Fragmentation Analysis*. Obtenido de <https://www.spliteng.com/products/split-desktop-software/>
- Howard L. Hartman, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering*. New Jersey, EUA: Wiley.
- Hustruuld, W. A. (2001). *Underground mining methods engineering fundamentals and international case studies*. Colorado, EUA: SME.
- Konya, A., & Konya, C. (2018). Six Sigma Blasting. *Engineering & Mining Journal*, 46-50.
- Konya, C. (1998). *Manual de perforación y voladura*.
- López Aburto, V. M. (2014). *Diseño de operaciones mineras a cielo abierto*. México.
- López Jimeno, C. (2004). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Manual del Especialista en Voladura. (2008). En O. International Society of Explosives Engineers Cleveland, *Manual del Especialista en Voladura* (pág. 674). USA.
- Maxam. (s.f.). *Soluciones de Voladura*. Recuperado el Junio de 17 de 2019, de https://www.maxam.net/es/fundacion/catedra_maxam/soluciones_voladura

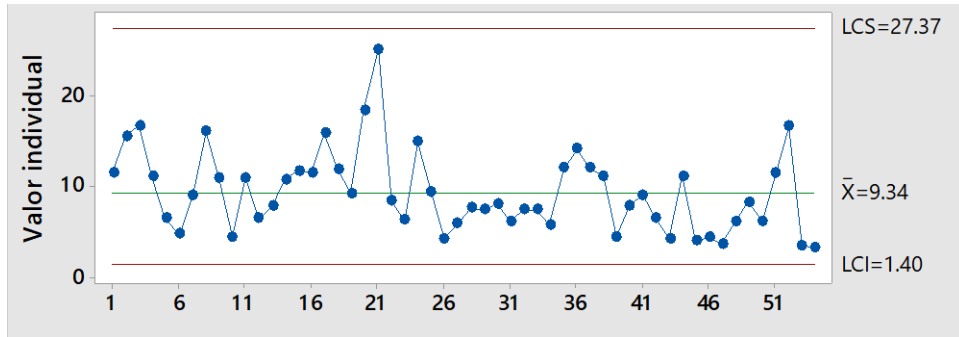
Mendoza Escobedo, J. J. (2017). *Diseño y evaluación de voladuras*. Ciudad de México: Tesis.

Peñoles. (2017). *Informe Anual*. Obtenido de <http://www.penoles.com.mx/wPortal/content/conn/UCM/path/Carpetas/www/Sala%20de%20Prensa/Informes%20Anuales/Informe%20Anual%202017.pdf>

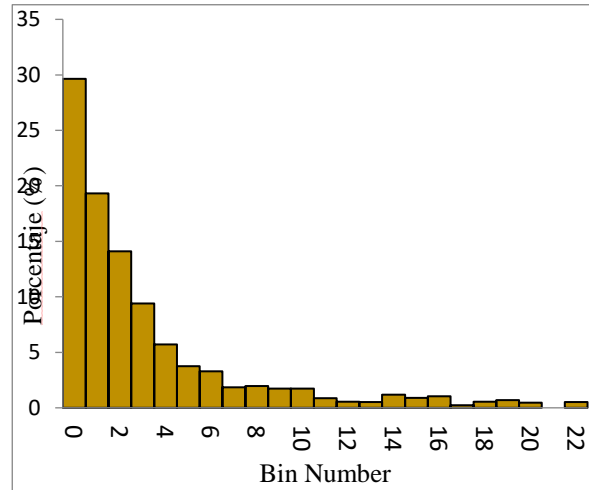
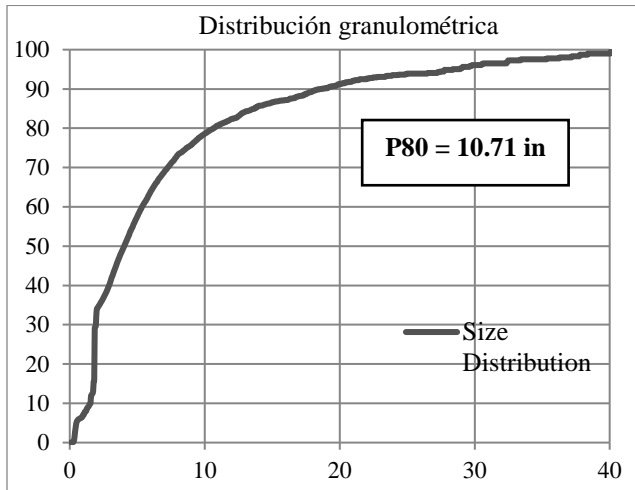
SEGOB. (26 de 11 de 2018). *Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de <https://www.gob.mx/sgm>

Society for Mining, M. a. (1992). *Handbook, Mining Engineering*. Colorado, EUA: SME.

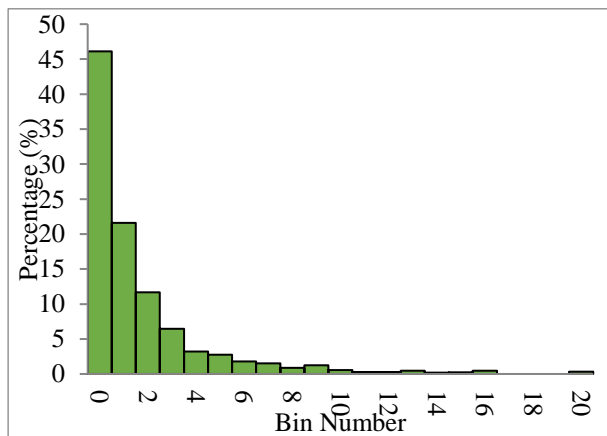
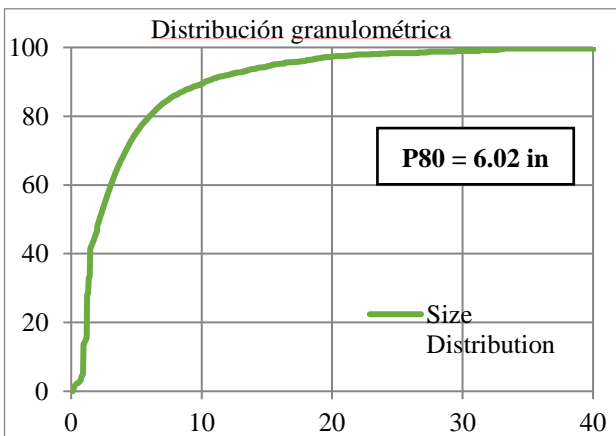
ANEXOS



Anexo 1 Valores individuales de observaciones realizadas



Anexo 2 Distribución granulométrica sulfuros. Histograma con porcentaje de finos



Anexo 3 Distribución granulométrica óxidos. Histograma con porcentaje de finos.