

MEJORA DE FRAGMENTACIÓN A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE CARGA EXPLOSIVA EN EL TACO PARA LA REDUCCIÓN DE SOBRE TAMAÑOS EN ROCA DE ALTA DUREZA

Jorge Cárdenas¹, Gustavo Huerta² y Johan Salas³

¹ Technical Services Engineer, Orica Mining Services, Lima, Perú (jorge.cardenas@orica.com)

² Blasting Engineer, Orica Mining Services, Lima, Perú (gustavo.huerta@orica.com)

³ Blasting Technician, Orica Mining Services, Puno, Perú (johan.salas@orica.com)

Categoría: Investigación y Tecnología Minera

RESUMEN

Uno de los retos de la minería es la optimización en el proceso de voladura, el cual presenta un impacto importante aguas abajo en el procesamiento del mineral quebrado en planta, es lo que las compañías mineras aseguran los resultados de granulometría obtenidos del proceso de voladura se realiza a través de un trabajo en conjunto con empresas especialistas en el proceso de carguío con explosivos.

El logro de los requerimientos granulométricos del material con mineral aplicando la energía química está en función de dos aspectos el primero la competencia del macizo rocoso tanto en dureza, elasticidad y nivel de fracturamiento del macizo rocoso y el segundo la cantidad, distribución y liberación de la energía de los explosivos. Por esta razón, el objetivo principal de este trabajo es presentar los resultados con el diseño de carguío que permitió realizar trabajo de esfuerzos en el sector con menos influencia de energía para la reducción de sobre tamaños y a la par que sea sostenible operativamente manteniendo el nivel de productividad en el proceso de carguío con camiones fabrica.

La técnica a través de una carga explosiva en la zona del material del taco a la cual llamaremos "granada" en adelante o *steaming charge*, en una ubicación y cantidad optima el cual permitió una distribución eficientemente de la energía en toda la columna de perforación, se compararon los resultados de línea base previa y los resultados obtenidos en las pruebas desarrolladas teniendo como conclusión una mejora sustancial en la reducción de sobre tamaños, mejora de los resultados globales de fragmentación y cumpliendo los niveles de productividad de carguío actuales.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio, para las fases de media y alta dureza se viene empleando un taco entre 5.0 a 3.5m,

equivalente al 25% de la longitud de los taladros, este diseño de línea base tiene como resultado la generación de sobre tamaños en la zona del taco, los cuales en algunos casos llegan a tener una granulometría de hasta 2.0m, estos sobre tamaños generan inconvenientes en el ciclo de minado, partiendo desde el proceso unitario de carguío, acarreo y en consecuencia al proceso de chancado. Los autores, evalúan esta alternativa con mejor distribución de energía la cual se alinea con la necesidad de mejorar los niveles de fragmentación asociando la alta complejidad de las voladuras respecto a los diferentes tipos de roca y la dureza del macizo rocoso (UCS>150Mpa) y presencia de saturación de agua que se tiene en toda la extensión de los tajos que actualmente se vienen explotando.

2. OBJETIVOS

Reducción de sobre tamaños en la zona del taco (menor a 1.5m) bajo el enfoque de no generar demoras en el proceso de chancado primario.

La primera etapa es fundamentar el beneficio de los resultados con la aplicación de una carga explosiva en a la zona superior del banco en donde no se tiene presencia de energía de la mezcla explosiva.

Como segunda etapa, es optimizar la aplicación de la técnica de *steaming charge* a través del explosivo encartuchado de mayor energía en la menor masa explosiva que permita un correcto rendimiento operacional de carguío en horas de trabajo y horario programado de voladura.

3. FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL

Para poder evaluar los resultados se parte de desarrollar los conceptos de medición de granulometría a través de equipos especializados, definición y alcances de los sobre tamaños junto con los modelos empíricos y numéricos de fragmentación,

indicadores de la calidad y competencia del macizo rocoso.

Como se mide y determina la energía desarrollada por el explosivo y los parámetros asociados que ejercen trabajo en el macizo rocoso.

3.1 Medición y determinación granulométrica

Mediante el análisis granulométrico con fotogrametría se toma como caso base los resultados de las secciones de los frentes de minado, zonas de extracción de mineral, que fueron cargados solo con columna de carga explosiva sin granada en la zona de taco.

La precisión de las estimaciones con el equipo de análisis granulométrico es en función de la calidad y cantidad con la que se realizan los muestreos en el seguimiento del minado del proyecto de interés.



Figura N° 01: Frente de minado – Fragmentación
Fuente: Autores

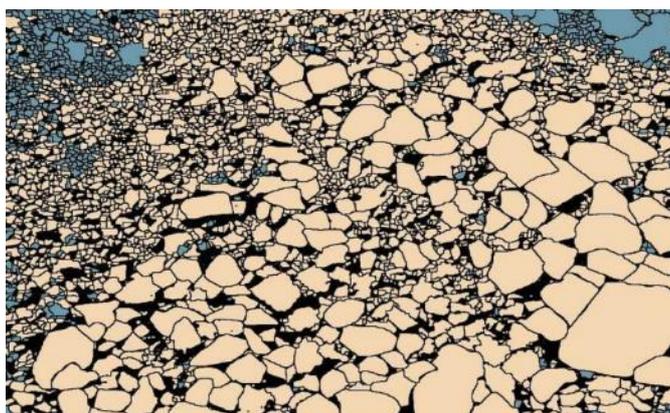


Figura N° 02: Análisis de imágenes fragmentación
Fuente: Portal web MotionMetrics

En función de las diferentes etapas del proceso de la voladura, hay muchos factores que influyen y se ven directamente afectados por el tamaño del material volado. En particular, la distribución del tamaño del fragmento y su tamaño máximo D_{max} , este es crítico, ya

que representa el tamaño máximo que puede ingresar por la apertura, *setting*, de la chancadora.

Por tanto, la fragmentación objetivo según los requerimientos planta, es un parámetro clave para el diseño de una voladura; en ella influyen el diámetro de perforación, el tamaño de la malla de voladura, el tipo y la cantidad de carga utilizada, los tiempos de secuencia entre otros.

Para estudiar la fragmentación por una voladura se toma en consideración las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y su respuesta a los explosivos: como primera aproximación, la impedancia de "roca-explosivo" es un parámetro que permite una estimación a priori del resultado de una explosión en un macizo rocoso determinado. Los modelos empíricos se basan en el conocimiento del tipo de explosivo, en los retardos utilizados, en la geometría de la voladura y en el tipo de roca a explotar. Los más utilizados son: modelo de Kuz-Ram (1987), "Two Components Model" o modelo TCM (1999), "Crush Zone model" o modelo CZM (2004), Modelo de Swebrec (KCO 2005-2010).

Modelos empíricos - Curva de distribución granulométrica

- **Modelo KUZ-RAM:** según Instituto Geológico y Minero de España (1987), Holmberg (2005) y Hustrulid (1999) este modelo fue desarrollado por Cunningham Claude en el año de 1983, por el AECI en South Africa, tomando la curva de distribución de la granulometría de Rosin y Rammler en base a la ecuación empírica de V. M. Kuznetsov propuesta en el año de 1973.

$$X = A * \left(\frac{V_0}{Q_e}\right) * Q_e^{\frac{1}{6}} * \left(\frac{S_{ANFO}}{115}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (Ec. 1)$$

$$X = A(K)^{-0.8} * Q_e^{\frac{1}{6}} * \left(\frac{115}{S_{ANFO}}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (Ec. 2)$$

Donde:

X50 = Tamaño medio de los fragmentos de Voladura. (cm)

A = Factor de roca.

Vo = Volumen de roca fragmentada por taladro (m³)

Q = Cantidad de TNT equivalente a la carga de explosivo por taladro

Qe = Masa de explosivo por taladro.

S ANFO = Potencia relativa en peso referida al Anfo.

- **Modelo CZM (Crush Zone):** El modelo CZM asume que los finos producidos por una voladura se deben a tanto a la compresión como al cizallamiento, y que los fragmentos gruesos se obtienen debido al fallo por tracción.

La zona de trituración puede estudiarse conociendo su radio r_c [mm], el volumen V_c que puede fragmentar una voladura y la fracción de finos F_c ; se pueden utilizar diferentes fórmulas para calcular r_c :

$$r_c = r_0 \sqrt{\frac{(\rho_e \cdot D^2)}{8 \cdot P_a}} \text{ (mm)}$$

Donde:

r_0 = (mm) diámetro del taladro.

D = (m/s) Velocidad de detonación.

ρ_e = (kg/m³) Densidad de carga explosiva.

P_a = Fuerza de compresión uniaxial de la roca.

La roca se considera un cuerpo elástico con capacidad de compresión y resistencia.

$$r_c = \sqrt{\frac{2 \cdot r_0^2 \cdot \rho_e \cdot Q_{ef}}{F_c}} \text{ (mm)}$$

Donde:

r_0 = (mm) diámetro del taladro.

(g/mm³) = Densidad de carga explosiva

Q_{ef} (N.mm/g) Energía específica del explosivo

F_c (MPa) = resistencia a la compresión dinámica confinada del macizo rocoso.

3.2 Sobre tamaños

En aquellas operaciones mineras que presentan características del macizo rocoso de alta dureza, obtener una granulometría de acuerdo al requerimiento para el proceso planta se convierte en crítico ya que requiere factores de carga altos y tacos críticos en el rango inferior ambos deben ser estrictamente controlados ya que una mínima desviación podría afectar directamente las operaciones posteriores, como en estabilidad de taludes, seguridad por riesgo a *flyrock* y demoras en los procesos de carguío, acarreo y planta.

En general, el término "Sobre tamaños", *oversize*, tiene como definición roca producida por el proceso de voladura que no puede ser desplazado adecuadamente por un equipo de carguío y en consecuencia no puede ser transportado ni procesado en la chancadora. Estos pueden requerir una voladura secundaria y/o un

proceso de rotura mediante un equipo mecanizado para percutir la roca, el cual impacta la roca hasta reducirla a un tamaño menor en el que pueda ser manipulada por la pala o un cargador.

La presencia de fragmentos sobredimensionados (roca de gran tamaño) como resultado de la voladura, no solo provocan pérdidas de productividad en los procesos post voladura, sino que también aumenta el costo al requerir un tratamiento adicional. En el caso de la chancadora que se alimenta de este material que no es óptimo, el consumo de energía aumenta junto con otras ineficiencias como atascos en las parrillas, desgaste excesivo de componentes entre otros.

La ocurrencia de sobre tamaños puede darse por varias razones y a su vez estar ubicados en distintas partes de la pila de material volado en función a la causa de origen. A continuación, listaremos algunas causas que ocasionan estas desviaciones:

- Condiciones geológicas: Desarrollo de voladuras en estructuras rocosas masivas, material conglomerado y formado naturalmente, fallas geológicas, geodas, diques intrusivos, juntas y discontinuidades estructurales.
- Perforación, diseños de voladura y carguío: Perforación excesiva/insuficiente, desviación en la distancia de las mallas, burden y espaciamiento inadecuado, tiempos de detonación, secuencia de disparo inadecuada, tiros quedados, taladros cortos o tapados, explosivo inadecuado y desviaciones operacionales.

Cuando se produce una voladura, los sobre tamaños pueden generarse en una o más áreas de la pila de material volado. La figura 03 muestra las secciones más representativas de una pila de material volado.

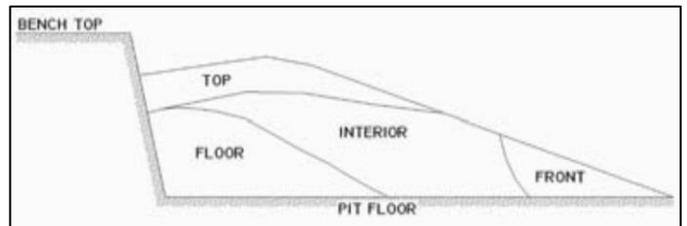


Figura N° 03: Diagrama de una pila de voladura

Fuente: S.P. Singh & R. Narendrula

- Top*: Parte superior de la pila de material volado
- Floor*: Nivel del piso, próximo al frente

- c. Interior: En la zona central o interna de la pila de material volado.
- d. *Front*: En la zona delantera de la pila de material volado, también llamado “material desplazado”.

Algunas causas de la presencia de sobre tamaños en la pila de material volado, asociado a su ubicación, se describen a continuación:

Parte superior: Roca de alta dureza en la parte superficial del banco a disparar, problemas de “patas” o “toes” en la voladura de banco superior y altura de taco excesiva.

Nivel del piso: Parámetros de perforación y voladura inadecuados, tales como altura de taco, energía de iniciación inadecuada para la carga explosiva, insuficiente energía en el fondo del taladro, desviaciones durante la perforación, taladros cortos.

Interior: Calidad de perforación, desviación de taladros y taladros cortos, burden y espaciamiento inadecuado, poca cantidad de explosivo (bajo factor de carga), explosivos de poca resistencia al agua en estas condiciones, explosivos variables en un taladro los cuales podrían generar variables niveles de energía, primado insuficiente, condiciones geológicas adversas.

Zona delantera o “material desplazado”: Los sobre tamaños generados en esta zona pueden producirse por los daños causados en una voladura adyacente (zonas de contacto entre voladuras).

3.3. Parámetros intrínsecos del macizo rocoso que influyen en la fragmentación.

3.3.1 Resistencia a la compresión uniaxial

“La resistencia a la compresión uniaxial es el parámetro más común para definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánica de un macizo rocoso” (Burbano, 2016).

Tabla 01: Clasificación de resistencia a la compresión uniaxial según la ISMR

UCS (MPa)	DESCRIPCIÓN
0.25-1	Extremadamente débil
1-5	Muy débil
5-25	Débil
25-50	Medianamente resistente
50-100	Resistente
100-150	Muy resistente
150-200	Muy resistente
200-250	Muy resistente
>250	Extremadamente resistente

El macizo rocoso correspondiente a las voladuras en las que se realizó la comparación granulométrica de frente de minado se caracterizaba entre resistente a muy resistente, partiendo desde los 150 Mpa y llegando en algunos casos a acercarse a los 250 Mpa.

3.4. Explosivos encartuchados de alta energía

La aplicación de un explosivo encartuchado en la zona del taco, a la cual hemos denominado “granada” o “steam charge” ubicado dentro del taco de la columna de carga, reducirá la ocurrencia de sobre tamaños en los frentes de minado, lo cual se podrá medir en los análisis granulométricos con un descenso en los pasantes P80, P90 y P100. Se asocia curvas de fragmentación más uniformes.

En este documento, se denomina granada a un explosivo encartuchado, resistente al agua y diseñado para ser usado como carga de fondo o como carga de columna en rocas muy duras, se realizaron pruebas usando presentaciones estándar y de mayor energía con masas explosivas de 6.25, 12.5 y 14 kg, ubicados a 2.0 a 2.5m del collar en los taladros de producción.

Se tiene como objetivo encontrar el explosivo de mayor energía y con una masa que permita cumplir los rendimientos operativos de carguío.

Tabla 02: Propiedades de explosivos encartuchados empleados como granada.

Masa explosiva (kg)	6.25	12.5	14.0
Densidad g/cm ³	1.16	1.16	1.16
VOD (m/s)	5600	5600	5500
Presión de detonación (MPa)	9094	9094	8773
Calor de formación (MJ/kg)	4.56	4.56	4.22
Energía Efectiva (MJ/kg)	2.82	2.82	2.58

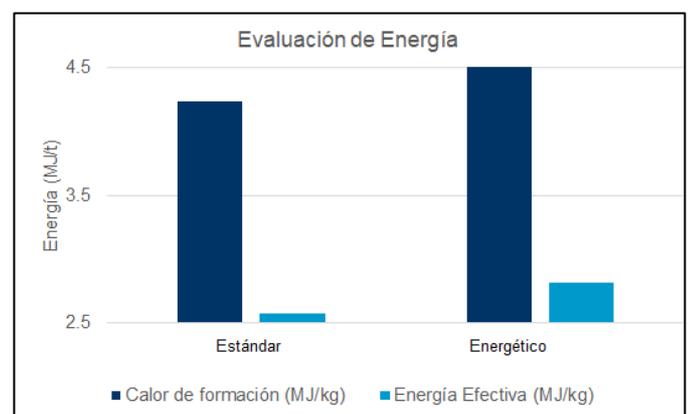


Figura N° 04: Evaluación de energía - Granadas

Fuente: Autores

3.5. Parámetros de diseño, material de tapado y ubicación de la granada.

3.5.1. Diseño de voladuras

Para este estudio se utilizaron diseños de carguío y secuencia de detonación los cuales son expuestos en los siguientes capítulos. Es importante mencionar que estos valores son referenciales y están asociados a las condiciones estructurales y operacionales propias de la operación minera donde se realizó el estudio.

3.5.2. Material de tapado.

Existe una variedad de materiales utilizados para tapar el taladro de voladura, y hay que considerar la densidad de estos materiales, ya que afecta a la capacidad del material (por sus características de inercia) para evitar la liberación prematura de los gases explosivos en expansión y, por extensión aumentar la cantidad de material quebrado durante el proceso de detonación.

Tabla 03: Densidad de materiales empleados como taco

Material	Densidad (kg/m ³)
Tierra-lodo	1730
Tierra - Compactada	1522
Grava	1522
Arena – humedad	1922
Arena – humedad y compactada	2082
Arena y Grava	2020
Agua	1000

3.5.3. Longitud de taco.

EL taco es empleado para confinar el explosivo en la parte superior de la carga explosiva, reduciendo el nivel de eyecciones y ruido. La falta de consistencia o longitud del taco genera que la energía de la detonación se disipe prematuramente en la zona del collar incrementando la posibilidad de *flyrock*.

La altura optima del taco se determina para proporcionar un adecuado confinamiento, permitiendo al mismo tiempo la mejor distribución de energía en el taladro. La eyección del taco es una causa común de perdida de energía en la detonación, especialmente si el material empleado como taco, no es el adecuado.

3.5.4. Scaled Depth of burial (SD)

Una alternativa empírica de estimar la energía en confinamiento es aplicando el SD (*Scaled Depth of Burial*) el cual es descrito como la relación del material de taco y la cantidad de explosivo, dentro de un espacio equivalente a diez veces el diámetro.

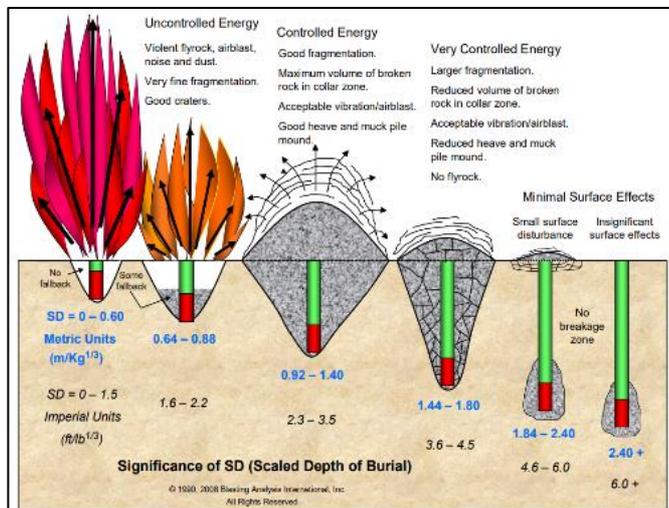


Figura N° 05: Diagrama SD (Scaled Depth of Burial)

Fuente: Frank Chiappetta de BAI

“Los valores de SD recomendados se encuentran en el rango de 0.92 a 1.4, el cual corresponde a una eyección controlada que produce buena fragmentación evitando eyecciones y vibración excesivas. Con un taco de 3.5m el SD es 0.85 m/kg^{1/3} para la columna explosiva.”

$$SD = D/W^{1/3} \quad \text{Scaled Depth of Burial - Metric Units}$$

Required Inputs with Metric Units

Top Stemming (m)

Explosive Diameter (mm)

Explosive Density (g/cc)

Calculations

Explosives Loading Density (kg/m)

L = Length of 10 Explosive Diameters (m)

W = Explosives in 10 Explosive Diameters (kg)

D = Distance from Surface to Center of W (m)

$$SD = \text{Scaled Depth of Burial (m/Kg}^{1/3}\text{)}$$

Para la determinación del SD se toma la granada de 6.25kg con taco de columna explosiva de 3.0m. Se toma como referencia una longitud de 0.5m para la granada. La ubicación al centro de la granada es de 1.75m.

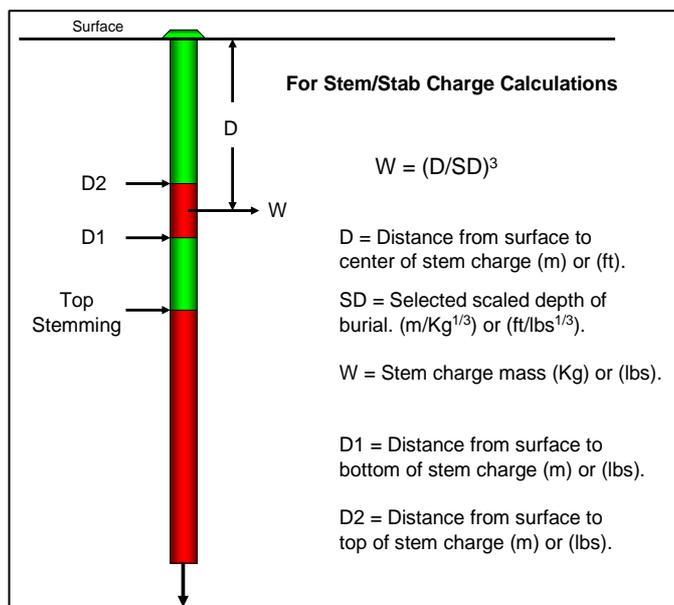


Figura N° 06: Diagrama SD (*Scaled Depth Burial*)

Fuente: Frank Chiappetta de BAI

4. METODOLOGÍA

4.1. Evaluación de fragmentación

Se realizó una línea base con los estándares iniciales de perforación y voladura cuyos resultados son comparados con los de los sectores de prueba. Las pruebas realizadas son en sectores de la misma característica de competencia.

El proceso de análisis granulométrico requiere un minucioso trabajo el cual es soportado por herramientas digitales las cuales optimizan el proceso y muestran la información que se recoge en terreno. En la actualidad, existen tecnologías que utilizan la inteligencia artificial para sensibilizar los resultados y de este modo ofrecer datos precisos.

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó la herramienta PortaMetrics con el objetivo de analizar y reportar los resultados de la post voladura.

Para el caso de evaluaciones puntuales de sobre tamaños de uso la herramienta Powersieve.

4.1.1. Simulación de escenarios

Las técnicas de voladura se utilizan ampliamente para quebrar el macizo rocoso en fragmentos más pequeños. La modelización numérica es un método eficaz empleado por muchos investigadores en el campo de las voladuras a fin de predecir y estimar los posibles resultados en distintos escenarios.

Los parámetros de voladura suelen optimizarse para controlar los resultados de fragmentación de la voladura, con el fin de cumplir los requisitos mínimos de granulometría que demanda el proceso de chancado y molienda. De este modo, a fin de mejorar la fragmentación mediante la reducción de sobre tamaños, se propone la aplicación de una carga explosiva en presentación de emulsión encartuchada de 12.5kg – 2.90MJ/kg, a la cual llamaremos “granada 12.5kg”, la cual se ubique a una distancia entre los 2.0m a 2.5m del collar, separada por un taco de gravilla intermedio que aísla la carga de fondo. Esta aplicación permitirá distribuir eficientemente la energía a lo largo del taladro y en consecuencia optimizar los resultados globales de fragmentación.

Con el objetivo de validar preliminarmente esta propuesta, se realizaron simulaciones utilizando herramientas tecnológicas que pudieran evidenciar en gabinete los posibles resultados en base a las condiciones de la mina y los escenarios planteados. A partir de estas validaciones, se han realizado una serie de simulaciones para investigar los mecanismos básicos responsables del impacto en la fragmentación de rocas en la zona del taco.

Simulación con halos de daño:

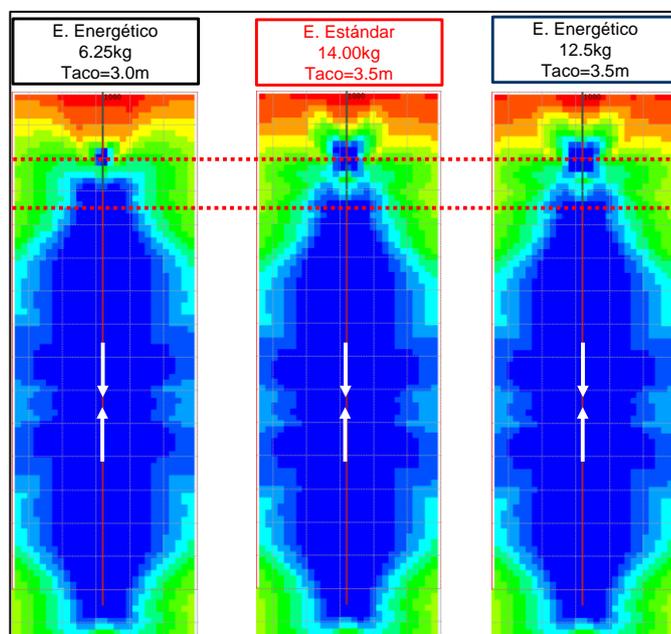


Figura N° 07: Simulación Halos de daño

Fuente: Blast Design Asistant - Orica

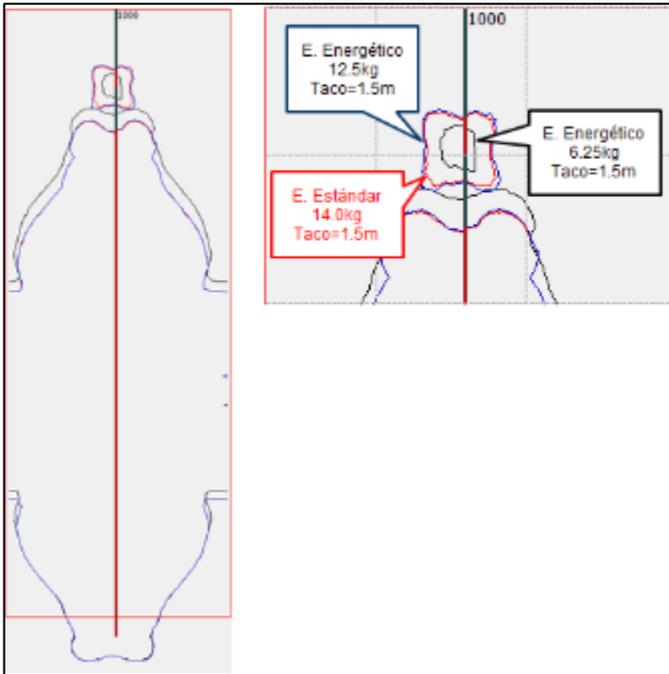


Figura N° 08: Simulación de Halos de daño
Fuente: Blast Design Asistant - Orica

Simulación con halos de energía:

Con la aplicación de explosivo encartuchado de 12.5kg y explosivo encartuchado de 14.0kg se tienen resultados similares a los 1.5m desde el taco.

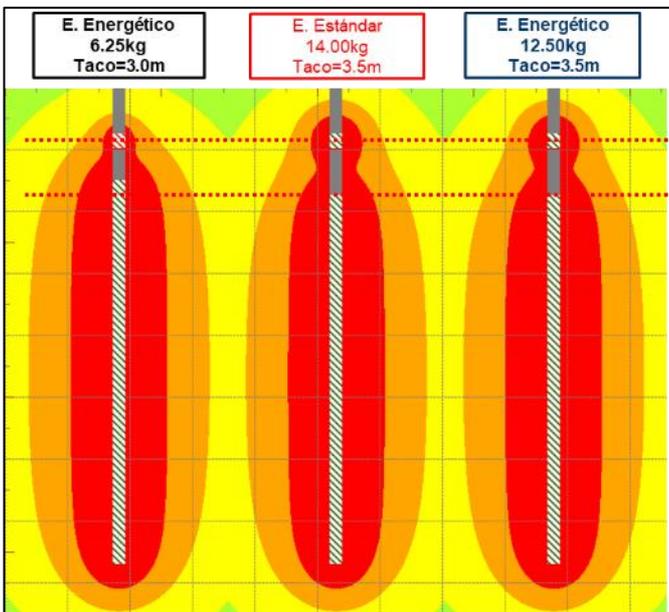


Figura N° 09: Simulación de Halos de energía
Fuente: DEnergía - Orica

A continuación, se muestran los resultados con vista en planta, corte a 2.0m

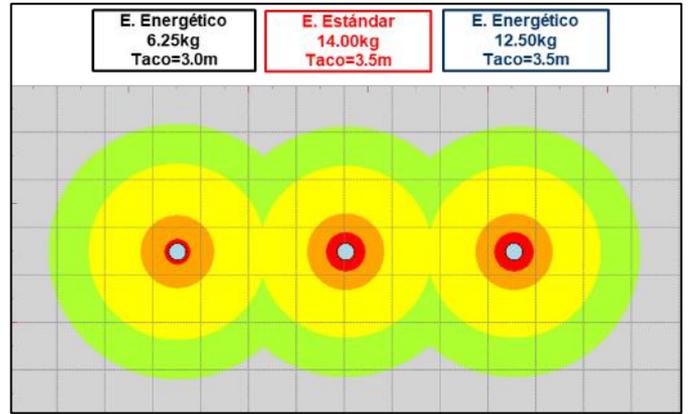


Figura N° 10: Simulación de Halos de energía
Fuente: DEnergía - Orica

- Se toma como referencia una línea base con un P80 de 7.9in en condiciones de dureza de roca IFRAG III(UCS=225MPa) con taco 3.0m y explosivo encartuchado 6.25kg.
- La fragmentación se incrementa al reducir la carga de columna en 0.5m y aumentar la energía en la granada con un P80 de 8.2, con un variación de 0.3in(~4%).
- Se mantienen resultados similares con explosivo encartuchado 14.0kg y explosivo encartuchado 12.5kg, el factor sensible es la ubicación a 1.5m

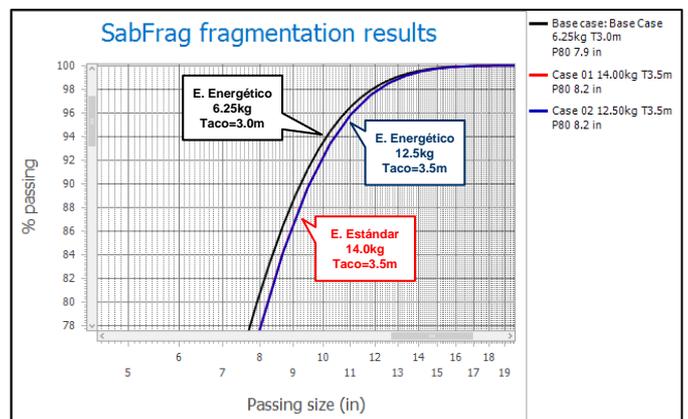


Figura N° 11: Simulación de Halos de energía
Fuente: Blast Design Asistant - Orica

- Lo resultados son similares con explosivo encartuchado 14.0kg y explosivo encartuchado 12.5kg.
- El P80 se incrementa en 2.5in (15%) y el P90 2.6in(13%)

Tabla 04: Resultados de fragmentación

% Passing	Explosivo (6.25kg) Taco 3.0m	Explosivo (14.kg) Taco 3.5m	Explosivo (12.50kg) Taco 3.5m
10	5.9	7.4	7.4
20	7.9	9.6	9.7
30	9.4	11.3	11.4
40	10.7	12.7	12.8
50	12.0	14.1	14.2
60	13.4	15.5	15.7
70	14.9	17.2	17.3
80	16.8	19.2	19.3
90	19.9	22.4	22.5

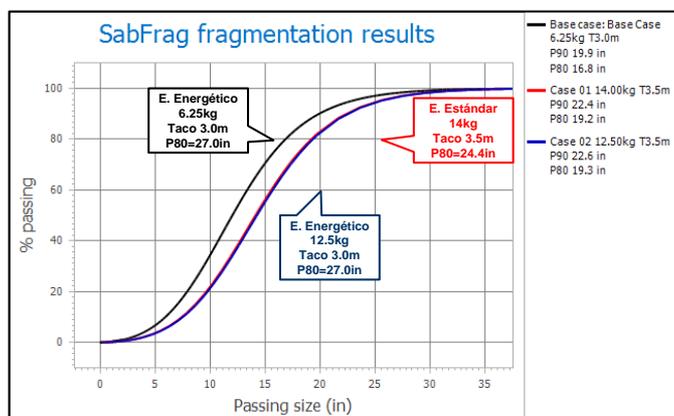


Figura N° 12: Simulación SabFrag – Fragmentación
Fuente: Blast Design Asistant – Orica

Modelos numéricos

A través de herramientas computacionales, es posible realizar la predicción de fragmentación como resultado del proceso de voladura. MBM (Mechanistic Blasting Model) es la herramienta que trabaja a nivel de resistencia mecánica de la roca, generando un quiebre “real” del material y fragmentándolo. Esta herramienta consta de 3 modelos numéricos para descubrir completamente el fenómeno en sí, tales como:

Elementos Finitos (FEA):

- Modelo que estudia el comportamiento de un cuerpo sólido sometido a cargas. Calcula campo de tensiones y de deformación en todo el sólido. Utilizando criterios de fallas, se pueden realizar estudio de propagación de grietas.

Fluido - Dinámica (CFD):

- Modelo que estudia el comportamiento dinámico de fluidos, en este caso en particular, expansión brusca de los gases en un recinto

confinado con paredes adiabáticas. Entrega campo de presiones de los gases para modelo FEA.

Elementos Discretos (DEM):

- Modelo que estudia el comportamiento de material granular de los materiales. Calcula contactos, velocidad de partícula, fuerzas de choque entre partículas, etc. Se utiliza para analizar el movimiento del material cuando ya se encuentra fragmentado.

La interacción de estos tres modelos numéricos, hacen posible capturar de forma más realista los fenómenos de voladura, entregando de forma visual datos que anteriormente solo se podían obtener de forma experimental. La complejidad de estos modelos hace que el costo computacional en tiempo de cálculo sea mayor a otro tipo de estudios, ya que, es necesario generar una gran cantidad de iteraciones para que los resultados de estos 3 modelos numéricos converjan.

Para estimar una curva granulométrica, se realiza un conteo físico de elementos desprendidos de la matriz sólida de la roca y se cuantifica el área que estas utilizan con respecto al espacio muestral. Una vez obtenido estos datos, se asocian una curva Swebrec o Rosim-Rammler.

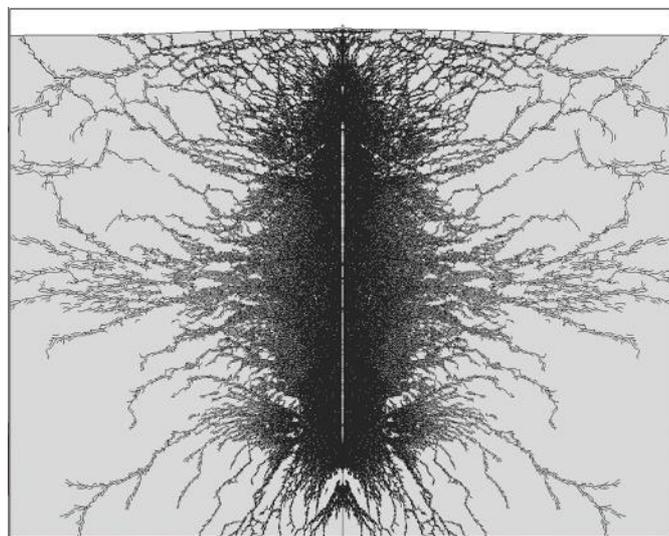


Figura N° 13: Simulación Elfen – Fragmentación
Fuente: Equipo de Modelling Avanzado Latam

5. RESULTADOS

Para obtener una correcta valoración de los resultados de la fragmentación de las voladuras analizadas, en esta sección describe las condiciones del macizo rocoso in situ y la distribución del tamaño de los fragmentos de roca después de las voladuras de prueba estudiadas. La información de las condiciones del macizo rocoso in situ se tienen por parte del titular minero y sus departamentos de Fragmentación y Carguío con el soporte del área de geotecnia.

El objetivo de reducción de sobre tamaños en la zona del taco (menor a 1.5m) bajo el enfoque de no generar demoras en el proceso de chancado primario se explica a continuación en dos partes.

- Primera etapa: Beneficio de los resultados con la aplicación de una carga explosiva en la zona superior del banco en donde no se tiene presencia de energía de la mezcla explosiva con pruebas con y sin granada como carga explosiva en el taco.
- Segunda etapa: Optimizar la aplicación de la técnica de *steaming charge* a través del explosivo encartuchado de mayor energía en la menor masa explosiva que permita un correcto rendimiento operacional de carguío en horas de trabajo.

5.1 Primera parte – Aplicación de granada

La zona de estudio se dividió en dos áreas con parámetros de voladura diferentes a fin de compararlos.

Heavy ANFO Aluminizado: Con malla de 5.6m x 6.3m. Según parámetros de perforación y voladura se cargó 915 kilogramos de explosivo (4.25MJ/kg) dejando un taco de 3.5m, con un factor de carga de 0.62kg/t. Se empleo una granada de 14kg como carga explosiva en el taco posicionada a 2.0m del collar del taladro. Adicionalmente se utilizó la técnica del doble primado para la detonación de la mezcla explosiva. Se tuvo un área de 71 taladros en la zona de Heavy ANFO Aluminizado, en la cual No se empleó granada como carga en el taco.

En la tabla 05 se muestra el resumen de los resultados de fragmentación de la voladura en estudio debidamente sectorizada en función a la aplicación de granada.

Tabla 05: Resultados de fragmentación superficial

Explosivo	HA-AL con granada	HA-AL sin granada
% Pasante	Tamaño de fragmento (in)	
100%	33.35	42.05
90%	17.54	26.5
80%	13.54	19.92
70%	10.79	15.83
60%	8.74	12.76
50%	7.05	10.24
40%	5.55	8.03
30%	4.21	6.06
20%	2.95	4.17
10%	1.65	2.32

En los subcapítulos 5.1.1 y 5.1.2 se describen los beneficios en los resultados granulométricos al aplicar una carga explosiva en la zona del taco.

5.1.1 Resultados de las pruebas – Sin granada

5.1.1.1 Fragmentación superficial post voladura

Los resultados de fragmentación superficial (P80”) obtenidos en la inspección post voladura, según la zona y explosivo aplicado se muestran a continuación:}

Heavy ANFO Aluminizado sin granada en el taco intermedio, se obtuvo un P80 19.92in.



Figura N°14: Fragmentación superficial

Fuente: Autores

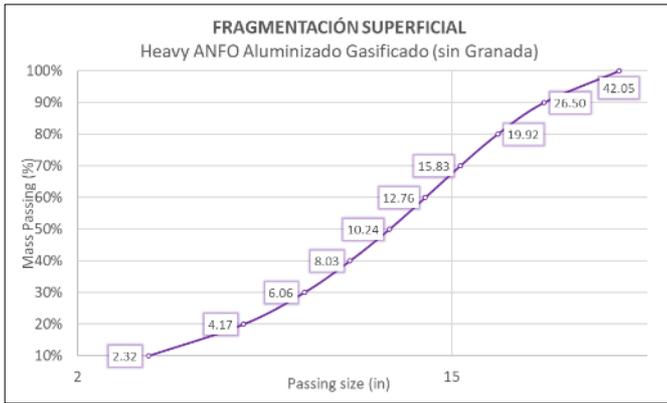


Figura N°15: Curvas de fragmentación – Superficial
Fuente: Autores

5.1.1.2 Fragmentación en frente de minado

Se realizó el seguimiento de los resultados de fragmentación en los frentes de minado en función al avance de la pala. A continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados de fragmentación y así también evidencia fotográfica representativa.

Tabla 08: Resultados de fragmentación – Frente

Heavy ANFO Aluminizado Sin granada					
% Pasante	M1	M2	M3	M4	Promedio
	Tamaño de fragmento (in)				
100%	41.02	38.78	36.30	36.73	38.21
90%	14.96	13.15	13.46	13.31	13.72
80%	9.69	8.70	8.86	8.62	8.97
70%	6.85	6.22	6.34	6.06	6.37
60%	4.92	4.53	4.61	4.37	4.61
50%	3.54	3.31	3.35	3.11	3.33
40%	2.44	2.32	2.36	2.17	2.32
30%	1.61	1.57	1.57	1.42	1.54
20%	0.94	0.94	0.94	0.83	0.91
10%	0.39	0.43	0.43	0.35	0.40

En base a los resultados analizados en 04 días de seguimiento (M1, M2, M3 Y M4) se obtuvo un valor promedio de fragmentación P80" de 8.97 pulgadas.



Figura N°16: Frente de minado

Fuente: Autores

La figura 23 muestra un frente de minado asociado a un disparo con Heavy ANFO aluminizado sin granada, en el cual se evidencia presencia de bolonería (fragmentos sobredimensionados) en el piso que por su peso específico se desprenden. Además, es posible evidenciar que, en la mitad del frente de minado, se tiene material quebrado con una granulometría menor a la del piso. Esta condición obedece a la energía efectiva que entrega al macizo rocoso la aplicación de un explosivo aluminizado. En referencia a la imagen mostrada, se tiene un resultado de fragmentación P80" de 9.69in a continuación, se muestra la curva de distribución granulométrica.

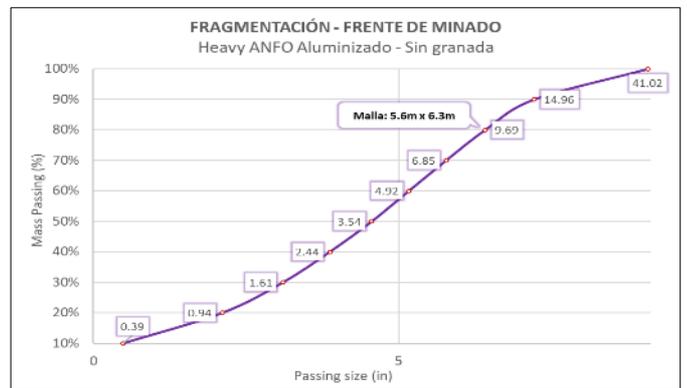


Figura N°26: Curvas de fragmentación – Frente minado
Fuente: Autores

5.1.2 Resultados de las pruebas – Con granada

5.1.2.1 Fragmentación superficial post voladura

Heavy ANFO Aluminizado, con granada explosivo encartuchado 14kg, se obtuvo un P80 13.54in.



Figura N°17: Curvas de fragmentación – Superficial
Fuente: Autores

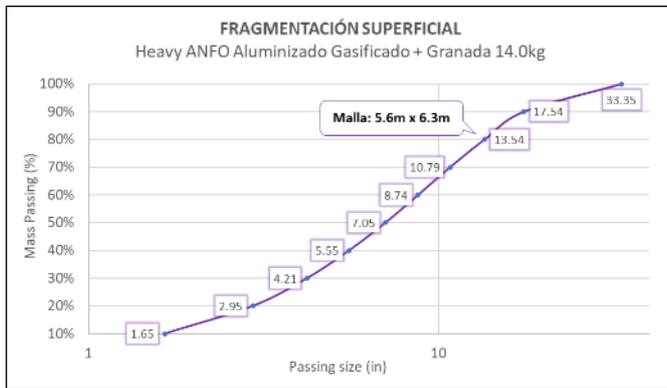


Figura N°18: Curvas de fragmentación – Frente minado
Fuente: Autores

5.1.2.2 Fragmentación en frente de minado

Se realizó el seguimiento de los resultados de fragmentación en los frentes de minado en la zona de prueba en la que se incluyó la granada – *steaming charge* en la zona del taco, esto en función al avance de la pala. A continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados de fragmentación y así también la evidencia fotográfica representativa.

Tabla 08: Resultados de fragmentación – Frente

Heavy ANFO Aluminizado Granada en el taco 14.0kg						
% Pasante	M1	M2	M3	M4	M5	Prom
	Tamaño de fragmento (in)					
100%	35.08	36.85	36.81	29.33	28.86	33.39
90%	12.48	13.03	12.32	10.91	11.89	12.13
80%	8.70	8.66	8.39	7.80	8.43	8.40
70%	6.50	6.22	6.14	5.91	6.42	6.24
60%	4.96	4.57	4.61	4.57	4.96	4.73
50%	3.74	3.35	3.43	3.50	3.78	3.56
40%	2.76	2.36	2.48	2.64	2.83	2.61
30%	1.93	1.57	1.69	1.89	2.05	1.83
20%	1.22	0.94	1.06	1.22	1.30	1.15
10%	0.59	0.43	0.51	0.63	0.67	0.57

En base a los resultados analizados en 05 días de seguimiento (M1, M2, M3, M4 y M5) se obtuvo un valor promedio de fragmentación P80” de 8.40 pulgadas. Haciendo una comparación con los resultados de fragmentación en la voladura en la que no se aplicó granada, se tiene un diferencial de 0.5in aproximadamente a favor del diseño que incorpora la granada en el taco. Es importante mencionar que estos valores están dados en una malla 5.6m x 6.3m.



Figura N°19: Frente de minado – Con granada
Fuente: Autores

La figura 28 muestra un frente de minado asociado a un disparo con Heavy ANFO aluminizado con granada de 14.0kg, en el cual se evidencia mínima presencia de *oversize* (fragmentos sobredimensionados) en el piso. Además, es posible evidenciar que, en la mitad del frente de minado, se tiene material quebrado con una granulometría menor a la del piso. El análisis granulométrico registra un valor de % de finos <1 pulgada de 21.6%. Esta condición obedece a la energía efectiva que entrega al macizo rocoso la aplicación de un explosivo aluminizado. En referencia a la imagen mostrada, se tiene un resultado de fragmentación P80” de 8.66in a continuación, se muestra la curva de distribución granulométrica.



Figura N°20: Curvas de fragmentación – Frente minado
Fuente: Autores

5.2 Segunda parte – Optimización de granada

La segunda parte corresponde a la evaluación energética y operativa. A continuación, mostramos los resultados de la evaluación técnica y operativa de utilizar una granada energética de 12.5kg.

5.2.1 Resultados en función de la energía del explosivo

Para este estudio, en un mismo proyecto, se utilizaron dos tipos de granada: la primera granada de mayor energía que tiene una masa de 12.5kg (zona delimitada en amarillo) y la segunda granada estándar cuya masa es de 14.0kg (zona delimitada en rojo al lado derecho).

Los parámetros de perforación y voladura se detallan a continuación:

- BxE: 4.8m x 5.5m
- Altura de banco: 15.5m
- Factor de carga: 0.75 kg/t
- Explosivo: Heavy ANFO Gasificado 50/50 & 65/35
- Altura de taco: 3.5m
- Altura de granada: 2.0m



Figura N° 21: Malla de prueba
Fuente: Autores

En total se realizaron dos pruebas con esta configuración, dos tipos de granadas de distinta masa y energía de 12.5kg y 14.0kg en sectores contiguos. En la tabla 06 se detallan los resultados de fragmentación

Tabla 06: Resultados de fragmentación - Prueba 1 y 2

Zona/ Masa explosiva	Prueba 1		Prueba 2	
	Energética	Estándar	Energética	Estándar
Taco	10.5	12.3	11.2	12
Columna	7.47	7.63	7.86	7.95

5.2.1.1 Resultados granada energética 12.5kg

A continuación, de forma representativa y a fin de evidenciar los resultados, se muestran los registros fotográficos del frente de minado de la prueba 2 y las curvas granulométricas mencionadas en la tabla 06.



Figura N° 22: Frente de minado
Fuente: Autores

La figura 23 muestra la curva granulométrica de fragmentación del análisis de la zona de columna la cual arroja un resultado de P80" de 7.86in

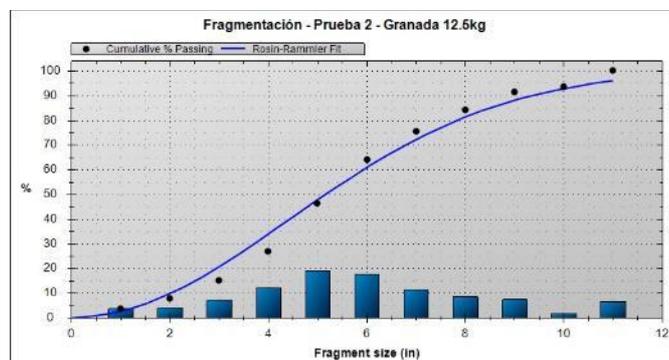


Figura N°23: Fragmentación – Zona columna
Fuente: Autores

La figura 24 muestra la curva granulométrica de fragmentación del análisis de la zona del taco la cual arroja un resultado de P80" de 11.2in

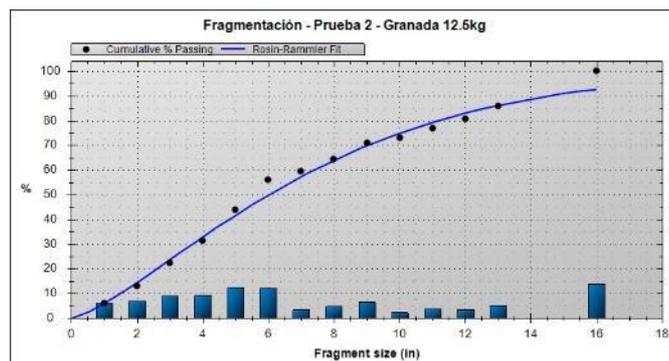


Figura N°24: Fragmentación – Zona taco

Fuente: Autores

La figura 25 muestra una superposición de ambas curvas de fragmentación (Zona columna – Zona Taco).

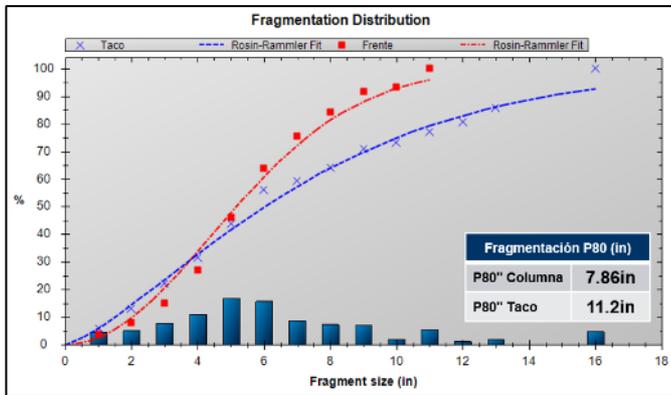


Figura N°25: Curvas de fragmentación

Fuente: Autores

En la tabla 07, se realizó el análisis comparativo de los resultados de utilizar una granada de 12.5kg y una granada de 14.0kg, teniendo como resultado en la evaluación de ambas voladuras una variación del 3.9% con respecto a los promedios analizados en los resultados de fragmentación.

Tabla 07: Resultados de fragmentación

Fragmentación P80 / Explosivo	Encartuchado energético 12.5kg	Encartuchado estándar 14.0kg
Taco (in)	11.40	11.60
Columna (in)	7.50	7.90

En la figura 27 se muestran los resultados de fragmentación superficial de la voladura de prueba utilizando granadas de 12.kg. Estos resultados muestran una fragmentación óptima, sin presencia de bloques de roca sobredimensionados mayores a 1.0m. Durante la inspección post voladura se pudo evidenciar la presencia de material fino a nivel superficial extendido a lo largo de la malla disparada.



Figura N°26: Encartuchado energético

Fuente: Autores



Figura N°27: Encartuchado estándar

Fuente: Autores

5.2.2 Resultados en función de los rendimientos operativos

Durante el proceso de carguío de explosivos, una tarea crítica es el reparto de explosivos en la malla y el nivel de seguridad que se debe tener en este proceso es vital a fin de asegurar el resultado final, la voladura.



Figura N°28: Proceso de reparto de explosivos

Fuente: Autores

Así mismo, es importante considerar que el proceso de reparto se da de forma manual a través de los

operadores de carguío, los cuales están permitidos de transportar un peso no mayor de 25.0kg efectivo. Es por esta razón, que el diseño de granada permite optimizar el proceso y los tiempos de reparto en un 50% (por cada ciclo de viaje) ya que por operador se pueden trasladar hasta 02 unidades. Un explosivo de mayor peso limitaría la capacidad de reparto ya que excederíamos el peso máximo permitido.



Figura N°29: Vehículo para carguío de explosivos
Fuente: Autores

En base a las condiciones operativas de la mina y de los recursos de equipos en los cuales se trasladan los explosivos, se pudo evidenciar que la aplicación de explosivos encartuchados de 12.5kg, en base a la capacidad de carga de 5t del furgón, se incrementa en 12% (43un. más) la cantidad de granadas por viaje.

En general, se ha evidenciado una alta operatividad al utilizar emulsión encartuchada también llamada granada de un peso de 12.5kg, esto sin afectar su desempeño energético y aporte a la fragmentación de rocas.

6. Discusión de resultados

Los resultados expuestos tienen como sustento evaluaciones en terreno en base a pruebas concretas en sector de la misma competencia.

Como caso base, los patrones típicos de mallas de voladura utilizados en esta operación minera son triangulares y oscilan entre 4.8m x 5.3m a 5.6 x 6.3m.

El carguío se lleva a cabo con una mezcla de Heavy ANFO 50/50 en condiciones secas y Heavy ANFO 65/35 en taladros con presencia de agua, y se cargan hasta dejar un taco de 3.5m en voladuras de producción con un factor de carga entre 0.75 a 0.80 kg/t

Los resultados de las pruebas realizadas mostraron una mejora sustancial en los resultados de la fragmentación durante el minado debido a una mejor distribución de la energía del explosivo a nivel del taco, además de una mejora en los resultados de fragmentación asociada al taco en el P80 y P90 en un rango del 11% al 18%. Adicionalmente, las simulaciones evidencian que se consigue un mayor halo de daño en el eje vertical reflejado cualitativa y cuantitativamente durante la inspección y medición de resultados en los frentes de minado. Los resultados obtenidos en estas simulaciones junto con las pruebas de validación en terreno pueden utilizarse para mejorar los resultados de fragmentación, reducción de sobre tamaños de 1.5m

Las mejoras operativas en cuanto a la masa explosiva están sujetas a las limitaciones ergonómicas de carga por una persona de hasta 25kg.,

7. Conclusiones

El objetivo de reducción de sobre tamaños en la zona del taco (menor a 1.5m) bajo el enfoque de no generar demoras en el proceso de chancado primario en roca extra dura se puede conseguir con la aplicación de la técnica de *stemming charge* o "granada", este se concluye a través de las simulaciones en software especializado junto con las pruebas en terreno.

En la primera parte se establece un sector de roca extra dura, se tiene un 23% de los taladros de 15.5m sin presencia de explosivo en el nivel superior con un taco entre 4.5 a 3.5m, al aplicar una carga puntual en ese sector podemos reducir los sobre tamaños a menos de 1.5m. Los resultados de terreno indican lo siguiente:

- En cuanto a las evaluaciones de fragmentación superficial en donde se tiene la mayor presencia de sobre tamaños se reduce el P80 de 19.92 a 13.54in (32%) y el P100 de 42.05 a 33.35in (21%)
- Con respecto a la fragmentación en el frente de minado se mejora el P80 de 8.97 a 8.40in (6%)

Otro aspecto que se evaluó es la eyección por la aplicación de "granadas" en esto se toma como

referencia que la columna ejerce mayor efecto en tacos reducidos que la granada.

- Con la aplicación de un taco 3.5m aumentamos el SD a $0.85 \text{ m/kg}^{1/3}$ para la columna explosiva, esto es mayor que el SD que con taco 3.0m de $0.76 \text{ m/kg}^{1/3}$.
- En base al modelo matemático Cratering Flyrock indica para un taco 3.0 un radio de influencia de 270m y con un taco de 3.5m un radio de 240m.

Con respecto a la ubicación adecuada es en la parte central de la zona del taco a mas de 1m de la columna explosiva para reducir la probabilidad de detonación por simpatía.

En relación con la optimización de la granada se establece como mejora técnica operativa migrar a alternativas de explosivos encartuchados de alta energía, teniendo presente que la opción de explosivos a granel requiere mayores recursos de camiones fabrica de explosivos y tiempos operacionales.

En la segunda parte en un sector de roca dura, se tiene la aplicación de la técnica de *steaming charge* a través del explosivo encartuchado de mayor energía de 12.5kg que con 14kg con energía estandar se demuestra que con valores de energía efectiva equivalentes en cuanto a unidad de energía por tonelada se tienen resultados similares en fragmentación en P80.

- Los valores de energía equivalentes a 0.15MJ/t en la zona del taco (3.5m) en una malla de 4.8x5.5m con una variación de 2%
- La variación de los resultados de fragmentación en frente de minado varia en la zona del taco con un P80 11.6 a 11.4in el cual representa un 2%, tomando como referencia que el taco es el 25% de la columna total de perforación.

Con respecto a la ergonomía se tiene como capacidad máxima de carga hasta 25kg, lo cual representa por caja dos encartuchados de 12.5kg o cuatro de 6.25kg. 12.5kg, en base a la capacidad de carga de 5t del vehículo estándar de transporte de explosivo, se incrementa en 12% (43un. más) la cantidad de granadas por viaje.

7. Recomendaciones

En la siguiente etapa se busca hacer parte los resultados de beneficios en los procesos planta.

AGRADECIMIENTOS

Hacemos extenso el reconocimiento a todo el personal involucrado en el desarrollo de este caso de estudio tanto por parte del personal de Orica por dar apertura y fomentar la presentación de estos trabajos junto con el titular minero con su predisposición a las oportunidades de mejora en sus procesos y excelencia en la operación.

REFERENCIAS

- S.P. Singh & R. Narendrula. 2010. Causes, Implications and control of oversize during blasting. FRAGBLAST, ISBN 978-0-415-48296-7 v. 9 p. 311-317.
- R. Pinksen & R.P. Prouix. 2011. Oversize reduction project at the iron ore company of Canada. SME Annual Meeting, Ed. 2011, Preprint 11-065, p. 01-05.
- Kemeny, Jhon M., Kanuda, Rennie B., Streeter, David., Bobo, Tom., 2003. Effect of Blasting on the Strength of Rock Fragments. ISEE, v. 1. 2003, p. 01-10.
- Yi, C., Johansson, D., 2015. Discrete Element Modelling of Blast Fragmentation of a Mortar Cylinder. International symposium on rock fragmentation by blasting, v 11. 2015, p. 793-798.
- M Cardu and A Calzamilgia 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 833 012121, p. 01-11.
- Rojas Linares, Luis., 2018. Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas. Revista industrial Data, 21. ISSN: 1810-9993, p. 17-26.
- R Yang, C. McAllister, J. Berendzen, D. Preece. 2016. Fragmentation modeling using the multiple Blasthole Fragmentation (MBF) model at an open pit mine. Mining engineering, v.1, 2016, p. 01-06.
- F Faramarzi, M A Ebrahimi Farsangi and H Mansouri. 2015. Prediction of Rock Fragmentation using a Gamma-based blast fragmentation distribution model. 11TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK FRAGMENTATION BY BLASTING v. 1, 2015, p. 01-08.
- F. Ouchterlony. 2005. What does the fragment size distribution of blasted rock look like? European Federation of Explosives Engineers, ISBN 0-9550290-0-7. 2005, p. 1-11.

Perfil profesional 1

Jorge Cárdenas Miranda
Technical Services Engineer
Orica
jorge.cardenas@orica.com
+51 920 136 815
Lima, Perú

Ingeniero de Minas egresado de la PUCP, consultor

técnico senior en Orica, con 10 años de experiencia en operaciones de mineras a tajo abierto en Latino América con desarrollo de trabajos en Perú, Chile, Colombia y Brasil.

Perfil profesional 2

Gustavo Sammy Huerta Valer
Blasting Engineer
Orica
gustavo.huerta@orica.com
+51 940 359 368
Lima, Perú

Ingeniero de minas, M.Sc en Gestión Minera. Ingeniero de voladura, con más de 6 años de experiencia en perforación y voladura en operaciones a cielo abierto en distintas operaciones a gran escala a nivel nacional.

Perfil profesional 3

Johan Salas Flores
Blasting Technician
Orica
johan.salas@orica.com
+51 974 757 878
Puno, Perú

Técnico en voladura, con 3 años de experiencia en perforación y voladura en operaciones a cielo abierto.