

Formulación óptima de anfo aluminizado para voladuras en minería subterránea

Optimum formulation of aluminized anfo for blatings in underground mining

Emiliano Mauro Giraldo Paredes ¹

Recibido: 01/07/2020 - Aprobado: 30/10/2020 - Publicado: 30/11/2020

RESUMEN

La perforación y voladura en una operación minera o civil, es esencial, puesto que de ello depende la eficiencia de las operaciones subsiguientes. Sin embargo, las voladuras también tienen efectos negativos, que pueden minimizarse, seleccionando explosivos de acuerdo al tipo de terreno. El explosivo más usado actualmente, es el ANFO, cuya potencia puede regularse, adicionando aluminio en distintos porcentajes en función del tipo de terreno (según la clasificación Bieniawski o Barton). Para materializar este estudio, se hicieron pruebas de voladura en la Mina Condestable, con ANFO aluminizado hasta el 6% de aluminio en polvo, cargando los taladros con aire comprimido a 80 PSI de presión y cebando con emulsión encartuchada. Bajo estas condiciones, se determinaron las concentraciones lineales de carga y la carga total por taladro. Del análisis de 20 parámetros, se concluye que la formulación óptima del ANFO aluminizado para las voladuras primarias en los tajeos A, B1, B2 Y C de Condestable es el ANFO aluminizado al 4 %, donde los tipos de terreno son de clase II y III-II. Asimismo, se determina que el porcentaje de aluminio adicionado al ANFO guarda una relación directa con el tipo de roca.

Palabras claves: Voladura de rocas; tipo de roca; explosivos; ANFO aluminizado, fragmentación de roca; Minería subterránea; tajeo.

ABSTRACT

Drilling and blasting in a mining operation is essential, since the efficiency of subsequent operations depends on it. However, blasting also has negative effects, which can be minimized by selecting explosives according to the rock type. The most commonly used explosive is the ANFO, whose power can be regulated, adding aluminum in different percentages depending on the rock type (according to Bieniawski or Barton classification). To carry out this study, blasting tests were carried out in the Condestable Mine, with ANFO aluminized up to 6% of powdered aluminum, carrying out the loading of drills with compressed air at 80 PSI of pressure and priming with cartridge emulsion, under these conditions, linear charge concentrations and total charge per hole were determined. From the analysis of 20 parameters, it is concluded that the optimal formulation of aluminized ANFO for primary blasting in A, B1, B2 and C stopes in Condestable is 4% aluminized ANFO, where the rock types are class II and III-II. In addition, it is determined that the percentage of aluminum added to ANFO is directly related to the type of rock.

Keywords: Rock blasting, rock type, explosives, aluminized ANFO, rock fragmentation, underground mining, stope.

¹ Docente Principal de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. E-mail: egiraldop@unmsm.edu.pe; egiraldoparedes@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8069-8485>

I. INTRODUCCIÓN

La voladura en una operación minera es fundamental, puesto que consecuentemente, afecta la productividad de las operaciones de carguío, transporte y chancado, uno de los parámetros a optimizar tan pronto como inicia una operación de excavación o cambio de tipo de roca durante la operación, es la malla de perforación, basado en las propiedades geomecánicas del terreno utilizando una clasificación como el RMR de Bieniawski (escala de I a V) y aplicando alguna teoría de voladura (Mantari Pastrana, 2018). Sin embargo, las voladuras también tienen una serie de efectos negativos como la vibración, golpe de aire y emanaciones (Siskind, 2005), que pueden minimizarse aplicando explosivos de acuerdo a las condiciones y realidades del tipo de roca, puesto que, muchas veces se usa el mismo explosivo para cualquier tipo de terreno, sobre todo cuando se aplican explosivos encartuchados, cuyas potencias vienen definidas desde la fábrica y no pueden modificarse. En una operación de excavación, el efecto más negativo es la vibración de terreno, por lo cual es preciso optimizar la carga por taladro, utilizando herramientas de medición y control como el MiniMate Plus, VodMate, BlastWare III y Roclab 10 (Piñas Esteban, 2007). El explosivo de mayor aplicación actualmente es el ANFO, cuya potencia puede regularse de acuerdo al tipo de terreno, variando el porcentaje de aluminio en su formulación (Lopez Jimeno, 2002). El propósito de este estudio es precisamente, establecer los porcentajes de aluminio que deben adicionarse al ANFO de acuerdo con el tipo de terreno, con la finalidad de obtener resultados óptimos de voladura (fragmentación, desplazamiento, mínimos daños a la roca remanente, contornos, avances, mínima contaminación ambiental, entre otros). Asimismo, que coadyuve al diseño apropiado de la estructura de una mina subterránea como niveles y chimeneas en conjunción con el método de explotación subterránea, que definitivamente también va a depender de una serie de otros factores, como la geología del terreno y profundidad (Ortiz Sánchez & Silverio Canchari, 2017). Los casos más caóticos observados en el diseño de tajeos, que compromete su estabilidad, son las minas de carbón en todo el territorio nacional, donde impera la informalidad, inclusive, hacen uso de explosivos para sus voladuras sin tener en cuenta ni el tipo ni calidad de terreno, produciendo derrumbes e interrumpiendo los accesos que ponen en riesgo la vida y la salud del personal (Giraldo Paredes & Blas Guzmán, 2007). En caso de la explotación por cámaras y pilares, como es el caso de la mina Condestable, la predicción de esfuerzos es fundamental para el diseño de los pilares, considerando entre otros factores, los efectos de la voladura sobre su estabilidad en función del tipo de terreno (Ortiz Sánchez & Silverio Canchari, 2015). La productividad de una operación de excavación, minera o civil depende en gran medida de la estabilidad de la roca circundante (remanente), estabilidad que dependerá del nivel de perturbación ocasionado por la voladura, los minadores continuos como las TBM por ejemplo, producen mínima perturbación a la roca adyacente a la excavación, gracias a ello y otros factores, el avance respecto a la perforación y voladura (P&V) prácticamente es el triplica (Giraldo Emiliano, 2010). Para alcanzar los objetivos del presente estudio, se hicieron pruebas de voladura en la mina Condestable, donde previamente se hizo un reconocimiento de la mina en general, evaluando

las condiciones actuales de operación como: perforación, voladura, carguío, transporte del material arrancado, chancado primario, entre otros parámetros; al igual que la disponibilidad de equipos, explosivos y accesorios de voladura, infraestructura y servicios en interior mina, servicios de laboratorio, personal disponible, etc. Posteriormente, se establecieron los tajeos pilotos en las distintas unidades lito estratigráficas, materializándose las pruebas en los tajeos A, B1, B2 y C. Análogamente, se establecieron las formulaciones de ANFO aluminizado con los que se harían las pruebas y garantizar su abastecimiento durante las pruebas. Una vez definidas las áreas de pruebas y todos los requerimientos, se diseñaron los formatos para los respectivos reportes, se capacitó al personal para la ejecución de las pruebas y el manejo de los reportes. Para la compilación de datos y su procesamiento, se diseñó un programa de cómputo, que permitió además hacer las simulaciones de los parámetros de perforación y voladura, en función de las propiedades geomecánicas del terreno y la formulación del ANFO aluminizado (AL/ANFO).

Los datos tomados en el campo, fueron compilados y alimentados al programa de cómputo indicado en el párrafo anterior para su procesamiento automático, arrojando entre otros resultados, los índices de perforación y voladura. A partir de esos resultados, se hizo un análisis de los parámetros considerados, con la finalidad de determinar las distintas mallas de perforación ensayadas para cada formulación del AL/ANFO, conducentes a la selección cuantitativa de la malla óptima de perforación para las respectivas formulaciones. Con estos resultados, se determinó la formulación óptima del ANFO ALUMINIZADO, para los distintos tipos de roca, considerando para ello los factores involucrados y sus efectos sobre los resultados de las voladuras. Al igual que para la selección de las mallas óptimas indicadas en el párrafo anterior, la selección de la formulación óptima se hizo también cuantitativamente, estableciendo un sistema de calificación para cada rubro. La hipótesis general del presente estudio es: el porcentaje de aluminio a adicionar en el ANFO aluminizado, depende del tipo de terreno a volar.

II. METODOS

Como se indicó anteriormente, las pruebas de voladura se llevaron a cabo en la mina Condestable 2, que está ubicada en la Loma de Vincho, en el distrito de Mala de la provincia de Cañete del departamento de Lima. El 75% de las concesiones de la Mina Condestable están emplazadas en una secuencia de rocas volcánico-sedimentarias, depositadas en un ambiente marino poco profundo. El resto está en rocas ígneas intrusivas relacionadas al batolito de la costa peruana. Localmente, esta secuencia ha sido dividida en 6 unidades litoestratigráficas: Calicantro, Apolo, Actinolita, que pertenecen a la formación Pucusana; Intermedio, Polvorín pertenecen a la familia Pamplona; y Chicharrón que pertenece a la familia Atocongo (Cordova Rojas, 2008). La clasificación geomecánica del terreno de Condestable, según los estudios realizados por DCR Ingenieros S. R. Ltda., se resumen en la Tabla 1.

En Condestable, se aplican distintos métodos de explotación, como el *sublevel open stoping* en los cuerpos

mineralizados más grandes, perforándose los taladros en abanico y paralelos hacia arriba o hacia abajo, siendo la malla de perforación es de 1,5 x 1,5 m. Después de la explotación, las cámaras quedan vacías, no se rellenan. Otro método, es el *shrinkage*, que se aplica a las vetas y mantos cuyas potencias oscilan entre 1 – 5 m, la altura de los tajeos, es de 30 m; en los niveles se dejan puentes de 4 a 5 m de espesor. El material roto desciende por gravedad hasta las ventanas de extracción, de donde los *scooptrams* extraen y cargan a los camiones. El método de cámaras y pilares se aplica a mantos y brechas con buzamiento promedio de 40° y potencias que van de 2 m a 15 m. Normalmente los pilares se recuperan, dejando únicamente los puentes, siempre se dejan pilares en zonas débiles como las fallas y sus intersecciones o cuando se trata de estéril (caballo) (Cordova Rojas, 2008).

Para realizar la parte experimental, se requirió básicamente explosivos y accesorios de voladura. La Tabla 2 presenta los explosivos (ANFO aluminizado) usados durante las pruebas, donde se incluye su densidad normal y el correspondiente cargado a la presión de 80 PSI y, la concentración lineal de carga por metro de taladro (kg/m). Los accesorios de voladura fueron mecha de seguridad de 145 s/m (guía blanca) y fulminante N° 6. Para el cebado, se usó como *booster* la emulsión encartuchada EMULNOR 3000 de 7/8" x 6". Los equipos de perforación fueron las perforadoras manuales BBC16 y los accesorios de perforación, juego de barrenos integrales Secoroc de 33 y 32 mm para taladros de 4 y 8 pies respectivamente. Para el carguío del ANFO, se usó el sistema que usa el principio de Venturi que succiona el ANFO contenido en el saco al pasar el aire comprimido por la tubería.

Para llevar adelante las voladuras de prueba con las distintas formulaciones del ANFO aluminizado, se seleccionaron los tajeos típicos de las zonas de producción, denominándolos Tajeos A, B (B1 Y B2) y C. Cada uno de estos tajeos, fueron reconocidos en todos sus aspectos antes

del inicio del estudio, como las propiedades geomecánicas, geología e inclusive, lo concerniente a la voladura actual. Para el levantamiento de datos de campo se elaboró formularios, a fin de que pueda reportarse todos los datos referentes a la perforación y voladura antes y durante las pruebas. Sobre su correcto llenado, se instruyó (mediante charlas) a todo el personal involucrado en las pruebas, definiendo todos los aspectos involucrados en dicho formulario.

Los equipos de perforación y aceros de perforación serían los mismos para todas las pruebas, siendo el diámetro promedio 32,5 mm y profundidad de 8 pies, el retacado se diseñó para cada formulación del ANFO. Considerando las propiedades determinadas para las distintas formulaciones del AL/ANFO y las propiedades de la roca y el macizo rocoso, se hizo una simulación de los distintos parámetros de la perforación y voladura más probables para cada formulación y para cada tajeo seleccionado.

En base a los parámetros establecidos mediante la simulación, se hizo un programa de pruebas de campo para las distintas formulaciones y para cada tajeo, variando la magnitud de la malla de perforación, en valores cercanos al valor obtenido en la simulación. El número de pruebas para cada formulación quedó establecido en 36, compartido en 3 tajeos y 2 guardias por día. El carguío de taladros se llevó a cabo con el método tradicional que ilustra la Figura 1, siendo el tiempo de carguío entre 12 y 15 segundos, dejando un retacado de entre 0,30 y 0,40 m. La secuencia de salida, en todos los casos se hizo mediante la malla de retardo en "V".

El registro de las pruebas de voladura, se llevaron a cabo en los formatos diseñados para esta investigación. El llenado de este formulario, se llevó a cabo considerando los parámetros establecidos y agrupados en datos de entrada y salida. Los datos de entrada, fueron registrados antes de la voladura por la guardia saliente (ejemplo la guardia 1),

Tabla 1. Clasificación de la masa rocosa en Condestable

Tipo de roca	RMR promedio	Clase de roca	Calidad de la masa rocosa
Lava andesítica	63	II	Buena
Pórfido dacítico andesítico	58	III - II	Regular a buena
Tufos	55	III - II	Regular a buena
Brechas	49	III	Regular

Fuente: DCR Ingenieros S.R. Ltda. (2001)

Tabla 2. Densidades y concentraciones lineales de carga para las distintas formulaciones de ANFO

Explosivo	Densidad normal (g/cc)	Densidad de carga a 80 PSI (g/cc)	Concentración lineal de carga (Kg/m)
ANFO + 0% Al	0.995	1.244	1.032
SUPERFAM II	1.010	1.263	1.047
ANFO + 2% Al	1.025	1.281	1.063
ANFO + 3% Al	1.030	1.288	1.068
ANFO + 4% Al	1.040	1.300	1.078
ANFO + 6% Al	1.090	1.363	1.130

dentro de estos datos estaban considerados: datos del tajeo, área a volar, datos de operación, tipo de explosivo, diámetro de perforación y profundidad, malla de perforación, paralelismo entre los taladros, retacado y malla de retardo. Los datos de salida, fueron registrados después de las voladuras por la guardia entrante (ejemplo la guardia 2), con todos los detalles como exigía el estudio. Por su importancia, hacía lo propio el supervisor de turno, registrando entre otros resultados: Área volada, emanaciones, avance por corte, taladros cortados (tacos), fragmentación del material, fragmentos sobredimensionados por encima de 50 cm, fragmentos que requerían voladura secundaria, contorno de la excavación, daños a la roca remanente, para delatar las fisuras y grietas dejadas por la voladura, se hacía un lavado copioso de todo el contorno de la excavación. Para el caso de la fragmentación, se estableció una escala de acuerdo a la abertura de la chancadora primaria Allis Chalmer 30", que ilustra la Figura 2.

Para la compilación y procesamiento de datos, se diseñó un programa de cómputo, a fin que arroje automáticamente al menos 20 parámetros como resultados de las voladuras de pruebas para cada porcentaje de aluminio adicionado al ANFO. Con los resultados obtenidos se hizo las discusiones pertinentes y llegando a establecer los porcentajes ideales de Aluminio en el ANFO aluminizado en función del tipo de terreno, es decir, la relación que tiene el porcentaje de aluminio con la clase de roca.

III. RESULTADOS

3.1. Propiedades del ANFO aluminizado en función del porcentaje de aluminio adicionado

La Tabla 3, resume las propiedades del ANFO aluminizado de acuerdo con el porcentaje de aluminio adicionado, donde se puede observar que, a medida que aumenta el



Figura 1. Equipo para el carguío de ANFO dentro de los taladros aplicando el principio de Venturi



Figura 2. Chancadora cónica Allis Chalmer de 30" mostrando su abertura

porcentaje de Al, el contenido de petróleo (FO) se reduce, porque al aluminio actúa como combustible, como tal durante la reacción consume parte del oxígeno contenido en el nitrato de amonio. Asimismo, la densidad, velocidad de detonación (VOD), calor de detonación y la potencia relativa, aumentan de acuerdo al incremento del porcentaje de aluminio, mientras que el volumen de explosión decrece.

3.2. Comparación de resultados

Analizando los resultados para cada tajeo donde se llevaron las 33 pruebas, se observa que los mejores resultados de voladura se obtienen para la formulación de ANFO aluminizado con 4 % de aluminio, puesto que los tipos de terreno de los tajeos donde se llevaron las pruebas son similares, clase II o III-II, como puede apreciarse en la Tabla 4.

Fragmentación: Este resultado esencial en toda voladura, se evaluó tanto en el tajeo como en la chancadora primaria y la cancha de mineral. La Figura 3, ilustra la evaluación de la fragmentación en los tajeos B1 y B2, como resultado se tiene fragmentación menuda, Esto implica que,

probablemente el ANFO aluminizado al 3% de Al, sea el más conveniente para las voladuras en este tipo de terrenos (terrenos menos duros, clase III - II).

Avance por disparo: Para evaluar este resultado, antes de la voladura se marcó la posición inicial del frente en las cajas con pintura fosforescente. Luego del disparo se midieron los avances, desde las marcas iniciales hasta el nuevo frente (profundidad de corte). Conociendo la profundidad de los taladros perforados y la profundidad de corte después de la voladura, se pudo determinar el avance promedio en 90 %. Los daños ocasionados por la voladura actual son mínimos. Estos daños se producen normalmente por la mala orientación y falta de paralelismo entre los taladros, que muchas veces se penetran en las cajas aumentando inclusive la dilución.

Emanaciones detectadas: Únicamente en las labores ciegas (sin ventilación), se pudo detectar altas concentraciones de los gases nocivos CO y el NO₂ como productos de la detonación explosiva. Siendo la concentración del CO, la de mayor preocupación. De

Tabla 3. Propiedades del ANFO aluminizado en función del aluminio adicionado

Aluminio adicionado (%)	Contenido de nitrato de amonio, AN (%)	Contenido de petróleo, FO (%)	Propiedades del ANFO aluminizado cargado a una presión de 80 PSI				
			Densidad (g/cc)	Velocidad de detonación, VOD (m/s)	Calor de detonación (kCal/kg)	Volumen de explosión (l/kg)	Potencia relativa por peso, RWS (%)
0	94,57	5,43	0,995	4737,36	907,21	973,29	100
2	93,32	4,68	1,025	4902,51	984,01	940,21	106
4	91,75	4,25	1,040	5073,23	1062,68	910,66	113
6	90,34	3,66	1,090	5379,70	1140,41	879,35	120

Tabla 4. Discusión de resultados para la formulación del ANFO aluminizado al 4 % de aluminio

Parámetros comparativos	Valores óptimos para el anfo + 4% al		
	Tajeo A	Tajeo B1 – B2	Tajeo C
Rock Mass Rating, RMR (Bieniawski)	55,00	63,00	63,00
Clase de la masa rocosa	III	III-II	III-II
Bureden (m)	1.100	1.100	1.100
Espaciamiento (m)	1.100	1.100	1.100
Retacado (m)	0.700	0.700	0.700
Adaptabilidad a la geometría del tajeo	1.500	1.500	1.000
Avance por corte, Av. (m)	2.250	2.100	2.250
Fragmentación	0.000	-0.500	0.000
Porcentaje de fragmentos sobredimensionados	3.500	6.000	31.000
Porcentaje de fragmentos sobredimensionados (voladura Secundaria)	3.500	6.000	3.500
Contorno de la excavación	0.500	1.000	0.500
Daños a la roca remanente	1.000	0.500	1.000
Numero de tiros cortados	0.000	0.000	0.000
Emanaciones (CO + NO ₂ , permisible 25 + 5 ppm)	200.50	101.50	200.50
Perforación específica (mp/TM)	0.295	0.248	0.295
Carga específica (Kg/m ³)	0.558	0.577	0.558
Factor de potencia (Kg/TM)	0.199	0.206	0.199



Figura 3. Evaluación de la fragmentación por el autor después de las voladuras en los tejos

Tabla 5. Nuevos valores de los parámetros de perforación y voladura con el ANFO aluminizado al 4 % de Al en función de la profundidad de taladros

Parámetros	Nuevos valores de acuerdo a la profundidad de taladro		
Profundidad de taladro (pies)	6	8	10
Diámetro promedio (mm)	32.5	32.5	32.5
Burden (m)	1.100	1.100	1.100
Espaciamiento (m)	1.100	1.100	1.100
Retacado (m)	0.700	0.700	0.700
Concentración lineal de carga (kg/m)	1.078	1.078	1.078
Carga por taladro (kg/tal)	1.024	1.671	2.318
Tonelaje roto por taladro (TM)	5.489	7.318	9.148
perforación específica (mp/TM)	0.328	0.328	0.328
Carga específica (kg/m ³)	0.539	0.619	0.709
Factor de potencia (kg/TM)	0.187	0.221	0.253

Tabla 6. Relación entre la clase de masa rocosa (Clasificación según Bianiawski) y el porcentaje de aluminio a adicionar en el ANFO aluminizado

Clase de roca	I	II	III - II	III	IV - III	IV	V
Porcentaje de aluminio en el anfo (%)	6	5	4	3	0	0	0

acuerdo a registros históricos, hubo casos en que su concentración estaba muy por encima de los niveles permisibles. En lugares bien ventilados, no existe este problema.

3.3. Nuevos parámetros de perforación y voladura aplicando el anfo aluminizado al 4 %

Los nuevos parámetros de perforación y voladura en los tajeos estudiados, ilustra la Tabla 5, donde se aprecia que, no obstante que los taladros más profundos (10 pies), arrancan mayor tonelaje por taladro, no tienen la misma ventaja económica. Esto demuestra la conveniencia de trabajar con taladros menos profundos, porque permiten arrancar el material al menor costo. El cebado, podrá seguir siendo el mismo, es decir, con cartuchos de EMULNOR 3000 con su respectivo fulminante y mecha.

3.4. Relación ente el porcentaje de aluminio en el anfo aluminizado y el tipo de roca

En base a los resultados obtenidos en las voladuras de pruebas en Condestable, aplicados básicamente en dos tipos de terreno, clase II y III-II, por ser los terrenos más duros, donde Condestable tenía interés de determinar los porcentajes apropiados de aluminio en el ANFO. Sin embargo, haciendo un análisis de los resultados para las distintas formulaciones de ANFO aluminizado y los resultados obtenidos para los distintos parámetros, se infiere que la relación entre el tipo de terreno y el porcentaje de aluminio a adicionar en el ANFO, sería como ilustra Tabla 6. En base a los indicadores establecidos para la evaluación de cada formulación de ANFO aluminizado en función del tipo de terreno, se puede confirmar la hipótesis, con los siguientes argumentos: a) Ha sido

demostrado que para el terreno clase III-II, el porcentaje de aluminio es del 4 % y para la clase II, 5 % y para la clase III, 3 %. b) Las pruebas en terreno clase IV – III con ANFO aluminizado al 2 % de Al, hubo mucha desestabilización, de modo que se probó con el Superfam que es un ANFO que contiene una mínima cantidad de aluminio y carbón, con buenos resultados, deduciendo que el ANFO simple (0 % de Al) sería lo más indicado, siendo así, para las rocas clase IV y V, sería suficiente hacer las voladuras con el ANFO simple; es de destacar que la rocas clase V y V-IV, por su naturaleza requieren explosivos aún más livianos que el ANFO simple, que bien puede ser el ANFO diluido. c) Cuando se hicieron las pruebas en terrenos clase III-II y II, con ANFO aluminizado con 6 % de aluminio se produjeron muchos daños a la roca remanente, suspendiéndose las pruebas con esta formulación. De ello se deduce que, esta formulación sería más apropiado para la roca clase I, clase de roca es muy escaso en la naturaleza, esto demuestra que, para toda la gama de rocas, el porcentaje de aluminio en polvo a adicionar al ANFO para voladuras subterráneas, oscilaría 0% y 6%. Cabe destacar que, en Perú las clases de roca predominantes están entre las clases III y IV. Con estas precisiones, queda demostrado la hipótesis planteada en la formulación del problema.

V. CONCLUSIONES

1. La potencia relativa por peso (RWS), aumenta como aumenta el contenido de aluminio en el ANFO aluminizado en forma directa. Considerando 100 % de RWS para el ANFO simple (0 % de aluminio), para 2 % y 6 % de aluminio, se tiene respectivamente 106 % y 120 % de RWS.
2. La diferencia entre las dimensiones de las mallas de perforación simulados y los optimizados mediante las pruebas, se debe básicamente a que la simulación se hizo considerando densidades normales de las distintas formulaciones de ANFO aluminizado, y no las densidades de carguío a presión (con aire comprimido). El gran incremento de la densidad de carguío, se refleja en el incremento del poder rompedor del explosivo. Por ejemplo, en el tajeo A, la malla simulada fue 1,02 x 1,02 m, mientras que lo optimizado fue 1,10 x 1,10 m, para el ANFO aluminizado al 4%.
3. Dado que los tipos de terreno donde se llevaron a cabo las pruebas de campo en Condestable fueron muy similares, clasificados como clase III-II y II, se demuestra que la formulación óptima sería el ANFO aluminizado al 4 % de aluminio. Sin embargo, la mejor formulación para la clase de roca III-II es el ANFO aluminizado al 3 %.
4. Durante las pruebas de campo, se pudo verificar que el ANFO aluminizado al 6 % de aluminio, produjo mucha sobre rotura en la roca remanente debido a su exceso de energía para el tipo de roca. Por consiguiente, esta formulación sería aplicable a terrenos más competentes.

5. Los ANFO aluminizados con bajos porcentajes de aluminio, son las que producen mejores contornos de excavación (contornos más uniformes) y mínimos daños a la roca remanente. Sin embargo, resultan más favorables las formulaciones con mayor porcentaje de aluminio debido a otros parámetros de evaluación, como la fragmentación.
6. La presencia de altas concentraciones de gases (CO y NO₂), se tuvo en las labores ciegas, donde la ventilación no es adecuada. Los resultados para los ANFO aluminizados no son muy diferentes a las emanaciones producidas por el ANFO simple.

V. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por apoyar con parte del financiamiento del presente estudio. Asimismo, agradece a la Cía. Minera Condestable, por las facilidades dispensadas para materializar el presente estudio en sus diversos tajeos, dotación de maquinaria, personal, servicios y facilidades de campamento.

VI. REFERENCIAS

- Cordova Rojas, N. D. (2008). *Geomecanica en el minado subterraneo casi mina condestable*. <http://docshare04.docshare.tips/files/26532/265324755.pdf>
- Giraldo Emiliano. (2010). TBMs como alternativa a la P y V en la excavación de túneles. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 13(26), 27–36. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v13i26.345>
- Giraldo Paredes, E., & Blas Guzmán, W. (2007). Minería actual del carbón en el norte del Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 10(20), 76–81. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/497>
- Lopez Jimeno, C. (2002). *Manual de perforación y voladur de rocas*. http://info.igme.es/SidPDF%5C065000%5C102%5C65102_0001.pdf
- Mantari Pastrana, J. J. (2018). *Diseño de malla de perforación y voladura para la explotación de vetas angostas con el método de explotación tajeo por subniveles en roca tipo III y IV* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/17777>
- Ortiz Sánchez, O., & Silverio Canchari, G. (2015). Análisis de variables en el diseño de pilares para sostenimiento minero subterráneo. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 16(31). <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v16i31.11287>
- Ortiz Sánchez, O., & Silverio Canchari, G. (2017). Espaciamiento óptimo de niveles y chimeneas en la explotación minera subterránea. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 19(37). <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i37.12965>

Piñas Esteban, Y. A. (2007). Aplicación del principio de la velocidad pico de partícula (PPV) para minimizar el daño al macizo rocoso, utilizando tecnología electrónica (Minera Aurífera Retamas S.A.- Yacimiento El Gigante – La Libertad). *Universidad Nacional de Ingeniería*. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/685>

Siskind, D. (2005). *Vibration From Blasting*. International Society of Explosives Engineers. <https://www.isee.org/store/product/56-vibrations-from-blasting>