



## ANALYSIS AND CALCULATION OF THE DENSITY OF THE HEAVY ANFO EXPLOSIVE IN SURFACE MINING USING THE PROGRAMMING LANGUAGE PYTHON

### ANÁLISIS Y CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL EXPLOSIVO HEAVY ANFO EN MINERÍA SUPERFICIAL EMPLEANDO EL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN PYTHON

Marcos Luis Quispe Perez<sup>1\*</sup>, Alexander Apaza Viza<sup>2</sup>, Fabiola Yaneth Acero Flores<sup>3</sup>, Marilyn Esthefany Cruz Alvares<sup>4</sup>, Erika Curo Zapana<sup>5</sup>, Rodolfo Vargas Rodriguez<sup>6</sup>, Darell Perci Pineda Centeno<sup>7</sup>,

#### ABSTRACT

This article presents an approach based on structured programming for the analysis and calculation of the density of the Heavy Anfo explosive in surface mining. The purpose of this work is to develop an interface that allows calculating the density of the heavy anfo explosive. From this analysis and calculation, important data is obtained to determine the costs and quality of the explosive.

This enables a more efficient design of drilling and blasting operations in less time, while reducing the risk of human error, which can arise due to the repetitive use of formulas to calculate the density of the explosive involved in the design of the Drilling and blasting in surface mining.

**KEYWORDS:** Drilling, density, blasting, mining, structured programming.

---

<sup>1\*</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [mquispep@unam.edu.pe](mailto:mquispep@unam.edu.pe), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8661-3806>

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [2018103004@unam.edu.pe](mailto:2018103004@unam.edu.pe), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0335-0758>

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [facero2002@gmail.com](mailto:facero2002@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3610-6610>

<sup>4</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [2019103029@unam.edu.pe](mailto:2019103029@unam.edu.pe), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7887-042X>

<sup>5</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [curozapana@gmail.com](mailto:curozapana@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9029-7320>

<sup>6</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [2019103046@unam.edu.pe](mailto:2019103046@unam.edu.pe), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4394-0494>

<sup>7</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [Terry200219@Outlook.com](mailto:Terry200219@Outlook.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9567-9042>

**\*Corresponding Author:** Marcos Luis Quispe Perez

<sup>\*</sup>Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, [mquispep@unam.edu.pe](mailto:mquispep@unam.edu.pe), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8661-3806>

**DOI:** 10.53555/ecb/2024.13.06.03

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería en Perú es una actividad económica crucial. Según el anuario minero 2020 del ministerio de energía y minas, el subsector minero peruano mantuvo una contribución sustancial en la estabilidad macroeconómica del país, significando una participación del 8.8% del PBI y representando el 61.9% de las exportaciones nacionales. En el 2022, Perú fue uno de los mayores productores de minerales en el mundo ostentando 7 de los más comercializados (cobre, oro, plata, zinc, plomo, estaño y molibdeno). En ese sentido, mantuvo su posición consolidándose como el segundo mayor productor de cobre y zinc a nivel mundial; y el primer país en la producción de zinc y estaño en Latinoamérica. Adicional a ello, posee las mayores reservas de plata en el mundo y se ubicó en tercer lugar en reservas de cobre y molibdeno.

En la actualidad, la optimización de las explotaciones mineras a cielo abierto es una herramienta fundamental para

las empresas explotadoras de recursos minerales. Esta optimización les permite aumentar la vida útil de sus proyectos mineros, explotar recursos minerales con menor tiempo, incrementar las reservas probadas del mineral de interés y obtener mayores utilidades, entre otros beneficios. Todo esto se logra a través de un cuidadoso planeamiento y diseño minero, ya que un yacimiento mineral es, en última instancia, un negocio.

Cabe mencionar que la operación de perforación y voladuras afecta directamente el costo de la operación y los costos operativos totales (*Optimization of Drilling and Blasting Operations in an Open Pit Mine—The SOMAIR Experience / Request PDF*, n.d.)

En el ámbito de la minería, la optimización se logra al evaluar y analizar cada una de las operaciones unitarias necesarias para extraer el recurso mineral de interés. Una de estas operaciones clave es la perforación y voladura, ampliamente utilizada debido a su capacidad para obtener grandes cantidades de material arrancado en un tiempo más reducido. Este enfoque puede aplicarse en rocas con diversas propiedades físicas y mecánicas, proporcionando una fragmentación adecuada del material. Esta fragmentación es esencial para la remoción y transporte eficientes del material volado.

El presente artículo se enfoca en el diseño y análisis de la operación de perforación y voladura en minería de superficie. Para lograr esto, se emplea la metodología de programación estructurada, la cual facilita el diseño y análisis de algoritmos secuenciales mediante el ingreso de datos (variables de entrada) y la realización de

cálculos específicos (procesamiento) para encontrar la densidad de un determinado heavy anfo.

El diseño de las voladuras implica llevar a cabo cálculos matemáticos y considerar diversas variables, lo que hace que sea una operación compleja. Por lo tanto, se ha ideado un algoritmo que permite calcular todas las densidades de los heavy anfo para el diseño óptimo de la voladura mediante la entrada de datos del nitrato de amonio, emulsión y diesel para el cálculo de la densidad del explosivo.

En el siguiente capítulo, se presentará el marco teórico de referencia, haciendo especial hincapié en la importancia de la operación de perforación y voladuras en la minería de superficie. Posteriormente, en los capítulos tres y cuatro, se expondrán las fases de la metodología y el análisis de los resultados, respectivamente. Finalmente, en el capítulo cinco, se presentarán las conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado.

## 2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

### 2.1. Perforación

La perforación es la primera operación en la preparación de una voladura. Su propósito es el de abrir en la roca huecos cilíndricos destinados a alojar al explosivo y sus accesorios iniciadores, denominados taladros, barrenos, hoyos o *blast holes*.

Se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, cuyos efectos de golpes y fricción producen el astillamiento y trituración de la roca en un área equivalente al diámetro de la roca y hasta una profundidad dada por la longitud del barreno utilizado. La eficiencia en perforación consiste en lograr la máxima penetración al menor costo. (EXSA Soluciones Exactas)

Los métodos de perforación más empleados son los métodos rotativos y roto percutivos. Siendo este último el sistema más clásico de perforación de barrenos. La perforación a rotopercusión se basa en la combinación de las siguientes acciones: percusión, rotación, empuje y barrido. (López Jimeno & Famesa, 2019)

En perforación, tienen gran importancia: la resistencia al corte o dureza de la roca (que influye en la facilidad y velocidad de penetración) y la abrasividad. Esta última influye en el desgaste de la broca y por ende en el diámetro final de los taladros cuando ésta se adelgaza. La resistencia de la roca determina el método o medio de perforación a emplear: rotación simple o rotopercusión. Por lo general cuanto más blanda sea la roca mayor debe ser la velocidad de

perforación. Por otro lado, cuanto más resistente sea a la compresión, mayor fuerza y torque serán necesarias para perforar. (Calderón Leyva, 2023)

## 2.2. Voladura

La voladura es uno de los medios principales de extracción de minerales en las operaciones de minería a cielo abierto. El propósito principal de la operación de voladura es la fragmentación de la roca y para esto se requiere de una gran cantidad de explosivos.

Los explosivos liberan una gran cantidad de energía durante la explosión, en donde, sólo el 20-30% es utilizada para la ruptura y el desplazamiento de las rocas, mientras que el resto de esta energía se desperdicia en forma de efectos secundarios ambientales. (Segundo Valdivia Quispe, 2018)

La voladura se puede definir como la ignición de una carga masiva de explosivos. El proceso de voladura comprende el cargue de los huecos hechos en la perforación. Con una sustancia explosiva, que al entrar en acción origina una onda de choque y, mediante una reacción, libera gases a una alta presión y temperatura de una forma substancialmente instantánea, para arrancar, fracturar o remover una cantidad de material según los parámetros del diseño de la voladura misma. (SOCIAL, s.f.)

## 2.3. La fragmentación de rocas

La fragmentación del macizo rocoso es causada inmediatamente después de la detonación. El efecto de impacto de la onda de choque y de los gases en rápida expansión sobre la pared del taladro, se transfiere a la roca circundante, difundiéndose a través de ella en forma de ondas o fuerzas de compresión, provocando solo deformación elástica, ya que las rocas son muy resistentes a la compresión. Al llegar estas ondas a la cara libre en el frente de voladura causan esfuerzos de tensión en la masa de roca, entre la cara libre del taladro. Si la resistencia a la tensión de la roca es excedida, esta se rompe en el área de la línea de menos resistencia (burden). En este caso las ondas reflejadas son ondas de tensión que retornan al punto de origen creando fisuras y grietas de tensión a partir de los puntos y planos de debilidad naturales existentes. (EXSA, s.f., pág. 17)

## 2.4. Explosivo

Son sustancias o compuestos químicos en estado sólido, líquido o gaseoso, que por medio de reacciones químicas de óxido-reducción, son capaces de transformarse en un tiempo muy breve, del orden de una fracción de milisegundo, en

grandes volúmenes de productos gaseosos y con la correspondiente liberación de energía. (EXSA, n.d.)

Los explosivos son mezclas en meta estable de oxidantes y combustibles. Se descomponen violentamente liberando gran cantidad de energía que se utiliza para romper la roca. La mayoría de los explosivos comerciales utilizan nitratos como oxidantes, siendo el nitrato de amonio el material básico de fabricación. (Colana Cuayla, 2020)

### 2.4.1. Emulsión.

Explosivo elaborado en base a una "emulsión agua en aceite". Se fabrica con una solución saturada de nitrato y una fase de aceite mineral. Está normalmente sensibilizada por burbujas de gas finamente dispersas (después de la adición de un agente gasificador en el collar del pozo de tronadura), o por adición de microesferas de vidrio (usualmente durante la fabricación de la emulsión). Antes de la adición de los sensibilizantes, las emulsiones son normalmente clasificadas como agentes oxidantes, e incapaces de detonar. Las emulsiones pueden ser balanceadas en oxígeno o pueden tener un balance de oxígeno positivo. (López Jimeno, 2019)

### 2.4.2. Anfo

El anfo a granel es un agente de tronadura que se mezcla y carga in-situ mediante camiones especialmente diseñados. para tronaduras de superficie, especialmente cuando se desea una moderada concentración de carga. Se recomienda utilizarlo en perforaciones mayores a 3" de diámetro, sin presencia de agua. Se entrega en forma mecanizada, directamente en las perforaciones de mediano o gran diámetro, mediante camiones fábrica vaciadores ("Auger" o "Quadra"), por lo que es recomendable cuando el volumen de consumo lo permite. (Valenzuela Aguilar, 2013)

### 2.4.3. Resistencia al agua

La resistencia al agua de los explosivos varía extensamente según su composición, y empaquetamiento. Los explosivos con nitrato de amonio/ petróleo (ANFO) tienen una resistencia al agua muy pobre, ya que el nitrato de amonio es soluble en agua. El efecto del agua en la performance del explosivo es para reducir la sensibilidad del explosivo, la eficiencia y la energía de reacción. Frecuentemente se utiliza agua en el pozo de tronadura por la generación de humo tóxico naranja o café. Finalmente, se puede reducir la sensibilidad al punto donde el producto no detonará. Los explosivos comunes no son a prueba de agua, tienen sólo calidades de resistencia

al agua. Esta resistencia al agua se rankea cualitativamente usando términos tales como malo, regular, bueno o excelente. Usualmente la resistencia al agua se clasifica para agua estática. Cuando el agua fluye por el pozo de tronadura (agua dinámica), se agrega resistencia encartuchando el explosivo. (Arroyo, 2022)

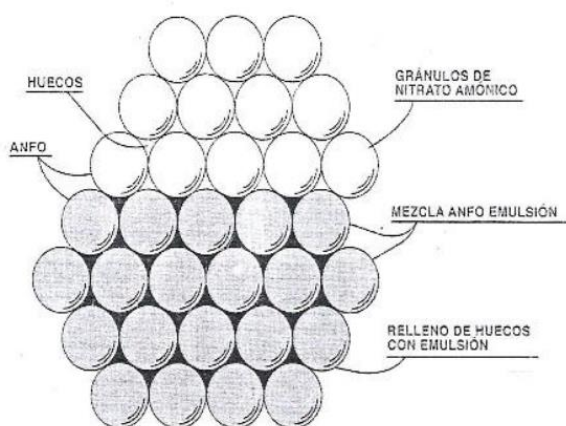
## 2.5. Heavy ANFO

En la tecnología actual de voladuras, es incuestionable que el anfo constituye el explosivo básico. Se han realizado diversos intentos para obtener una mayor energía de este explosivo, desde la trituration de los prills de nitrato amónico de alta

densidad hasta el empleo de combustibles líquidos de alta energía (como las nitroparafinas, el metanol y el nitropropano), aunque no han prosperado comercialmente.

En ANFO pesado o heavy ANFO, que es una mezcla de emulsión matriz con ANFO, resulta ser una alternativa de fácil uso y menor costo en el campo de los explosivos. (López Jimeno, 2019)

El ANFO presenta unos huecos intersticiales que pueden ser ocupados por un explosivo líquido como la emulsión, que actúa como una matriz energética.



**Figura 1:** Estructura del Heavy anfo pesado. (Manual de Perforación y Voladura FAMESA 2019)

Las propiedades del ANFO pesado varían según los porcentajes de la mezcla, aunque sus ventajas se mantienen:

- Cuenta con mayor energía, respecto a otros agentes explosivos.
- Tienen mejores características de sensibilidad.
- Presenta gran resistencia al agua.
- Permite efectuar cargas con variación de energía a lo largo del taladro.

La fabricación es relativamente fácil, pues la emulsión matriz puede ser preparada en una planta fija y transportada en un camión cisterna hasta un depósito de almacenamiento o ser bombeada a un camión mezclador. Con estos camiones pueden prepararse in situ las mezclas de emulsión con nitrato amónico y gasoil, en las proporciones adecuadas a las condiciones de trabajo. (Manual de perforación y voladura FAMESA, 2019, pág. 160) Anfos pesados vaciables de la serie BLENDDEX, es una mezcla de Emulsión y Anfo, que reúne las principales propiedades de ambos componentes: alta energía, buena generación de gases, alta densidad y, en algunos casos,

resistencia al agua. Son productos apropiados para tronaduras de superficie, especialmente cuando es factible el uso de sistemas mecanizados de carga, en perforaciones secas o con agua, si ésta se extrae previamente.

BLENDDEX® S Anfo Pesado vaciable sensibilizado. Es un agente de tronadura a granel para perforaciones de diámetros sobre 5½ pulgadas, fabricado en base a una mezcla anfo / emulsión, sensibilizada el momento del mezclado y carguío en las perforaciones. Se carga en forma mecanizada con equipos mezcladores móviles (camión fábrica tipo Auger o Quadra), cuando el volumen de consumo así lo justifica.

Las densidades de los Anfos Pesados vaciables pueden variar hasta en un 3 % debido a las propiedades de los granulos del nitrato de amonio y a la diferente compactación que sufren por efecto de la presión hidrostática de la columna de explosivo y del taco, al encontrarse cargados en la perforación. (Manual de tronadura ENAEX S.A., pág. 31)

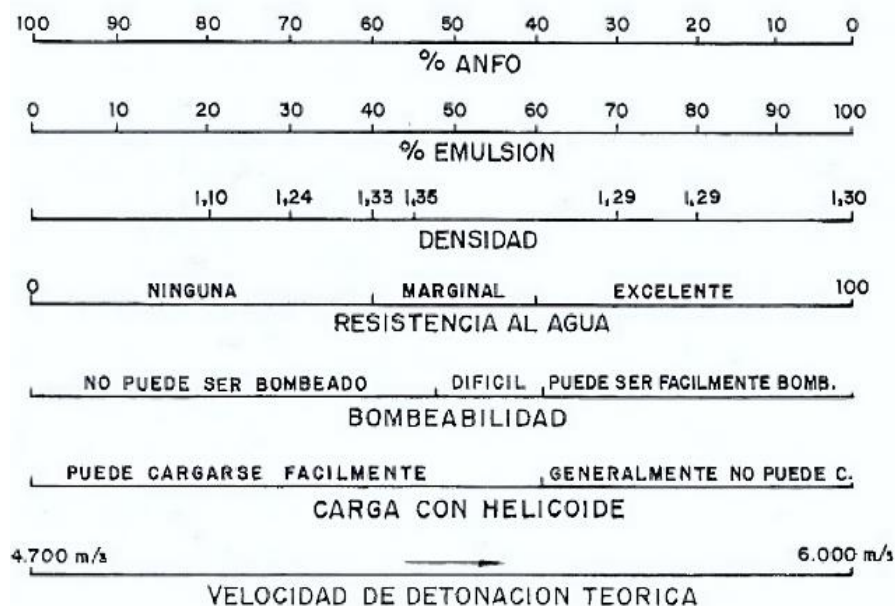


Figura 2: Características de carga y resistencia al agua de diferentes tipos de ANFO pesado (Du Pont,1986)

Explosivo	Densidad(g/cm <sup>3</sup> )	VOD(m/s)	Diámetro crítico(pulgadas)
ANFO	0.81 ± 0.01	3800-4300	1.5
HA 37	1.03 ± 0.01	4800-5000	4
HA 46	1.19 ± 0.01	5000-5300	4
HA 55	1.29 ± 0.01	5200-5400	4
HA 64	1.33 ± 0.01	4500-4800	5
Emulsión	1.10 ± 0.01	5200-5400	2

Figura 3: Rangos de densidad y VOD

ANFO PESADO 37 (30% de emulsión y 70% de ANFO), este es un buen explosivo para utilizarlo en roca de dureza media a dura, 100 a 150 Mpa tiene muy buena VOD, la restricción para este producto es la presencia de Agua, porque esta mezcla no es resistente al agua.

ANFO PESADO 55 (50% de emulsión y 50% de ANFO), esta es una mezcla que tiene una pequeña resistencia al agua, este explosivo permite un mayor error en la mezcla del ANFO para que la reacción resultante con un balance de oxígeno positivo, sin embargo, es un explosivo de menor Velocidad de Detonación y es un explosivo más caro por tener una mayor proporción de emulsión, mayor densidad(1.28gr/cc)

ANFO Pesado 64 (60% de emulsión y 40% de ANFO). Esta mezcla muy cara tiene una alta densidad 1.31gr/cc, su característica principal es su resistencia al agua hasta 72 horas, razón por la cual tiene gran utilización en minería tajo abierto. Las evidencias son muy claras cuando ocurre un balance positivo de oxígeno, se generan óxidos

nitrosos, y son de un color naranja oscuro. (Fredy Bertier Cruzado Mendoza, 2017)

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la descripción de los parámetros para el cálculo de densidad de explosivo del explosivo Heavy Anfo, así como las fórmulas necesarias para su obtención.

#### 3.1. Parámetros para hallar la densidad del explosivo

##### 3.1.1. Densidad de Nitrato de Amonio

Es la materia prima principal para la fabricación de explosivos industriales del tipo ANFO. Favorece la combustión de materiales orgánicos aún en ausencia de oxígeno. Se descompone a altas temperaturas y bajo un impacto violento en extremo. Actúa como agente oxidante en muchas reacciones a temperatura ambiente. No obstante, lo anterior, es considerada una sal estable en el sentido que es una sal de amonio procedente de un ácido fuerte que no tiende a perder amoniaco durante su almacenamiento. (EXSA S.A.2009)

### 3.1.2. Densidad de Diesel

Las densidades típicas de varias sustancias se encuentran a presión atmosférica. La densidad se define como la masa por unidad de volumen. Es una propiedad intensiva, que se define matemáticamente como masa dividida por volumen:  $\rho = m / V$ .

En palabras, la densidad ( $\rho$ ) de una sustancia es la masa total ( $m$ ) de esa sustancia dividida por el volumen total ( $V$ ) ocupado por esa sustancia. La unidad estándar del SI es kilogramos por metro cúbico ( $kg / m^3$ ). La unidad de inglés estándar es libras de masa por pie cúbico ( $lbm / ft^3$ ). La densidad del Diésel es de  $850 kg / m^3$ .

### 3.1.3. Densidad del Explosivo

Es una de sus propiedades más importantes. La densidad determina la sensibilidad, la velocidad de detonación, y el diámetro crítico de la carga. La densidad, algunas veces denominada gravedad específica, se define como el peso por unidad de volumen y normalmente se expresa en términos de gramos por centímetro cúbico ( $g/cc$ ). La densidad de la mayoría de los explosivos comerciales varía en un rango que va de un mínimo aprox. de  $0.8 g/cc$ , a un máximo de  $1.6 g/cc$ .

PRODUCTO	DENSIDAD gr/cm <sup>3</sup>	DENSIDAD LINEAL Kg/m					
	prom	7 7/8	9	9 7/8	10 5/8	11	12 1/4
Anfo	0.80	25.2	32.9	39.6	45.8	49.1	60.9
HA-28	0.97	30.5	39.8	48.0	55.5	59.5	73.8
HA-37	1.07	33.6	43.9	52.9	61.2	65.6	81.4
HA-46	1.19	37.4	48.9	58.8	68.1	73.0	90.5
HA-55	1.28	40.2	52.6	63.3	73.3	78.5	97.4
HA-64	1.31	41.2	53.8	64.8	75.0	80.4	99.7
HA-73	1.32	41.5	54.2	65.3	75.6	81.0	100.4
Emulsión	1.34	42.1	55.0	66.3	76.7	82.2	101.9

Figura 4: Valores de densidad de HA teniendo  $0.8 g/cc$  de densidad de ANFO y  $1.34 g/cc$  de densidad de emulsión.

### 3.1.4. Información inicial

Los datos iniciales que son necesarios para el cálculo son la densidad del Nitrato de amonio ( $\rho_{ANFO}$ ), densidad de diesel ( $\rho_{diesel}$ ) y la densidad de la emulsión ( $\rho_{emulsión}$ ).

### 3.2. Algoritmo

El objetivo de esta etapa es exhibir el algoritmo utilizado para realizar los cálculos de las densidades del explosivo Heavy ANFO de acuerdo a la cantidad de emulsión y ANFO en su mezcla. Con este fin, se han definido tres fórmulas dentro de un módulo, como se puede apreciar en la tabla x. Estas funciones permiten calcular los valores de los siguientes parámetros: Masa de emulsión ( $m_{emulsión}$ ), Masa de ANFO ( $m_{ANFO}$ ), Masa del

explosivo ( $m_{explosivo}$ ) y Densidad del explosivo ( $\rho_{explosivo}$ )

Módulo: Fórmulas para el cálculo de densidad de Heavy ANFO

$$m_{emulsión} = \frac{\%Emulsión}{100} \times 1000cm^3 \times \rho_{emulsión}$$

$$m_{ANFO} = \frac{\%ANFO}{100} \times 1000cm^3 \times \rho_{ANFO}$$

$$m_{explosivo} = m_{emulsión} + m_{ANFO}$$

$$\rho_{explosivo} = \frac{m_{explosivo}}{1000cm^3} \times k_s$$

Figura 5: Módulo de fórmulas para cálculo de densidad

### 3.2.1. Factor de corrección

En el diseño de este algoritmo, se ha empleado un gráfico donde tenemos los valores de  $k_s$  como factor de corrección para cada Heavy ANFO. Se presentan los valores que toma la constante  $k_s$  de acuerdo a la cantidad de emulsión que se utilice en la mezcla del Heavy ANFO. Estos valores servirán para reemplazarlos en las fórmulas para el cálculo de la densidad del explosivo.

Respecto al factor de corrección, este se aplica debido a la composición específica de la mezcla. Este factor de corrección se determina experimentalmente y varía entre diferentes fabricantes y composiciones específicas de Heavy ANFO.

Cuando la matriz de emulsión aumenta por encima del 50%, la potencia disminuye, ello se debe a que la separación de las partículas de anfo resultan demasiado elevadas para que estas actúen eficientemente como puntos calientes y propagadores de la onda de choque.

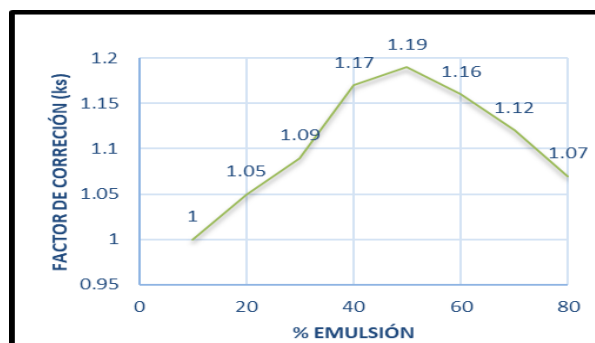


Gráfico 1: Valores de  $k_s$  según el porcentaje de emulsión en la mezcla de Heavy ANFO

Fuente: Elaboración propia.

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se muestra a continuación una tabla de comparación para evaluar y valorar los resultados obtenidos después de diseñar este algoritmo. La

tabla compara el cálculo tradicional de densidad y otro usando el algoritmo desarrollado en este artículo. Además, se presenta un ejemplo en el que

se utiliza el algoritmo para calcular la tabla de densidades.

---

#### MÉTODO TRADICIONAL

---

Se deben realizar operaciones matemáticas, que se vuelven tediosas y algunas veces complejas.

Dificultad en la obtención de resultados, influyendo negativamente en la interpretación de la información

Optimización mínima en la metodología aplicada para el cálculo de los diferentes parámetros ya que requiere más tiempo para este cálculo.

Se requiere una gran cantidad de inversión de capital humano, lo que aumenta los costos.

---

**Tabla 1:** Resultados con el método tradicional

---

#### USO DEL ALGORITMO

---

Facilita el cálculo de los diferentes parámetros de forma rápida.

Mínimo posibilidad de error.

Las fórmulas que están presentes en el algoritmo las tiene implícitas en su diseño.

Información organizada y estructurada lo que ahorra tiempo y costos.

Optimización en la metodología aplicada para el cálculo de los diferentes parámetros.

---

**Tabla 2:** Resultados con el uso del Algoritmo.

Para comprobar los resultados se realizó una prueba para con los valores siguientes: Nitrato de

amonio (0.75 g/cm<sup>3</sup>), Diesel(0.85 g/cm<sup>3</sup>) y emulsión 1.33 g/cm<sup>3</sup>.

#### CÁLCULO DE DENSIDAD DE EXLPOSIVO HEAVY ANFO

Datos:

Ingrese la densidad del Nitrato de Amonio (g/cm<sup>3</sup>): 0.75

Ingrese la densidad del diesel (g/cm<sup>3</sup>): 0.85

Ingrese la densidad de la emulsión (g/cm<sup>3</sup>): 1.33

**Figura 6:** Datos de las variables

El programa solo está diseñado para arrojar los resultados, por ello la interpretación depende del profesional a cargo. Este algoritmo difiere del método tradicional al ofrecer el cálculo de densidad de manera más rápida, casi instantánea, ya que no

es necesario tener conocimiento de las fórmulas para calcular los diferentes parámetros, ya que el algoritmo los tiene incorporados en su diseño. Además, al utilizar el algoritmo se evita cometer errores humanos que se producen al utilizar repetidamente las fórmulas.

#### 4.1. Algoritmo creado en Python para el cálculo.

```
import pandas as pd
print("CÁLCULO DE DENSIDAD DE EXPLOSIVO HEAVY ANFO\n")
print("Datos:\n")
d_NA = float(input("Ingrese la densidad del Nitrato de Amonio (g/cm3): "))
d_diesel = float(input("Ingrese la densidad del diesel (g/cm3): "))
d_ANFO = d_NA*0.945 + d_diesel*0.055
d_emul = float(input("Ingrese la densidad de la emulsión (g/cm3): "))
```

```

"HA_19"
masa_emul19 = 0.1*1000*d_emul
masa_ANFO19 = 0.9*1000*d_ANFO
masa_expl19 = masa_emul19 + masa_ANFO19
HA19 = round(1 * masa_expl19/1000,4)

"HA_28"
masa_emul28 = 0.2*1000*d_emul
masa_ANFO28 = 0.8*1000*d_ANFO
masa_expl28 = masa_emul28 + masa_ANFO28
HA28 = round(1.05 * masa_expl28/1000,4)

"HA_37"
masa_emul37 = 0.3*1000*d_emul
masa_ANFO37 = 0.7*1000*d_ANFO
masa_expl37 = masa_emul37 + masa_ANFO37
HA37 = round(1.09 * masa_expl37/1000,4)

"HA_46"
masa_emul46 = 0.4*1000*d_emul
masa_ANFO46 = 0.6*1000*d_ANFO
masa_expl46 = masa_emul46 + masa_ANFO46
HA46 = round(1.17 * masa_expl46/1000,4)

"HA_55"
masa_emul55 = 0.5*1000*d_emul
masa_ANFO55 = 0.5*1000*d_ANFO
masa_expl55 = masa_emul55 + masa_ANFO55
HA55 = round(1.19 * masa_expl55/1000,4)

"HA_64"
masa_emul64 = 0.6*1000*d_emul
masa_ANFO64 = 0.4*1000*d_ANFO
masa_expl64 = masa_emul64 + masa_ANFO64
HA64 = round(1.16 * masa_expl64/1000,4)

"HA_73"
masa_emul73 = 0.7*1000*d_emul
masa_ANFO73 = 0.3*1000*d_ANFO
masa_expl73 = masa_emul73 + masa_ANFO73
HA73 = round(1.12 * masa_expl73/1000,4)

"HA_82"
masa_emul82 = 0.8*1000*d_emul
masa_ANFO82 = 0.2*1000*d_ANFO
masa_expl82 = masa_emul82 + masa_ANFO82
HA82 = round(1.07 * masa_expl82/1000,4)
print("\nRESULTADOS\n")dic =
{"EXPLOSIVO":["HA19","HA28","HA37","HA
46","HA55","HA73","HA82"],"DENSIDAD":[H
A19,HA28,HA37,HA46,HA55,HA73,HA82]}
dfdic = pd.DataFrame(dic)
dfdic

```

La función print() en Python es una función incorporada que se utiliza para mostrar mensajes en la pantalla. Es muy útil cuando se desea mostrar el resultado de una operación o simplemente para imprimir un mensaje para el usuario.

La sintaxis básica de la función print() es la siguiente: print(valor1, valor2, valor3, ..., sep=' ', end='\n') (python documentation, 2022)

El tipo de dato float en Python se utiliza para representar números de punto flotante, es decir, números decimales o números con parte fraccionaria. Los números de punto flotante son utilizados cuando se necesita mayor precisión en las operaciones matemáticas que los números enteros no pueden proporcionar. como es el caso de las densidades que se necesita esa precisión. (Python documentation, 2022, pág. 12)

En Python, la función round() se utiliza para redondear un número flotante al número entero más cercano. También puede especificarse el número de dígitos decimales a los que se debe redondear. (Python documentation, 2022)

#### RESULTADOS

	EXPLOSIVO	DENSIDAD
0	HA19	0.8129
1	HA28	0.9139
2	HA37	1.0114
3	HA46	1.1528
4	HA55	1.2409
5	HA73	1.2966
6	HA82	1.3002

**Tabla 3:** Resultado obtenido del Algoritmo creado en Python para el cálculo de densidades. Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

Si solo se necesita calcular las densidades utilizando fórmulas empíricas para las densidades del heavy Anfo, es válido utilizar el algoritmo presentado en este trabajo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el programa solo proporciona los resultados y su correcta interpretación depende de la preparación y habilidades de la persona a cargo.

Este algoritmo tiene una ventaja respecto al método tradicional o manual, ya que permite calcular las densidades de forma instantánea, ya que no hace falta conocer las fórmulas para calcular, porque el algoritmo ya las tiene incluidas en su diseño.

El algoritmo presentado en este artículo ofrece una gran ventaja al proporcionar una manera rápida y



sencilla de obtener las diferentes variables necesarias para perforar y hacer voladuras. Solo es necesario ingresar los datos en la interfaz para conocer el valor de las densidades de distintos Heavy anfo. Esta ventaja del algoritmo se traduce en ahorro de tiempo, lo que significa una reducción de costos para la industria minera.

Al utilizar un algoritmo, se pueden evitar errores humanos y reducir la necesidad de realizar cálculos manuales, lo que a su vez disminuye el riesgo de cometer errores que podrían resultar en accidentes o daños en la obra. Además, se optimiza el uso de recursos como el tiempo y los materiales al planificar de forma más precisa los pasos a seguir. El uso de un algoritmo también permite analizar diferentes escenarios y realizar modificaciones o ajustes para obtener los mejores resultados posibles. Esto es especialmente importante en situaciones donde se requiere lograr una voladura controlada o cuando se trabaja en zonas sensibles donde se deben minimizar los impactos ambientales.

## REFERENCIAS

1. Arroyo, M. (26 de Enero de 2022). *¿Por qué los explosivos utilizados en minería deben tener la sensibilidad correcta?* Recuperado el 22 de Agosto de 2023, de Instituto de Ingenieros de Minas del Perú: <https://iimp.org.pe/institucional/noticias/porque-los-explosivos-utilizados-en-mineria-deben-tener-la-sensibilidad-correcta>
2. Builes. (2012). *Análisis Y Diseño de la Operación de Perforación y Voladuras en Minería de Superficie Empleando El Enfoque de la Programación Estructurada*. *Boletín Ciencias de la Tierra*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/41135/30381-189766-1-PB.html?sequence=1&isAllowed=y>
3. Calderón Leyva, J. I. (16 de Junio de 2023). *Evaluación Técnica y Económica de la Perforación Y Voladura para la Mejora en el Avance Mediante Taladros de 20 pies en Labores Horizontales, Mina Raúl - Cia. Minera Condestable*. Recuperado el 12 de Agosto de 2023, de [https://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4071/T033\\_46889439\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4071/T033_46889439_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
4. Colana Cuayla, J. E. (Noviembre de 2020). *Efectos del Diseño de Malla de Perforación y Voladura en la Reducción de Costos de Operación en el Proyecto de Explotación El Nuevo Sureño*. Moquegua, Perú. Obtenido de <https://repositorio.unam.edu.pe/server/api/core/bitstreams/92eb2033-31dd-470b-b9a1-3d3c92b2de81/content>
5. Dirección de Promoción Minera. (Mayo de 2020). *Anuario Minero 2020*, Ministerio de Energía y Minas. *Ira*. Lima, Perú. Obtenido de <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2020/AM2020.pdf>
6. EXSA. (s.f.). *MANUAL PRÁCTICO DE EXSA*. Obtenido de <https://www.udocz.com/apuntes/86082/manual-practico-de-voladura-exsa>
7. EXSA. (s.f.). *Manual Práctico de Voladura Especial*.
8. EXSA Soluciones Exactas. (s.f.). *Manual Práctico de Voladura. 5ta*. Obtenido de <https://online.fliphtml5.com/hqjn/rypz/#p=2>
9. Fredy Bertier Cruzado Mendoza. (2017). Obtenido de *Análisis de la máxima carga operante en las vibraciones en campo lejano generadas por voladura, en cerro negro S.A., Cajamarca-2017*: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10905/Cruzado%20Mendoza%2C%20Fredy%20Bertier%20-%20Diaz%20Choroco%2C%20Kevin%20Alexander.pdf>
10. López Jimeno, C. (Setiembre de 2019). *Manual de Perforación y Voladura*. Lima, Surquillo, Perú: Famesa Explosivos S.A.C.
11. *Manual de perforación y voladura FAMESA*. (2019). Santiago de surco Lima.
12. *Manual de tronadura ENAEX S.A.* (s.f.).
13. *Optimization of drilling and blasting operations in an open pit mine—the SOMAIR experience | Request PDF*. (s.f.). Recuperado el 24 de Agosto de 2023, de ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/240449735\\_Optimization\\_of\\_drilling\\_and\\_blasting\\_operations\\_in\\_an\\_open\\_pit\\_mine-the\\_SOMAIR\\_experience](https://www.researchgate.net/publication/240449735_Optimization_of_drilling_and_blasting_operations_in_an_open_pit_mine-the_SOMAIR_experience)
14. python documentation. (Enero de 2022). Obtenido de Built-in Functions - print(): <https://docs.python.org/3/library/functions.html#print>
15. Python documentation. (Enero de 2022). Obtenido de <https://docs.python.org/3/library/stdtypes.html#numeric-types-int-float-complex>
16. Python documentation. (Enero de 2022). Obtenido de Built-in Functions - round(): <https://docs.python.org/3/library/functions.html#round>
17. Segundo Valdivia Quispe, M. E. (2018). *Influencia de la aplicación de detritus en la carga por taladro en los costos de voladura*

*del tajo tapado oeste la quinua, yanacocha s.r.l. cajamarca, 2018. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/14184/Valdivia%20Quispe%20Segundo%20-%20Ramos%20Ch%C3%A1vez%20Mercedes%20Elizabeth.pdf?sequence=1&isAllowed=y>*

18. SOCIAL, M. D. (s.f.). *Guía Adquisición de Explosivos y Accesorios de Voladura*. Obtenido de <https://www.indumil.gov.co/wp-content/uploads/2016/02/GuiaExplosivos.pdf>
19. Valenzuela Aguilar, C. A. (2013). *Diseño de Perforación y Voladura con 11” de Diámetro con Doble Taco en Mineral de Hierro para Optimizar la Fragmentación a P80 - E.E. San Martín C.G.S.A. Mina 16 y 18 – Shougang*. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA: <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/89b728a4-4a23-42ce-ae23-6ccc0a54d65e/content>