

Esponjamiento y su predicción
**basada en la granulometría
de los materiales
fragmentados.**



Exploración de la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de las rocas

Exploration of the Relationship Between Fragmentation Degree and Rock Swelling

RESUMEN

El presente estudio investiga la relación entre la fragmentación de la roca y el esponjamiento, un fenómeno crítico en la minería y la construcción que afecta la eficiencia y los costos de las operaciones. Se evaluaron dos tipos de roca local (arenisca y diorita) mediante pruebas de fragmentación controladas en laboratorio. Las muestras fragmentadas fueron clasificadas granulométricamente y se calcularon sus densidades aparentes. Los resultados indican que el esponjamiento no varía significativamente con fragmentos gruesos, pero se incrementa en fragmentos finos, alcanzando un pico en granulometrías muy pequeñas antes de disminuir notablemente. Además, se observó que la forma y la distribución de los fragmentos influyen en el esponjamiento. Este estudio contribuye al entendimiento del esponjamiento y su predicción basada en la granulometría de los materiales fragmentados.

ABSTRACT

This study investigates the relationship between rock fragmentation and swell, a critical phenomenon in mining and construction that impacts efficiency and operational costs. Two types of local rock (sandstone and diorite) were evaluated through controlled fragmentation tests in the laboratory. The fragmented samples were granulometrically classified, and their bulk densities calculated. Results indicate that swell does not vary significantly with coarse fragments but increases with finer fragments, peaking at very fine granulometries before decreasing notably. Additionally, the shape and distribution of fragments influence swell. This study contributes to the understanding of swell and its prediction based on the granulometry of fragmented materials.



Palabras Claves

Fragmentación de roca, esponjamiento, granulometría, densidad aparente, mecánica de rocas, voladura y movimiento de tierras.

Key words

Rock fragmentation, swell, granulometry, bulk density, rock mechanics, blasting, earthworks / excavation.

INTRODUCCIÓN

En minería y construcción, la fragmentación de la roca es un proceso clave que impacta la eficiencia y los costos operativos. Además, la fragmentación influye directamente en el esponjamiento de la roca, que se refiere al aumento de volumen del material tras ser triturado. Este fenómeno es crucial para el diseño de voladuras y la planificación de proyectos de movimiento de tierra, ya que afecta la capacidad de transporte y almacenamiento del material.

A pesar de la importancia del esponjamiento, la relación cuantitativa entre la fragmentación de la roca y el aumento de volumen no está completamente comprendida. Esta investigación se enfoca en determinar cómo varía el esponjamiento con distintos tamaños de fragmentos y en qué medida es posible predecirlo a partir de la granulometría del material fragmentado.

Objetivos del estudio:

- Evaluar la relación entre el tamaño de los fragmentos de roca y el esponjamiento.
- Evaluar el esponjamiento en rocas arenisca y diorita.

Tamaño de fragmento (m)	Pasante %
x	P
0	0.00%
0.05	0.47%
0.1	2.30%
0.15	5.78%
0.2	10.96%
0.25	17.69%
0.3	25.70%
0.35	34.60%
0.4	43.94%
0.45	53.26%
0.5	62.13%
0.55	70.21%
0.6	77.28%
0.65	83.20%
0.7	87.98%
0.75	91.67%
0.8	94.42%
0.85	96.39%
0.9	97.75%
0.95	98.64%
1	99.21%

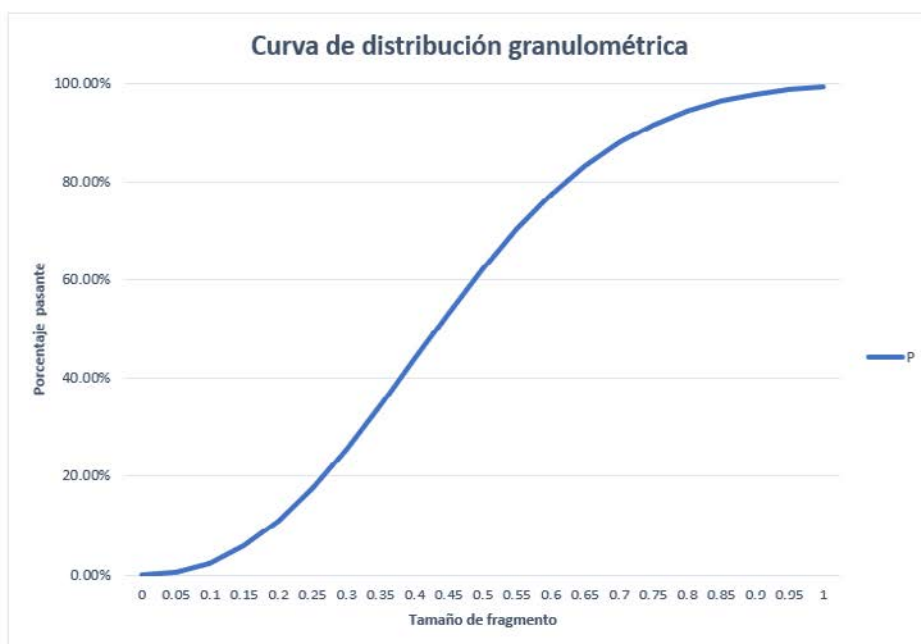


Figura 1. Curva de distribución granulométrica

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al esponjamiento Tiktin [5] escribe en su libro lo siguiente (pp. 19-21):

Los terrenos, tanto de suelo como de roca, están compuestos por una mezcla de partículas de diferentes tamaños. Entre estas partículas existen espacios vacíos que son llenados por aire y agua. Al aplicar una fuerza mecánica y reordenar las partículas, el volumen de estos espacios vacíos cambia. Por lo tanto, el volumen de una muestra de material no es constante, sino que depende de las acciones mecánicas a las que se someta. El volumen que

FUNDAMENTOS

La fragmentación se refiere al proceso de romper el macizo rocoso in situ en fragmentos más pequeños durante las operaciones de excavación o manipulación de materiales. Según Nanda y Naik [4], la distribución del tamaño de los fragmentos y el grado de fragmentación dentro de la masa de roca volada o fragmentada son aspectos cruciales para optimizar la eficiencia en las operaciones de carga, transporte, trituración y molienda.

La fragmentación de la roca en minería e industria se realiza principalmente mediante procesos mecánicos, perforación y voladura. Su predicción y control son esenciales para optimizar las operaciones. Faramarzi, Farsangi y Mansouri [2] señalan que la fragmentación de rocas ha sido el foco de múltiples investigaciones, ya que se considera el aspecto más importante de la producción, afectando los costos de perforación, voladura y la eficiencia de todos los subsistemas, como la carga, el transporte y otras operaciones mineras.

Sanchidrián (citado por Munene *et al.* [3]) señala que los procesos de fragmentación mencionados no generan fragmentos de tamaño homogéneo o uniforme, sino una distribución de fragmentos de diferentes tamaños (ver figura 1).

ocupa en una situación particular se denomina volumen aparente.

Por este motivo, también se habla de densidad aparente, que es la relación entre la masa de una porción de terreno y su volumen aparente.

$$d_a = \frac{M}{V_a}$$

Donde:

d_a : densidad aparente

V_a : volumen aparente

M : masa de las partículas más masa de agua

Al remover el material, se genera un aumento de volumen que debe considerarse al calcular la producción y dimensionar adecuadamente los medios de transporte necesarios. Según lo expuesto, el factor de esponjamiento (*Swell Factor*) se define como la relación entre el volumen del material antes y después de la excavación.

$$F_W = \frac{V_B}{V_S} = \frac{d_S}{d_B}$$

Donde:

F_W : factor de esponjamiento (*swell*)

V_B : volumen que ocupa el material en banco o *in situ*

V_S : volumen que ocupa el material suelto

d_B : densidad en banco o *in situ*

d_S : densidad del material suelto

Otra relación relevante es el porcentaje de esponjamiento, que se refiere al incremento de volumen que experimenta el material en comparación con el que tenía en el banco o *in situ*, es decir, la proporción del aumento en el volumen tras la excavación o manipulación del material:

$$S_W = \frac{V_S - V_B}{V_B} \times 100$$

Donde:

S_W : % de esponjamiento

O en función de las densidades:

$$S_W = \frac{d_B - d_S}{d_S} \times 100$$

En un estudio, Choudhary [1] menciona que el porcentaje de esponjamiento depende del grado de fragmentación. A medida que el grado de fragmentación aumenta, el porcentaje de esponjamiento también incrementa, aunque está limitado por un valor máximo determinado por las características del mineral.

Según lo expuesto, esta investigación tiene como objetivo establecer la relación entre el esponjamiento y el grado de fragmentación, partiendo de la premisa de que, a mayor grado de fragmentación, mayor será el esponjamiento. El proyecto se llevará a cabo con dos tipos de rocas locales, en un laboratorio metalúrgico, utilizando fragmentación controlada y pequeñas cantidades de material de roca. No obstante, es importante considerar las limitaciones del estudio, tales como las siguientes:

- Se utilizaron principalmente dos tipos de roca locales: arenisca y diorita.
- Los ensayos se realizaron con muestras húmedas, lo que influye en la densidad aparente de las rocas. Es importante considerar que la humedad varía en cada muestra debido a la porosidad de las rocas.
- Los resultados obtenidos son representativos únicamente de los tipos de roca estudiados y no pueden extrapolarse a otros tipos de roca.

METODOLOGÍA

El proyecto consideró dos tipos de roca locales (arenisca y diorita), las cuales fueron ensayadas previamente, utilizando como dato inicial las densidades de las muestras sin fragmentar. Para determinar la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento, las muestras fueron fragmentadas con un chancador primario (chancador de quijada), obteniendo fragmentos menores a 1/2" (ver figura 2). Posteriormente, el material chancado pasó por un proceso de clasificación granulométrica utilizando un tamizador Tyler (ver figura 3) con mallas gruesas y finas, para obtener una gama amplia de fragmentos (ver figuras 4 y 5).



Figura 2. Chancador primario de quijadas

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Tamizador Tyler

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Set de mallas para clasificación de granulometrías gruesas

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Set de mallas para clasificación de granulometrías finas

Fuente: Elaboración propia.

Después de la clasificación granulométrica, se calculó la densidad de cada granulometría mediante el método de la probeta. Se pesó cada muestra y se midió su volumen en una probeta tres veces, promediando los resultados para obtener la densidad aparente (ver figura 6). Dado que se trabajó con pequeñas cantidades de material, las densidades de las granulometrías gruesas se calcularon con muestras de aproximadamente 600 g, mientras que para las granulometrías finas se utilizaron muestras de 150 g por granulometría.



Figura 6. Herramientas de medición

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis estadístico se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para conocer el nivel de relación entre las variables: grado de fragmentación y esponjamiento de la roca.

Como proceso adicional, se graficaron las curvas granulométricas de las muestras de roca, añadiendo una tercera muestra de granodiorita para ampliar la comparación. Esto permitió comparar las densidades aparentes de los tres tipos de roca (arenisca, diorita y granodiorita) en función de su distribución granulométrica después del chancado.

RESULTADOS

Como primer resultado, se observa que la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento en granulometrías gruesas no es muy significativa (ver tablas 1 y 2). Sin embargo, se aprecia un ligero aumento del esponjamiento en granulometrías finas en comparación con las gruesas. No obstante, en la fragmentación más fina, con una granulometría menor a la malla n.º 50, se destaca una notable reducción del esponjamiento (ver figuras 7 y 8).

Tabla 1
Esponjamiento según malla (tamaño de fragmentos) de la muestra de roca arenisca

ARENISCA			
	Malla	mm	Esponjamiento %
GRUESO	5/8"	16	94,5
	1/2"	12,5	93,9
	3/8"	9,5	96,7
	5/16"	8	95,2
	1/4"	6,3	94,8
	n.º 4	4,75	95,6
FINO	n.º 6	3,35	98,5
	n.º 8	2,36	102,7
	n.º 10	2	99,6
	n.º 14	1,4	101,9
	n.º 20	0,85	101,9
	n.º 30	0,6	102,2
	n.º 50	0,3	96,8
	-n.º 50	-0,3	81,6

Fuente: Elaboración propia.

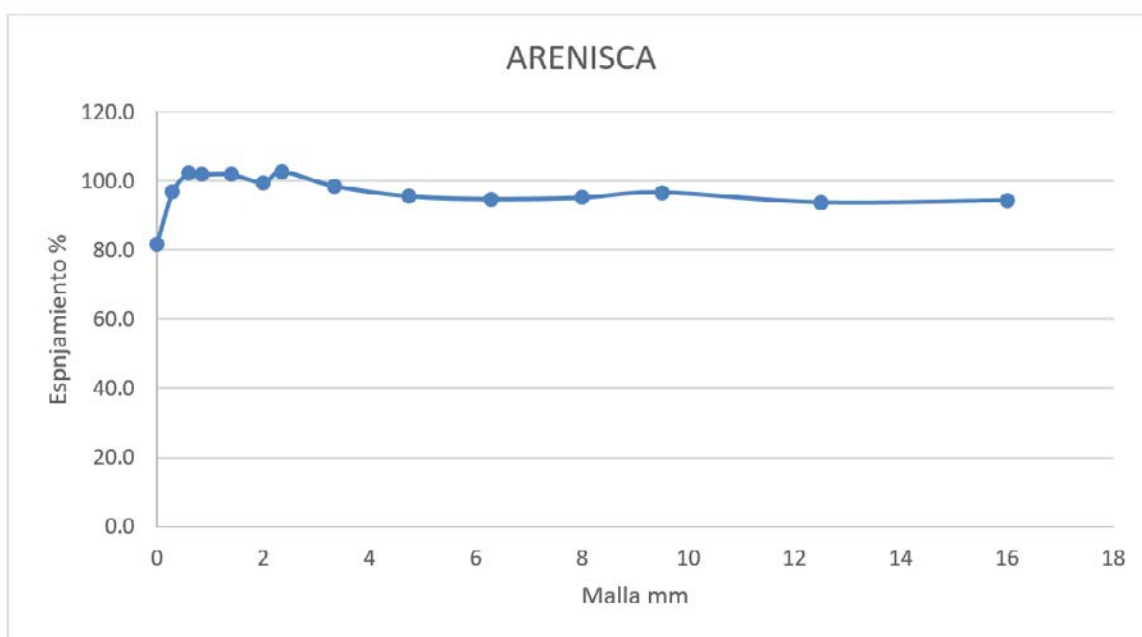


Figura 7. Relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de la roca arenisca

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Espanjamiento según malla (tamaño de fragmentos) de la muestra de roca diorita

DIORITA			
	Malla	mm	Espanjamiento %
GRUESO	5/8"	16	92,4
	1/2"	12,5	94,0
	3/8"	9,5	96,6
	5/16"	8	89,3
	1/4"	6,3	90,8
	n.º 4	4,75	94,6
FINO	n.º 6	3,35	93,8
	n.º 8	2,36	101,1
	n.º 10	2	103,6
	n.º 14	1,4	108,8
	n.º 20	0,85	102,6
	n.º 30	0,6	101,1
	n.º 50	0,3	102,1
	-n.º 50	-0,3	82,0

Fuente: Elaboración propia.

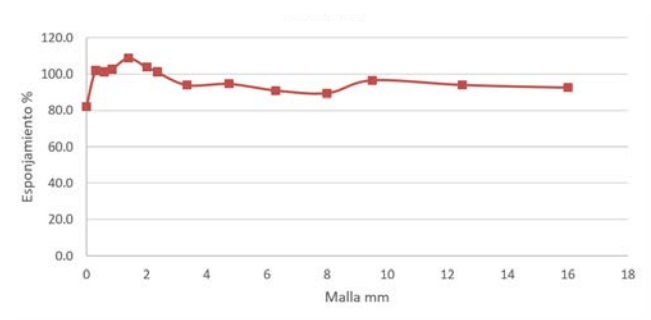


Figura 8. Relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de la roca diorita

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Correlación entre grado de fragmentación y esponjamiento en las rocas diorita y arenisca

DIORITA		ARENISCA	
Malla (mm)	Espanjamiento %	Malla (mm)	Espanjamiento %
16,0	92,4	16,0	94,5
12,5	94,0	12,5	93,9
9,5	96,6	9,5	96,7
8,0	89,3	8,0	95,2
6,3	90,8	6,3	94,8
4,8	94,6	4,8	95,6
3,4	93,8	3,4	98,5
2,4	101,1	2,4	102,7
2,0	103,6	2,0	99,6
1,4	108,8	1,4	101,9
0,9	102,6	0,9	101,9
0,6	101,1	0,6	102,2
0,3	102,1	0,3	96,8
Menor a 0,3	82,0	Menor a 0,3	81,6
Coef. Pearson (r)	-0,3600	Coef. Pearson (r)	-0,1964
Determinación (r^2)	0,1296	Determinación (r^2)	0,0386

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar ambos tipos de roca, se observa que la relación entre esponjamiento y grado de fragmentación no presenta diferencias relevantes. El esponjamiento promedio es de 96,9 % para la arenisca y 96,6 % para la diorita (ver figura 9).

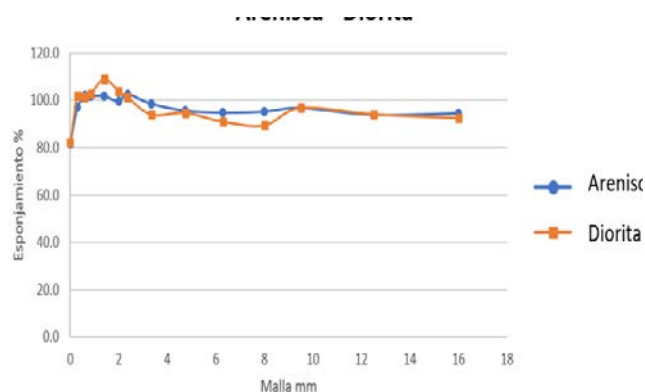


Figura 9. Comparación entre la relación grado de fragmentación-esponjamiento de la arenisca y diorita

Fuente: Elaboración propia.

El análisis con el coeficiente de correlación de Pearson arrojó un valor de -0,3600 para la diorita y -0,1964 para la arenisca, lo que indica una relación inversa entre las variables, es decir, a menor número de malla (mayor fragmentación), mayor es el esponjamiento. Sin embargo, al considerar el coeficiente de determinación, los valores obtenidos son 0,1296 para la diorita y 0,0386 para la arenisca, lo que sugiere que, aunque las variables no son completamente independientes, la relación entre ellas es débil (ver tabla 3).

Si omitimos en el análisis el efecto observado en la malla menor a 0,3 mm, donde se produce una disminución notable del esponjamiento, los coeficientes de correlación resultan en -0,6880 para la diorita y -0,7587 para la arenisca. Además,

el coeficiente de determinación aumenta significativamente, alcanzando 0,4733 para la diorita y 0,5756 para la arenisca. Esto evidencia un aumento importante en la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento (ver tabla 4).

Tabla 4
Correlación entre grado de fragmentación y esponjamiento en las rocas diorita y arenisca, en mallas mayores a 0,3 mm

DIORITA		ARENISCA	
Malla (mm)	Esponjamiento	Malla (mm)	Esponjamiento
16,0	92,4	16,0	94,5
12,5	94,0	12,5	93,9
9,5	96,6	9,5	96,7
8,0	89,3	8,0	95,2
6,3	90,8	6,3	94,8
4,8	94,6	4,8	95,6
3,4	93,8	3,4	98,5
2,4	101,1	2,4	102,7
2,0	103,6	2,0	99,6
1,4	108,8	1,4	101,9
0,9	102,6	0,9	101,9
0,6	101,1	0,6	102,2
0,3	102,1	0,3	96,8
0,0	82,0	0,0	81,6
Coef. Pearson (r)	-0,6880	Coef. Pearson (r)	-0,7587
Determinación (r²)	0,4733	Determinación (r²)	0,5756

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los resultados del esponjamiento del material sin considerar la clasificación granulométrica, se observa un mayor esponjamiento en la granodiorita. Por otro lado, la diferencia de esponjamiento entre la arenisca y la diorita es mínima (ver tabla 5).

Tabla 5
Esponjamiento de la arenisca, diorita y granodiorita, sin clasificación geomecánica

	Densidad inicial (sin fragmentar)	Densidad aparente	Esponjamiento
Arenisca	2,06	1,29	59,4
Diorita	2,32	1,48	56,6
Granodiorita	2,47	1,41	75,3

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las curvas de distribución granulométrica, no se evidenció una diferencia significativa entre las muestras estudiadas. Con estos resultados, se puede asumir que existen otros factores, además de los analizados, que influyen en el esponjamiento (ver figura 10).

Durante el estudio se pudo observar otros factores que tienen relación con el esponjamiento como los siguientes:

- La distribución de los fragmentos dentro del recipiente influye en el volumen, ya que este varía según cómo se acomoden los fragmentos al vaciar el material fragmentado en la probeta.
- La distribución granulométrica afecta al esponjamiento, puesto que una mayor cantidad de finos puede llenar los espacios vacíos entre los fragmentos más gruesos, influyendo en el esponjamiento del material.
- La forma de los fragmentos también es un factor a considerar, ya que se observó que las muestras de roca fragmentada presentaron formas particulares según el tipo de roca.

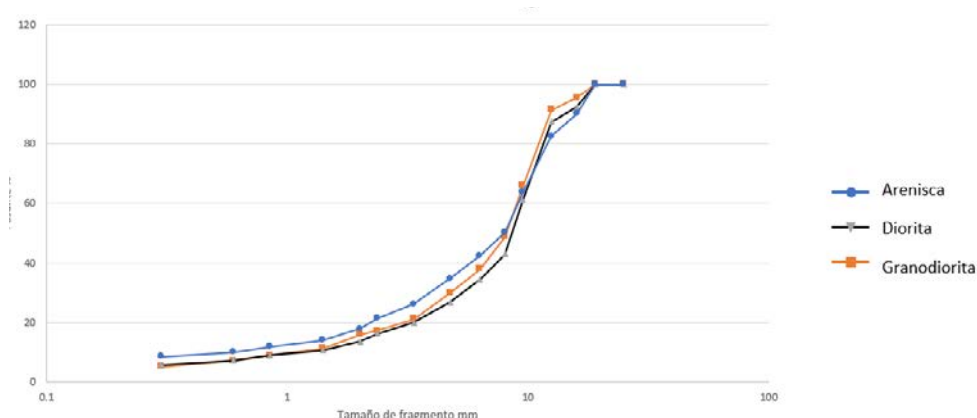


Figura 10. Comparación de las curvas de distribución granulométrica de las muestras de arenisca, diorita y granodiorita

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- El estudio confirma que existe una relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de la roca. Aunque esta relación varía según el tamaño de los fragmentos, se observó que en fragmentos gruesos el esponjamiento es relativamente constante, mientras que en fragmentos finos aumenta hasta un punto crítico en granulometrías muy pequeñas (menores a 0,3 mm), donde el esponjamiento disminuye significativamente. Este comportamiento sugiere que la densidad aparente de los fragmentos y su distribución juegan roles cruciales en el esponjamiento.
- Se identificó que la acomodación de los fragmentos en el recipiente de medición influye en los resultados del esponjamiento, con diferentes volúmenes aparentes medidos para una misma muestra de roca y granulometría.
- El análisis de correlación de Pearson muestra una relación inversa entre la malla (grado de fragmentación) y el esponjamiento para la diorita y la arenisca. Inicialmente, esta relación es débil, con coeficientes de $-0,3600$ y $-0,1964$ respectivamente. Sin embargo, al excluir las mallas menores a 0,3 mm, donde se observa una disminución notable del esponjamiento, los coeficientes de correlación aumentan a $-0,6880$ para la diorita y $-0,7587$ para la arenisca, con un mayor grado de determinación ($0,4733$ y $0,5756$). Esto propone una relación más fuerte entre el grado de fragmentación y el esponjamiento en mallas mayores a 0,3 mm.
- Al comparar arenisca, diorita y granodiorita, se observó que las curvas granulométricas son similares entre las muestras, aunque la granodiorita presenta un mayor esponjamiento en comparación con la arenisca y la diorita, lo que indica que las características específicas del material influyen en el esponjamiento.
- Finalmente, se concluye que, aunque las diferencias entre arenisca y diorita no son significativas, hay otros factores no estudiados que podrían afectar el esponjamiento, como la distribución granulométrica y la forma de los fragmentos, lo que sugiere la necesidad de futuras investigaciones en esta área.

REFERENCIAS

- [1] Choudhary, B. (2019). Effect of blast-induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 119-126. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.119>
- [2] Faramarzi, F., Farsangi, E. & Mansouri, H. (2013). A rock engineering systems-based model to predict rock fragmentation by blasting. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 60, 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2012.12.010>
- [3] Munene, E. et al. (2022). A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering*, 186, 107743. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107743>
- [4] Nanda, S. & Naik, H. (2023). A review of the blast fragmentation analysis techniques used in surface mines. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 71, 2445-2454. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2023/28601>
- [5] Tikin, J. (1997). *Movimiento de tierras* (3.ª ed.), E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

ACERCA DEL AUTOR

Carlos Yungo Suero

Es ingeniero de minas, se desempeña como docente a tiempo completo en la Tecsup n.º 2, Arequipa. Con amplia experiencia en el sector minero, su enfoque profesional está orientado a la formación de futuros ingenieros, combinando sus conocimientos técnicos con una sólida práctica educativa.

@ cyungo@tecsup.edu.pe

Ruben T. Coaguila Coaguila

Es ingeniero metalúrgico, se desempeña como docente a tiempo completo en la Tecsup n.º 2, Arequipa. Con amplia experiencia en el sector minero metalúrgico (capacitador de operadores en plantas concentradoras). Su enfoque profesional está orientado a la formación de futuros técnicos en operaciones de plantas concentradoras, combinando sus conocimientos técnicos con una sólida práctica educativa.

@ rcoaguila@tecsup.edu.pe

Walter Bedregal Moreano

Es ingeniero geólogo, se desempeña como docente a tiempo completo en Tecsup n.º 2, Arequipa. Con experiencia en geotecnia minera, su enfoque profesional está orientado a la formación de técnicos en operaciones mineras, combinando sus conocimientos en el rubro minero.

@ wbedregal@tecsup.edu.pe

Edwin Daniel Santos Llerena

Ingeniero de minas, actual docente a tiempo completo en Tecsup n.º 2, Arequipa. Combina su vasta experiencia en el sector minero con un enfoque pedagógico sólido, orientado a preparar a los próximos profesionales en el sector minero. Su compromiso con la educación se refleja en una enseñanza que integra conocimientos técnicos y práctica educativa, brindando a sus estudiantes una formación sólida en conocimientos.

@ esantos@tecsup.edu.pe

Recibido: 24-04-24

Revisado: 17-09-24

Aceptado: 03-10-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.