

Evaluación de la correlación entre la RCS e Is50 en base a dimensiones de probetas

Correlation evaluation between UCS and Is50 based on specimen dimensions

Ernesto Patricio Feijoo-Calle¹, Bernardo Andrés Feijoo-Guevara¹ y Emily Geovana Vásquez-Guerrero¹

¹ Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, pfeijoo@uazuay.edu.ec, bernardofejoo@uazuay.edu.ec, emilyvasquez@es.uazuay.edu.ec
* Autor para correspondencia: pfeijoo@uazuay.edu.ec

Fecha de recepción del manuscrito: 26/11/2022 Fecha de aceptación del manuscrito: 24/12/2022 Fecha de publicación: 29/12/2022

Resumen—En el desarrollo de actividades mineras, tanto a cielo abierto como en subterráneo, es importante determinar ciertas propiedades de las rocas, presentes en los afloramientos encontrados, una de ellas es la resistencia a la compresión simple (RCS), ya que mediante esta y otras in situ, se puede evaluar la estabilidad de las estructuras. La RCS se evalúa mediante el envío permanente de muestras a laboratorio, lo cual es muchas veces tedioso, complicado y costoso, por lo que una alternativa en campo es la valoración del Índice de Carga Puntual o Is 50, el cual se lo obtiene de una forma más accesible. La relación que existe entre la RCS y el Is 50 es propuesta por varios autores, pero muchas veces estas correlaciones teóricas no reflejan la realidad, porque existen variables que involucran variaciones considerables y en consecuencia distorsionan la evaluación de la RCS. Se propone establecer ciertas directrices para encontrar una correlación que mantenga una concordancia entre la RCS y el Is 50, con las expuestas en la teoría y de esta forma tener una mayor confiabilidad de los cálculos y resultados. Una de las directrices es establecer la geometría de las probetas para los ensayos, específicamente las dimensiones de las mismas. Se han propuesto tres grupos de probetas en andesita, con dimensiones aproximadas de 5x10x10 cm, 5x5x10 cm y 5x5x5 cm y los resultados obtenidos son alentadores, además podemos concluir que la metodología planteada debe ser introducida para los procesos de campo en los proyectos mineros.

Palabras clave—Compresión, Estabilidad, Minería, Resistencia, Roca.

Abstract—In the development of mining activities, both open pit and underground, it is important to determine certain properties of the rocks present in the outcrops found, one of them is the unconfined compressive strength (UCS), since through this and other in situ, the stability of structures can be assessed. The UCS is evaluated by permanently sending samples to the laboratory, which is often tedious, complicated and expensive, so an alternative in the field is the assessment of the Point Load Test Index or Is 50, which is obtained from a more accessible way. The relationship that exists between the UCS and the Is 50 is proposed by several authors, but many times these theoretical correlations do not reflect reality, because there are variables that involve considerable variations and consequently distort the evaluation of the UCS. It is proposed to establish certain guidelines to find a correlation that maintains a concordance between the UCS and the Is 50, with those exposed in the theory and in this way have a greater reliability of the calculations and results. One of the guidelines is to establish the geometry of the test specimens, specifically their dimensions. Three groups of andesite specimens have been proposed, with approximate dimensions of 5x10x10 cm, 5x5x10 cm and 5x5x5 cm and the results obtained are encouraging, we can also conclude that the proposed methodology should be introduced for field processes in mining projects.

Keywords—Compression, Stability, Mining, Resistance, Rocks.

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de las actividades mineras, tanto en minas a cielo abierto como en minas subterráneas, es importante conocer la estabilidad de las estructuras presentes en el proyecto minero y que muchas veces son generadas por los ingenieros en minas para la extracción y explotación de los recursos minerales, pero es indispensable el análisis de la estabilidad de estas obras, el cual es dependiente de algunas propiedades, tanto del material rocoso como del macizo

rocoso. Por esta razón es importante establecer las propiedades o características de la zona, para ejecutar los análisis y evaluar la estabilidad, mediante la obtención de factores numéricos (Feijoo e Iñiguez, 2020).

En cuanto a la matriz rocosa, material rocoso o simplemente roca, hay muchos parámetros que se emplean para su identificación y descripción de sus características. Estas propiedades junto con la composición mineralógica determinan su comportamiento. Las propiedades mecánicas de la ma-

triz rocosa son las que permiten conocer las características tenso-deformacionales de la misma, sometida a un estado de esfuerzos determinados. Dentro de las propiedades básicas, y de cara al conocimiento del comportamiento mecánico de la matriz, son de particular importancia la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción. El comportamiento tensión-deformacional de una roca, viene definido por la relación entre dos esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas, hace referencia a como se va deformando y a la variación del comportamiento del material a lo largo de la aplicación de la carga, lo que permite conocer:

- El comportamiento antes de llegar a la rotura.
- La forma en la que se produce la rotura.
- El comportamiento después de la rotura.

Su estudio, se lleva a cabo a partir de ensayos de aplicación de fuerzas, en donde se registran las curvas esfuerzo-deformación a lo largo de las diferentes etapas del proceso.

Las rocas presentan relaciones lineales y/o no lineales entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones producidas, obteniéndose diferentes modelos de curvas de tensión contra deformación para distintos tipos de rocas (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016).

Una propiedad o relación fundamental del material rocoso es la resistencia a la compresión simple (RCS) pero en ocasiones se dificulta su determinación por la falta de laboratorios cercanos al proyecto minero y/o también por su alto costo, especialmente para el caso de pequeña minería, en especial en distritos mineros en los que laboran mineros artesanales. Para la determinación de la resistencia a compresión simple o uniaxial de la roca, se ha desarrollado un ensayo alternativo conocido como índice de carga puntual (Is 50), el cual es de fácil ejecución en campo. Determinado este índice se lo correlaciona con ecuaciones propuestas por varios autores y se obtiene la RCS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio, se estableció trabajar con una andesita proveniente de la zona de Cojitambo, provincia del Cañar, Ecuador. Las andesitas son rocas volcánicas de grano fino, son comunes, como coladas de lava en regiones orogénicas y ocasionalmente forman pequeñas intrusiones. Son compactas, algunas veces vesiculares y comúnmente de color castaño y en extensión total ocupan el segundo lugar después del basalto (Blyth y Freitas, 2003). Luego de obtener las muestras en campo, se procedió a la elaboración de las probetas, mediante una cortadora marca Covington, la cual es un modelo de piso diseñada para cortar rocas. Esta posee una sierra de estilo inmersión, lo que significa que el fluido de corte se asienta dentro del tanque y la cuchilla giratoria elevará el fluido alrededor de la probeta (Figura 1).

De hecho, las propiedades de las rocas varían en las diferentes direcciones que se aplique un efecto, por eso a este punto proponemos utilizar el corte en la roca, el cual por razones descritas no será igual en función de la arista establecida para generar el mismo. Este corte debe ser ejecutado sobre muestras o probetas preparadas, para tratar de mitigar los efectos de la anisotropía, lo cual es muy difícil conseguir.



Fig. 1: Cortadora Covington.

Así pues, en el proceso de corte de rocas intervienen conjuntamente el equipo o sierra de corte, el útil diamantado y el material a cortar (Feijoo *et al.*, 2022). También se pueden obtener muestras a partir de bloques de roca; la extracción de estos bloques en la mina o en la obra se debe llevar a cabo sin voladuras, ya que éstas pueden generar en la roca nuevas microfisuras o aumentar las existentes, lo cual se traduciría en una pérdida de resistencia de las probetas que se obtengan de ellos (Feijoo *et al.*, 2019).

Obtenidas las probetas, se procede a la ejecución de los ensayos. Para la resistencia a la compresión simple se utilizaron 90 probetas, en tres grupos de 30 cada uno, las que tuvieron dimensiones de 5x10x10 cm, 5x5x10 cm y 5x5x5 cm. El mismo número y dimensiones de probetas se utilizó para el ensayo de carga puntual (Figura 2).



Fig. 2: Probetas elaboradas.

Para la ejecución de los ensayos se utiliza el equipo apropiado. Para la determinación de la RCS, este equipo es una prensa Humboldt que tiene facultades para someter materiales a ensayos de tensión y compresión (Figura 3). La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o sistema hidráulico. La máquina de ensayos tiene como función comprobar la resistencia de diversos tipos de materiales, para esto posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta (modelo de dimensiones preestablecidas) y mide en forma gráfica la deformación, y la carga al momento de su ruptura (Feijoo y Brito, 2021).



Fig. 3: Equipo para ensayos de resistencia a la compresión Humboldt.

La resistencia a la compresión simple de las rocas es la medida más común para definir los razonamientos de rotura y el proceder geomecánico de un macizo rocoso determinado. Para la obtención en los exámenes de laboratorio requiere muestras escrupulosamente preparadas y de un cierto tiempo considerable para poder conocer el resultado, lo cual puede presentar un alto coste. Las rocas anisótropas en específico son dificultosas de realizar exámenes por la variante de su resistencia por lo que son necesarios numerosos exámenes de laboratorio para obtener parámetros representativos de todo el rango de resistencias (Burbano y García, 2016).

El propósito de este ensayo es medir la resistencia a compresión de una probeta de roca, sometida a una carga axial. Para realizar el ensayo, hay que disponer de una prensa de capacidad adecuada que permita emplear la carga sobre la probeta a velocidad constante hasta que se produzca la rotura en la misma en un intervalo de tiempo entre 5 y 15 minutos, también la velocidad de carga puede establecerse entre intervalos de 0,5 a 1 MPa/s (Ramírez et al., 1984).

La probeta se coloca entre los discos de la prensa, bien centrada. Donde se aplica una carga de asentamiento equivalente al 1 % de la resistencia a compresión simple estimada. En este momento, el reloj indicador de carga se pone en cero. Se fija la velocidad de aplicación de la carga, dando comienzo la compresión, hasta que la muestra se rompe. La ecuación 1 nos muestra como determinar la resistencia a compresión simple de una probeta:

$$RCS = \sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

P= es la carga máxima a la que ha sido sometida la probeta durante el ensayo.

A= es el área de la sección transversal de la probeta.

Pero en los proyectos mineros sucede muy a menudo que no es posible enviar las muestras a los laboratorios, debido a su ubicación y/o al costo que representa para la empresa minera, por lo que se puede utilizar como alternativa el índice de prueba de carga puntual o I_s 50 (Feijoo et al., 2022). El índice de carga puntual es uno de los ensayos más importantes que se usan para la determinación indirecta de la RCS, ya que la implementación de la prensa puede ser usada in situ o

en laboratorio, además de que requiere de muy poca o nula preparación de las muestras para la prueba (Cordero, 2019).

El ensayo de carga puntual o de rotura entre puntas es un ensayo básico que puede realizarse en el campo con testigos sin modificación o con fragmentos de roca. Este se fundamenta en aplicar una carga puntual en un trozo de roca hasta su rotura obteniéndose un índice I_s que se correlaciona con la resistencia a compresión simple de la roca (González de Vallejo y Ferrer, 2007).

El valor de prueba de carga puntual se puede usar como una estimación indirecta de la compresión uniaxial o simple de la roca, la muestra que se lleve a cabo su ejecución puede ser un núcleo de roca, un bloque o un bulto irregular de roca (Pohjanperae et al., 2005).

El ensayo de carga puntual consiste en romper un pedazo de roca entre dos puntas cónicas de acero endurecido (Figura 4). Las muestras que posteriormente van a ser colocadas entre dichas puntas pueden ser de cualquier forma, pero lo recomendable es que su diámetro no sea inferior a 50 mm, ya que, el volumen de dicha probeta influye en su resistencia (Feijoo y Ureña, 2021).



Fig. 4: Equipo para ensayos de carga puntual.

La ecuación 2 nos permite calcular el índice de carga puntual sin corrección:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (2)$$

Donde:

P = Carga aplicada en N.

De = Diámetro del núcleo equivalente en mm (Ramírez y Alejano, 2004).

La razón $0.3 < D / W < 1$ que de preferencia quede cerca de 1.

En la ecuación 3 se determina el diámetro equivalente De en función de las dimensiones de los fragmentos irregulares:

$$De^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (3)$$

Donde:

$$A = WD \quad (4)$$

Donde A es el área transversal mínima paralela a la dirección de la carga en mm^2 .

El índice de resistencia a la carga puntual corregido, I_s 50 de una muestra de roca se define como el valor de I_s que

se ha medido para una prueba diametral con $D = 50$ mm. Cuando una clasificación de roca es fundamental, el método más fiable para conseguir el $Is\ 50$ es llevar a cabo las pruebas con diámetros de $D = 50$ mm o muy cercanos a dicho valor. La mayoría de las pruebas de carga puntual, son llevadas a cabo utilizando tamaños de muestras diferentes al diámetro mencionado (Navarrete *et al.*, 2013).

En la ecuación 5 podemos obtener la corrección por tamaño:

$$Is50 = \left(\frac{De}{50} \right)^{0,45} * Is \quad (5)$$

Para la ejecución del índice de carga puntual se utilizó un equipo construido para este efecto, el cual consiste de una bomba y una estructura diseñada en base a las recomendaciones del caso.

Cabe indicar que los ensayos de resistencia a la compresión y de carga puntual se los ejecutaron siguiendo las normas respectivas.

Realizados los ensayos antes descritos, se obtiene una relación, la cual genera un dominio y rango, características que sirven para la caracterización del material rocoso, en este caso la andesita, y de esta forma conocer la propiedad de resistencia de las muestras obtenidas.

Sin embargo, existen correlaciones en la literatura que ya han sido establecidas en años pasados y las mismas proponen algunas ecuaciones. Al conocer las correlaciones propuestas en la teoría, las más relevantes y usadas se detallan a continuación. En 1972, Franklin, J. A. y Bosh, E., proponen un factor de correlación de 24. Chau, K. T., y Wong, R. H. C., en 1996 un factor de 12.5. Rusnak, J., y Mark, C., en 2000, un factor de 21. Thuro y Plinninger, R. J., en 2001 un factor de 18.7. Mark, C., en 2002, un factor de 21. Akram, M., y Bakar, M. Z. A., en 2007 un factor de 13.295. Cobanoglu, I., y Celik, S. B., en 2008, una relación $RCS=8.66\ Is\ 50 + 10.85$ (Galván, 2015). Por lo tanto, se poseen estas correlaciones para luego compararlas con la relación que se obtendrá del material rocoso, para el presente caso.

RESULTADOS

Luego de la ejecución de los ensayos se obtienen los resultados, los cuales se los puede observar en las tablas 1, 2 y 3 y ordenados los mismos se procedió a graficarlos para determinar las correlaciones buscadas (Figuras 5, 6 y 7).

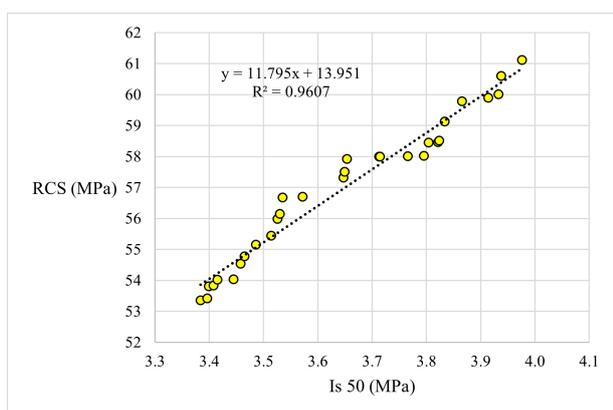


Fig. 5: Correlación entre la resistencia a compresión simple e $Is\ 50$ para probetas con dimensiones $5 \times 10 \times 10$ cm.

Tabla 1: Resultados de resistencia a la compresión simple e $Is\ 50$ de las probetas con dimensiones $5 \times 10 \times 10$ cm.

Probeta	Is 50 (MPa)	RCS (MPa)	Probeta	Is 50 (MPa)	RCS (MPa)
1	3.4	53	16	3.6	58
2	3.4	53	17	3.7	58
3	3.4	54	18	3.7	58
4	3.4	54	19	3.7	58
5	3.4	54	20	3.8	58
6	3.4	54	21	3.8	58
7	3.5	55	22	3.8	58
8	3.5	55	23	3.8	58
9	3.5	55	24	3.8	59
10	3.5	55	25	3.8	59
11	3.5	56	26	3.9	60
12	3.5	56	27	3.9	60
13	3.5	57	28	3.9	60
14	3.6	57	29	3.9	61
15	3.6	57	30	4.0	61

Tabla 2: Resultados de resistencia a la compresión simple e $Is\ 50$ de las probetas con dimensiones $5 \times 5 \times 10$ cm.

Probeta	Is 50 (MPa)	RCS (MPa)	Probeta	Is 50 (MPa)	RCS (MPa)
1	1.5	17	16	3.1	36
2	1.5	19	17	3.1	37
3	2.1	26	18	3.1	37
4	2.6	28	19	3.1	39
5	2.6	29	20	3.2	39
6	2.6	30	21	3.2	39
7	2.6	30	22	3.2	39
8	2.9	31	23	3.2	39
9	3.0	32	24	3.2	41
10	3.0	32	25	3.3	42
11	3.0	33	26	3.3	47
12	3.0	34	27	3.3	47
13	3.0	34	28	3.4	47
14	3.1	36	29	3.5	47
15	3.1	36	30	3.5	52

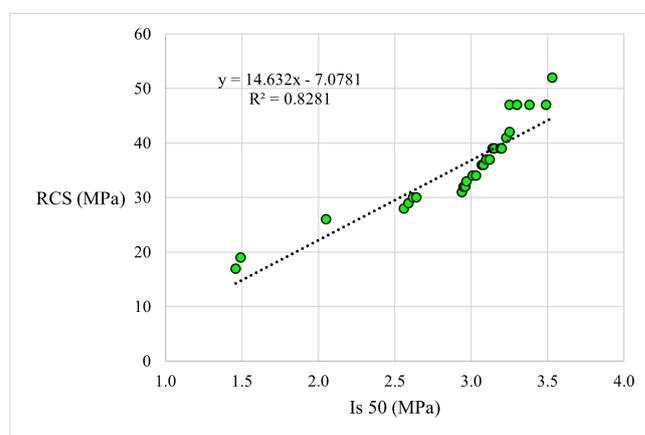


Fig. 6: Correlación entre la resistencia a compresión simple e $Is\ 50$ para probetas con dimensiones $5 \times 5 \times 10$ cm.

Tabla 3: Resultados de resistencia a la compresión simple e Is 50 de las probetas con dimensiones 5 x 5 x 5 cm

Probeta	Is 50 (MPa)	RCS (MPa)	Probeta	Is 50 (MPa)	RCS (MPa)
1	0.9	17	16	1.9	23
2	1.0	19	17	2.0	23
3	1.0	20	18	2.6	24
4	1.0	20	19	3.5	20
5	1.1	20	20	3.5	25
6	1.1	21	21	3.6	25
7	1.2	21	22	3.6	25
8	1.2	21	23	3.8	25
9	1.4	22	24	4.1	26
10	1.4	22	25	4.3	26
11	1.4	23	26	4.4	27
12	1.4	23	27	4.5	28
13	1.6	23	28	4.5	28
14	1.7	23	29	4.6	30
15	1.8	23	30	5.1	31

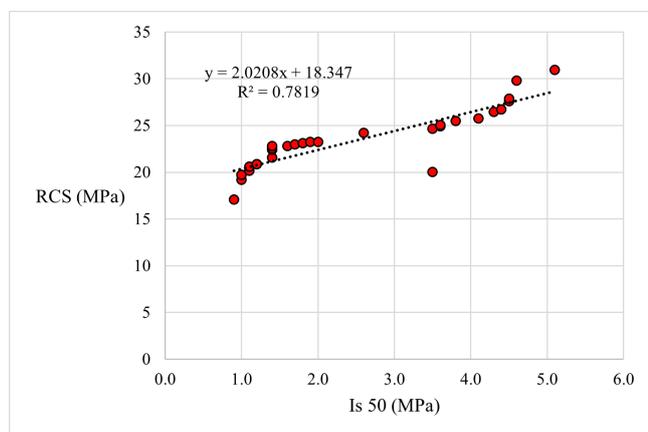


Fig. 7: Correlación entre la resistencia a compresión simple e Is 50 para probetas con dimensiones 5 x 5 x 5 cm.

DISCUSIÓN

Realizados los respectivos análisis, se procedió a graficar las correlaciones de los tres tipos de probetas (Figura 8), las cuales están en color amarillo, verde y rojo, conjuntamente con las correlaciones propuestas en la literatura, estas últimas en color negro. La coloración de las correlaciones del estudio, se la escogió a manera de una semaforización, donde rojo no es adecuado, amarillo es más o menos adecuado y verde es adecuado. En otras palabras, la correlación de las probetas de 5x5x10 cm, en color verde, está enmarcada dentro del rango de las correlaciones de la literatura, lo que nos proporciona el hecho de que las dimensiones de dichas probetas son muy adecuadas para este objetivo. La correlación de las probetas de dimensiones de 5x10x10 cm, en color amarillo, tiene una aproximación a las correlaciones de la literatura, a pesar de que su rango está por fuera de lo establecido. Finalmente, la correlación de las probetas de 5x5x5 cm, en color rojo, no tiene un buen campo de aproximación en rango con las correlaciones teóricas, lo que implica que dichas dimensiones de probetas no son adecuadas para el objetivo propuesto.

Las correlaciones son las siguientes:

Para las probetas de dimensiones 5x5x10 cm, en la gráfica

de color verde, es:

$$RCS = 14,632 * Is50 - 7,0781 \quad (6)$$

Para las probetas de dimensiones 5x10x10 cm, en la gráfica de color amarillo, es:

$$RCS = 11,795 * Is50 + 13,951 \quad (7)$$

Para las probetas de dimensiones 5x5x5 cm, en la gráfica de color rojo, es:

$$RCS = 2,0208 * Is50 + 18,347 \quad (8)$$

Donde tanto la RCS como el Is 50 están en MPa.

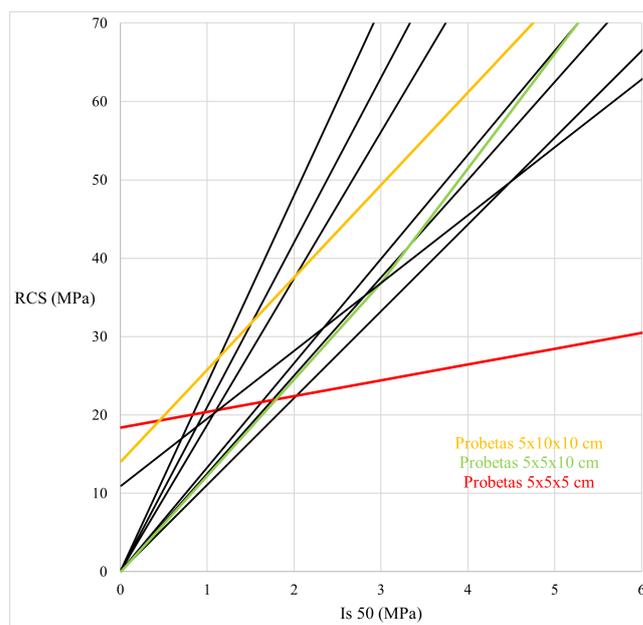


Fig. 8: Correlaciones teóricas y establecidas en laboratorio entre la resistencia a compresión simple e Is 50.

CONCLUSIONES

Se determinó que existe una correlación adecuada entre el Is 50 y la RCS de la roca estudiada (andesita) y la misma proporciona límites para dicho material rocoso.

Se propone también, para el caso de estudio presentado, una correlación entre el Is 50 y la RCS, la cual se expresa mediante la ecuación 6. La relación propuesta permite caracterizar el material rocoso presente en la zona, en consecuencia, se han obtenido valores de Is 50 que van desde 1.5 MPa a los 3.5 MPa y el valor de la RCS entre los 17 MPa hasta los 52 MPa.

Este trabajo muestra que no siempre existe una buena aproximación de las ecuaciones o correlaciones encontradas con las correlaciones propuestas en la literatura, por lo que para materiales específicos se recomienda ejecutar ensayos y obtener así una relación propia para el material rocoso.

Finalmente se sugiere que esta propuesta sea desarrollada en otros tipos de roca, con un número mayor de probetas elaboradas, diferentes dimensiones de probetas, es decir ejecutarla con una modificación de las diferentes variables involucradas, para de esta forma tratar de generalizarlo y que sea efectivo al momento de usarlo en un proyecto minero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Azuay.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, EPFC, BAFG, EGVG; redacción y preparación del borrador original, EPFC; redacción, revisión y edición, BAFG, EGVG.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación fue financiada por la Universidad del Azuay, a través del Vicerrectorado de Investigaciones.

REFERENCIAS

- Blyth, F., Freitas, M. (2003). *Geología para Ingenieros*. México D.F., México.
- Burbano, D., & García, T. (2016). Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras). *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(2), 13–16. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.862>
- Cordero, P. (2019). *Manual de prácticas de laboratorio de Mecánica de Rocas (Parte I)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Feijoo, P., Brito, E. (2021). Rock Characterization Through Physical Properties and Their Relationship to Simple Compressive Strength. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.*, 1(2), 931–941. <https://doi.org/10.18502/epoch.v1i2.9507>
- Feijoo, E., Choco, E., Peláez, G., Feijoo, B. (2022). Índice de Carga Puntual y su Relación con Dimensiones en Bloque Regular de Roca. *Revista Tecnológica - Espol*, 34(2), 28-39.
- Feijoo, P. & Flores, C. & Feijoo, B. (2019). The Concept of the Granulometric Area and Its Relation with the Resistance to the Simple Compression of Rocks. *IESTEC*, p. 52–56.
- Feijoo, P., Iñiguez, C. (2020). Corte en rocas y su relación con la resistencia a compresión simple. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, E30, 59-67.
- Feijoo, P., Peralta, A., Tamayo, A., Feijoo, B. (2022). Tamaño de partícula del material rocoso y su correlación con el índice de prueba de carga puntual. *Minerva*, 3(7), 78-88.
- Feijoo, P. & Ureña, C. (2021). Caracterización de la resistencia a la compresión en rocas mediante clasificación granulométrica: un ensayo de campo. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1), 2-11.
- Galván, M. (2015). *Mecánica de Rocas: Correlación entre la Resistencia a Carga Puntual y la Resistencia a Compresión Simple*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M. (2007). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. España.
- Navarrete, M., Martínez, W., Alonso, E., Lara, C., Bedolla, A., Chávez, H., Delgado, D., Arteaga, J. (2013). Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. *ALCONPANT*, 3(2), 133-143.
- Pohjanperae, P., Wanne, T., & Johansson, E. (2005). Point load test results from Olkiluoto area borehole cores (POSIVA-WR-06-59). Finland
- Ramírez, P., Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España.
- Ramírez, P., de la Cuadra, L., Lain, R., Grigalbo, E. (1984). *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. Instituto Geológico Minero. Madrid. España.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2016). *Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carreteras*. México D. F., México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte.