

LA RESISTIVIDAD DE ROCAS Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN MINA

Feijoo Calle Ernesto Patricio ¹, Padrón Suarez Jhenifer Cristina ²

{pfeijoo ¹, jhenpad13 ²} @uazuay.edu.ec

ORCID: 0000-0001-6901-7933 ¹, ORCID: 0000-0001-7341-1685 ²

Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería en Minas

Recibido (02/03/20), Aceptado (20/03/20)

Resumen: En el trabajo que se presenta a continuación, se propone un método de campo para correlacionar los valores de la resistencia a la compresión simple (RCS) y la resistividad en rocas, ya que en los proyectos mineros, muchas veces, resulta complicado determinar el valor de la RCS, para lo cual es indispensable enviar muestras al laboratorio, convirtiéndose en una actividad tediosa y costosa para la empresa. Si correlacionamos los valores de la resistividad de la roca con la RCS, podemos evitar enviar permanentemente dichas muestras, y mediante una relación establecer cuando amerita la ejecución de nuevas pruebas obligatoriamente en laboratorio. Este trabajo se lo desarrolló sobre la base de muestras y probetas de una zona denominada Cojitambo, provincia del Cañar (Ecuador) y en las mismas se ejecutaron medidas de resistencia eléctrica sobre cada una de las aristas de las probetas generadas y de esta forma contamos con un mayor número de datos de resistividad. Los resultados obtenidos permiten una correlación entre las propiedades antes descritas y se ha estructurado una posible metodología de cálculo.

Palabras Clave: Minería, RCS, resistividad, roca.

ROCK RESISTIVITY AND ITS RELATION TO UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH IN A MINE

Abstract: In the work that follows, a field method is proposed to correlate the values of the unconfined compressive strength (UCS) and the resistivity in rocks, since in mining projects, it is often difficult to determine the value of the UCS, for which it is essential to send samples to the laboratory, becoming a tedious and expensive activity for the company. If we correlate the values of the resistivity of the rock with the UCS, we can avoid permanently sending said samples, and by means of a relationship establish when the execution of new tests is required in the laboratory. This work was carried out on the basis of samples of an area called Cojitambo, province of Cañar (Ecuador) and on them, electrical resistance measurements were carried out on each of the edges of the generated specimens and in this way we have with a greater number of resistivity data. The results obtained allow a correlation between the properties described above and a possible calculation methodology has been structured.

Keywords: Mining, UCS, resistivity, rock.

I. INTRODUCCIÓN

En la explotación de minas y canteras es importante determinar la resistencia a la compresión simple de las rocas (RCS) ya que mediante este parámetro se pueden desarrollar clasificaciones de los macizos rocosos, y con las cuales se determina la estabilidad de las estructuras mineras, tanto a cielo abierto como en subterráneo.

La resistencia de una roca o de sedimentos no bien consolidados está influida por la mineralogía de sus partículas y por el contacto que hay entre ellas [1].

Pero muchas veces debido a las condiciones en las cuales se encuentran las labores mineras, resulta complicado y a veces casi imposible enviar muestras de roca a laboratorios para determinar el valor de la RCS, y en estos tiempos es la problemática de los encargados de evaluar la estabilidad de las estructuras en el campo, por lo que se presenta la imperiosa necesidad de generar alternativas in situ para la valoración de la RCS. En este trabajo se propone determinar propiedades eléctricas, como la resistividad de las rocas y correlacionarla con la RCS, para de esta manera obtener de una manera aproximada dicho parámetro.

En la Mecánica de Rocas, que es la encargada de estudiar las propiedades de las rocas y de los macizos rocosos, es muy importante definir algunas de ellas, que sin restar importancia a otras, se consideran prioritarias. El comportamiento de una masa o macizo de roca in situ es diferente de un material rocoso, debido a que el material rocoso es mucho más fuerte y un macizo rocoso presenta casi siempre sistemas de debilidades estructurales llamadas diaclasas (fracturas, fisuras, juntas, discontinuidades, fallas de varios tamaños). Prácticamente todas las rocas que forman los kilómetros de la corteza terrestre están atravesadas por fisuras y grietas de corta extensión [2].

En este punto cabe analizar una de las propiedades de las rocas que se verá involucrada en la propuesta de correlación en este trabajo, tomando en consideración que la heterogeneidad de los materiales o rocas usados siempre pueden ser un limitante para su análisis. También, incluso en rocas aparentemente isotropas y homogéneas, entendiéndose como homogeneidad si dos muestras cualesquiera de una masa rocosa del mismo volumen e igualmente orientadas son idénticas desde todos los puntos de vista [3], las propiedades pueden variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica.

El presente trabajo presenta una sección inicial de los conceptos básicos sobre la resistencia a la compresión simple o uniaxial de las rocas, como un parámetro fundamental para la determinación de factores de estabilidad en las obras mineras, así como conceptos

adicionales de resistividad eléctrica, porosidad y sus relaciones. Se presenta también una sección en la cual se explica la metodología utilizada para la propuesta, en la cual se describen las actividades ejecutadas para los diferentes ensayos propuestos. La siguiente sección muestra los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones.

II. DESARROLLO

Resistencia a la Compresión Simple de Rocas

Se denomina resistencia a la compresión simple o uniaxial de una roca (RCS) al esfuerzo medido sobre la misma de una manera técnica. La resistencia a la compresión simple de las rocas es el parámetro más común para definir los criterios de rotura y el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso. Su obtención en ensayos de laboratorio requiere muestras cuidadosamente preparadas y de un tiempo considerable para conocer su resultado, lo que puede representar un alto costo [4]. Esta valoración o parámetro se debe a la necesidad de emplear clasificaciones de macizos rocosos. Estas clasificaciones son conocidas como clasificaciones geomecánicas y derivan de la diferencia existente entre las propiedades de la roca por su naturaleza y las del macizo, que presenta diferentes grados de fracturación y meteorización. Las clasificaciones geomecánicas son sistemas de valoración del comportamiento del terreno rocoso. Se basan en calificar numéricamente las propiedades y características específicas de la roca en un emplazamiento determinado y posteriormente obtener una calificación final como la suma de las valoraciones parciales. Las diferentes clasificaciones toman en cuenta un parámetro fundamental, la resistencia a la compresión simple. La RCS es una medida de resistencia de la matriz rocosa, la cual representa el esfuerzo de compresión axial máximo que puede soportar una muestra de material antes de fracturarse [7].

Este ensayo sirve para determinar la resistencia a compresión de una probeta cilíndrica de roca de altura entre el doble y el triple del diámetro [5]. Normalmente estas probetas se obtienen a partir de testigos de perforación. 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. Averiguar la resistencia a compresión simple de una roca es importante porque permite clasificar la roca según su resistencia, es un parámetro importante en los criterios de rotura más utilizados [6].

Tabla I. Clasificación de la roca en base a la resistencia a la compresión según la ISRM

Descripción	Resistencia a la Compresión (MPa)
Extremadamente blanda	< 1
Muy blanda	1-5
Blanda	5-25
Moderadamente blanda	25-50
Dura	50-100
Muy dura	100-250
Extremadamente dura	250

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 [8].

Para estimar la resistencia a compresión simple de una roca, se pueden usar métodos y/o ensayos que se realizan en campo y/o laboratorio. Su obtención va desde una estimación meramente subjetiva hasta una medición indirecta. Uno de estos métodos es la obtención de la RCS a través de las propiedades índice de la roca [9].

Resistividad de Rocas

La resistividad eléctrica de rocas y minerales es una propiedad extremadamente variable, y depende de varios factores. La resistividad de rocas cristalinas tales como granulita, granito, diorita, etc., tomada in situ, depende en gran medida del agua que contengan en fracturas y grietas. Análogamente, la porosidad, grado de saturación y la naturaleza de los electrolitos que llenan los poros, determinan la resistividad de rocas como areniscas, calizas, etc. Por regla general, las rocas compactas son malas conductoras de la electricidad, pero las zonas de roca quebrantada y rota pueden tener a veces resistividad tan baja como algunas menas. Además, pueden presentar resistividad baja algunas arcillas, así como la creta, margas, etc. Cuando están secas la mayoría de las rocas no son conductoras [10].

La resistividad eléctrica ρ de cualquier sustancia se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene en un centímetro cúbico de esa sustancia, tomado de forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente a una de las aristas de ese cubo. Según el sistema de unidades elegido, la resistividad se mide en ohm·metro [10].

A una roca, como conductor de la corriente eléctrica, se le puede considerar como un agregado que consta de un esqueleto sólido mineral, de líquidos y gases. En la resistividad de un tal agregado influyen los siguientes factores:

- La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca (su esqueleto);
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca;
- La humedad de la roca;
- La porosidad de la roca;
- La textura de la roca, y la forma y distribución de sus poros;
- Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral.

La resistencia de los minerales constituyentes de las rocas, es muy grande y oscila entre 106 y 1015 ohm·metro [11]. Figura 1.

La resistividad eléctrica, en particular, es muy alta en los especímenes secos en comparación con los valores obtenidos con cualquier contenido de agua [12].

Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen valores altos de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que poseen, y el porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno. Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad [13].

Para la determinación de la resistividad en el campo usaremos la relación:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (1)$$

Donde:

ρ es la resistividad en ohm·metro (Ωm)

R es la resistencia que presenta la roca en ohmios (Ω)

A es la sección de la roca en metros cuadrados (m^2)

L es la longitud de la roca en metros (m) [14].

La figura 1 proporciona un esquema con los márgenes de variación más comunes en algunas rocas y minerales [15].

Porosidad de Rocas

Es definida como la razón entre el volumen de los espacios vacíos entre la roca y el total volumen aparente de la roca, también se refiere a la probabilidad de encontrar vacíos en el volumen total [9]. Así también el contenido de humedad presente en una roca es la relación existente entre el agua contenida en los poros de la roca y la masa de las partículas de la roca misma.

III.METODOLOGIA

Para el desarrollo de este trabajo se inició con la

obtención de muestras de un sector denominado Cojitaambo, el cual presenta una morfología de tipo multi-forme, es una formación volcánica en la provincia del Cañar (Ecuador) [16]. Estas muestras se tomaron de afloramientos y tratando que la matriz rocosa extraída sea sana y que no contenga alteraciones. Es muy importante que las muestras tengan superficies frescas y limpias, que nos permita realizar una valoración correcta del estado de la roca a la cual se procede a realizar los ensayos.

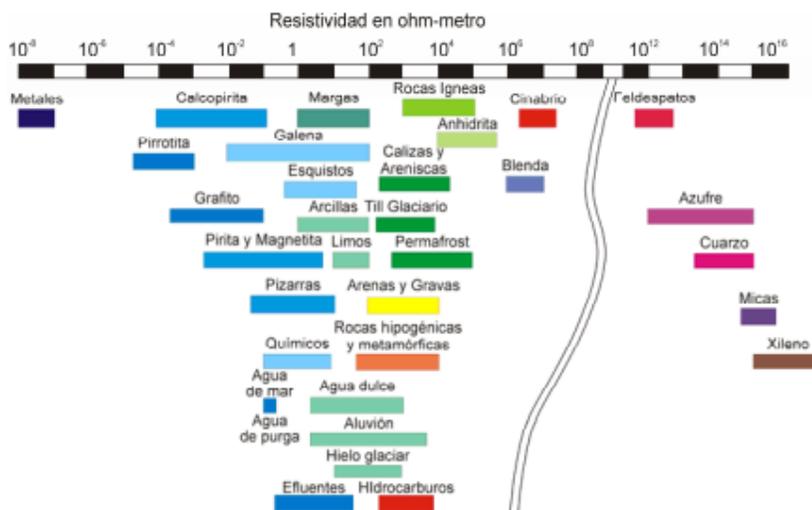


Figura 1: Valores de Resistividades de rocas y minerales.

Realizada la toma de muestras se las preparó para la elaboración de probetas, en lo posible de iguales dimensiones. Las probetas preparadas tuvieron las siguientes dimensiones aproximadamente: 5 cm x 4 cm x 10 cm. En total se elaboraron 15 probetas. Figura 2.



Figura 2: Muestras o probetas de roca

En la primera fase se ejecutaron las pruebas para la obtención de la resistividad en campo o resistividad en

mina, para lo cual con un multímetro común, se obtiene la resistencia y con sus dimensiones se obtuvieron sus respectivas resistividades. Inicialmente las probetas son sumergidas totalmente en agua por 30 minutos y luego se las coloca sobre un papel absorbente, de manera inmediata se procede a la toma del valor de la resistencia entre sus diferentes aristas. Figura 3.

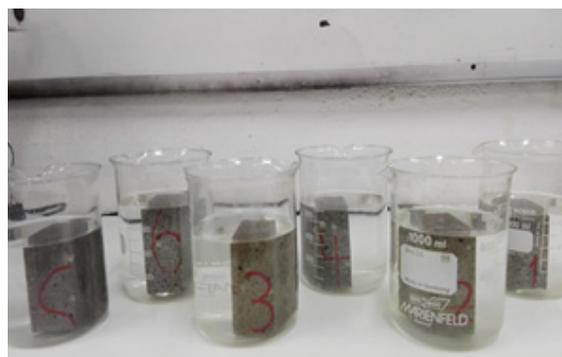


Figura 3: Muestras o probetas de roca sumergidas en agua.

En una segunda parte, luego de haber determinado la resistividad en cada arista de cada probeta, se las lleva al laboratorio para la determinación de la resistencia a la compresión simple. Para la ejecución de los ensayos se utiliza el equipo apropiado. Esta máquina es una prensa Humboldt que tiene facultades para someter materiales a ensayos de tensión y compresión. 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. (Figura 4).



Figura 4: Máquina de compresión Humboldt.

Las recomendaciones para la aplicación de la máquina de compresión son:

- Adecuado para cilindros, cubos, vigas y núcleos de mezclas.
- Rango de prueba de 2500 a 250000 lb (11 a 1112 KN) con una precisión de $\pm 0.5\%$ de la carga indicada.
- La configuración estándar incluye platos para probar cilindros de 6 "x 12" (150 mm x 300 mm).

IV.RESULTADOS

Luego de evaluar los datos, se ha establecido que la resistividad en mina presenta una serie de valores, que establecen un máximo y un mínimo, en la correlación con la resistencia a la compresión simple. Esto se lo puede observar en las figuras 5 y 6, y son relevantes estas series de valores, ya que establecen una zona de límites de valores, para la resistividad de las rocas o materiales que se están estudiando, es decir en esta zona de límites (máxima y mínima), están los resultados de resistencia a la compresión simple de dichos materiales.

En la figura 7, se han establecido a las ecuaciones que generan la zona propuesta, proporcionando la li-

mitación de los valores y parámetros determinados, y además en dicha figura se han señalado las respectivas gráficas.

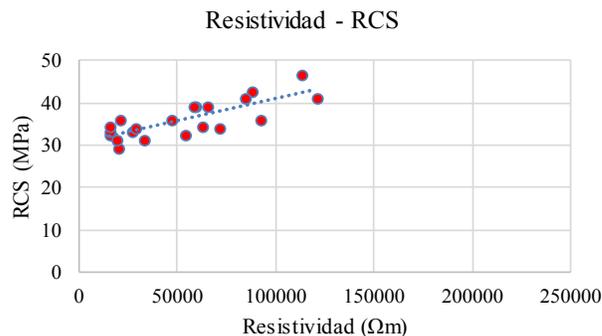


Figura 5: Valores de resistividad y RCS máxima.

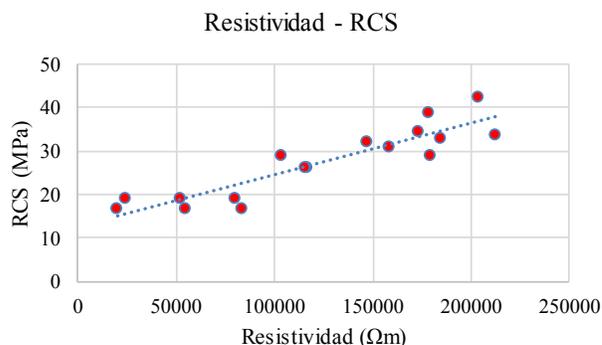


Figura 6: Valores de resistividad y RCS mínima.

Las ecuaciones que se presentan a continuación, nos permiten determinar de una manera aproximada el valor de la resistencia a la compresión simple de la roca. Su detalle es:

$$RCS_{max} = 0.0001\rho + 30.394 \tag{2}$$

$$RCS_{min} = 0.0001\rho + 12.926 \tag{3}$$

En donde:
RCS en MPa
 ρ en Ωm

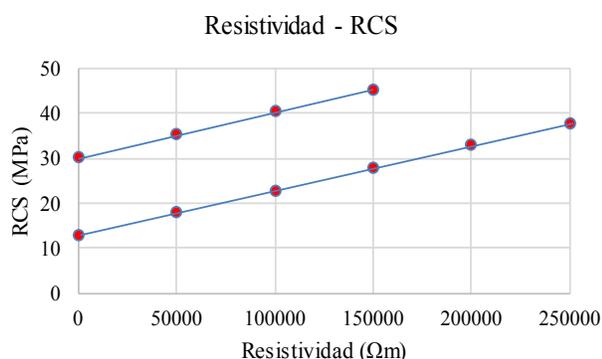


Figura 7: Ecuaciones máxima y mínima para RCS.

Analizadas las ecuaciones se determina que existe una correlación entre la RCS y la resistividad de la roca. La relación entre las dos magnitudes presentan unos R² de 0.63 y 0.83 para la máxima y mínima respectivamente.

V. CONCLUSIONES

Los ensayos planteados en este estudio, permiten conocer la resistencia a la compresión simple de la roca (RCS) de una manera económica y en poco tiempo, lo cual brinda cierta ventaja con respecto a los ensayos que se usan generalmente para conocer la resistencia a compresión de las rocas en laboratorio.

Como se puede observar en las figuras 5, 6 y 7 las rectas para el sitio de estudio, presentan una variación máxima y mínima que permiten determinar los valores de la RCS ágilmente.

Podemos registrar, que rocas de similares características en resistencia, presentan una resistividad que estará contenida dentro de las rectas propuestas, lo que nos permite establecer que solamente cuando la resistividad no esté dentro de la mencionada área, se envíen nuevamente muestras de roca a laboratorio.

Una vez evaluados los resultados, que se han obtenido en las experiencias llevadas a cabo, reconocemos el empleo del procedimiento para la determinación en campo de la resistencia a la compresión simple (RCS) de las rocas y caracterizarla por medio de la resistividad eléctrica en mina.

Este trabajo presenta una metodología de trabajo simple y sencillo, para la caracterización de la roca en un proyecto minero, por lo que su puesta a punto debe profundizarse con un mayor número de muestras de diferentes tipos de rocas y de esta forma el proceso sea avalado.

REFERENCIAS

- [1] F. Blyth, M. Freitas, Geología para Ingenieros. México D. F. México: 2003.
- [2] M. Iriondo, Introducción a la Geología. Córdoba. Argentina: 2006.
- [3] D. Ragan, Geología Estructural. Barcelona. España: 1980.
- [4] D. Burbano, T. García, «Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras)», *Fi*, vol. 1, n.º 2, pp. 13 - 16, dic. 2016.
- [5] P. Feijoo, C. Flores, B. Feijoo, «El concepto de Área Granulométrica y su relación con la Resistencia a la Compresión Simple de Rocas», *IESTEC*, pp. 52-56, 2019.
- [6] C. Delgado, Evaluación de un cambio Tecnológico para el Procesamiento de Minerales de Alta Dureza. Tesis. Universidad de Chile: 2013.
- [7] M. Galván, Mecánica de Rocas, Correlación entre la Resistencia a Carga Puntual y la Resistencia a Compresión Simple. Cali. Colombia: 2015.
- [8] Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carreteras. México D. F., México: 2016.
- [9] M. Galván, I. Restrepo, «Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas». *DYNA*, [S.l.], v. 83, n. 198, pp. 9-15, sep. 2016.
- [10] D. Parasnis, Geofísica Minera. Madrid. España: Paraninfo, 1971.
- [11] V. Lakubovskii, L. Liajov, Exploración Eléctrica. Moscú. Rusia: Nedra, 1980.
- [12] L. Graham, G. Carrillo, Propiedades geofísicas de rocas y suelos calcáreos. Mediciones de laboratorio en especímenes pequeños. Universidad Autónoma de Yucatán. México: 2002.
- [13] E. Díaz, Implementación del código Zondres 2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D. Universidad Nacional Autónoma de México, México: 2010.
- [14] M. Solana, Comparación de Técnicas Geofísicas para determinación de Suelos Agrícolas. Universidad Politécnica de Madrid. España: 2014.
- [15] N. Pérez, P. Garnica, V. Hugo, N. Landaverde, Evaluación de la resistividad en campo y en laboratorio y su aplicación a pavimentos. Secretaria de Comunicaciones y Transporte, México: 2010.
- [16] P. Feijoo, M. Román, «Correlación entre la deformación y la resistencia a la compresión en rocas: un diagnóstico de campo». *Universidad Ciencia y Tecnología*, Volumen 23, Número 91, pp. 14, 2019.

RESUMEN CURRICULAR



Patricio Feijoo C. Ingeniero en Minas (1997), graduado en 1991 inicialmente como Tecnólogo Minero en la Universidad del Azuay en Cuenca (Ecuador), con estudios y pasantías adicionales en Bolivia, Brasil, España, Australia en áreas de la geología, geofísica y desarrollo de actividades de explotación de minas. En lo referente a la experiencia profesional ha estado vinculado al asesoramiento minero al estado ecuatoriano desde el año 2000 hasta el año 2008 y luego en empresas privadas nacionales e internacionales. Desde el año 1991 se encuentra vinculado también a la docencia en la Universidad del Azuay, en la cual hasta la fecha, mantiene el cargo de Profesor Titular e Investigador y permanentemente se ha dedicado a la generación e incentivos para la industria minera local y nacional, manteniendo un constante contacto con las instituciones y empresas mineras en Ecuador.



Jhenifer Padrón S. Nació en Ecuador, Cañar en 1996. Recibió su título de Bachiller en Ciencias Generales especialidad Físico Matemático en el año 2013. Actualmente cursa sus estudios en la Universidad del Azuay en la carrera de Ingeniería en Minas.