



La enseñanza de la física aplicada desde la perspectiva de la Ingeniería de Minas

Céspedes Guevara Nelly Yolanda^a, Ruíz Ortiz Andrés Felipe^b, Valera Maya Juliám Andrés^c

^aDocente Investigador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina

^bEstudiante Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina

^cEstudiante Ingeniería de Minas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Fundación Universitaria del Área Andina

ARTICLE INFO

Received: 15 September 2020

Accepted: 20 October 2020

Available on-line: 30 November 2020

Keywords: *Enseñanza de la física, estructuras geomecánicas, fenómenos físicos*

E-mail addresses:

ncespedes@areandina.edu.co

aruiz58@estudiantes.areandina.edu.co

jvalera3@estudiantes.areandina.edu.co

ISSN 2007-9847

© 2020 Institute of Science Education.
All rights reserved

ABSTRACT

Esta reflexión surge como parte del proceso de investigación en el proyecto de estudio geomecánico de las estructuras de minas de carbón, una forma de aplicar la mecánica en contexto. Los procesos de caracterización de los fenómenos naturales permiten describir las condiciones de los fenómenos físicos, por lo tanto, una clasificación de los macizos rocosos proporciona una noción de la estructura que se observa, pero no realiza una evaluación total de las condiciones mecánicas de las rocas a partir de la medición de esfuerzo, tensión y resistencia. De acuerdo con Suárez (2016) se puede conocer el efecto del esfuerzo y la tensión del material rocoso a través de modelaciones numéricas mecánicas e hidráulicas, pero no se tiene establecido un modelo matemático que dé cuenta la deformación de la estructura de la roca. Este aspecto proporciona el campo de trabajo para el proyecto de investigación ya que solamente se ha realizado un abordaje desde la caracterización geológica en el área de mecánica de rocas. Desde esta perspectiva, se pueden establecer índices de caracterización que a través de la medición se pueden identificar los métodos de excavación, estabilidad de taludes y uso de la roca como material a través de los parámetros básicos de medida. En este orden se hace urgente para la industria de la minería encontrar un modelo teórico que le aporte mayor precisión a los parámetros mecánicos; de resistencia, deformación y esfuerzos en mina subterránea. El enfoque metodológico se fundamenta en el diseño e implementación de un modelo que permita caracterizar físicamente las estructuras rocosas a través de un modelo predictivo con un grado de confiabilidad que proporciona una identificación real de las estructuras analizadas. Desde el punto de vista metodológico, se abordó la investigación a través de una metodología mixta en donde se emplea la metodología cualitativa en la caracterización de las estructuras rocosas y la metodología cuantitativa en el análisis teórico de las mediciones realizadas.

This reflection arises as part of the research process in the project of geomechanical study of coal mine structures, a way of applying mechanics in context. The processes of characterization of natural phenomena allow describing the conditions of physical phenomena, therefore, a classification of rock masses provides an idea of the structure that is observed, but does not make a total evaluation of the mechanical conditions of the rocks from the measurement of effort, tension and resistance. According to Suárez (2016), the effect of the stress and tension of the rocky material can be known through mechanical and hydraulic numerical modeling, but a mathematical model that accounts for the deformation of the rock structure has not been established. This aspect provides the field of work for the research project since only one approach has been made from the geological characterization in the area of rock mechanics. From this perspective, characterization indices can be established that, through measurement, can identify excavation methods, slope stability and use of rock as a material through basic measurement parameters. In this order, it is urgent for the mining industry to find a theoretical model that provides greater precision to the mechanical parameters; resistance, deformation and efforts in underground mine. The methodological approach is based on the design and implementation of a model that allows to physically characterize the rocky structures through a predictive model with a degree of reliability that provides a real identification of the analyzed structures. From the

methodological point of view, the research was approached through a mixed methodology where qualitative methodology is used in the characterization of rock structures and quantitative methodology in the theoretical analysis of the measurements made.

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de caracterización de los fenómenos naturales permiten describir las condiciones de los fenómenos físicos, por lo tanto, una clasificación de los macizos rocosos proporciona una noción de la estructura que se observa, pero no realiza una evaluación total de las condiciones mecánicas de las rocas a partir de la medición de esfuerzo, tensión y resistencia. En donde, se puede observar que la aplicación de conceptos básicos de la física, particularmente de mecánica, evidencian la apropiación de las diferentes expresiones matemáticas y la explicación de fenómenos que son vitales en los procesos de modelación en Ingeniería de Minas.

El proyecto de investigación realizado sobre el análisis geomecánico de las estructuras rocosas, permite emplear escenarios del contexto de la física como parte del apoyo conceptual para la explicación de situaciones mecánicas que conducen a la comprensión de las estructuras de minas de carbón muy características del macizo colombiano.

En este contexto, se pueden plantear situaciones de acercamiento al conocimiento, en donde los estudiantes proyecten soluciones a cuestionamientos sobre la necesidad de esquematizar las bases de un modelo inicial que los ubique dentro de un modelo aplicado de una situación particular, que requiera de conceptos ya conocidos en física como es el caso del concepto de fuerza.

De acuerdo con Pérez y Setién (2008) la interdisciplinariedad implica conexiones entre las disciplinas, tal es el caso, de los procesos que se han llevado a cabo en el análisis de estructuras rocosas, desde los conceptos físicos de fuerza y tensión. De acuerdo con Suárez (2016) se puede conocer el efecto del esfuerzo y la tensión del material rocoso a través de modelaciones numéricas mecánicas e hidráulicas, pero no se tiene establecido un modelo matemático que dé cuenta la deformación de la estructura de la roca. Este aspecto proporciona el campo de trabajo para el proyecto de investigación ya que solamente se ha realizado un abordaje desde la caracterización geológica en el área de mecánica de rocas, así que “El objetivo de caracterizar el macizo rocoso es finalmente de armar un modelo geológico detallado y capaz de ser asimilado por el raciocinio humano” (p. 25).

Sin embargo, esta caracterización puede ser tan extensa y detallada como se logre, lo cual es necesario que el modelo geológico tenga especificado los límites de aplicación. Estos límites se definen tras reconocer las amenazas de los procesos geológicos que actuarán sobre una obra civil segura y económicamente efectiva que indujo todo el proceso de estudio y descripción; cerrando de este modo el círculo de actividades necesarias que justifican todo el estudio del macizo rocoso” (p. 123). Desde esta perspectiva, se pueden establecer índices de caracterización que a través de la medición se pueden identificar los métodos de excavación, estabilidad de taludes y uso de la roca como material a través de los parámetros básicos de medida. En este orden se hace urgente para la industria de la minería encontrar un modelo teórico que le aporte mayor precisión a los parámetros mecánicos; de resistencia, deformación y esfuerzos en mina subterránea.

Los esquemas desarrollados en el proyecto de investigación responden a los antecedentes de las diferentes investigaciones que han estudiado el tema, tal es el caso de un estudio geomecánico realizado en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, del programa de Ingeniería Geológica, en el cual se pudo proponer un plan de caracterización del macizo a una escala de detalle según los aspectos geológicos y geotécnicos presentes en la zona de trabajo, esto hace que un estudio geomecánico garantice la estabilidad de las excavaciones, así como también la seguridad de los trabajadores, además prolonga la vida útil del proyecto al optimizar los recursos.

El método generado para realizar la caracterización del macizo rocoso está dado por Bieniawski (1973) y Barton, Lien Lunde (1974), (Blanco, 1998. González de Vallejo, 1998. López Jimeno, 1998. Moreno, 1998) propone el índice RMR con el cual, a partir de la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa, del índice RQD (Rock Quality Designation). Permittiéndonos así caracterizar el macizo rocoso y calcular sostenimientos en labores subterráneas.

Para poder determinar la calidad del macizo rocoso, se divide en zonas delimitadas por planos de discontinuidades geológicas, comprendiendo así el conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas de la región. Este índice evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión simple
- RQD
- Separación de las discontinuidades

- Estado de las discontinuidades
 1. Longitud
 2. Abertura
 3. Rugosidad
 4. Relleno
 5. Alteración
- Presencia de agua
- Orientación de las discontinuidades en el túnel
- Corrección por orientación de las discontinuidades

Gracias a los parámetros de resultados que arroja un análisis de caracterización geomecánica, mencionados anteriormente, se puede determinar ciertas características relevantes en un macizo rocoso.

Estas características son:

- Clase: Esta característica ayuda a categorizar el macizo rocoso, va de la uno (“I”) a la cinco (“V”).
- Calidad: Determina en palabras concisas el tipo de calidad del macizo, va desde la “*muy buena*”, hasta la “*muy mala*”.
- Cohesión: Esta característica interna del macizo rocoso, nos puede ayudar a determinar la competencia del mismo, esta cohesión va desde “*mayor que 4kp/cm²*”, hasta “*menor que 1kp/cm²*”.
- Ángulo de rozamiento: Este ángulo de rozamiento interno de la roca está determinado desde “*mayor que 45°*” a “*menor que 15°*”.
- Tiempo de autoaporte y longitud sin sostener: Esta característica determina cuánto tiempo el macizo puede estar sin sostenimiento, así como cuanta distancia puede estar el sostenimiento entre sí, en una labor, siendo de “*10 años*” a “*30 minutos*”, para lo primero y de “*15 m*” a “*1 m*”, para lo segundo.

II. METODOLOGÍA (ANDRÉS – YOLANDA)

El enfoque metodológico se fundamenta en el diseño e implementación de un modelo que permita caracterizar físicamente las estructuras rocosas a través de un modelo predictivo con un grado de confiabilidad que proporciona una identificación real de las estructuras analizadas. Desde el punto de vista metodológico, se abordó la investigación a través de una metodología mixta en donde se emplea la metodología cualitativa en la caracterización de las estructuras rocosas y la metodología cuantitativa en el análisis teórico de las mediciones realizadas.

La metodología cualitativa abordada en la investigación se realizó a través de una pesquisa bibliográfica que permitiera identificar los escenarios de contexto desde la enseñanza de la física aplicada y la geomecánica que vincula los esquemas conceptuales necesarios para dar cuenta de los escenarios de construcción de conocimiento desde la física aplicada.

Desde esta perspectiva, lo cualitativo permite establecer conexiones, destacando las necesidades de interpretación de los datos obtenidos a partir de las relaciones entre los resultados de los diseños de trabajo, con el fin de buscar unos resultados precisos que visualizan los resultados obtenidos en el modelo teórico planteado.

Los procesos de investigación se encuentran ligados al objeto de estudio; en el caso de la construcción de conocimiento en la física aplicada, particularmente en los aspectos de medida de calidad del macizo rocoso, es de vital importancia identificar que la metodología cualitativa determina las relaciones existentes entre los escenarios teóricos y las aplicaciones de la medición realizada en los aspectos teóricos trabajados en el proyecto.

En este contexto, la investigación cualitativa permite trabajar con los datos obtenidos en el proceso de recolección de información, en donde cobra una gran importancia la observación del fenómeno a estudiar, ya que, en el trabajo con los aspectos cualitativos existe la posibilidad de caracterizar los elementos analizados en el fenómeno estudiado.

En minería la clasificación geotécnica de los macizos rocosos se hace con el fin de definir y garantizar la viabilidad y estabilidad de la construcción del proyecto. Con el fin de estudiar el comportamiento de los macizos rocosos autores como Bieniawski (RMR), Barton (Índice Q) y Hoek y Brown (Índice GSI), clasificaron parámetros geomecánicos

in situ cualitativos con el fin de convertirlos a cuantitativos para categorizar y evaluar las estructuras. En el caso del RMR de Bieniawski se evalúan 6 parámetros que son: Resistencia a la compresión simple (uniaxial) en roca intacta, Índice de calidad de la roca RQD, Espaciamiento de las discontinuidades (fracturas que presente el macizo en estudio), Estado de las discontinuidades, Condición de aguas subterráneas, Orientación de las discontinuidades.

Bieniawski desarrolló el RMR en los años 70 siendo reformado en numerosas ocasiones y siendo la actual por el momento la de 1989, este método se basa en la suma de una serie de factores o parámetros del macizo rocoso para su clasificación geomecánica. La suma de esta caracterización corresponde a valores de cada uno de los seis parámetros y oscila entre 0 y 100, y que es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca, distinguiéndose en cinco tipos o clases de roca según el valor del RMR:

- **Clase I:** RMR > 80 roca muy buena
- **Clase II:** 80 < RMR < 60 roca buena
- **Clase III:** 60 < RMR < 40 roca media
- **Clase IV:** 40 < RMR < 20 roca mala
- **Clase V:** RMR < 20 roca muy mala

Barton con su Índice Q, se convirtió en el pilar de la clasificación y caracterización geomecánicas en túneles clasificando la calidad del macizo en 3 parámetros principales: Tamaño del bloque (RQD/J_n) haciendo referencia al índice de calidad de la roca y el número de familias de diaclasas (fracturas) presentes en el bloque, Esfuerzo cortante inter-bloque (J_r/J_a) representa las interacciones entre rugosidad y alteración presente en la roca, Esfuerzo activo (J_w/SRF) consiste en la relación entre la presión de agua presente en el macizo y el esfuerzo por pérdida de carga por la excavación.

En 1964, Deere propuso un índice de calidad basado en la recuperación de núcleos de perforación comúnmente llamado Rock Quality Designation representando el RQD, siendo definido por el porcentaje representado por la sumatoria de núcleos de perforación en longitudes enteras ≥ 100 mm dividida entre la longitud total de la perforación.

$$RQD = \frac{\text{Núcleos} \geq 100 \text{ mm}}{\text{Largo de la perforación}} * 100 \quad (1)$$

TABLA I. Calidad de la roca por recuperación de núcleo.

RQD	Calidad de la roca
< 25 %	Muy Mala
25 - 50 %	Mala
50 - 75 %	Regular
75 - 90 %	Buena
90 - 100 %	Excelente

Fuente: Elaboración propia

Cuando no se dispone de núcleos de perforación es posible estimar el RQD por el número de fisuras contenidas, en un bloque de 1 metro cúbico, realizando una suma de cada sistema de juntas sin arcilla usando este parámetro:

$$RQD = 115 - 3.3(Jv), \quad (2)$$

donde Jv : Cantidad total de juntas por metro cúbico.

III. RESULTADOS

El análisis realizado mediante el RMR de Bieniawski y el Índice Q de Barton, arrojan calidades de macizos rocosos bajas lo cual indica que están siendo afectadas por factores exógenos o que presentan un alto diaclasamiento haciendo que se debiliten y tornándose necesario aplicar medidas de sostenimiento que los autores establecen.

- Estación geomecánica 1: Avance a sección completa de 1 a 1.5 metros con un soporte a 20 m, con anclaje local en las bóvedas de 2 a 3 metros de largo y espaciado a 2 metros con malla electrosoldada ocasional y 5 centímetros de concreto lanzado para impermeabilizar.
- El Q de Barton nos da un parámetro de sostenimiento con pernos a distancia de 1.5 a 2 metros y con un concreto lanzado de espesor de 40 milímetros, teniendo una calidad de roca regular.
- Estación geomecánica 2 y 3: Avance y desabombe de 1.5 a 3 metros con sostenimiento completo, anclado sistemático en bóvedas con tablas de 3 metros con espaciado entre ellas de 1.5 a 2 metros con malla de techo y de 5 a 10 centímetros de concreto lanzado para impermeabilización. Sostenimiento pernado con espaciado de 1.3 a 1.5 metros, con longitud de 1.5 a 2.4 metros y 40 milímetros de concreto lanzado, con una calidad de roca mala.

Estos estándares establecidos permiten estimar sostenimientos para excavaciones subterráneas, ampliando las posibilidades dependiendo del macizo que se tenga en el avance de una mina. Tener en cuenta que estos factores no son definitivos y siempre están expuestos a cambios por afectaciones estructurales que no pudieron ser identificadas o por infiltraciones de aguas subterráneas, lo que generaría cambios de sostenimiento y de planeamiento.

En este sentido, el aporte al conocimiento que se genera en esta investigación se encuentra centrado desde la conceptualización de los escenarios de la construcción de modelos, ya que de acuerdo con Hurtado (2006) la formulación de un modelo en ingeniería comprende un análisis apropiado de los datos que permita explicar el comportamiento de la información obtenida y a su vez evidencie los elementos de conocimiento propios de la disciplina. El modelo teórico que se evidencia en el transcurso de la investigación proporciona una metodología de medición de la calidad y sus índices RMR que muestran la compresión y la resistencia del macizo rocoso a diferentes factores exógenos y endógenos de la estructura en el macizo.

El cálculo que permite establecer la calidad de la roca mediante el índice de calidad de Bieniawski RMR (Rock Mass Ratio), se realiza a partir de valores establecidos según las características geomecánicas que presente la estructura, en donde cada factor es valorado y la suma de todos los factores da como resultado el cálculo RMR básico.

A continuación, en la tabla 2 se presentan los valores de calidad del macizo rocoso teniendo en cuenta el parámetro de medición y la estimación de dichos valores, partiendo de valores ya preestablecidos por el autor que son tomados visualmente in situ.

TABLA II. Parámetro y estimación de la calidad del macizo rocoso.

PARÁMETRO			ESTIMACIÓN Y ESCALA DE VALORES						
1	Resistencia de la roca sana	Carga Puntual Mpa	>10 100	4-10 40-100	2-4 20-40	1-2 10-20	Únicamente compresión simple		
		Compr Simple Mpa	>250 >2500	100-250 1000-2500	50-100 500-1000	25-50 250-500	5-25	1-5	<1
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD %	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			
	Valoración	20	15	10	8	5			
3	Separación de discontinuidades	>2m	0.6-2m	0.2-0.6m	0.06-0.2m	<0.06m			
	Valoración	20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades	Muy rugosa Discontinuas Sin Separaciones Borde sano y duro	Ligeramente rugosas Abertura <1 mm Bordes duros	Ligeramente rugosas Abertura <1 mm Bordes blandos	Espejo de falla o con relleno <5mm o abiertas	Relleno blando >5 mm Abertura >5 mm Diaclasa continua			
	Valoración	30	25	20	10	0			
5	Presencia de agua	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	<10 L/min	10-25L/min	25-125 L/min	>125L/min		
		Relación entre la presión de agua	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración	15	10	7	4	0			
6	Dirección y buzamiento	Muy favorable	Favorable	Medio o regular	Desfavorable	Muy favorable			

Valoración	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores según la tabla, se procede a realizar una sumatoria de todos los factores seleccionados para así obtener la calidad de la roca a través de la metodología de medición según Bieniawski.

IV. CONCLUSIONES

Como se pudo observar en las caracterizaciones de las tres estaciones asignadas para análisis de muestras, y con base en los resultados de las mismas, a mayor profundidad de las estaciones el macizo es más frágil, esto, como se mencionó en el análisis de resultados, se debe a los agentes exógenos de la zona en donde se encuentra la mina. Generalmente estos “agentes exógenos”, modifican la estructura física de la roca, haciéndola más vulnerable, pero en este análisis de caracterización pasa lo contrario, ya que la estación geomecánica 1, siendo la que se encuentra a menor profundidad y por consiguiente más expuesta a todo lo que la pueda afectar a nivel ambiental, geológicamente hablando es la parte más competente del macizo.

Teniendo en mente todo lo anterior, no está de más decir que cualquier proyecto minero que se realice en esta zona del país, debe tener un sostenimiento bastante robusto y con una durabilidad amplia, además de que es recomendable realizar un nuevo análisis de caracterización geomecánica, cada cierto tiempo, ya que el macizo al ser poco competente puede hacer que el sostenimiento que se considere sea el apropiado, en unos años necesite de algún tipo de refuerzo o reemplazo.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Universitaria del Área Andina, que nos permitió presentarnos a convocatoria de investigación del año 2020, y al programa de pre-grado de Ingeniería de Minas que nos brindó la información necesaria para la ejecución de la investigación.

REFERENCIAS

Becerra y Castillo (2017), *Estudio geomecánico para las minas Esperanza y Zarzal pertenecientes a la concesión minera fju-151, municipio de Gameza, Boyacá.*

Carrillo, Z (2018). *Introducción a la Mecánica de Rocas y sus aplicaciones en la industria del petróleo*. Editorial UIS Duarte y Monroy.

Exploración Gas Metano Asociado Al Carbón. (2012). *Área Checua, Lenguazaque*. Sector Gmac Boquerón De Tausa-La Pluma, Cucunubá.

Figueroa M, Mendoza N, Ríos S. (2014). *Characterization and testing of rock aggregates of the Santa Marta Batholith, (Colombia)*. Revista ION, 27(2), 87-104. Retrieved January 30, 2020, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-100X2014000200008&lng=en&tlng=en.
Fuquen y Osorno.(2005). *Geología de la plancha 190 Chiquinquirá*. Ingeominas.

Fuentes H, Carvajal J, Calderón, Z. (2011). *Estimación de propiedades mecánicas de roca utilizando inteligencia artificial*. *Ingeniería y Ciencia*. 7(14), 83-103. Retrieved January 30, 2020, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-91652011000200005&lng=en&tlng=es.

Gil, D. (1996). *New trends in science education*. International Journal of Science Education, 18(8), 889 – 901.
Universitaria Vol. 7(5), 23-32 (2014).

Guba, E , Lincoln Y. (1994). *Competing paradigms in qualitative research*. In N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), Handbook of qualitative research. pp. 105-11.

Ingeominas Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2010). *El Carbón muestreo, análisis y clasificación de recursos y reservas*. 2da Edición. Recuperado de <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/El-carbon-Colombiano-muestreo-analisis.PDF> Galvis Carreño, Laura Viviana, Ochoa, Cesar Augusto, Arguello.

Ley-Paredes, Victor José, Ríos-Soberanis, Carlos Rolando, Pérez-Pacheco, Emilio, Vinajera-Reyna, Carlos Emilio, Wakayama, Shuichi, & Sakai, Takenobu. (2019). *Experimental studies on the mechanical behavior of Mayan archeological rocks*. DYNA, 86(208). 227-233. <https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73581>.

LA FALLA DE LA ROCA. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (26), 87-107. Retrieved January 30, 2020, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302009000200009&lng=en&tlng=es.

Marco Nacional de Cualificaciones de Colombia. (2017). *Sector Minero minerales, oro y carbón*. 1ra Edición. Recuperado de https://www.mineduccion.gov.co/1759/articles-362826_recurso.pdf N.G.W., COOK. (2009).

Pérez, N., Setién, E. (2008). *La interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad en las ciencias*. Una mirada a la teoría bibliológico-informativa. *Acimed*, 18 – 4. Disponible en: http://bvs.sld.cu/revistas/aci/vol18_4_08/aci31008.htm.

Suárez, L (2016). *Mecánica del macizo rocoso*. Medellín, Primera Edición. Recuperado en: http://geomecanica.org/publications/files/mono_files/enElaboracion/rockMassBook.pdf.

Ulloa Y Rodríguez. FR-II-GPI-Ver 3 formato descargado desde SIGIIP Página 13 de 13 (1979). *Geología De Las Planchas 170*. Vélez, 190 Chiquinquirá, Colombia. Servicio Geológico Colombiano.