



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO**

**PARA EL ADECUADO SOSTENIMIENTO DE LA MINA**

**POMPERIA - PUNO**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. II LENIN NIETO CCALLE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO, PERÚ**

**2019**



## DEDICATORIA

*A mis padres Pascual Nieto y Hilda Ccalle.*

*A mis hermanos Marx, Alexis y Mery.*

*A todos ustedes es una gran alegría y un privilegio dedicarles este esfuerzo que ha de ser un logro cumplido, con todo un gran esfuerzo poder terminarlo y me llena de satisfacción personal, profesional además es una muestra de todo lo aprendido durante estos años el cual quedara evidenciado para futuras ocasiones con mucho cariño y amor para ustedes.*

***II Lenin Nieto Ccalle***



## AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por permitirme despertar cada día, a mis padres Pascual Nieto y Hilda Ccalle quienes me apoyaron enormemente durante estos años y es gracias a ellos que me guían y aconsejan, a mis hermanos Marx, Alexis y Mery por el apoyo incondicional.

A los docentes de la Facultad de ingeniería de minas y a los docentes de la Escuela de Ingeniería Geológica que me impartieron sus sabios conocimientos técnicos y por haber compartido sus experiencias que son una fortaleza para que uno pueda superarse.

A la Universidad Nacional del Altiplano por ser mi alma mater y sus aulas testigo del desarrollo y aprendizaje durante todos estos años de mi formación profesional.

**II Lenin Nieto Ccalle**



## ÍNDICE GENERAL

**DEDICATORIA**

**AGRADECIMIENTOS**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

<b>RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>II. MÉTODOS Y MATERIALES .....</b>	<b>12</b>
<b>III. RESULTADOS.....</b>	<b>13</b>
<b>DISCUSIONES .....</b>	<b>18</b>
<b>IV. CONCLUSIONES .....</b>	<b>19</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>19</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>20</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>20</b>

**Área** : Ingeniería de minas.

**Tema** : Mecánica de rocas, geomecánica y geotecnia.

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 07 de noviembre del 2019.



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.-</b>	Curvas de span crítico, Pakalnis (2009) .....	13
<b>Figura 2.-</b>	Gráfico para el sistema de sostenimiento del sistema Q .....	13
<b>Figura 3.-</b>	Histograma de valores de RMR que presenta el macizo rocoso de la mina Pomperia.....	14
<b>Figura 4.-</b>	Histograma de los valores de RQD que presenta el macizo rocoso de la mina Pomperia.....	15
<b>Figura 5.-</b>	Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°1 ubicada a 15 m de la bocamina. ....	15
<b>Figura 6.-</b>	Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°2 ubicada a 25 m de la bocamina. ....	15
<b>Figura 7.-</b>	Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°3 ubicada a 55 m de la bocamina. ....	15
<b>Figura 8.-</b>	Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°4 ubicada a 65 m de la bocamina. ....	16
<b>Figura 9.-</b>	Tipo de sostenimiento, excavación N° 1 .....	16
<b>Figura 10.-</b>	Tipo de sostenimiento, excavación N° 2 .....	16
<b>Figura 11.-</b>	Tipo de sostenimiento, excavación N° 3 .....	17
<b>Figura 12.-</b>	Tipo de sostenimiento, excavación N° 4 .....	17
<b>Figura 13.-</b>	Área de perforación y voladura de rocas, ancho máximo de 10 m interior mina .....	17
<b>Figura 14.-</b>	Área de mecánica de rocas, ancho de excavación de 5 a 7 m, interior mina .....	17
<b>Figura 15.-</b>	Área de rescate minero, ancho máximo de excavación entre 0 a 5 m, interior mina .....	18
<b>Figura 16.-</b>	Área de maquinaria minera, ancho máximo de excavación 0 a 5 m, interior mina .....	18



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.-</b> Correlaciones de RMR y Q .....	13
<b>Tabla 2.-</b> Contenido de humedad de la roca andesita .....	13
<b>Tabla 3.-</b> Ensayo de resistencia a la compresión Uniaxial de la roca .....	14
<b>Tabla 4.-</b> Resumen de RMR por estaciones de mapeo geomecánico .....	14
<b>Tabla 5.-</b> Valores de RQD para las 17 progresivas de la cortada principal .....	15
<b>Tabla 6.-</b> Valores de índice Q de Barton.....	16
<b>Tabla 7.-</b> Dimensión equivalente .....	16
<b>Tabla 8.-</b> Tipo de sostenimiento según Q de Barton.....	17



## ÍNDICE DE ACRONIMOS

- RQD** : Designación de la calidad de roca (Rock Quality Designation).
- RMR**: Valoración del macizo rocoso (Rock Mass Rating).
- GSI** : Índice de resistencia geológica (Geological Strength Index).
- UCS** : Resistencia a la compresión uniaxial (Uniaxial Compressive Strength).
- Mpa** : Mega Pascales.
- $m_b$**  : Constante de Hoek-Brown del macizo rocoso.
- $m_i$**  : Constante de Hoek-Brown de la roca intacta.
- s, a** : Constantes que dependen de las características del macizo rocoso
- $\sigma_{cm}$**  : Resistencia a la compresión simple del macizo rocoso.
- $\sigma_{et}$**  : Resistencia a la tracción del macizo rocoso.
- $\sigma_c$**  : Resistencia a la compresión simple de la roca intacta.
- $\sigma_t$**  : Resistencia a la tracción de la roca intacta.
- c** : Cohesión
- $\phi$**  : Ángulo de fricción.



# **Caracterización geomecánica del macizo rocoso para el adecuado sostenimiento de la Mina Pomperia - Puno**

## **Geomechanical characterization of the rock mass to the adequate support of the Pomperia Mine Puno**

II Lenin, Nieto-Ccalle

Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano  
Puno-Peru.

II.lenin.engineer@gmail.com 971539663

### **RESUMEN**

El presente estudio se realizó en la cortada principal de la mina Pomperia, políticamente ubicada en el distrito de Puno, provincia y departamento de Puno, una antigua mina que fue explotada por los españoles en los años 60 y la cual se encuentra como posesión de la Universidad Nacional del Altiplano la cual sufrió un derrumbe a los 70 ml por las condiciones en las que se encuentra el macizo rocoso por eso a partir del 2012 al 2018 se determinó el peligro que pudiera ocurrir con el desprendimiento y colapso en zonas donde la roca se encuentra con control estructural. El objetivo de la investigación es determinar el estado del macizo rocoso y como afecta al sostenimiento a lo largo de la cortada, utilizando la clasificación geomecánica para realizar comparaciones de las metodologías de diseño de sostenimiento de túneles, siguiendo un diseño metodológico descriptivo cuantitativo. A través de la caracterización geomecánica se logró cumplir con el objetivo de conocer el estado del sostenimiento con la caracterización donde la cortada tiene un tipo de roca III además se realizó 17 estaciones las cuales tendrán un mayor estudio para proyectos futuros teniendo como resultado las zonas de estabilidad en las progresivas 3, 6, 12 y 16 con un valor de RMR de Bieniawski de 63 (buena), 55 (regular), 51 (regular) y 50 (regular) que se encuentran en la categoría de tipo de roca III, y teniendo como tipo de sostenimiento, empernado sistemático con espaciamiento de 2.8m, empernado puntual, empernado sistemático con espaciamiento de 1.5m y, empernado sistemático con espaciamiento de 1.5m, con esta investigación se estará aportando en la prevención de accidentes.

**Palabras Clave:** Clasificación geomecánica; estabilidad; Resistencia; Roca Intacta.



## ABSTRACT

The research was conducted in the main cut of the Pomperia mine, politically located in the district of Puno, province and department of Puno, an old mine that was exploited by the Spaniards in the 60s and which is in possession of the University Altiplano National which suffered a collapse at 70 ml due to the conditions in which the rock mass is found, from 2012 to 2018, the danger that could occur with the detachment and collapse in areas where the rock is found was determined with structural control. The objective of the investigation is to determine the state of the rock mass and how it affects the support along the cut, using the geomechanical classification to make comparisons of the methodologies of tunnel support design, following a quantitative descriptive methodological design. Through the geomechanical characterization it was possible to meet the objective of knowing the state of the support with the characterization where the cut has a type of rock III in addition 17 stations were carried out which will have a greater study for future projects resulting in the areas of stability in progressive 3, 6, 12 and 16 with a RMR value of Bieniawski of 63 (good), 55 (regular), 51 (regular) and 50 (regular) that are in the category of rock type III, and having as a type of support, systematic bolting with 2.8m spacing, punctual bolting, systematic bolting with 1.5m spacing, systematic bolting with 1.5m spacing, this investigation will be contributing to accident prevention.

**Keywords:** Geomechanical classification; stability; Resistance; Intact Rock.



## I.- INTRODUCCIÓN

En la excavación subterránea de la mina Pompería es importante conocer las condiciones de cómo se encuentra el macizo rocoso y es por eso que durante la construcción de excavaciones subterráneas tanto en obras civiles y mineras, debido al proceso de excavación, el macizo rocoso circundante se perturba y se generan los esfuerzos inducidos; modificándose así sus propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso inicial. Por tanto, para contrarrestar este desequilibrio, se requiere instalar sostenimiento para tratar de llegar a un estado de esfuerzos de equilibrio. Para determinar el sostenimiento es necesario hacer un diseño detallado del mismo, que debe tener en cuenta: Las características del macizo rocoso, la influencia de esfuerzos naturales e inducidos, la dirección de la excavación con relación los rasgos estructurales, la forma y las dimensiones de la excavación; y la deformabilidad del macizo rocoso y de los elementos de sostenimiento a fin de que el diseño asegure la vida de servicio esperada de la excavación (Osinergmin, 2017).

Este diseño se basa fundamentalmente en tres tipos de métodos: analíticos o cinemáticos, empíricos y numéricos. Stille y Palmström (2003) aconsejan emplear en conjunto los tres métodos en forma paralela para excavaciones muy complejas y de grandes dimensiones, mientras que en excavaciones subterráneas poco profundas y de pequeñas dimensiones, los métodos empíricos y analíticos son aceptables. El diseño de sostenimiento por métodos empíricos se basa en relaciones entre sistemas de clasificación de macizo rocoso, casos históricos, y experiencias previas, de los cuales gran parte provienen

de las industrias civil y minera (Burgos, 2015). Las clasificaciones geomecánicas más empleadas son: RMR (Bieniawski, 1989), el índice Q (Barton *et al.*, 1980) y RMi (Palmström, 1996). Por otro lado, el sistema GSI (Hoek y Brown, 1980) que estima parámetros de resistencia última, permite obtener parámetros mecánicos con fines a ser aplicados en modelos numéricos o físicos, como los realizados en las Presas Las Tres Garagantas en China (Liu *et al.*, 2003a; 2003b).

La clasificación geomecánica RMR considera los siguientes parámetros: resistencia de la roca intacta, RQD, espaciamiento de discontinuidades, condición de las discontinuidades (persistencia, abertura, rugosidad, relleno y alteración), presencia de agua subterránea, ajuste por orientación de la principal familia de discontinuidades; y de acuerdo al índice Q considera: RQD (Palmström, 2005), número de familias de discontinuidades ( $J_n$ ), número de rugosidad ( $J_r$ ), número de alteración ( $J_a$ ), factor de reducción por presencia de agua ( $J_w$ ) y factor de reducción de esfuerzos (SRF). De acuerdo a la clasificación de índice de resistencia geológico (GSI) (Hoek y Brown, 1997), esta se puede determinar a partir del RMR de 1989 restando cinco unidades a este valor, para el cual el macizo rocoso debe considerarse completamente seco y el ajuste por orientación de las discontinuidades como muy favorable.

En base a la clasificación RMR del año 1989 se tienen dos propuestas de sostenimiento: Bieniawski (1989) recomienda pautas de excavación y sostenimiento para túneles en forma de herradura, considerando 5 categorías de macizos rocosos tal igual que la



clasificación geomecánica para los cuales sugiere la forma de realizar la excavación, el sostenimiento aplicable que pueden ser pernos de roca de 2 mm de diámetro completamente inyectados, shotcrete y cimbras; presentando limitaciones en cuanto al ancho de excavación de 10 m y otros factores; mientras Lawson y Bieniawski (2013) proponen formulaciones matemáticas basadas en tres intervalos de RMR y ancho de la excavación para determinar las características del sostenimiento (longitud y espaciamiento de pernos), la cual es la que más se adecua al presente trabajo debido a que está basada en varios casos de estudios de diseño de sostenimiento diseñados con métodos empíricos y modelados numéricamente. En tanto en base al índice Q de Barton se tienen también dos propuestas: Barton *et al.* (1980) proponen una formulación matemática para determinar la longitud de los pernos de anclaje ( $L = 2 + 0.15 B / ESR$ ), y el ábaco de Grimstad (2007), por la cual se determina la categoría de sostenimiento de una excavación en función al índice Q y el diámetro equivalente [relación entre el ancho y/o altura de la excavación sobre la relación de sostenimiento de la excavación (ESR)]. Indicando que el ábaco de la versión del 2007 considera 9 categorías de sostenimiento, mientras que el ábaco de 1989 considera solamente siete categorías; en tanto los valores de la relación de sostenimiento de la excavación (ESR) también han variado teniendo inicialmente 6 categorías a 7 categorías en la actualidad, lo que conlleva a que estas actualizaciones sean más precisas y más recomendables para poderlas usar en la presente investigación.

El diseño de sostenimiento mediante métodos numéricos es realizado típicamente mediante el análisis de esfuerzos alrededor de las excavaciones subterráneas, esto se puede realizar identificando las zonas de daño alrededor de las excavaciones (factor de seguridad  $< 1$ ) donde existe requerimiento de sostenimiento; estos modelos numéricos nos proporcionan un medio para investigar rápidamente diversos escenarios y condiciones que de otra manera no se pueden evaluar fácilmente. Para ello nos apoyaremos en el uso de la metodología continua de elementos finitos (Osinergmin, 2017). Estos requieren de técnicas computacionales más complejas, debido a que integran en su análisis una variedad más amplia de parámetros que influyen dentro del problema. En general la exactitud del modelo y su tiempo de modelación están relacionadas con el tipo de análisis y el código implementado. Existen diferentes tipos de análisis debido a que ningún método puede considerar todos los aspectos del comportamiento real de la roca. Se dividen en continuo y discontinuo, el primero consiste en dividir el medio en un número finito de subdominios (elementos) cuyo comportamiento se describe por descripciones matemáticas con un grado finito de grados de libertad, para determinar la influencia de diversos parámetros en el comportamiento de todo el sistema. Los discontinuos en cambio modelan la interacción entre sistemas de bloques o partículas, llegando a ser discretizados internamente para comportarse como dominios deformables o elásticos (Jing, 2003). Comúnmente los métodos numéricos más usados son: Los métodos continuos (elementos finitos, diferencias finitas y elementos de borde),



los métodos discontinuos (elementos discretos y redes de fracturas discretas) y los métodos híbridos (unión de los dos métodos anteriores).

## II.- MÉTODOS Y MATERIALES

Se realizó la caracterización geomecánica en la galería principal de la mina escuela Carolina, mediante 17 progresivas, desde la bocamina hasta el tope de la labor utilizando la metodología adecuada de acuerdo a la ISRM, de la misma manera de extrajo muestras de roca en 7 estaciones para poder evaluar la resistencia y propiedades físicas de la roca en el laboratorio de geotecnia y mecánica de rocas de la facultad de ingeniería de minas.

Para la extracción de muestras se seleccionaron progresivas más representativas a lo largo de los 84 m de la galería de la mina escuela carolina, se llevaron las muestras debidamente cubiertas al laboratorio para posteriormente realizar las pruebas de compresión simple y carga puntual, como también sus propiedades físicas, de acuerdo a las normas ASTM, los mismos que servirán para evaluar la resistencia del macizo rocoso y así ubicar zonas de estabilidad a lo largo de la galería principal.

Para el diseño de las cámaras subterráneas se llevo a cabo la caracterización geomecánica de la galería principal el cual se realizó de acuerdo a Bieniaswki de 1989, para poder calcular el RMR y así ubicar zonas de estabilidad donde se podrán diseñar las cámaras respectivas. Los equipos utilizados fueron la brújula marca Brunton para los datos estructurales, equipo de compresión simple marca ELE Internacional, para

calcular la resistencia de la matriz rocosa, martillo Schmidt marca Proeti también para la resistencia in situ de macizo rocoso, así también formatos y libretas de campo.

### 2.- Técnicas e instrumento de recolección de datos

#### 2.1.1. Técnicas

Se realizó un levantamiento litológico estructural de 2 puntos elegidos, mediante el método de detalle lineal, determinando las características de las discontinuidades, buzamiento (Dip) y la dirección de buzamiento (Dip Dir). Así como el relleno, persistencia, rugosidad, espaciamiento de discontinuidades y presencia de agua. Y se determinaron la calidad del macizo rocoso.

#### 2.1.2. Instrumentos

- Brújula, Wincha, y picota de geólogo.

#### 2.1.2. Metodología de recolección de datos

- **Trabajo de campo:** recoger la información y registro de la línea de base para ver los parámetros iniciales.

- **Trabajo de gabinete:** Consistente en la evaluación de datos, y la determinación los parámetros Geomecánicos RMR de Bieniawski e índice Q.

#### Diseño de span métodos de entrada

Según pakalnis (2002), La curva de span crítico para los techos de tajeos, tanto de estabilidad e inestabilidad, esto con el fin de agregar macizos rocosos de bajo RMR.

La estabilidad de la excavación ha sido clasificada en tres categorías, estable, potencialmente inestable e inestable, como se puede observar en el gráfico de span crítico, figura 1.

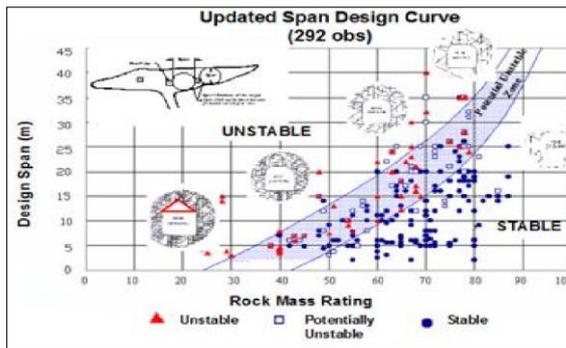


Figura 1.- Curvas de span crítico,  
Fuente: Pakalnis (2009)

### a) Dimensión equivalente.

Barton et al. (1974) propusieron la siguiente ecuación para estimar la dimensión equivalente ( $D_e$ ) de un auto sostenimiento o un túnel sin sostenimiento

$$D_e = 2.0(Q^{0.4}), \text{ metros.}$$

### b) Diseño de sostenimiento

El valor  $Q$  se relaciona con los requisitos de sostenimiento del túnel y con las dimensiones equivalentes de la excavación. La relación entre  $Q$  y la dimensión equivalente de una excavación determina las medidas de sostenimiento apropiadas, como se muestra en la figura 2 y Tabla 1.

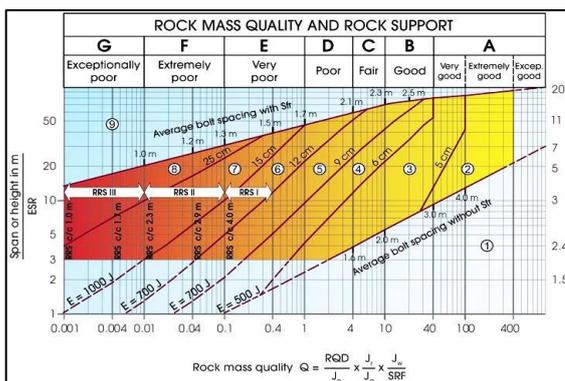


Figura 2.- Gráfico para el sistema de sostenimiento del sistema  $Q$

Fuente: Grimstad y Barton (1993).

## Correlaciones entre los índices RMR Y Q

La relación entre los índices de calidad RMR y  $Q$  puede expresarse en forma general como dependen del tipo y estado de la roca y de su condición in situ. Se han propuesto distintas correlaciones empíricas para RMR y  $Q$  como las presentadas en la Tabla 1, estas correlaciones tienen aplicación local.

Tabla 1.- Correlaciones de RMR y  $Q$

AUTOR	CORRELACIÓN RMR - Q
Barton, 1995	$RMR = 15 \log(Q) + 50$
Bieniawski, 1976, 1989	$RMR = 9 \ln(Q) + 44$
Rutledge y Preston, 1978	$RMR = 5.9 \ln(Q) + 43$
Moreno E. 1981	$RMR = 12.5 \ln(Q) + 55.2$
Abad et al 1983	$RMR = 10.53 \ln(Q) + 41.83$
Cameron Clark, Budavari 1981	$RMR = 5.4 \ln(Q) + 60.8$

Fuente: Gonzales de Vallejo (2004).

## III.- RESULTADOS

### Contenido de humedad

La cantidad de agua presente en la roca está ligado a la porosidad y composición mineralógica que presenta esta misma, las pruebas de laboratorio indican el siguiente contenido de agua, presente en la tabla N° 2.

Tabla 2.- Contenido de humedad de la roca andesita

UBICACIÓN: MINA ESCUELA CAROLINA					
MUESTRA: ROCA ANDESITA					
CONTENIDO DE HUMEDAD					
MUESTRA	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
Peso tara (g)	65.77	48.16	59.26	66.94	64.89
Peso muestra húmeda + tara (g)	310.3	324.04	319.50	325.60	288.11
Peso muestra seca + tara (g)	298.2	310.87	306.89	311.95	276.85
Peso agua (g)	12.17	13.17	12.61	13.65	11.26
Peso muestra húmeda (g)	244.6	275.88	260.24	258.66	223.22
Peso muestra seca (g)	232.4	262.71	247.63	245.01	211.96
$\omega$ (%)	5.24	5.01	5.09	5.57	5.31
Promedio $\omega$ (%)	5.24				

Fuente: Laboratorio de geotecnia y Mecánica de Rocas UNAP.

## Resistencia

Es el esfuerzo máximo que puede soportar una roca sin romperse, (González, 2002). La resistencia de los núcleos de roca de la andesita se presenta en la tabla N°3.

Tabla 3.- Ensayo de resistencia a la compresión Uniaxial de la roca

**RESUMEN DE RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE DE MUESTRAS DE ROCA INTACTA DE MINA ESCUELA CAROLINA**

N°	PROGRESIVAS DE TOMA DE MUESTRAS DE ROCA DE GALERIA PRINCIPAL	UCS (MPa)	UCS corregido (MPa)	UCS corregido (Kg-f/cm <sup>2</sup> )
1	P. 1 (Boca Mina - L. Izquierdo)	52.02	49.38	503.50
	P. 1 (Boca Mina - L. Derecho)	62.01	57.93	590.73
2	P. 2 (15 - 20m. - L. Izquierdo)	38.50	35.96	366.67
	P. 2 (15 - 20m. - L. Derecho)	57.93	54.76	558.40
3	P. 3 (25 - 30m. - L. Izquierdo)	68.03	64.21	654.81
	P. 3 (25 - 30m. - L. Derecho)	78.31	74.03	754.91
4	P. 5 (65 - 70m. - L. Derecho)	31.57	28.91	294.75
5	P. 6 (75 - 80m. - L. Derecho)	96.28	91.44	932.40
	P. 7 (80 - 84m. - L. Izquierdo)	99.89	98.50	1004.41
6	P. 7 (80 - 84m. - L. Derecho)	120.95	114.69	1169.51

Fuente: Laboratorio de Geotecnia y Mecánica de rocas UNAP.

Los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación están relacionados a la caracterización geomecánica del macizo rocoso de la galería principal de la mina escuela carolina, los cuales ayudaron a la identificación de zonas de estabilidad y para el diseño de las cámaras subterráneas los mismos que tienen unos objetivos académicos y de investigación.

Uno de los factores claves para determinar la calidad del macizo rocoso es la determinación del RMR, a continuación, en la Tabla 4. Se muestra el resumen del RMR por estaciones para luego analizar cuál es su comportamiento a lo largo de la galería de la mina escuela Carolina.

Tabla 4.- Resumen de RMR por estaciones de mapeo geomecánico

**RESUMEN DE RMR POR ESTACIONES DE MAPEO GEOMECANICO DE LA MINA ESCUELA CAROLINA**

N°	ESTACION PROGRESIVA	RMR	VALORACION	CLASE DE ROCA	DESCRIPCION
1	EST. 1 - (0 - 5m)	50.5	60 - 41	III	ROCA REGULAR
2	EST. 2 - (5 - 10m)	52	60 - 41	III	ROCA REGULAR
3	EST. 3 - (10 - 15m)	63	80 - 61	II	ROCA BUENA
4	EST. 4 - (15 - 20m)	49	60 - 41	III	ROCA REGULAR
5	EST. 5 - (20 - 25m)	44.5	61 - 41	III	ROCA REGULAR
6	EST. 6 - (25 - 30m)	55	80 - 61	III	ROCA REGULAR
7	EST. 7 - (30 - 35m)	41	61 - 41	III	ROCA REGULAR
8	EST. 8 - (35 - 40m)	44	61 - 41	III	ROCA REGULAR
9	EST. 9 - (40 - 45m)	42	62 - 41	III	ROCA REGULAR
10	EST. 10 - (45 - 50m)	44	63 - 41	III	ROCA REGULAR
11	EST. 11 - (50 - 55m)	41	64 - 41	III	ROCA REGULAR
12	EST. 12 - (55 - 60m)	51	65 - 41	III	ROCA REGULAR
13	EST. 13 - (60 - 65m)	44	66 - 41	III	ROCA REGULAR
14	EST. 14 - (65 - 70m)	50	67 - 41	III	ROCA REGULAR
15	EST. 15 - (70 - 75m)	42	68 - 41	III	ROCA REGULAR
16	EST. 16 - (75 - 80m)	41.5	69 - 41	III	ROCA REGULAR
17	EST. 17 - (80 - 84m)	43	70 - 41	III	ROCA REGULAR

Fuente: Laboratorio de geotecnia y mecánica de rocas FIM UNAP.

En la figura 3 se aprecia el histograma de frecuencia relativa de los valores de RMR que presenta el macizo rocoso de la mina escuela carolina, el cual nos muestra un valor de RMR medio.

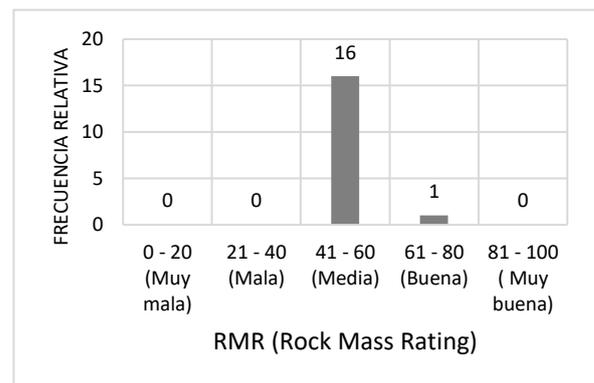


Figura 3.-Histograma de valores de RMR que presenta el macizo rocoso de la mina Pomperia

Fuente: Elaboración propia

Para cumplir con los objetivos planeados se tienen que ubicar zonas de estabilidad y un factor importante para su

ubicación es el valor del RMR. Como se puede apreciar en la tabla 4, las estaciones geomecánicas que tienen un valor alto son; la estación número 3, 6, 12 y 14. Que servirán para diseñar las cámaras subterráneas.

**Rock Quality Designation:** Los valores para el RQD de la galería principal de la mina escuela Carolina se muestran en la tabla 5, dichos valores se tomaron mediante 17 progresivas a lo largo de la galería principal.

Tabla 5.- Valores de RQD para las 17 progresivas de la cortada principal

PROG. F	P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7	P.8	P.9	P.10	P.11	P.12	P.13	P.14	P.15
RQD (%)	75	75	75	70	70	75	75	75	75	70	70	75	70	62	70

Fuente: Elaboración propia

La calidad de la roca de la galería principal de la mina escuela Carolina en promedio es de 72.18%, lo que nos indica que la calidad de roca promedio es regular tal como se muestra en la figura 4.

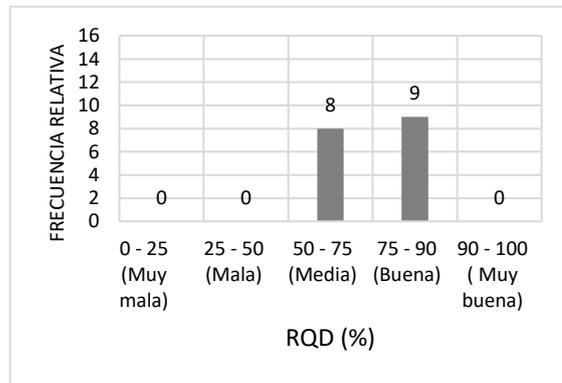


Figura 4.-Histograma de los valores de RQD que presenta el macizo rocoso de la mina Pompería  
Fuente: Elaboración propia

### Modelamiento estructural del macizo rocoso

Las características estructurales del macizo rocoso son representadas en las Figuras N°5, 6, 7, 8, generando así un conocimiento general y vista panorámica de los niveles de esfuerzos presentes

dentro de la caracterización del macizo rocoso.

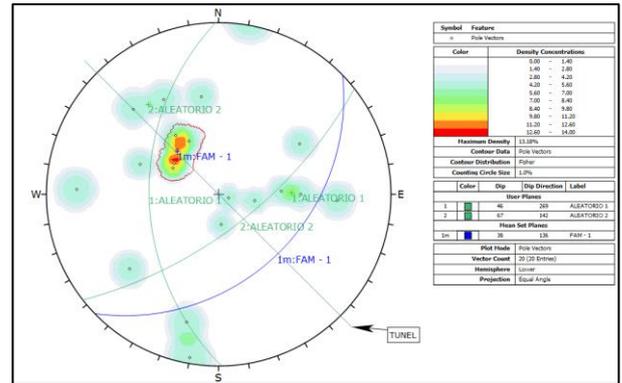


Figura 5.- Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°1 ubicada a 15 m de la bocamina.

Fuente: Elaboración propia, software DIPS.

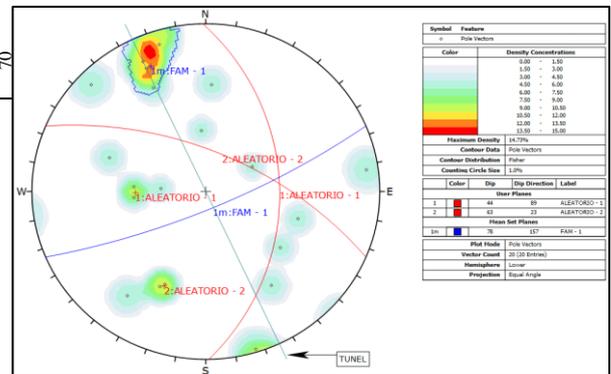


Figura 6.-Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°2 ubicada a 25 m de la bocamina.

Fuente: Elaboración propia, software DIPS.

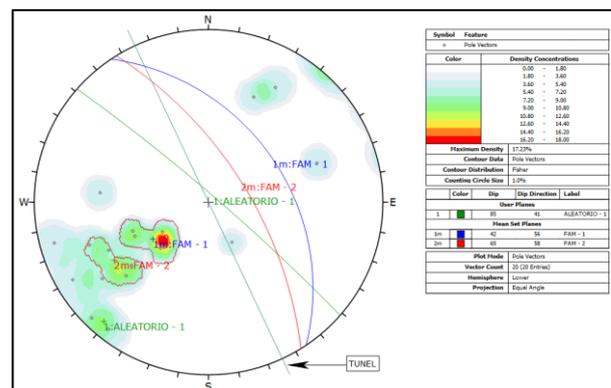


Figura 7.- Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°3 ubicada a 55 m de la bocamina.

Fuente: Elaboración propia, software DIPS.

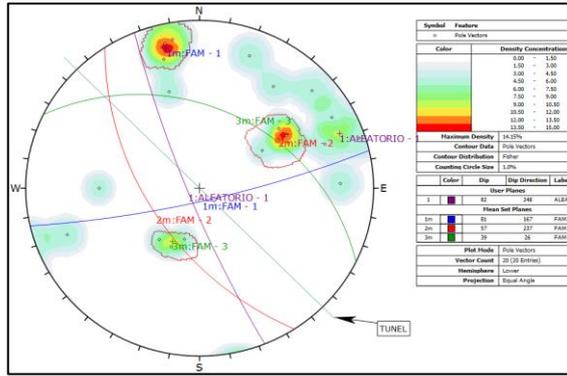


Figura 8.-Familia de diaclasas presentes en la caracterización del macizo rocoso, para la apertura N°4 ubicada a 65 m de la bocamina.

Fuente: Elaboración propia, software DIPS.

### Interrelación entre el índice RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton

Los valores obtenidos del índice de RMR de Bieniawski a valores de índice de clasificación Q de Barton. Tenemos los resultados de interrelación RMR y Q en base a las ecuaciones propuestas en la tabla 4, se hizo el uso de la interrelación de Rutledge y Preston (1978). Los valores obtenidos para el índice de Barton de cada estación donde se planea realizar las excavaciones se presentan en la tabla 6.

Tabla 6.- Valores de índice Q de Barton

N° excavación	Q	Calidad del macizo rocoso
1	29.66	Regular
2	7.64	Regular
3	3.88	Regular
4	3.28	Bueno

Fuente: Elaboración propia

### Determinación de la dimensión equivalente

La determinación de la dimensión equivalente (De), utilizamos la siguiente ecuación.

$$De = 2.0(Q^{0.4}), \text{ metros.}$$

La ecuación se aplicó para cada estación donde se desarrollarán las excavaciones. Los mismos que se presentan en la tabla 7.

Tabla 7.- Dimensión equivalente

N° de estación- excavación	1	2	3	4
De = Rutledge y Preston	7.76	4.51	3.44	3.21

Fuente: Elaboración propia

### Sostenimiento

Para determinar el tipo de sostenimiento en base al índice Q, se usa el gráfico de Grimstad y Barton (1993), para lo cual se necesita la dimensión equivalente (De) y el valor del índice Q de Barton.

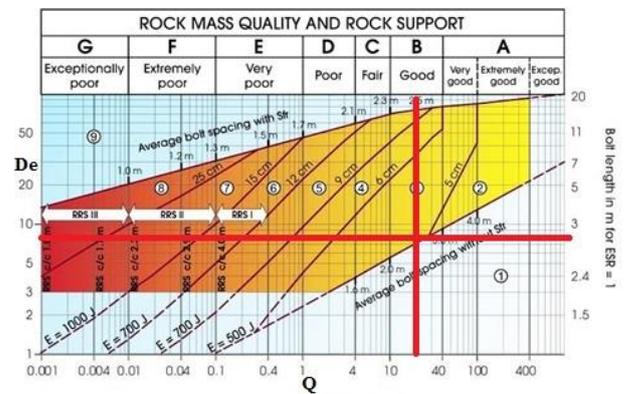


Figura 9.-Tipo de sostenimiento, excavación N° 1

Valor del sistema Q = 29.66, De = 7.76  
Elaboración propia.

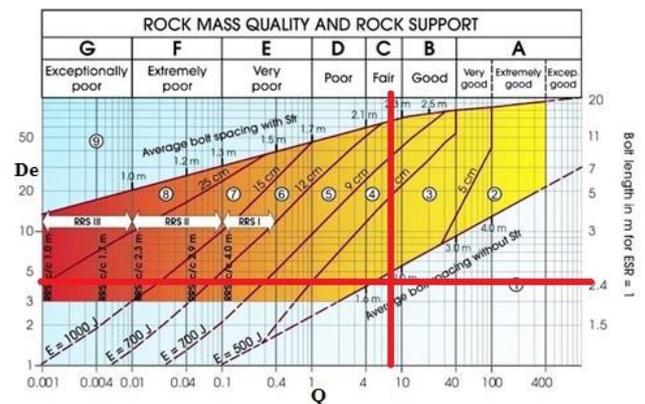


Figura 10.-Tipo de sostenimiento, excavación N° 2

Valor del sistema Q = 7.64, De = 4.51,  
Fuente: Elaboración propia.

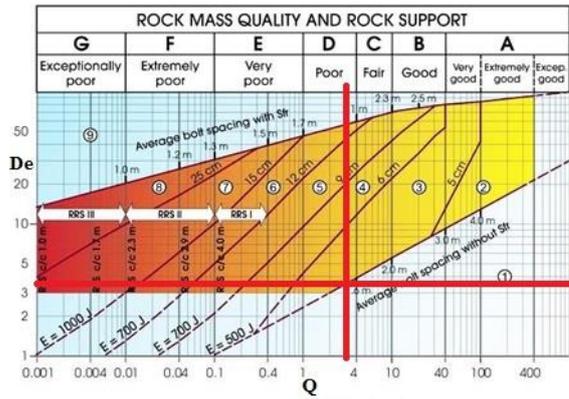


Figura 11.- Tipo de sostenimiento, excavación N° 3

Valor del sistema  $Q = 3.88$ ,  $De = 3.44$   
Fuente: Elaboración propia.

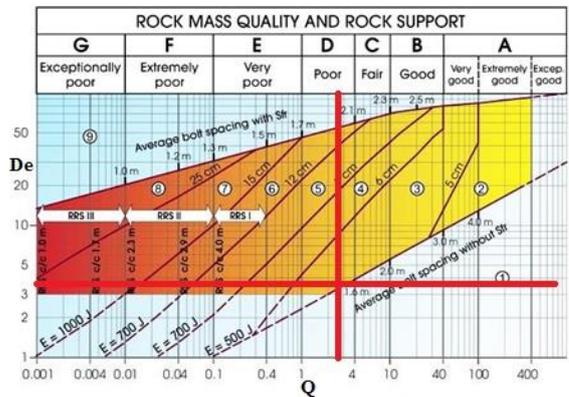


Figura 12.- Tipo de sostenimiento, excavación N° 4

Valor del sistema  $Q = 3.28$ ,  $De = 3.21$ , tipo de sostenimiento = empernado sistemático con espaciamiento de 1.5 m. Fuente: Elaboración propia.

De las figuras 9 al 11 podemos apreciar que nos recomienda el tipo de sostenimiento en base al gráfico de Grimstad y Barton, el tipo de sostenimiento recomendado se presenta en la tabla 8.

Tabla 8.- Tipo de sostenimiento según Q de Barton

N° de Excavación	Valor Q	Calidad del macizo rocoso	Tipo de sostenimiento
1	29.66	Buena	Empernado sistemático con espaciamiento de 2.8 m
2	7.64	Regular	Empernado puntual
3	3.88	Regular	Empernado sistemático con espaciamiento de 1.5 m

4 3.28 Regular Empernado sistemático con espaciamiento de 1.5 m

Fuente: Elaboración propia

### Áreas de excavación propuestas

Se diseñan excavaciones para las áreas de perforación y voladura, mecánica de rocas, rescate minero y maquinaria minera, las dimensiones óptimas para el diseño son, sección de 2m x 2m x 1.80m de altura, como entrada principal, seguidamente se desarrolla una nueva excavación tipo cámara de dimensiones 6m x 6m x 2.5m de altura. En las figuras 13, 14, 15 y 16 se pueden apreciar los anchos máximos de cada excavación, los mismos que se estandarizaron a una sola dimensión y un gradiente de (+) 0.5%.

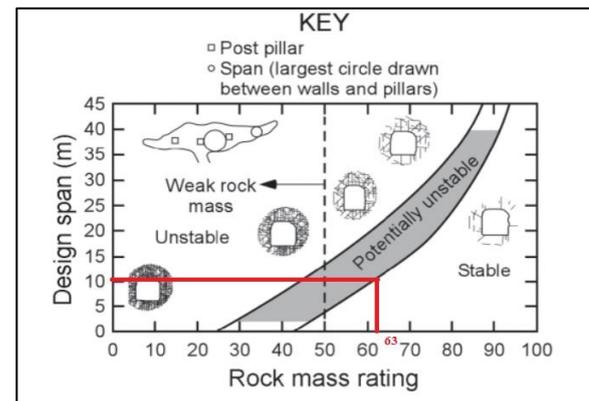


Figura 13.- Área de perforación y voladura de rocas, ancho máximo de 10 m interior mina

Fuente: Elaboración propia

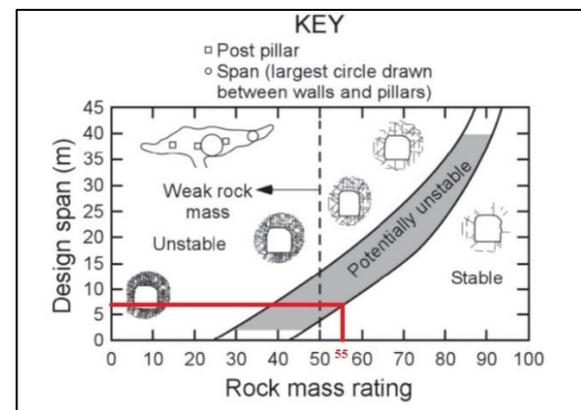


Figura 14.- Área de mecánica de rocas, ancho de excavación de 5 a 8 m, interior mina

Fuente: Elaboración propia

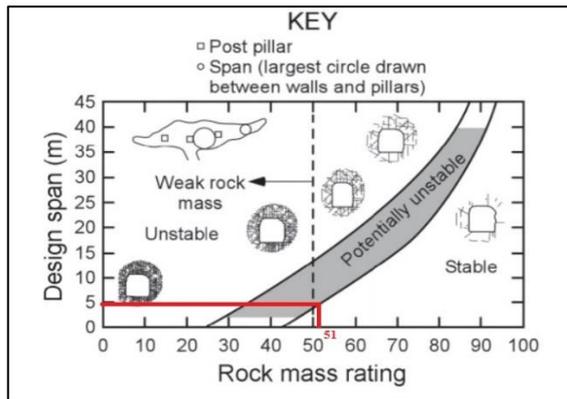


Figura 15.- Área de rescate minero, ancho máximo de excavación entre 0 a 5 m, interior mina

Fuente: Elaboración propia

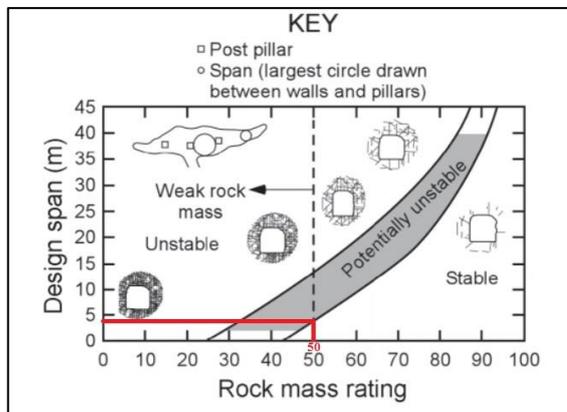


Figura 16.- Área de maquinaria minera, ancho máximo de excavación 0 a 5 m, interior mina

Fuente: Elaboración propia

## DISCUSIONES

Realizado el análisis al sistema de clasificación se puede mencionar que: El sistema RMR considera casi todos los parámetros que caracterizan un macizo rocoso y por ello es la clasificación de calidad del macizo rocoso más utilizada internacionalmente debido principalmente a la fácil obtención de datos y costos económicos ya sea de sondeos o de observaciones in situ. Presenta problemas de sensibilidad a los parámetros individualmente considerados debido a que éstos están como sumandos; y principalmente no considera el estado tensional del macizo. En cuanto al sistema de clasificación Q, no presenta problemas

de sensibilidad a los parámetros considerados individualmente, debido a que éstos aparecen como multiplicadores o divisores, además que el sistema Q si considera el estado tensional del macizo mediante el SRF, sin embargo, la evaluación de este parámetro es relativamente subjetiva y no tiene en cuenta la historia tectónica ni otros factores de tipo geomorfológico. La clasificación Q no considera la orientación de las juntas, lo cual limita su eficacia, ya que este factor es muy especial en muchos casos. Según los antecedentes de investigación, citado (Barber, 2018), en su tesis titulado “Restauración y adaptación de la mina experimental Marcelo Jorissen”, se concluye que la Mina escuela Marcelo Jorissen es un espacio donde se desarrolla prácticas en una mina de carbón para que los alumnos de las especialidades de laboreo se familiarizasen con los elementos de entibación y métodos de explotación.

Efectivamente en el presente estudio de investigación con la caracterización geomecánica se logró identificar los valores de RMR los cuales servirán al educando para que desarrollen el tipo de sostenimiento que requiere la galería principal de la mina escuela carolina, y así los estudiantes también podrán familiarizarse con los elementos de sostenimiento.

Según los antecedentes de la investigación (Ortiz, 2014), en su tesis titulada “Actualización del programa de trabajo e inversiones de la mina didáctica del centro nacional minero Sena – Regional Boyacá”, se concluye que la mina didáctica del centro minero Sena, dedicada a la formación teórica – practica de aprendices en el sector minero y por ser



la única en el país tiene que cumplir con todas las exigencias para garantizar la formación profesional e integral del educando, actualmente está en una etapa de preparación, en donde el avance de las labores está sujeto a las diferentes prácticas que realizan los aprendices en sus diferentes módulos de formación.

En el presente trabajo de investigación con la caracterización geomecánica para el diseño de las cámaras subterráneas también se propone que los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de minas, puedan realizar las actividades de rehabilitación y apertura de las nuevas cámaras subterráneas, de acuerdo a los diferentes cursos de formación, de la misma manera se coincide que la mina escuela Carolina también es la única en el país.

En el presente trabajo de investigación con el diseño de la mina escuela carolina también se le brindara al estudiante un espacio donde pueda adquirir experiencia práctica en perforación y voladura, mecánica de rocas, ventilación de mina y seguridad minera al mismo modo que la mina experimental Edgar.

Según el centro experimental y capacitación en procesos minero metalúrgicos, mina escuela Brillador, el centro tiene un doble propósito, por una parte, realizar actividades de docencia en terreno y la otra mantener un nexo permanente con la industria minera, que permita a la Universidad estar actualizada en los procesos, estrategias productivas y, ser un referente para las investigaciones aplicadas.

El diseño de las cámaras subterráneas para la mina escuela Carolina y la rehabilitación de la misma también

permitirá brindar al estudiante un espacio donde pueda realizar investigaciones aplicativas, de la misma manera como la mina escuela el brillador el docente podrá desarrollar sus actividades en terreno.

#### **IV.- CONCLUSIONES**

La caracterización geomecánica del macizo rocoso de la zona de estudio, mediante la clasificación geomecánica de Bieniawski e índice Q de Barton, y el diseño de métodos de entrada de Pakalnis, determinaron el diseño de la construcción subterránea de la mina escuela carolina para fines académicos y de investigación de la facultad de Ingeniería de Minas UNA Puno.

Se logra ubicar las zonas de mayor estabilidad en la galería principal de la mina Pomperia los cuales tienen un valor de RMR de; 63, 55, 51 y 50, los mismos que corresponden a las progresivas 3, 6, 12 y 14 del mapeo geomecánico.

La caracterización geomecánica del macizo rocoso de la zona de estudio determinó las características de diseño los cuales serán, sección de 2 x 2 x 1.80 metros de altura, como entrada primaria, seguidamente se desarrolla una nueva excavación tipo cámara de dimensiones 6 x 6 x 2.5 metros de altura, con una gradiente de (+) 0.5%. Las cuáles serán para las cuatro áreas propuestas.

#### **RECOMENDACIONES**

Se recomienda que, para cualquier diseño subterráneo que se realice en interior de la mina se debe considerar primeramente las características geomecánicas del macizo rocoso y las propiedades físico mecánicas.

Al realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso es recomendable realizarlo al menos con dos



clasificaciones geomecánicas, a manera de comparación para contrastar y validar los resultados de ambas clasificaciones. En caso se decida utilizar el sistema de clasificación RMR de 1989 como el presente trabajo para caracterizar y determinar la calidad del macizo rocoso, se sugiere utilizar los ábacos originales para valorar correctamente las tres primeras variables (resistencia a la compresión Uniaxial, RQD y espaciamiento de discontinuidades) se recomienda utilizar los respectivos ábacos para dar la verdadera valoración de cada uno de estos parámetros, ya que por esta variación a favor o en contra de unos puntos puede indicar una calidad de macizo rocoso.

Se recomienda que la galería principal de la mina escuela carolina sea estable en todo su tramo para que los estudiantes puedan realizar sus prácticas de manera segura, así mismo se recomienda que, para realizar una nueva excavación es necesario estabilizar la zona mediante un tipo de sostenimiento adecuado.

Se recomienda realizar a detalle la caracterización geomecánica del macizo rocoso para obtener valores confiables y estos puedan incidir de manera óptima para cualquier diseño en mina subterránea. Así mismo se recomienda seleccionar de manera adecuada el tipo de clasificación geomecánica a utilizar.

### AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por permitirme despertar cada día, a mis padres Pascual Nieto y Hilda Ccalle quienes me apoyaron enormemente estos años y es gracias a ellos que siempre me guían y aconsejan, a mis hermanos Marx, Alexis y Mery por el apoyo incondicional.

A los Docentes de la Facultad de ingeniería de minas que me impartieron sus sabios conocimientos técnicos y por haber compartido sus experiencias que son

una fortaleza para que uno pueda superarse.

### REFERENCIAS

- Barton, N., Løset, F., Lien, R., & Lunde, J. (1980). Application of the Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. *International Conference on Sub-Surface Space, Rock Store, Stockholm*, 2, 553–561.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: John Wiley & Sons.
- Burgos Cedeño, S. L. (2015). *Desarrollo de Herramienta de Diseño para la Estabilidad de Excavaciones con entrada de personal*. Tesis de Posgrado - Universidad de Chile, Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134934>
- Grimstad, E. (2007). The Norwegian method of tunnelling – a challenge for support design. *XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground Excavations in Rock* (London Ins). London: McGRAWHILL.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165–1186.
- Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>



- Jauch, F. (2000). *Using borehole geophysics for geotechnical classifications of crystalline rock masses in tunnelling*. Tesis Doctoral - SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, Alemania.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-004036107](https://doi.org/10.3929/ethz-a-004036107)
- Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 283–353.
- Liu, J., Fen, X.-T., Ding, X.-L., Zhang, J., & Yue, D.-M. (2003a). Stability assessment of the Three Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling—Part I: physical model tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5), 609–631.
- Liu, J., Feng, X.-T., & Ding, X.-L. (2003b). Stability assessment of the Three-Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling—Part II: numerical modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5), 633–652.
- Lowson, A. R., & Bieniawski, Z. T. (2013). Critical assessment of RMR-based tunnel design practices: A practical engineer's approach. *Rapid Excavation & Tunneling Conference*.
- Mamani, N. (2019). Diseño de la construcción subterránea de la mina escuela carolina con fines académicos y de investigación.
- Osinermin. (2017). *GUÍA DE CRITERIOS GEOMECÁNICOS PARA DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, SUPERVISIÓN Y CIERRE DE LABORES SUBTERRÁNEAS*. (Osinermin, Ed.). Lima.
- Palmström, A. (1996). Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 175–188.
- Palmström, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362–377.
- Rocscience Inc. (2011). *Phase2 Version 8.0 - Finite Element Analysis for Excavations and Slopes*. Toronto, Ontario, Canada.
- Stille, H., & Palmström, A. (2003). Classification as a tool in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(4), 331–345.