

Clasificación geomecánica óptima para evaluar el macizo rocoso en el frente de arranque del Tramo IV del túnel Levisa-Mayarí

Optimal geomechanical classification for evaluating the rock mass from coalface Section IV of Levisa-Mayarí tunnel

Alexander Ochoa-Quesada^{1*}, Maday Cartaya-Pires², Jorge Luis Blanco-Blázquez³

¹Empresa Geocuba Oriente Norte, Santiago de Cuba, Cuba

²Universidad de Moa, Holguín, Cuba

³Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín (Raudal), Holguín, Cuba.

*Autor para la correspondencia: alexander.ochoa@nauta.cu

Resumen

La obra ingenieril Trasvase Este-Oeste, concebida para conducir agua desde los ríos del macizo montañoso de Nipe-Sagua-Baracoa a las llanuras del norte de Holguín-Camagüey, incluye la construcción de canales, presas y túneles. Durante el laboreo de estos últimos, en el tramo IV del túnel Levisa-Mayarí se presentaron problemas de inestabilidad en los macizos perforados. Esta investigación tuvo el propósito de evaluar varias clasificaciones geomecánicas (Barton-Q, Bulichev-S, Bieniawski-RMR y Hoek-GSI) para elegir la más apropiada y ajustar sus parámetros a las características del macizo rocoso. El agrietamiento se evaluó por estacionados de 1,50 m aproximadamente, según el avance del túnel y por litología. Para el procesamiento de los datos se utilizaron los softwares Dips v5.0 y Unwedge v3.0; el ajuste de los parámetros geomecánicos se realizó mediante el método de prueba y error. En el macizo existen tres familias de grietas predominantes y su calidad clasifica como de muy mala a mala. Se concluye que la clasificación GSI de Hoek, Marinos y Marinos con los ajustes de correlación con el esclerómetro y el índice de calidad Q de Barton son las que más se adecuan a las particularidades de macizo rocoso estudiado, siendo la última la que ofrece mejores resultados para proyectar soluciones de sostenimiento.

Palabras clave: laboreo de túneles; trasvase Este-Oeste; clasificación geomecánica; agrietamiento; túnel Levisa-Mayarí.

Abstract

The East-West Trasvase engineering work, designed to drive water from Nipe-Sagua-Baracoa mountain range Rivers to the northern Holguín-Camagüey plains, includes building canals, dams and tunnels. During the work on section IV of Levisa-Mayarí tunnel, there were instability problems with the perforated mass. This research was intended to evaluate several geomechanical classifications (Barton-Q, Bulichev-S, Bieniawski-RMR, and Hoek-GSI) for choosing the most appropriate one and adjusting its parameters to the rock mass characteristics. Cracking was evaluated by parked approximately 1.50 m, according to the progress of the tunnel and by lithology. For data processing, Dips v5.0 and Unwedge v3.0 softwares were used; the adjustment of geomechanical parameters was performed by using the trial and error method. There are three cracks families which predominate in the rock mass and its quality is classified from poorly to bad. It is concluded that Hoek and Marinos' GSI classification with correlation adjustments with the sclerometer and the Barton Q quality index are the ones that best suit the particularities of the rock mass studied, being the latter who best results offer to project support solutions.

Keywords: tunneling; East-West Trasvase; geomechanical classification; cracking; Levisa-Mayarí tunnel.

1. INTRODUCCIÓN

Desde 1990 se inició el Trasvase Este-Oeste, una de las obras de ingeniería cubana más importantes del siglo XX, que en su proyección concibe la construcción de canales, presas, puentes y túneles. Esta obra responde a la necesidad de llevar el agua de los ríos que nacen en el macizo montañoso de Nipe-Sagua-Baracoa a las fértiles llanuras del norte de Holguín, Las Tunas, noreste de Camagüey, el norte y centro del Valle del Cauto.

El estudio del macizo rocoso donde está enclavada la obra corre a cargo de la empresa que realiza la construcción subterránea, sin embargo, la existencia de problemas de inestabilidad llevan a la necesidad de ahondar en esos estudios a fin de resolver el problema. Esta problemática pudiera ser resuelta utilizando varias clasificaciones geomecánicas, de gran aplicación mundial, tales como: Protodyakonov, Bieniawski, Barton, Romana, Plamstrom, González de Vallejo, entre otras, las que en general determinan, mediante un índice, la calidad del macizo rocoso y el posible sostenimiento a

emplear. La finalidad es dividir el macizo en dominios estructurales con características similares, como: litología, espaciado de grietas, entre otros. Los límites de un dominio estructural pueden coincidir o no con rasgos geológicos, tales como fallas o diques (González de Vallejo 2002; López Jiménez 1998).

De manera general, en las obras del Trasvase Este-Oeste para definir el sostenimiento adecuado se caracteriza el macizo en el frente de arranque de los túneles con la clasificación geomecánica de Barton (1974) a través de su índice de calidad Q; hasta el momento no se han aplicado otras clasificaciones geomecánicas, incluso cuando continúan presentándose problemas con la estabilidad.

El objetivo del presente estudio fue seleccionar y proponer la clasificación geomecánica más apropiada y ajustar sus parámetros a las características del macizo para evaluar su comportamiento en el frente de arranque del túnel Levisa-Mayarí, Tramo IV.

1.1. Caracterización geológica del área de estudio

El túnel Levisa-Mayarí es una obra subterránea que va desde la presa Levisa a la presa Mayarí en el río de igual nombre. La zona investigada se ubica entre las coordenadas Lambert X1=623 254.65 a X2=625 797.31 y Y1=218 941.78, Y2=219 294.40 en las hojas cartográficas 1:25 000 de Mayarí 5077-I.

1.1.1. Tipologías ingeniero-geológicas presentes en la zona de estudio

El informe de Blanco-Blázquez (2015) integra los resultados investigativos de diferentes empresas en el que las tipologías ingeniero-geológicas presentes en la zona estudiada se denominan como sigue:

Tipo I. Serpentinita intacta o masiva formada por bloques cúbicos con hasta tres familias de grietas.

Tipo II. Serpentinita en bloques irregulares, medianos y multifacetados.

Tipo III. Serpentinita en bloques irregulares, muy tectonizadas.

Tipo IV. Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas.

Tipo V. Serpentinitas foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas.

Tipo M. Serpentinitas muy meteorizadas que puede llegar a contener lateritas mezcladas.

Ochoa y Zaldívar (2016) agrupan en dos tipos litológicos estas denominaciones, resultando en:

Tipo II-III. Serpentinitas en bloques irregulares, medianos, multifacetados hasta muy tectonizados: aunque se menciona el nombre principal de serpentinitas, pueden ser diferentes tipos de peridotitas con diferente grado de serpentización hasta serpentinitas puras, con fábrica brechosa desde media a fina que, en profundidad, entre estos bloques se caracterizan por presentar tamaño medio entre grietas de 10-30 cm de color predominante de verde claro hasta oscuro casi negro.

Tipo IV-V. Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas, mal seleccionadas y cementadas, que pueden ser foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas: Se caracterizan por la presencia de numerosas grietas que le dan aspecto brechoso fino, las que, en superficie, pueden estar abiertas o rellenas de arcillas y en el interior del macizo rellenas de minerales serpentiniticos; cuando son esquistosas pueden presentarse pliegues inarmónicos con budinas de dimensiones variables. Las serpentinitas brechosas finas presentan dureza de media a blanda mientras las esquistosas son blandas y las budinas moderadamente duras, por lo general están medianamente meteorizadas, debido a que por ser zonas de fallas las aguas penetran a mayor profundidad, meteorizando las rocas a grandes profundidades y convirtiendo los minerales serpentiniticos, los piroxenos y olivinos en minerales arcillosos, principalmente montmorillonitas. El color es verdoso con bandas oscuras y claras con aspecto abigarrado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio del agrietamiento como parámetro básico para el empleo de las clasificaciones geomecánicas se realiza mediante el levantamiento geológico in situ por estacionados aproximadamente de 1,50 m, según el avance del túnel. El procesamiento se realizó con los softwares Dips v5 y Unwedge v3.0.

Para evaluar la calidad del macizo rocoso en el túnel Tramo IV se aplicaron a un mismo estacionado 1+081.78 las metodologías de clasificación geomecánica más empleadas para túneles, como la de Barton (1974) (Q), Bulichev (1996) (S), Bieniawski (1989) (RMR), Hoek, Marinos y Marinos (2005) (GSI), lo cual permitió analizar de manera cualitativa y cuantitativa las deficiencias de estas en sus parámetros; para ello se

subdividió el frente de arranque en puntal izquierdo y derecho, teniendo en cuenta la litología existente.

Para proponer la clasificación geomecánica más idónea a emplear en este caso de estudio, así como para efectuar propuestas de ajuste de parámetros, realizar las correlaciones necesarias para adecuarlas a las condiciones reales del macizo estudiado, determinar la resistencia de la roca con el empleo del esclerómetro y ajustar sus resultados mediante el índice corrector K_R , se aplicó el método matemático científico e investigativo Prueba y error (Dans 2017; Quispe 2013); además se realizó la consulta a diferentes especialistas en el tema y se consideró el resultado y las experiencias de 10 años de prestación de servicios y experimentación in situ en la ejecución de esta obra.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del levantamiento geológico de campo en el frente de arranque del túnel se pudo observar que el macizo rocoso es de color gris claro a gris oscuro y presenta ligeras alteraciones. Las proyecciones estereográficas obtenidas mediante el procesamiento del agrietamiento con software Dips v.5 muestran que predominan tres familias de discontinuidades con rumbos predominantes de NE-SW y NW-SE (Figura 1).

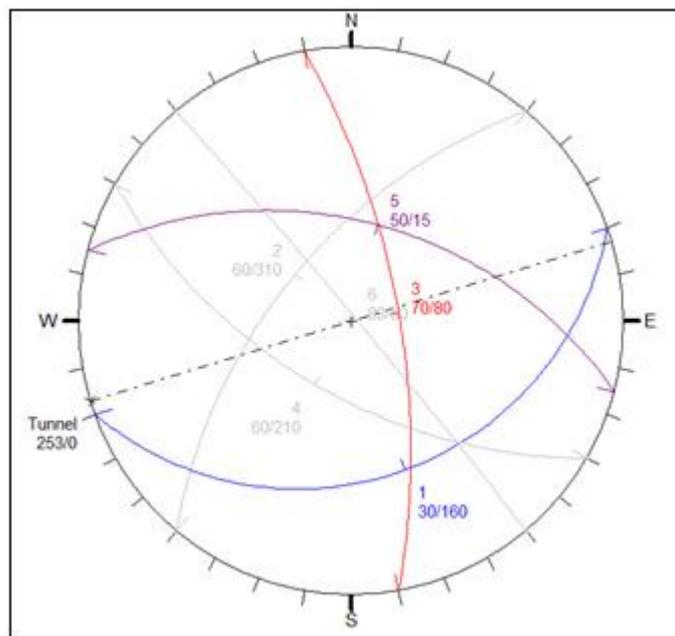


Figura 1. Planos principales del agrietamiento.

Mediante el software Unwedge 3.0 se representaron los principales bloques identificados, donde se aprecian diferencias en sus dimensiones y ubicación espacial (Figura 2).

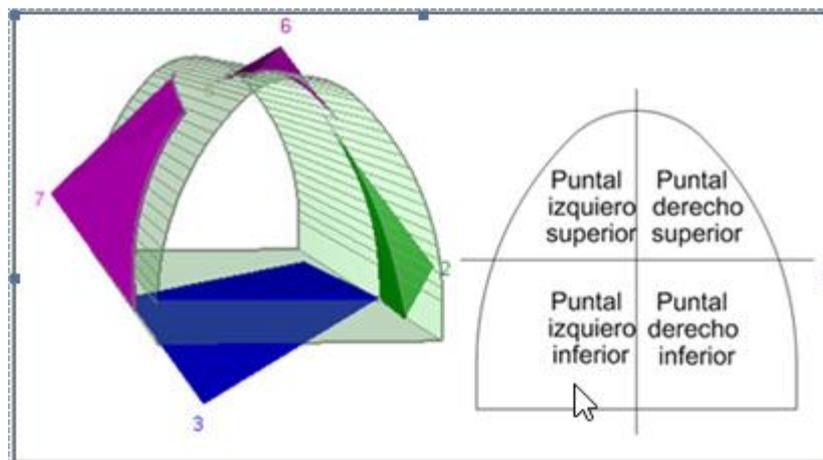


Figura 2. Vista 3D de los bloques principales y subdivisión del frente de arranque según el comportamiento litológico.

3.1. Clasificación de Barton

El índice Q que se obtiene en esta metodología representa la calidad del macizo rocoso, de igual forma se realiza el estudio para las demás clasificaciones geomecánicas empleadas en el mismo estacionado y se muestran a continuación. Los resultados de esta metodología se exponen en la Tabla 1.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Tabla 1. Resultados obtenidos con la metodología de Barton

Parámetros	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Clasificación
Puntal Izquierdo inferior (Tipo II-III)	65	12	1,5	6	1	2,5	Q = 0,541 roca muy mala
Puntal Derecho (Tipo IV-V)	33	15	1,5	8	1	2,5	Q = 0,166 roca muy mala

3.2. Clasificación de Bulichev

Realiza un pronóstico de la estabilidad de macizos propensos al derrumbe y tiene en cuenta parámetros que permiten clasificar el macizo lo más cercano a las condiciones naturales. Los resultados obtenidos son similares a las condiciones apreciadas in situ en el túnel (Tabla 2).

$$S = f\left(\frac{K_m}{K_n}\right) \left[\frac{K_r K_w}{(K_t K_A K_\alpha)} \right] \quad (2)$$

Tabla 2. Resultados obtenidos con la metodología de Bulichev

Parámetros	f	Km	Kn	Kr	Kw	Kt	Ka	Ka	Clasificación
Puntal Izquierdo inferior	0,92	9	9	1,5	0,5	4	2	1,5	S = 0,0575 no estable
Puntal Derecho	0,125	2,5	9	1	0,5	4	2	1,5	S = 0,003 altamente inestable

3.3. Clasificación de Bieniawski

La clasificación del macizo rocoso, empleando la ecuación 3, considera como parámetros fundamentales: la resistencia de la matriz rocosa, el RQD (*Rock Quality Designation*) de Deere, la separación y el estado de las discontinuidades, la presencia de agua subterránea o freática y la corrección por la orientación de las discontinuidades. La calidad de las rocas se clasifica en cinco categorías que definen cinco clases de rocas y estiman sus valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna. Los valores del RMR de Bieniawski obtenidos que se muestran en la Tabla 3 son representativos de las condiciones actuales que presenta el macizo estudiado.

$$\text{RMR} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B \quad (3)$$

Tabla 3. Resultados obtenidos con la metodología de Bieniawski

Parámetros	A1	A2	A3	A4	A5	B	Clasificación
Puntal Izquierdo Inferior	1	13	5	20	7	(-5)	RMR = 41 roca de calidad media
Puntal Derecho	4	8	5	20	7	(-5)	RMR = 39 roca de calidad mala

3.4. Clasificación GSI de Hoek, Marinos y Marinos

El método GSI se basa en la estimación de la resistencia a la deformación y la deformabilidad de la masa rocosa para diferentes condiciones geológicas. En este caso se elaboró una correlación entre el GSI, la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta y la Q de Barton, calculada en el frente de explotación.

3.4.1. Estacionado: 1+081.78

En la Tabla 4 se reflejan los valores obtenidos según el GSI para las diferentes tipologías identificadas, los resultados obtenidos para el estacionado 1+081.78 se muestran en la tipología II-III y IV-V, considerando la subdivisión que se le asignó al frente de arranque en la Figura 3.

Tabla 4. Parámetros fundamentales en base al GSI por las descripciones de campo, y su correlación con Barton

N°	Tipo	GSI	D	σ_{ci} (Mpa)	Em (Gpa)	σ_{cm} (MPa)	C (MPa)	Mi	ϕ°	S	a	Mb	Q.calc.
1.	Serpentinitas masivas Tipo I	80	0	75	48,70	22,390	0,7804	30	20	0,10837	0,00237	14,7	25,710
		75	0	55	31,27	14,062	0,5026	30	19	0,06218	0,00364	12,3	19,528
		70	0	35	18,71	7,663	0,2808	30	18	0,03567	0,00542	10,3	14,554
2.	Serpentinitas en bloques irregulares, medianos, multifacetados hasta muy tectonizados. Tipo II-III	70	0	30	17,32	6,569	0,2407	16	18	0,03567	0,00542	5,5	13,099
		60	0	25	8,89	4,015	0,1547	16	16	0,01174	0,01136	3,8	7,546
		50	0	15	3,87	1,767	0,0716	16	13	0,00387	0,02293	2,7	3,470
3.	Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas. Tipo IV	50	0	10	3,16	1,178	0,0477	12	13	0,00387	0,02293	2,0	3,123
		40	0	7	1,49	0,605	0,0257	12	10	0,00127	0,04547	1,4	1,341
		25	0	5	0,53	0,271	0,0125	12	6	0,00024	0,12507	0,8	0,181
4.	Serpentinitas foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistasas. Tipo V	20	0	4	0,36	0,186	0,0087	10	4	0,00014	0,17488	0,6	0,070
		15	0	3	0,23	0,119	0,0058	10	2	0,00008	0,24440	0,5	0,021
		10	0	2	0,14	0,068	0,0034	10	0	0,00005	0,34143	0,4	0,004

La correlación entre la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta σ_{ci} y el índice Qcalc permite clasificar al macizo con el GSI e identificar valores similares a los de la clasificación de Barton.

3.5. Calidad de las rocas por litología estudiadas en el túnel según los resultados obtenidos con las clasificaciones geomecánicas

En la Tabla 5 se exponen los índices Q, S, RMR y GSI para cada litología estudiada en el túnel. Estos resultados evidencian el comportamiento del macizo rocoso en el frente de laboreo del túnel según fue subdividido, lo que afirma que el puntal izquierdo tiene una calidad de mala a media, y el puntal derecho tiene un índice de calidad de muy malo a malo.

Tabla 5. Índices de calidad obtenidos para cada metodología

No	Tipos Litológicos	Metodología	Valor	Índice de Calidad
1	Tipo II-III Serpentinitas de bloques muy finos desintegradas mal seleccionadas y cementadas Puntal izquierdo inferior	Barton Q	0,541	Muy Mala
		Bulishev S	0,575	No estable
		Bieniawski RMR	41	Medio
		Hoek, Marinos y Marinos GSI	50	Mala
2	Tipo IV-V Serpentinitas foliadas, laminadas y cizalladas hasta esquistosas Puntal derecho	Barton Q	0,166	Muy Mala
		Bulishev S	0,003	Altamente no estable
		Bieniawski RMR	39	Mala
		Hoek, Marinos y Marinos GSI	50	Mala

3.6. Ajuste a la ecuación de Barton para correlacionarla con el empleo del esclerómetro

Para poder clasificar el macizo serpentinitico estudiado se propone el siguiente ajuste de la Q de Barton, con lo cual se obtienen valores muy cercanos a la calidad real de las rocas, aspecto de difícil predicción debido al gran número de factores que inciden en el comportamiento del macizo. Para ello se establece un índice corrector K_R con el empleo del esclerómetro como se muestra en la Tabla 6 (González de Vallejo 2002), el cual depende de la calidad del macizo y de su resistencia a compresión medida con el esclerómetro, el que es de uso muy práctico para mediciones in situ en el frente del túnel de acuerdo con el avance.

Tabla 6. Índice K_R obtenido que clasifica el macizo rocoso según su resistencia

Condición de Resistencia	Valor de resistencia a la compresión Esclerómetro-Martillo Schmidt (MPa)	Índice corrector K_R
Macizo de muy baja resistencia	1-5	1 - 1,12
Macizo de baja resistencia	5-15	1,12
Macizo de resistencia media	15-50	1,12

Macizo resistente	50-200	1,12
Macizo altamente resistente	>200	2

3.6.1. Análisis experimental a pie de obra ajustando la ecuación de Barton

El ajuste de la clasificación de Barton se realiza mediante el índice corrector K_R para diferentes estacionados y secciones del túnel. A continuación se expone el resultado obtenido para el estacionado 1+081,78.

Estacionado: 1+081.78

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} K_R$$

Puntal Izquierdo inferior

$$Q = \left(\frac{65}{12} * \frac{1.5}{6} * \frac{1}{2.5} \right) * 1.12$$

$$Q = 0.541 * 1.12$$

$$Q = 0,605$$

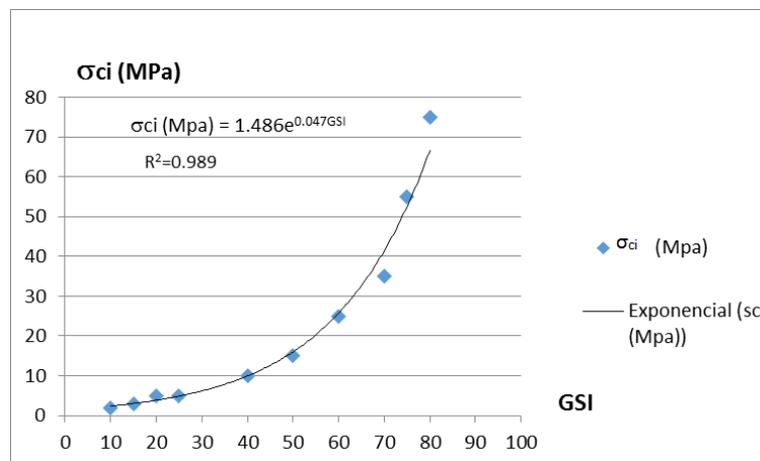
3.7. Ajuste de correlación entre el GSI, σ_{ci} y la Q de Barton para el cálculo de la estabilidad de macizos rocosos serpentínicos

A pesar de no ser un método que desarrolla proyecciones de sostenimiento para un túnel fue correlacionado a partir de sus resultados como GSI con la clasificación de Barton (Q), para proyectar parámetros de sostenimientos a partir del mismo.

Para valores de σ_{ci} menores de 4 MPa, la Q proporciona valores de cero o cercano a cero negativo. La experiencia práctica revela que para valores de cero, a la Q debe asignársele el valor 0,1 y cercano a cero negativo deben ser valores menores o en el rango desde 0,1 hasta 0,001 (Tabla 7). En caso de tener GSI iguales y una $\sigma_{ci} \leq 5$ Mpa, se le asigna el 90 % del valor de la anterior. No debe sobrepasar los 5 Mpa.

Tabla 7. Mediciones y resultados de la Q de Barton

GSI	σ_{ci} (Mpa)	Qcalc
80	75	25,710
75	55	19,528
70	35	14,554
70	30	13,099
60	25	7,546
50	15	3,470
50	10	3,123
40	7	1,341
25	5	0,181
20	4	0,070
15	3	0,021
10	2	0,004

Figura 3. Determinación de la curva de correlación entre el GSI y σ_{ci} (MPa).

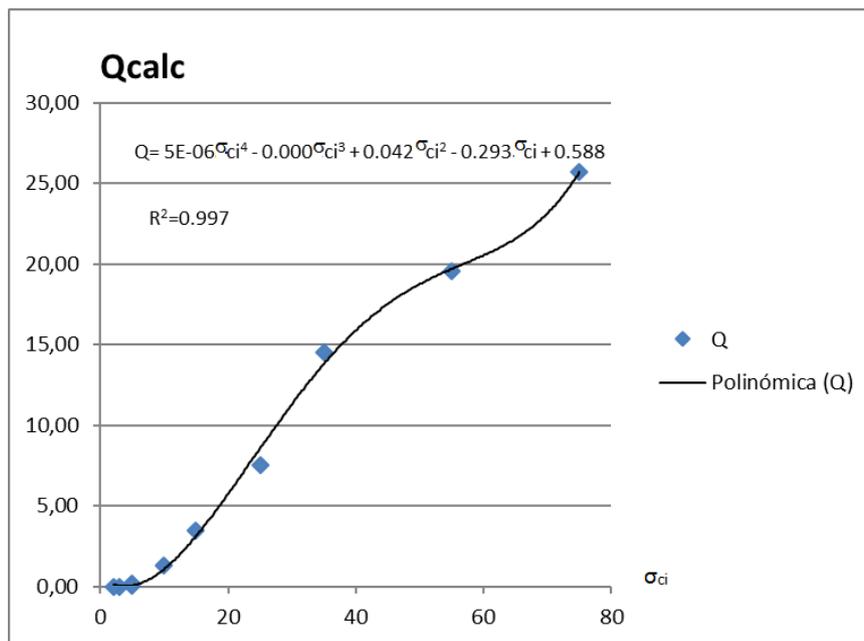


Figura 4. Determinación de la curva de correlación entre la Q de Barton y el σ_{ci} (MPa).

Los resultados mostrados en la curva exponencial (Figura 3) y la curva polinómica (Figura 4) no fueron representativos con respecto a las mediciones reales del túnel (in situ). Sin embargo, al ser el GSI con respecto a la **Qcalc** potencial semejante a la exponencial se pudo obtener una curva de ajuste directamente que generó la ecuación de cálculo con resultados similares a los medidos, tal como se muestra en la Figura 5.

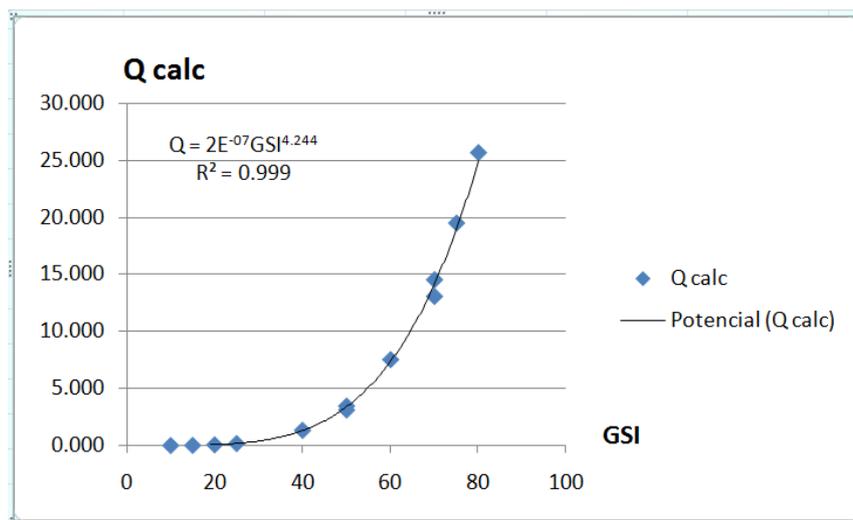


Figura 5. Determinación de la curva de correlación entre el GSI y la Q de Barton. El estudio realizado en varios años de trabajos experimentales y de campo permitió encontrar una correlación entre el GSI, la resistencia uniaxial

compresiva para la roca intacta σ_{ci} y el valor de la Q_{calc} para el diseño de túneles, desarrollada de la siguiente forma:

1. σ_{ci} (Mpa) = $1.486e^{0.047GSI}$ ecuación de curva exponencial de mejor ajuste con $R^2=0.989$
2. $Q = 5 \cdot 10^{-06}\sigma_{ci}^4 - 0.000\sigma_{ci}^3 + 0.042\sigma_{ci}^2 - 0.293\sigma_{ci} + 0.588$ ecuación de curva polinómica de mejor ajuste de 4^{to} orden con $R^2=0.997$
3. $Q = 2 \cdot 10^{-07}GSI^{4.244}$ ecuación de ajuste de tipo exponencial $R^2=0.999$

Estas correlaciones se han aplicado desde hace cuatro años en la Empresa Raudal y Geocuba Oriente Norte, Agencia ASEMA, las que se han perfeccionado y ajustado a las diferentes descripciones de los frentes de trabajo.

3.7.1. Rangos ajustados de la Q de Barton para el análisis de la calidad de las rocas en los macizos serpentiniticos de los túneles del trasvase

Se hace difícil unificar los criterios que definen la calidad de las rocas al analizar los parámetros que evalúan las clasificaciones geomecánicas, ya que estas hacen subdivisiones del macizo propias de los autores y son obtenidas para rocas con diferentes características genéticas, de estructura, entre otras. Asimismo, sucede con las diferentes teorías de clasificación de la roca, según su resistencia a compresión simple, como la Tabla de Duncan y Jennings, Palstrom, Precons, FKP, donde se clasifica al macizo teniendo en cuenta su condición de resistencia para rangos de valores preestablecidos.

Por consiguiente, para las condiciones existentes en el túnel estudiado del Trasvase Este-Oeste se definieron cinco rangos ajustados de la Q de Barton, con lo que se clasificó la calidad de las rocas serpentiniticas, como se muestran a continuación:

- | | |
|-------------------------------|----------------|
| 1. Macizo de muy mala calidad | $Q = 0,001-5$ |
| 2. Macizo de mala calidad | $Q = 5-10$ |
| 3. Macizo de buena calidad | $Q = 10-500$ |
| 4. Macizo muy estable | $Q = 500-1000$ |
| 5. Macizo Altamente estable | $Q = >1000$ |

Las características de la información que presentan en su respuesta sísmica (Figura 4) son buenas en lo que se refiere a la zona de interés, producto de

la calidad del proceso aplicado al cubo sísmico en su versión kirb95. El modelo estructural que se observa en la geometría en la configuración de la línea arbitraria 11, con orientación SW-NE, ofrece un bosquejo de un cuerpo tipo anticlinal con culminación en esta línea donde se encuentra propuesta la localización.

4. CONCLUSIONES

- La correlación de los resultados de ajuste del GSI con la Q y la resistencia uniaxial compresiva para la roca intacta permite proyectar soluciones de estabilidad en la ejecución del túnel, basado en múltiples pruebas realizadas, tanto en el frente como fuera de la excavación en las mismas rocas, donde se obtiene una base datos procesada estadísticamente. Se propone como ecuación final de ajuste entre el GSI y Qcalc la siguiente forma: $Q_{calc} = 2 \cdot 10^{-07} GSI^{4.244}$, $R^2=0.999$.
- Para clasificar el macizo serpentinitico estudiado se aplica la Q de Barton ajustada por el índice corrector K_R y se evalúa la calidad de las rocas por la escala de rangos ajustados a las condiciones reales in situ.
- La clasificación GSI de Hoek, Marinos y Marinos con los ajustes de correlación con el esclerómetro y el índice de calidad Q de Barton son las clasificaciones geomecánicas que más se ajustan a las particularidades de macizo rocoso estudiado, siendo esta última la que ofrece mejores resultados para proyectar soluciones de sostenimiento

5. REFERENCIAS

- Barton, N. 1974: *Estimating the shear strength of rock joints*. 3rd. ISRM.
- Bieniawski, Z. T. 1989: *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Blanco-Blázquez, J. L. 2015: Informe Ingeniero Geológico integral Tránsito Este-Oeste. Tramo Sagua Mayarí. Túnel Levisa-Mayarí. Tramo IV y Túnel de Conexión 3. Ingeniería Básica. INRH, Holguín.
- Dans, E. 2017: Entrevista en la revista *Madresfera* Consultado: 11/09/2018. Disponible en: <http://entreparesis.org/prueba-y-error/>
- González de Vallejo, L. 2002: *Ingeniería Geológica*. Madrid. 744 p.
- Hoek, E.; Marinos, V. and Marinos, P. 2005: The geological strength index: applications and limitations. *Bull Eng Geol Environ*, 64: 55–65.
- Ochoa, Q. A. y Zaldivar, H. A. 2016: Informe de la Asistencia Técnica a los Frentes de Trabajo en el Túnel Levisa-Mayarí. Tránsito Este Oeste. Tramo Sagua-Mayarí (túnel Levisa-Mayarí). Tramo IV. Ingeniería de Detalle. Archivos Técnicos Raudal, GeoCuba Oriente Norte. Holguín.

Quispe, E. 2013: Método de Prueba y Error en Excel. Consultado: 22/10/2018. Disponible en:

<http://elmerzinho.blogspot.com/2013/03/metodo-de-prueba-y-error-en-excel.html>

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores no declaran conflictos de intereses

Contribución de los autores

AOQ: trabajó en la obtención de datos en el campo, interpretación de resultados, redacción del manuscrito y aprobación de la versión final. MCP: revisión y confirmación de los datos, análisis y discusión de los resultados, revisión del original y aprobación de versión final. JLBB: obtención de datos y aprobación de la versión final.

ORCID

AOQ, <https://orcid.org/0000-0002-3271-3684>

MCP, <https://orcid.org/0000-0003-0057-5261>

JLBB, <https://orcid.org/0000-0001-5657-0860>

Recibido: 07/02/2019

Aceptado: 29/11/2020