

Caracterización geomecánica del macizo rocoso en Túneles

Geomechanical characterization of the rock mass in Tunnels

Julio Chable ^A, Jorge López ^B,

A. Ingeniero de Proyectos, JC Estudios Geotécnicos, Mecánica de Rocas

B Ingeniero de Proyectos, Comisión Federal de Electricidad, GEIC, Mecánica de Rocas

RESUMEN: Con los resultados de la caracterización geomecánica del macizo rocoso, para demostrar la importancia de generar información en campo sobre sus características geotécnicas, de acuerdo a los resultados de las condiciones geológica y geotécnica del sitio de estudio, dado que la roca intacta no representa la totalidad del macizo rocoso. De acuerdo a los resultados de la condición geológica-geotécnica del sitio a partir de información de campo y laboratorio, datos que serán de mucha importancia para poder evaluar la estabilidad y los tratamientos de las obras posteriores.

ABSTRACT: With the results of the geomechanical characterization of the rock mass, to demonstrate the importance of generating information in the field about its geotechnical characteristics, according to the results of the geological and geotechnical conditions of the study site, since the intact rock does not represent the totality of the rock mass. According to the results of the geological-geotechnical condition of the site from field and laboratory information, data that will be of great importance to be able to evaluate the stability and the treatments of the subsequent works.

1 OBJETIVO

1.1 Introducción

El objetivo principal de este artículo es de presentar la caracterización geomecánica en zonas de roca y de brechas, así como su análisis en conjunto con los resultados obtenidos de campo como levantamientos geomecánicos y pruebas de laboratorio.

2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

2.1 Litología

Primeramente es necesario tener con la información de los estudios geológicos realizados en la zona de estudio, es importante conocer cada uno de los estratos geológicos y orientaciones regionales de la zona de estudio, con la finalidad de conocer las condiciones de suelo a profundidad en las que se va desplantar las obras, (Figura 1).

2.2 Geología estructural

De acuerdo con la información geológica es necesario realizar un estereograma con los principales sistemas de fallas y fracturas con sus respectivas orientaciones obtenidas en la zona de estudio, con la finalidad de las afectaciones que puedan tener las obras, (Figura 2).

ERA PERIODO	LITOLOGIA	DESCRIPCIÓN
CENozoico CUATERNARIO PLEISTOCENO	Qar	Suelo residual (Qar). Material limo-arcilloso de color pardo oscuro a negro, producto del intemperismo de las rocas presentes en la zona.
	Qcd	Depósitos de talud (Qcd). Constituidos por fragmentos de roca mal clasificados, angulosos a subangulosos y de composición andesítica, embebidos en material limo-arcilloso de color pardo oscuro.
		[Depósitos preterciarios de talud y brechas.]
	tbt	Toba (tbt). De color pardo y ocre, con tonalidad rojiza, constituida por fragmentos filicos andesíticos, de tamaño $0,02\text{ m}$. Al estar seco, la roca puede presentar las siguientes condiciones: arcilloso, limo-arcilloso y arcillo-arenoso.
	tbc	Toba de cenizas (tbc). De color gris a gris verdoso, poco consolidada, conformada por escasos fragmentos filicos de andesita, pólvora y cristales esclafos. Al estar seco, la condición del material es arcilloso y arcillo-arenoso.
	lrb	Brecha de bloques (lrb). Constituida por bloques angulosos y subangulosos de composición andesítica y con tamaños que varían de 0,25 a 1,00 m, embebidos en una matriz limo-arenosa (0,06 a 0,43 mm) de color gris con tonalidad parda, donde el porcentaje de bloques es mayor con respecto a la matriz. Se presentan horizontes de tobas filicas.
	lrs	Brecha de bloques (lrs). Constituida por fragmentos angulosos a subangulosos de composición andesítica y de tamaño variable de 0,02 a 0,08 m y ocasionalmente se observan bloques mayores a 1 m, embebidos en una matriz arena fina a gruesa (0,08 a 4,8 mm) de color gris claro, donde el porcentaje de fragmentos es mayor con respecto a la matriz. Se presentan horizontes de tobas filicas.
	lrs	Brecha arenolimitada (lrs). Constituida por clastos andesíticos de color gris oscuro y rojo, de forma subredondeados a subangulosos y de tamaño de 0,01 a 0,10 m y esporádicamente fragmentos de hasta 1,50 m, empacados en una matriz compacta de arena fina (0,06 a 0,43 mm) y de color gris oscuro con tonalidades pardas. La relación entre la matriz y los clastos se presenta en la misma proporción. Se presentan horizontes de tobas filicas.
	an	(Cen-Br) Andesita y brechas andesíticas. Derrames de andesita porfídica de color gris con tonalidad rojiza, que alternan con brechas andesíticas, de color pardo con tonalidad rojiza, sus fragmentos varían de 0,01 a 0,07 m y están empacados en una matriz vítreo, que al estar seco presenta una consistencia limo-arcillosa.
	TIran	Traquiandésita (Tiran). Conjunto de rocas constituidas por traquiandésitas, dacitas y vírfidos. Son de color gris con tonalidades rosáceas y rojizas, de estructura compacta, constituidas por abundantes cristales de plagioclasa, anfíboles y porfiroclastos, embebidos en una matriz vítreo.

Figura 1. Columna litológica de la zona de estudio.

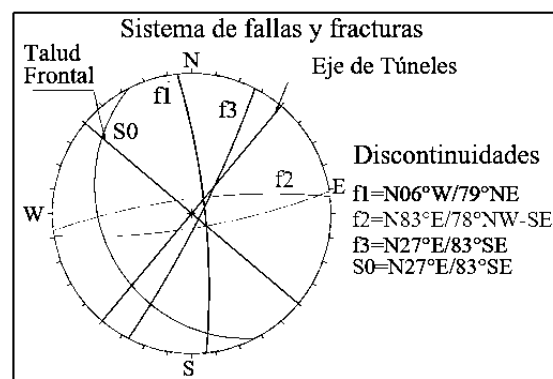


Figura 2. Estereograma con las orientaciones de los sistemas principales de fallas y fracturas del bitúnel.

3 METODOLOGÍA

3.1 Diagrama de procesos

La Figura 3 presenta un diagrama de procesos que sintetiza la metodología de caracterización geomecánica del macizo rocoso.

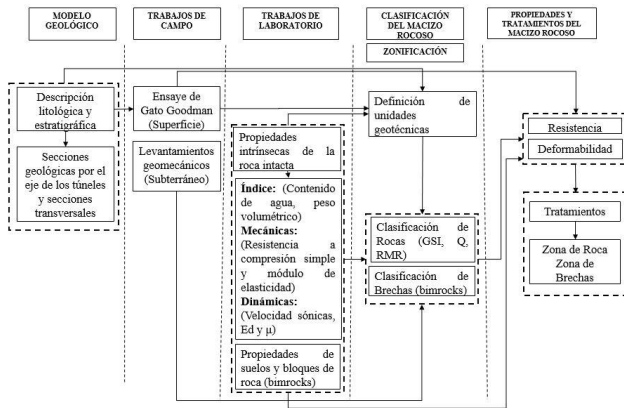


Figura 3. Proceso de caracterización geotécnica.

4 TRABAJOS DE LABORATORIO

Se escogen muestras sanas sin alteración y sin fracturas para realizar sobre ellas los ensayos de resistencia a la compresión simple y con ello la obtención de módulo de elasticidad, así como sus propiedades dinámicas (Ed y μ).

4.1 Propiedades índice

La Tabla 1 presenta los valores promedio correspondientes al contenido de agua y el peso volumétrico de los ensayos realizados en laboratorio.

Tabla 1. Valores promedio de propiedades índices de la roca intacta.

Descripción	Propiedades	UG-3a (Andesita)	UG-3b (Andesita oxidada)	UG-3c (Brecha Andesítica)
	Contenido de agua (%)	2.51	4.91	6.41
Propiedades índice	Peso volumétrico ambiente (kN/m ³)	24.53	21.98	20.59

4.2 Propiedades Mecánicas

Para evaluar el comportamiento esfuerzo – deformación de la roca intacta, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión simple con obtención de módulo de elasticidad, así como pruebas de tensión indirecta y triaxiales. Los resultados promedio por tipo de roca se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de parámetros de resistencia de la roca intacta.

Litología	Descripción	σ_{ci} (MPa)	E_{t50} (MPa)	σ_{τ} (MPa)	m_i (adm)	Relación de Poisson (°)
UG-3a	Andesita	74	14,675	6.41	12	0.12
UG-3b	Andesita oxidada	23	7,350	4.15	12	0.13
UG-3c	Brecha Andesítica	94	5,566	3.49	9	0.11

5 DEFINICIÓN DE UNIDADES GEOTÉCNICAS

Las unidades geotécnicas se pueden definir tomando como referencia la información geológica en conjunto con los resultados de las pruebas de laboratorio (Tabla 3).

Con base en lo anterior se empleó la clasificación de (Deere y Miller, 1966) [1], la cual toma en cuenta la resistencia a la compresión simple y el módulo Et50 de la roca intacta. En la Figura 4 se puede apreciar la distribución de valores para cada tipo de roca.

Tabla 3. Definición de unidades geotécnicas.

Unidad geológica	Descripción	Litología	Unidad Geotécnica
Qtb-br	Depósitos Pirocásticos de Tobas y Brechas	Brecha tobácea (brt)	Ug-2d
Qan-br	Andesitas y Brechas Andesíticas	Andesita (an)	Ug-3a
		Andesita oxidada	Ug-3b
		Brecha andesítica	Ug-3c

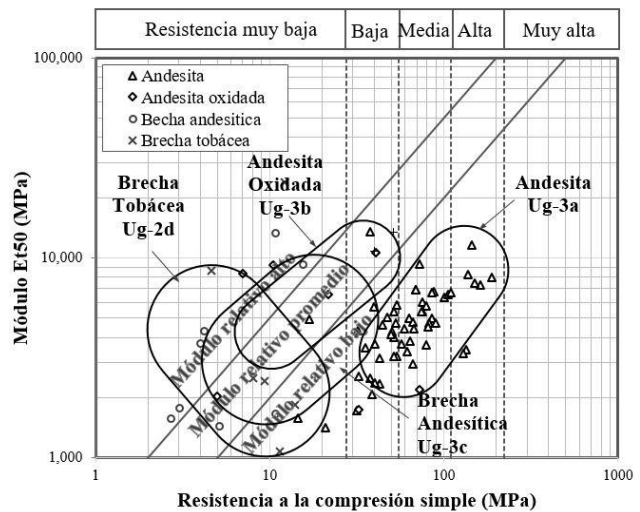


Figura 4. Clasificación de las unidades geotécnicas de las galerías del TIMT, Deere-Miller 1966 [1].

6 TRABAJOS DE CAMPO

6.1 Levantamientos geomecánicos

Los levantamientos geomecánicos que se realizaron en la zona de estudio, se identificaron una zona de rocas y otra de brechas.

En la zona de roca se realizaron levantamientos geomecánicos con la metodología propuesta por (Bieniawski RMR, 1989) [6], (Barton Q, 2002) [3], (Hoek GSI, 2002) [4] y (Morelli, 2017) [5].

En la zona de brechas los levantamientos se llevaron a cabo con la metodología propuesta por (Kalender et al. 2013) [6] para bimbros.

Dentro de estos levantamientos se describe el grado de meteorización de la roca, de acuerdo con el método sugerido por la (ISMR, 1978) [7].

7 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

7.1 Zona de Roca

Para el levantamiento geomecánico de las discontinuidades en zona de roca se consideraron los siguientes criterios.

7.1.1 Resistencia a compresión de discontinuidades, JCS

Para calcular el valor del JCS, se obtienen los valores de rebote promedio con el martillo Schmidt para los distintos contactos roca - roca, para posteriormente calcular la resistencia con el ábaco de (Miller, 1965) [8], (Figura 5) o mediante la siguiente ecuación:

$$\log_{10} JCS = 0.00088 \gamma_r + 1.01 \quad (1)$$

donde: r = rebote promedio; γ = peso volumétrico de la roca en kN/m^3 ; y JCS = Resistencia a compresión simple de la discontinuidad en MN/m^2 .

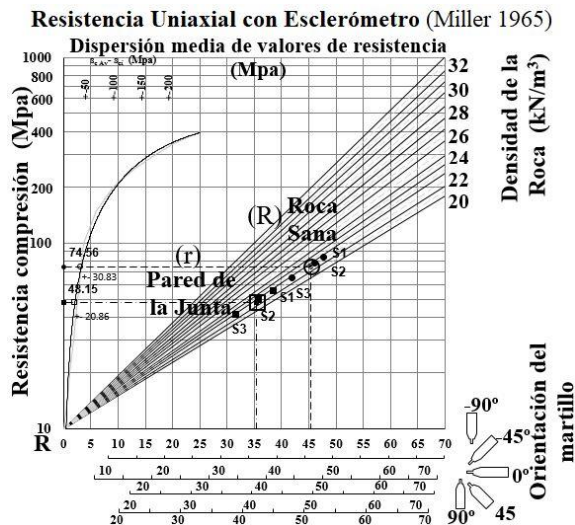


Figura 5. Ábaco para cálculo del JCS con el esclerómetro en campo, de Miller 1965 [8].

7.1.2 Rugosidad, JRC

El coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint Roughness Coefficient), se determinó en campo a pequeña escala con el criterio (Barton-Choubey, 1977) [9], y a gran escala con el de (Barton, 1982) [10]. Ver Figuras 6 y 7.

Rugosidad JRC, Pequeña Escala (Barton-Choubey 1977)

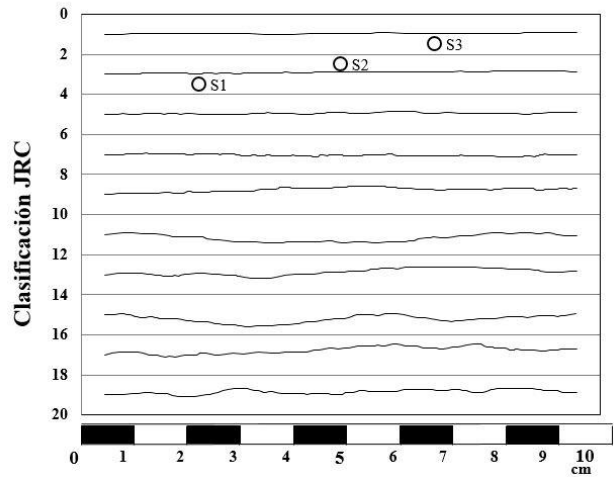


Figura 6. Rugosidad a pequeña escala Barton-Choubey, 1977 [9].

Rugosidad JRC, Gran Escala (Barton 1982)

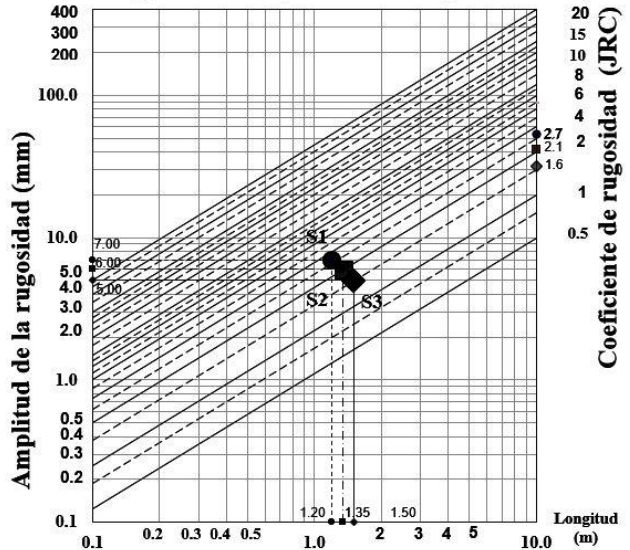


Figura 7. Rugosidad a gran escala Barton, 1982 [10].

7.1.3 Resistencia al corte de discontinuidades, JCS

Para determinar la resistencia al corte de discontinuidades en contacto roca-roca se empleó el criterio de Barton-Choubey [13]:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC_n + \log_{10} \left(\frac{JRC_n}{\sigma_n} \right) \right] + \phi_t \quad (2)$$

donde: t = esfuerzo tangencial; σ_n = esfuerzo normal sobre el plano de discontinuidad; ϕ_r = es el ángulo de rozamiento residual; JRC_n = coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint Roughness Coefficient); y JCS_n = resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (Joint wall Compression Strength).

Para el cálculo del ángulo de rozamiento residual ϕ_r se empleó la siguiente ecuación:

$$\phi_r = (\phi_b - 20 + 20 \left(\frac{r}{R}\right)) \quad (3)$$

donde: ϕ_b = ángulo básico o de la roca sana, R y r = rebotes del esclerómetro en roca sana y pared de la junta.

El ángulo de fricción máximo, es función del ángulo residual y las componentes de rugosidad y resistencia de las discontinuidades, dado por la siguiente ecuación:

$$\phi_{\max} = JRC_n \left[\log_{10} \left(\frac{JRC_n}{\sigma_n} \right) \right] + \phi_r \quad (4)$$

$$\text{Si } \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) > 50, \phi_{\max} = \phi_r + 1.7(JRC) \quad (5)$$

Los valores de JRC y JCS se normalizaron para el macizo a gran escala, de acuerdo con la longitud de las discontinuidades, por medio de las ecuaciones:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0} \quad (6)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03 JRC_0} \quad (7)$$

En la Tabla 4 se presenta la estimación de los ángulos de fricción básico, residual y máximo en las discontinuidades (contacto roca-roca), para 3 sistemas de fracturamiento en diferentes unidades geotécnicas:

Tabla 4. Ángulo de fricción básico, residual y máximo de las discontinuidades, criterio Barton-Choubey.

Sistema	Tipo de ángulo de Fricción (°)	Ug-3a		Ug-3b	
		Sana	Alt.	Sana	Alt.
S1	ϕ (básico)	39	35	35	35
	ϕ_r (residual)	32	29	32	30
	ϕ (máximo)	41	40	40	41
	ϕ (básico)	35	35	35	35
S2	ϕ_r (residual)	31	30	30	29
	ϕ (máximo)	41	40	40	40
	ϕ (básico)	35	35	35	35
S3	ϕ_r (residual)	31	29	31	31
	ϕ (máximo)	41	40	40	40

7.1.4 Índice de Resistencia Geológica, GSI

El valor de GSI (Geological Strength Index) se determinó con los criterios de (Hoek et al. 2013) [11] mediante la ecuación:

$$GSI = 2J_{\text{Cond}76} + \left(\frac{RQD}{2} \right) \quad (8)$$

donde: $J_{\text{Cond}76}$ = Condición de la junta (Bieniawski 1976) [12]; RQD = Rock Quality Designation.

Adicionalmente se empleó el criterio de (Morelli, 2017) [5] para estimar el valor de GSI (Figura 8), el cual resulta de graficar el SR (Structure Rating) en función del SCR (Surface Condition Rating), las cuales se describen a continuación:

$$SR = 1.75 \ln(J_v) + 79.8 \quad (9)$$

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (10)$$

donde: J_v = índice volumétrico de junta; R_r , R_w y R_f = parámetros de RMR 1989, de rugosidad, relleno y alteración de las juntas respectivamente.

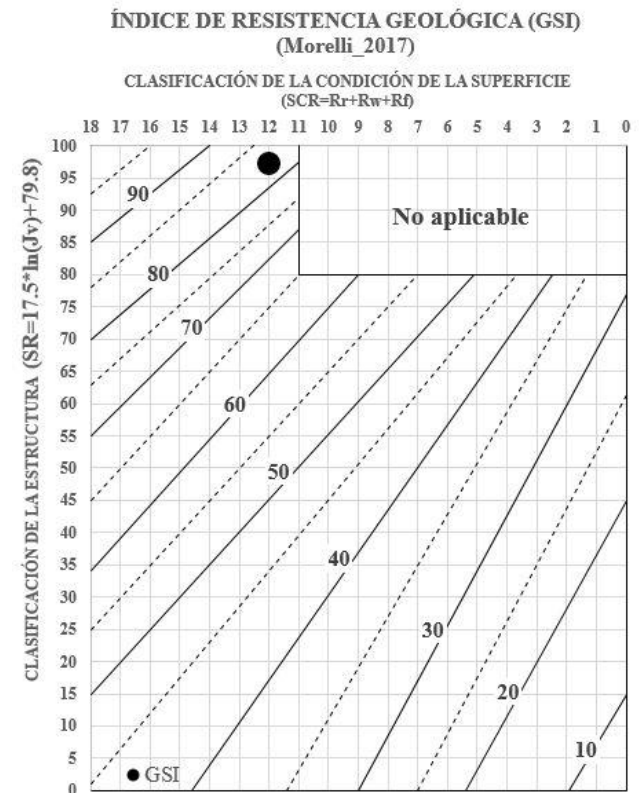


Figura 8. Cálculo de GSI (Morelli, 2017) [5].

7.1.5 Resistencia y Deformabilidad

Para calcular los parámetros de resistencia del criterio de Mohr- Coulomb (c y φ) en la zona de rocas, se calcula-ron las constantes de calidad (m_b, s, a) representativos del macizo rocoso en la zona estudiada a través del criterio de (Hoek –Brown 2002) [4], en conjunto con los valores de GSI (Geological Strength Index). La aproximación de los parámetros de resistencia se obtuvo mediante las siguientes ecuaciones:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \tag{11}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{(1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}))/((1+a)(2+a))}} \tag{12}$$

donde: $\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci}$.

Los parámetros de deformabilidad se definieron a partir de los resultados de las pruebas mecánicas de laboratorio y aplicación de la fórmula empírica propuesta por (Hoek y Diederichs 2006) [13]:

$$E_m = E_i \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right) \tag{13}$$

donde: E_i = módulo de la roca intacta, equivalente al Et50 y D = factor de perturbación, (valores de 0 para macizos rocosos inalterados y hasta 1 para macizos muy alterados).

7.2 Zona de Brecha

La caracterización de las brechas o materiales mixtos se realiza tomando como base la metodología propuesta por (Kalender et al., 2013), para evaluar las propiedades mecánicas de materiales formados por bloques geotécnicamente significativos dentro de una matriz de textura más fina (bimrocks). Los parámetros mecánicos de estos materiales se estiman a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\phi_{br} = \phi_m \left[1 + \frac{1000 \left[\left(\frac{\alpha}{\phi_m} \right) - 1 \right]}{1000 + 5 \left[\frac{(100-VBP)}{15} \right]} \right] \left(\frac{VBP}{VBP+1} \right) \tag{14}$$

$$RCS_{br} = \frac{(A-A \frac{VBP}{100})}{(A-1)} (RCS_m) \tag{15}$$

$$c_{br} = \frac{(RCS_{br})(1-\text{seno}(\phi_{br}))}{2\text{cos}(\phi_{br})} \tag{16}$$

El parámetro RCS_m (resistencia a la compresión simple de la matriz) se determinó con varias metodologías: con martillo Schmidt (figura 7), para definir el límite superior de resistencia en zonas donde se encontró la matriz cementada, mediante pruebas de laboratorio en núcleos recuperados y a partir de consideraciones empíricas de acuerdo con la apariencia de la matriz (ISRM, 1978) [7], figura 10.

El parámetro φ_m (ángulo de fricción interno de la matriz), se determinó a partir de los resultados de las pruebas de campo (clasificación del material y phicómetro); así como a partir de pruebas triaxiales de laboratorio.

Los parámetros VBP (proporción volumétrica de bloques) y α (Ángulo de reposo de los bloques) se determina-ron a partir de la cantidad y forma de los bloques presentes en las unidades caracterizadas. Esta información se definió principalmente en afloramientos de la excavación representativos (figura 10).

De acuerdo con (Sonmez et al. 2009) [14], el parámetro A (figura 10) cuantifica la aportación de la matriz y los bloques en la resistencia al corte del bimrock y puede pre-sentar valores de 0 a 500. El valor de A se incrementa al aumentar la adhesión entre los bloques y la matriz, así como al aumentar la angulosidad de los bloques (Tabla 5).

En función del criterio descrito anteriormente, la Tabla 6 presenta los parámetros identificados en cada unidad geotécnica.

La deformabilidad de las brechas fue obtenida en campo a través de pruebas de presiómetro.

Tabla 5. Variación del parámetro A (Sonmez et al., 2009) [13].

Prueba	Parámetro A
Sin adhesión (cohesión) entre bloques y matriz con bloques redondeados.	0
Débil adhesión (cohesión) entre bloques y matriz con bloques semi redondeados.	10
Moderada adhesión (cohesión) entre bloques y matriz con bloques semi angulares.	50
Fuerte adhesión (pero menos que la cohesión de la matriz) entre los bloques y la matriz con bloques angulares.	500

Clasificación cualitativa		Matriz	Bloques	Clasificación visual de la matriz			
A. Kalender et al. Engineering Geology 183 (2014)	ISRM			G (>5mm)	S	M	C
Casi sin adhesión Los bloques pueden separarse fácilmente de la matriz a mano	Escaleta s1 <0.025 s2 0.025-0.05 s3 0.05-0.1						
Adhesión débil Los bloques se pueden separar de la matriz a mano	s4 0.1-0.25 s5 0.25-0.5			0-25	25-50	50-75	> 75
Adhesión moderada Los bloques se pueden separar fácilmente de la matriz mecánicamente	s6-r0 0.5-1.0 r1 1-5 r2 5-25			Tamaño de bloques (cm)			
Alta adhesión Menos que la cohesión de la matriz, los bloques se pueden separar mecánicamente de la	r3 25-50 r4 50-100 r5 100-250 r6 >250			Forma de bloque			

Figura 9. Clasificación cualitativa, visual A. Kalender et al. Engineering Geology 183, 2014) [6].

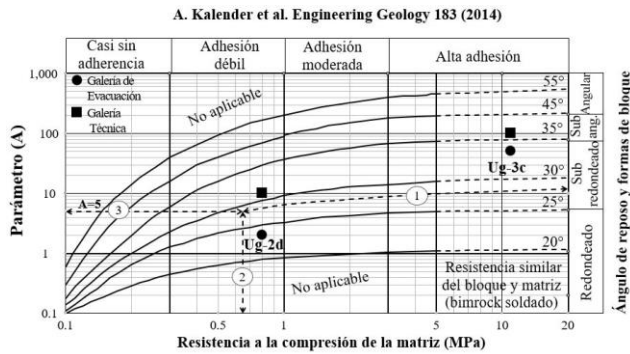


Figura 10. Parámetro "A" del Bimrock (matriz y tamaño de bloques), (Sonmez et al. 2009) [14].

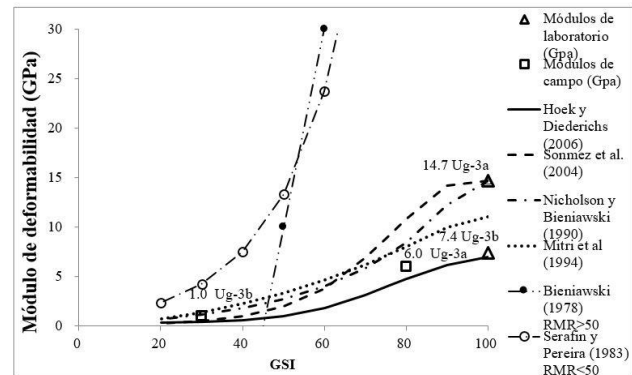


Figura 11. Deformabilidad del macizo rocoso con ecuaciones empíricas, Hoek y Diederichs 2006 [13].

Tabla 6. Parámetros de caracterización de las brechas.

Unidad Geotécnica	Tamaño de Bloques (m)	V.B.P (%)	Ángulo de reposo	Parámetro A
Ug-2d	0.15-0.25	25-50	22-32	2-10
Ug-3c	0.20-0.30	50-75	30-40	50-100

8 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN ZONAS DE ROCA Y BRECHA

De acuerdo con los criterios indicados en el inciso 7, la Tabla 7 presenta los parámetros determinados para cada unidad geotécnica, siendo la ecuación de (Hoek y Diederichs, 2006) [13], la que más se aproxima a los parámetros del macizo rocoso, (figura 11).

Tabla 7. Propiedades del macizo rocoso.

UG	RMR	Q	GSI	m_i	c (MPa)	ϕ (°)	E_m (GPa)
Ug-3a (Andesita)	87	32	84	12	1	47	6
Ug-3b (Andesita Oxidada)	22	11	22	12	0.28	40	1
Ug-2d (Brechas Tobáceas)	*NA	*NA	*NA	9	0.15	30	0.1
Ug-3c (Brecha Andesítica)	*NA	*NA	*NA	9	0.2	37	0.7

* NA, No aplica.

donde: m_i = constante roca intacta; c = cohesión; ϕ = ángulo de fricción; E_m = módulo de elasticidad.

9 REFERENCIAS

- [1] Deere, D. U., & Miller, R. P. 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois Univ. At Urbana Dept. Of Civil Engineering.
- [2] Bieniawski, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- [3] Barton N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. International journal of rock mechanics and mining sciences.
- [4] Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B. (2002): 2002. Hoek-Brown failure criterion, edition. Proc. North American Rock Mechanics Society.
- [5] Morelli, G. L. 2017. Alternative Quantification of the Geological Strength Index Chart for Jointed Rocks, Springer International Publishing AG.
- [6] Kalender, A.; Sonmez, H.; Medley, E.; Tunusluoglu, C.; Kasapoglu, K.E. 2014. An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoil, Hacettepe University, Department of Geological Engineering, Applied Geology, Division, Oakland, CA, USA.
- [7] ISRM. 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368.
- [8] Miller, R.P. 1965. Engineering classification and index properties for intact rock. Tesis de Doctorado, University of Illinois.
- [9] Barton, N., & Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics 1/2:1-54.

-
- [10] Barton, N. 1982. Modelling rock joint behaviour from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design. Office of Nuclear Waste Isolation, Columbus, Ohio, ONWI-260.
 - [11] Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs. 2013. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA.
 - [12] Bieniawski Z. T. 1976. Rock mass classification in rock engineering applications. Proceedings of a Symposium on Exploration for Rock Engineering, Vol. 12, pp. 97-106.
 - [13] Hoek, E., Diederichs, MS. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203-215.
 - [14] Sonmez, H., Kasapoglu K.E, COSKUN A, Tunusluoglu, C., Medley, EW., Zimmerman, RW. 2009. A conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks. *ISRM Regional Symp. Rock Engineering in Difficult Ground Conditions, Soft Rocks and Karst*, (pp. 357-360).