

Rectificación de testigos de roca según norma ASTM D4543 y su influencia en la determinación máxima de carga normal de ensayos uniaxiales

Miguel Vera Barrientos, *profesor asistente*, y Cristóbal Córdova Villa, *alumno memorista*, Departamento de Ingeniería en Minas, Laboratorio de Mecánica de Rocas, Universidad de Santiago de Chile

Resumen

El desarrollo de labores mineras se ve influenciado directamente con el conocimiento del macizo rocoso. Un mayor conocimiento del macizo en cuestión otorga mayor seguridad a las personas, equipos e instalaciones en operaciones interior mina

Un correcto procedimiento a nivel de laboratorio otorga una mayor confiabilidad en las condiciones de la roca, ya que a mayor precisión a nivel de ensayos, entrega una aproximación más acertada en cuanto a las condiciones reales que presenta el macizo rocoso y es por esta razón que se debe procurar minimizar al máximo las posibles desviaciones en las cuales se puede incurrir si es que no se llevan a cabo los procedimientos adecuados.

La ejecución de ensayos destructivos que se realicen a probetas de rocas se verán influenciados por las condiciones que están presente en cuanto a la preparación de la muestra y de acuerdo con el cumplimiento de la norma ASTM D4543, ya que una de las condiciones que se indica es que una probeta de roca para ser ensayada debe cumplir con ciertas condiciones de paralelismo en cuanto a su cara basal y superior, todo esto enfocado a la distribución de una carga normal y no a una componente de corte que afecte, en cierto modo, la máxima resistencia que pueda soportar a nivel de roca intacta.

El trabajo se restringió al diámetro de probetas de tamaño Hq

El artículo propone un método sistemático para la rectificación de muestras de roca intacta con tablas de valores empíricos y escalamiento de los resultados.

Introducción

La importancia que radica en la caracterización del comportamiento mecánico del macizo rocoso, con las correspondientes evaluaciones de ensayos que permitan generalizar algunas propiedades y además que sean aplicables, forma parte del objetivo de nuestro estudio.

La preparación de las probetas es uno de los primeros pasos que se puede referenciar a través de la norma ASTM.

De los distintos tipos de rocas que componen un macizo rocoso el factor geológico y mineralógico nos entrega los indicios del comportamiento en el resultado final de un ensayo, logrando ser este realizado en roca primaria o secundaria. Ejemplos de rocas con alta resistencia y rupturas del tipo frágil para sectores primarios o lo contrario para sectores de roca secundaria.

Sin embargo si uno trata de aislar el factor geomíneralógico significa que trabaja con la geometría de la probeta que quiera ensayar. Algunas compañías mineras establecen para el cálculo del esfuerzo máximo que soporta una muestra de sus ensayos un porcentaje de holgura que llega en casos extremos de hasta un 10% del valor real del UCS.

En esta etapa de nuestro trabajo hemos analizado cerca de 150 ensayos para establecer algunas pautas generales o lineamientos que nos lleven a deducir el porcentaje o efecto del paralelismo de las caras de una probeta rectificadas sobre el resultado final.

Como la resistencia de compresión uniaxial depende directamente de la resistencia individual de los granos componentes de la roca analizada, nuestro universo de muestras se restringió a un tipo de roca de características similares, tratando de aislar el factor geológico, enfocándonos en el rectificado de las muestras, estableciendo condiciones de humedad, razón de esbeltez, aplicación de carga según sugerencias ASTM.

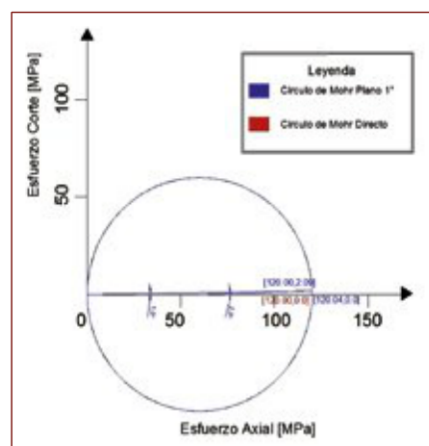


Figura 1. Representación gráfica de un ensayo no confinado a través del círculo de Mohr para una desviación de un 1 grado.

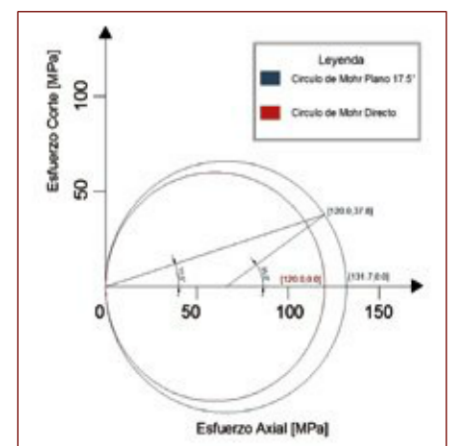


Figura 2 Representación gráfica de un ensayo no confinado a través del círculo de Mohr para una desviación de 17.5 grados.

El objetivo de un buen rectificado comprende el paralelismo en ambas caras, la determinación del plano entre las caras y la perpendicularidad con respecto del eje de la probeta.

Fundamentos teóricos Metodología mediante aplicación de círculo de Mohr

La problemática planteada se puede expresar de manera análoga, utilizando la expresión de Mohr y de manera gráfica, la cual se conoce como el círculo de Mohr.

Cuando se aplica una carga sobre un área determinada, se puede obtener el esfuerzo respectivo, que será un esfuerzo puro si es que la probeta sobre la que se realiza dicho esfuerzo presenta un paralelismo sin desviación alguna, lo cual no genera esfuerzos cortantes, obteniéndose de esta manera la máxima resistencia de la muestra ensayada mediante compresión, a nivel de roca intacta. Ahora bien, si se determina que la probeta de roca a ensayar presenta una leve desviación de paralelismo con respecto de sus caras, esta no va a mostrar la máxima resistencia a la compresión debido a que se generan esfuerzos cortantes que actúan sobre la probeta.

La representación gráfica que se muestra en la Figura 1 se obtiene del ensayo de compresión no confinada generando un valor de sigma 1 que indica el valor máximo de ruptura sin aplicaciones de esfuerzos cortantes y un sigma 3, que para efectos de un ensayo sin confinamiento es cero.

ABSTRACT

The development of mining works is directly influenced by the knowledge of the rock mass. A better knowledge of the mass provides more safety to the people, equipment and facilities in inner mine operations.

A correct procedure at a laboratory level provides a higher reliability on the conditions of the rock, since a higher precision at tests provides a more correct approximation of the actual conditions of the rock mass. For this reason, the possible deviations that can occur if the proper procedures are not carried out should be minimized as much as possible.

The execution of destructive tests that are performed on rock samples will be influenced by the conditions that arise concerning the preparation of samples and in compliance with the ASTM D4543 standard, since one of the conditions indicated therein is that, in order to be tested, a rock core should comply with some parallelism conditions regarding its basal and superior side. All this focused on the distribution of a normal load and not on a cutting compound that affects, in a way, the maximum resistance that it can withstand at an intact rock level.

En el eje vertical se tiene el esfuerzo cortante (τ) y en el eje horizontal se tiene el esfuerzo sigma (σ). El círculo se grafica con diámetro igual al módulo de sigma 1. Desde el centro de la circunferencia se traza un arco en sentido antihorario de medida 2θ ; al intersectar el círculo de Mohr se obtiene una componente de sigma n (σ_n) y de esfuerzo cortante tau (τ). Lo anterior se origina cuando hay una desviación en el rectificado de la probeta que genera un ángulo entre la superficie de la probeta y la aplicación de la carga, como se puede ver en la Figura 2.

De manera analítica se generan las siguientes ecuaciones que ayudan a esclarecer la problemática planteada y que se pueden obtener directamente del círculo de Mohr graficado mediante el uso de trigonometría.

$$\sigma_n = \tau \left[\frac{1}{\sin 2\theta} + \frac{1}{\tan 2\theta} \right]$$

Donde σ_n es el valor de la resistencia promedio máxima conocido de dicha probeta.

τ es el esfuerzo cortante que se genera a una desviación θ de paralelismo entre caras. Posteriormente se obtiene el nuevo radio del círculo de Mohr que se genera con la desviación obtenida, posterior al rectificado.

$$R = \frac{\tau}{\sin 2\theta}$$

Finalmente se obtiene el valor del nuevo sigma 1 para nuestro nuevo sistema, el cual es inferior al sigma 1 máximo, ya que el primero genera esfuerzos cortantes.

$$\sigma_1 = 2 * R$$

Con la metodología señalada se puede obtener el esfuerzo de ruptura correspondiente a diversas desviaciones generadas producto de un inadecuado proceso de rectificado. Cabe señalar que cada vez que una probeta presente desviación de sus caras, el esfuerzo que se obtiene estará subvalorado y, por ende, no se podrá alcanzar la máxima resistencia que se logra con un esfuerzo puro.

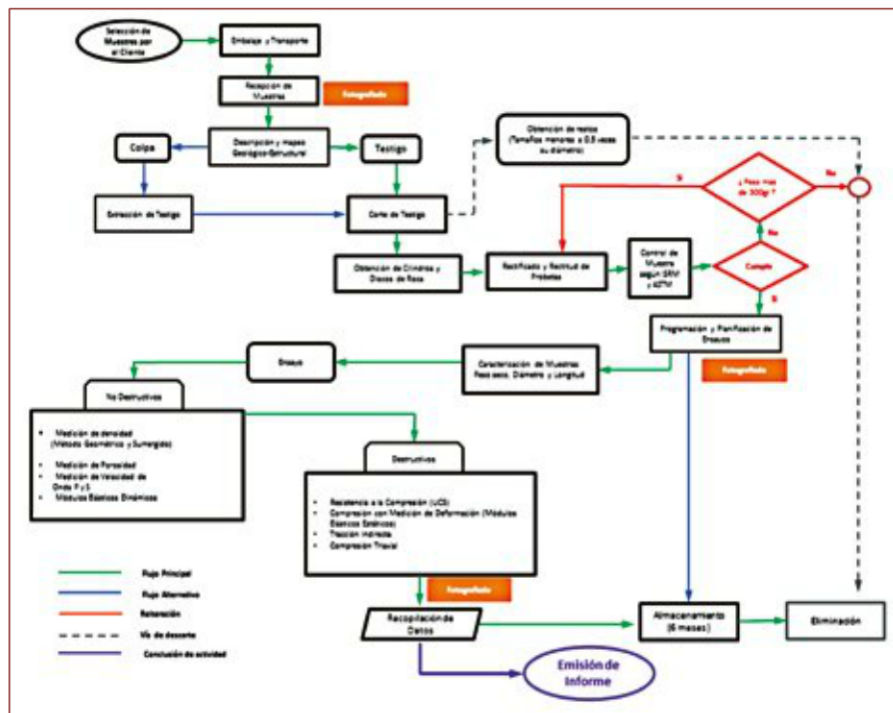


Figura 3. Diagrama de flujo del funcionamiento del laboratorio.

Desarrollo experimental

Nuestro laboratorio, por normativa de calidad, se puede representar en el diagrama de procesos de la Figura 3, que es un documento que esquematiza y detalla el funcionamiento del laboratorio junto con las medidas que se toman en aras del mejoramiento continuo para una mejor satisfacción al cliente.

En esta figura, se pueden visualizar parcialmente las etapas y procesos que deben seguir las muestras, desde la recepción hasta la entrega de resultados.

- I. El cliente contratante envía las muestras a las instalaciones del laboratorio. Estas se inspeccionan para verificar su aptitud, para que se lleven a cabo las pruebas solicitadas, como también verificar la correcta codificación de las muestras por parte del cliente. Si los especímenes no son aptos para los ensayos, se informa al cliente de dicha situación.
- II. Las muestras aceptadas seguirán posteriormente un proceso de examinación, de caracterización litológica básica y de homologación o asignación de un código interno fotografiado si se estima necesario.
- III. El trabajo se planificará conforme a otras tareas que se puedan estar llevando a cabo simultáneamente, con el fin de coordinar los tiempos de entrega y la fecha de finalización del trabajo según lo acordado con el cliente.
- IV. Posteriormente, las muestras pasarán a una etapa de preparación, donde se caracterizarán según lo solicitado por el cliente, junto con guardar un archivo fotográfico de cada uno de los especímenes. Al final de esta etapa, se verificará si se posee toda la información necesaria para llevar a cabo los ensayos, junto con controlar que las muestras cumplan con los requisitos y parámetros necesarios para las pruebas.
- V. A continuación de la ejecución de los ensayos, los resultados se verificarán y serán entregados al cliente, para lue-



Figura 4. Reloj comparador.

go realizar un análisis del servicio realizado, con la finalidad de descubrir si se produjo alguna no conformidad en algunos de los procesos, o si el cliente lo informó, pues no se encontró satisfecho.

- VI. Para el caso de las muestras, luego de ser realizados los ensayos, los restos de rocas se fotografían y almacenan en la bodega del laboratorio para ser retirados por los clientes según lo soliciten, o ser descartadas después de un tiempo determinado, según se estipula en el procedimiento SGC-PAEM-13. La eliminación de los restos de roca se realiza en conformidad a los requerimientos medioambientales que también conciernen a la actividad de CGEM-USACH.
- VII. Las labores finalizan cuando el cliente expresa su satisfacción y se puede tomar en cuenta su parecer, con el objetivo de retroalimentar los procedimientos del laboratorio y aportar a la mejora continua del sistema de gestión de calidad.

Una vez cortadas las muestras y cumpliendo con la norma ASTM D4543 en su relación de forma se procede a realizar su



Figura 5. Sala de rectificado USACH.

rectificado para la preparación y control de probetas. Permite mensurar el error de paralelismo entre las caras basales de una probeta, con una precisión de 0.01 mm. En la Figura 4 se muestra un medidor de paralelismo usado con probetas ya rectificadas; en la Figura 5 se muestra un conjunto de máquinas rectificadoras automáticas. Con estas máquinas se preparan las probetas, para posteriormente realizar la carga de compresión uniaxial simple. Nuestro proyecto creó una matriz con lo mínimo necesario que se debe cumplir en información para comprobar o refutar el marco teórico (Tabla 1). Se especifican las siguientes características: origen del sondaje, litología, dimensiones, paralelismo de la probeta, plano entre caras y perpendicularidad con respecto del eje central de las probetas. Finalmente, se establece si se cumple con la norma o si se procede a revisar.

Para el total de las 150 muestras guardamos y trabajamos con las desviaciones que planificamos en un comienzo.

Resultados de los ensayos

Cumpliendo con el objetivo se preparan probetas con valores de desviación entre sus caras cercanas al 1%, indicando los resultados en la Tabla 2. Como primera impresión de los resultados se incrementa la cantidad de rupturas por estructuras debido a las características propias del lugar, pórfido diorítico con alteraciones cloríticas y conjunto de brechas. Además, la generación de rupturas se debe a material poco consolidado y al ver el historial de ensayos triaxiales se aprecia que la gran mayoría de los resultados la roca es dúctil y deformable. En la Tabla 3 se muestran

ID	Metrage		Número	Diámetro	Cara	Diametros de Medida			Pendiente	Max Delta	ulo entre C	pendiculari	Plano	Desviacion pendiculari	ESTADO
	min	max				1	2	3							
GMT 01	83,10	83,49	1	63,27	1	0,020	0,020	0,020	0,0051	0,020	0,03	0,0003	1	1	Cumple
				63,38	2	0,000	0,030	0,030	0,0046	0,030		0,0005	1	1	1
GMT 01	83,10	83,49	2	63,51	1	0,010	0,010	0,010	0,0026	0,010	0,02	0,0002	1	1	Cumple
				63,25	2	0,010	0,010	0,020	0,0029	0,020		0,0003	1	1	1
GMT 01	101,40	101,60	1	63,51	1	0,020	0,000	0,010	0,0031	0,020	0,03	0,0003	1	1	Cumple
				63,41	2	0,010	0,010	0,010	0,0026	0,010		0,0002	1	1	1
GMT 01	103,39	103,68	1	63,51	1	0,010	0,020	0,030	0,0051	0,030	0,02	0,0005	1	1	Cumple
				63,54	2	0,000	0,040	0,025	0,0047	0,040		0,0006	0	1	1

Tabla 1. Tabla de Rectificado de Probetas.

PROBETA	IDENTIFICACIÓN				OBSERVACIONES	DIMENSIONES [mm]		PESO [gr]		PROPIEDADES MECANICAS		
	ID SONDAJE	DESDE	HASTA			DIAMETRO	ALTURA	SECO	(b)	UCS [MPa]	UCS ₁₆ [MPa]	TIPO DE RUPTURA
1	GMT 01	101,40	101,60		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,51	134,83	1063,90	2,20	30,98	32,50	MATRIZ-ESTRUCTURA
1	GMT 01	103,39	103,68		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,51	135,78	1081,60	2,21	24,37	25,56	ESTRUCTURA
2	GMT 01	103,39	103,68		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,48	134,27	1081,30	2,21	48,15	50,50	MATRIZ-ESTRUCTURA
1	GMT 01	120,11	120,36		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,50	135,07	1075,10	2,18	44,15	46,31	MATRIZ-ESTRUCTURA
1	GMT 01	135,42	135,84		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,34	139,16	1069,04	2,17			
3	GMT 01	135,42	135,84		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,35	137,02	1079,80	2,12	39,46	41,37	ESTRUCTURA
2	GMT 01	135,42	135,84		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,36	134,69	1044,00	2,29	46,59	48,85	ESTRUCTURA
	GMT 01	148,55	148,73		P Diorítico, Alt Cuarzo sericitico	63,55	134,22	1040,30	2,17	21,26	22,30	ESTRUCTURA
	GMT 01	184,59	184,63			63,43	139,93	1039,13	2,19	79,68	83,56	ESTRUCTURA
1	GMT 01	83,10	83,49		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,55	137,70	1064,20	2,20	31,79	33,35	ESTRUCTURA
2	GMT 01	83,10	83,49		P Diorítico, Alt Clorítica. Cuarzo sericitico de fondo	63,36	137,47	1059,50	2,23	28,44	29,82	ESTRUCTURA
1	GMT 01	139,74	140,06		P Diorítico, Alt Clorítica.	63,34	135,34	1067,50	2,34	21,25	22,28	ESTRUCTURA
2	GMT 01	139,74	140,06		P Diorítico, Alt Clorítica.	63,51	35,64	1086,20	2,32	23,32	24,46	ESTRUCTURA
1	GMT 01	164,95	164,99		Brecha con clastos con vetilleos y alteración clorítica	63,51	138,15	990,90	1,93	52,26	54,82	ESTRUCTURA
2	GMT 01	164,99	163,28		Brecha con clastos con vetilleos y alteración clorítica	63,51	133,33	958,10	1,91	63,12	66,21	ESTRUCTURA
1	GMT 01	178,69	178,89		Brecha con clastos con vetilleos y alteración clorítica	63,50	134,81	967,00	1,87	56,64	59,41	ESTRUCTURA
2	GMT 01	178,69	178,89		Brecha con clastos con vetilleos y alteración clorítica	63,57	135,71	964,00	1,94	56,04	58,80	MATRIZ-ESTRUCTURA
Número de resultados, N						17	17	17	17	16	16	
Valor máximo, MAX						63,57	139,93	1.086,20	2,34	79,68	83,56	
Valor mínimo, MIN						63,34	35,64	958,10	1,87	21,25	22,28	
Mediana, MED						63,50	135,34	1.063,90	2,19	41,81	43,84	
Valor promedio, MEAN						63,46	130,18	1.043,03	2,15	41,72	43,76	
Desviación estándar, SDEV						0,08	24,43	44,45	0,14	17,09	17,93	
Coeficiente de variación, CV						0,00	0,19	0,04	0,07	0,41	0,41	

Tabla 2. Resultado de Ensayos de Compresión Simple no Confinada.

los resultados y la nueva matriz desarrollada para analizar el efecto de la desviación sobre las caras de una probeta sobre la compresión uniaxial simple.

En la Figura 6 se representan todos los resultados de las muestras ensayadas, función de la densidad y compresión uniaxial no confinada. Entregando un promedio de densidad de 2.22 gr/cm³, se marcan en pequeñas elipses dos probetas de similares características en profundidad y litología, pero de diferente paralelismo entre las caras. Una pequeña diferencia en el resultado del ensayo UCS y, marcando claramente todos los ensayos bajo la línea de color negro, los resultados fueron por estructuras presentes; además, la profundidad de la muestras desplazó los valores de UCS hacia el lado derecho de la gráfica, como lo indica la línea segmentada.

Conclusiones

- La norma ASTM D4543 entrega un conjunto de valores de paralelismo entre caras que se encuentran en un rango muy conservador asegurando el resultado de ensayos destructivos.
- Al concretar una cierta cantidad de ensayos, la desviación de las caras o el no paralelismo entre ellas no influye sobre el resultado cuando estamos en un rango inferior a 0.1 %.
- Como resultado de la variación de sigma n con respecto al sigma 1, alcanza a 0.03%.
- Para el tipo de probeta ensayada, correspondiente a pórfido y brecha con alteración clorítica, aumenta la probabilidad de que esta sea por estructura.

ID	Metraje		Número	Angulo entre Caras		σ _n	τ	R	σ ₁
	min	max		θ (rad)	θ (°)				
GMT 01	83,10	83,49	1	0,001	0,033	33,352	0,019	16,67	33,35
GMT 01	83,10	83,49	1	0,000	0,000	54,821	0,000	-	54,821
GMT 01	101,40	101,60	1	0,000	0,000	59,413	0,000	-	59,413
GMT 01	103,39	103,68	2	0,000	0,000	32,815	0,000	-	32,815
GMT 01	103,39	103,68	1	0,003	0,146	265,803	0,679	132,903	265,805
GMT 01	120,11	120,36	1	0,002	0,098	124,979	0,214	62,490	124,979
GMT 01	135,42	135,84	1	0,000	0,001	63,980	0,001	31,990	63,980
GMT 01	135,42	135,84	3	0,000	0,008	48,850	0,007	24,425	48,850
GMT 01	139,74	140,06	1	0,000	0,008	17,070	0,002	8,535	17,070
GMT 01	139,74	140,06	1	0,000	0,008	12,260	0,002	6,130	12,260
GMT 01	148,55	148,73	1	0,000	0,008	14,466	0,002	7,233	14,466
GMT 01	164,95	164,99	2	0,000	0,008	120,320	0,017	60,160	120,320
GMT 01	164,99	165,28	2	0,000	0,008	70,188	0,010	35,094	70,188
GMT 01	178,69	178,99	1	0,000	0,008	94,817	0,014	47,409	94,817
GMT 01	178,69	178,99	1	0,000	0,016	16,960	0,005	8,480	16,960
GMT 01	184,59	184,63	1	0,000	0,016	89,367	0,026	44,684	89,367
GMT 02	85,71	85,93	1	0,000	0,016	3,576	0,001	1,788	3,576

Tabla 3. Descripción y Cálculo de los Parámetros Geomecánicos para Distinto Paralelismo de las Probetas.

- Se determinó que el promedio obtenido de carga de ruptura se encontró cercano a los 88 Mpa, estandarizados a un diámetro de 50 mm, que concuerda con los valores estandarizados de la empresa minera, los cuales son de 90 MPa.
- Se determinó que la densidad promedio de las muestras ensayadas se encuentran en el rango de 2.1-2.2 g/cm³.
- Hasta con un 1% de desviación equivalen a un ángulo en grado por sobre los 14°, lo cual equivale a una probeta totalmente oblicua a simple vista.
- Se creó una tabla de control de calidad del rectificad, la cual se basa en el cumplimiento de la norma ASTM D4543.

Recomendaciones

- Se recomienda continuar realizando un estudio, pero con roca más competente y menos alterada.

- Se recomienda cumplir con los estándares establecidos por la norma para asegurar una correcta distribución de esfuerzos. Sin embargo, dependerá del cliente el rango de error que quiera adoptar para los resultados obtenidos.
- Se recomienda tener los sistemas rotulares en las prensas.
- La descripción de las probetas debe hacerse la mayoría de las veces por un geólogo.

Referencias

Anuario de Estándares ASTM D4543-08 (American Society for Testing Materials) Estados Unidos. Annual Book of ASTM Standards, Sección 4, Apartado 04.08 Soil and Rock (I): D420-D5876 y 04.09 Soil and Rock (II). 2013.

Hoek, E. (2002). *Rock Engineering*, disponible en <http://www.rocsience.com>

Bieniawski, Z T. (1989). *Engineering rock mass classifications*.

Gonzalez de Vallejo. (2004). *Ingeniería geológica*. ■