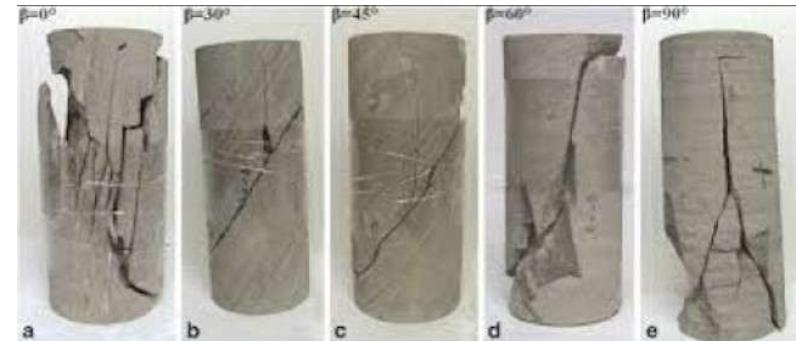


Macizos rocosos



Mecánica de Suelos y Geología
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice

- Macizo rocoso y roca “intacta”
- Criterio Hoek-Brown
- Clasificación RMR, Q , GSI

Macizo rocoso: Roca matriz (intacta) + Discontinuidades

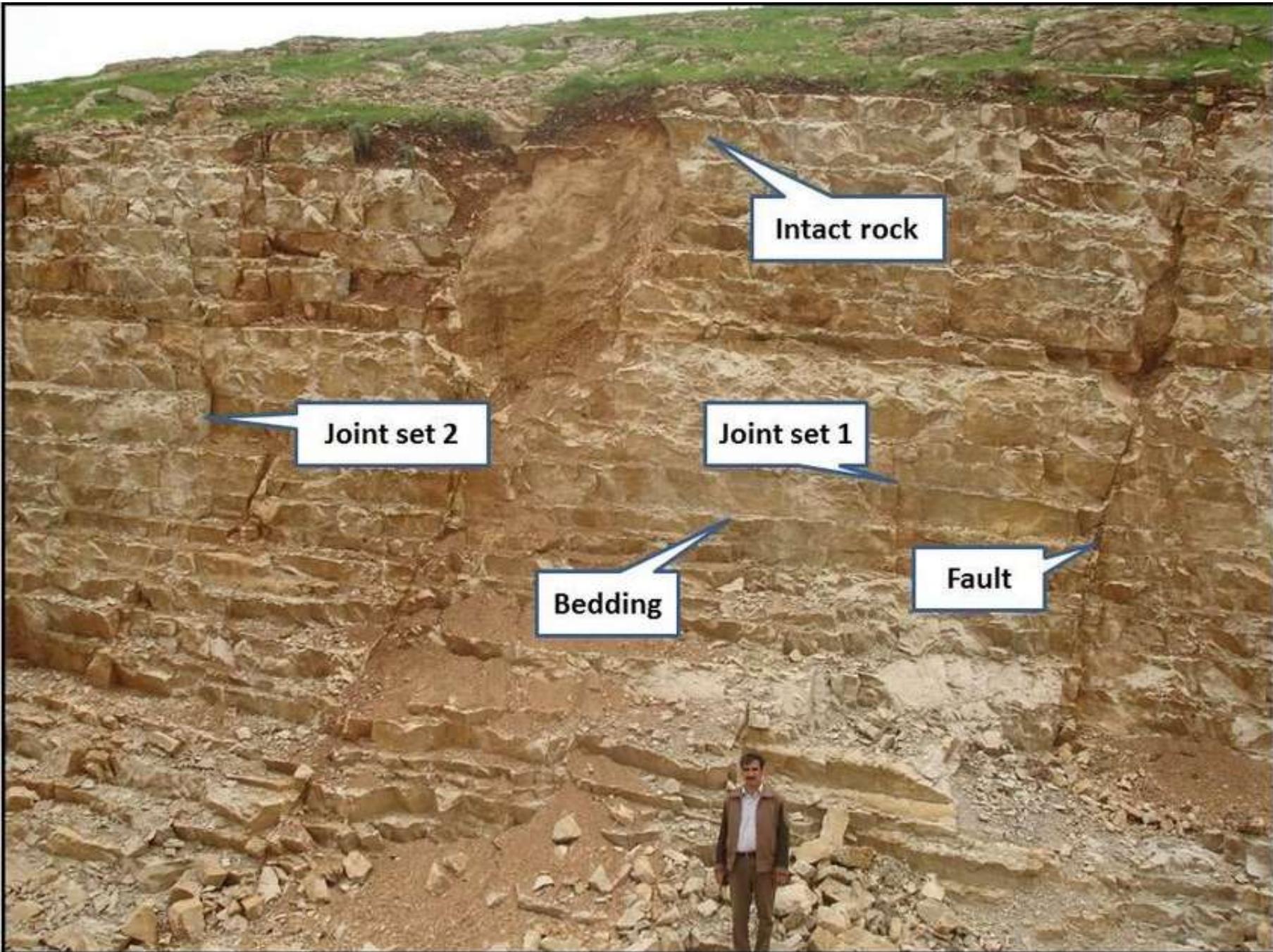


Manera en que se presentan las rocas en la naturaleza.

Anisótropos
propiedades físicas
y mecánicas
variables.

Discontinuos
estructurados en
bloques.

Heterogéneos
discontinuidades y
anisotropía.



Bedding:
plano de
estratificación.

Joint set:
familia de
diaclasas.

Fault: falla.

Intact rock:
roca matriz.

Limestone:
caliza.

Fracturas

Elemento estructural de interés en estudios de MR.

Discontinuidades estrechas y planas.

Comportamiento frágil de la roca.



<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>



https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157625031979374/with/5023313701/

(a) Diaclasas

En gral. no hay desplazamiento entre bloques. Si lo hay, es perpendicular al plano de fracturación.

(b) Fallas

Desplazamiento entre bloques paralelo al plano de fracturación.

Diacasas

Fracturas con o sin desplazamiento de bloques.

Si hay desplazamiento, es perpendicular al plano de fracturación.



<https://www.meteorologiaenred.com/diaclasas.html>



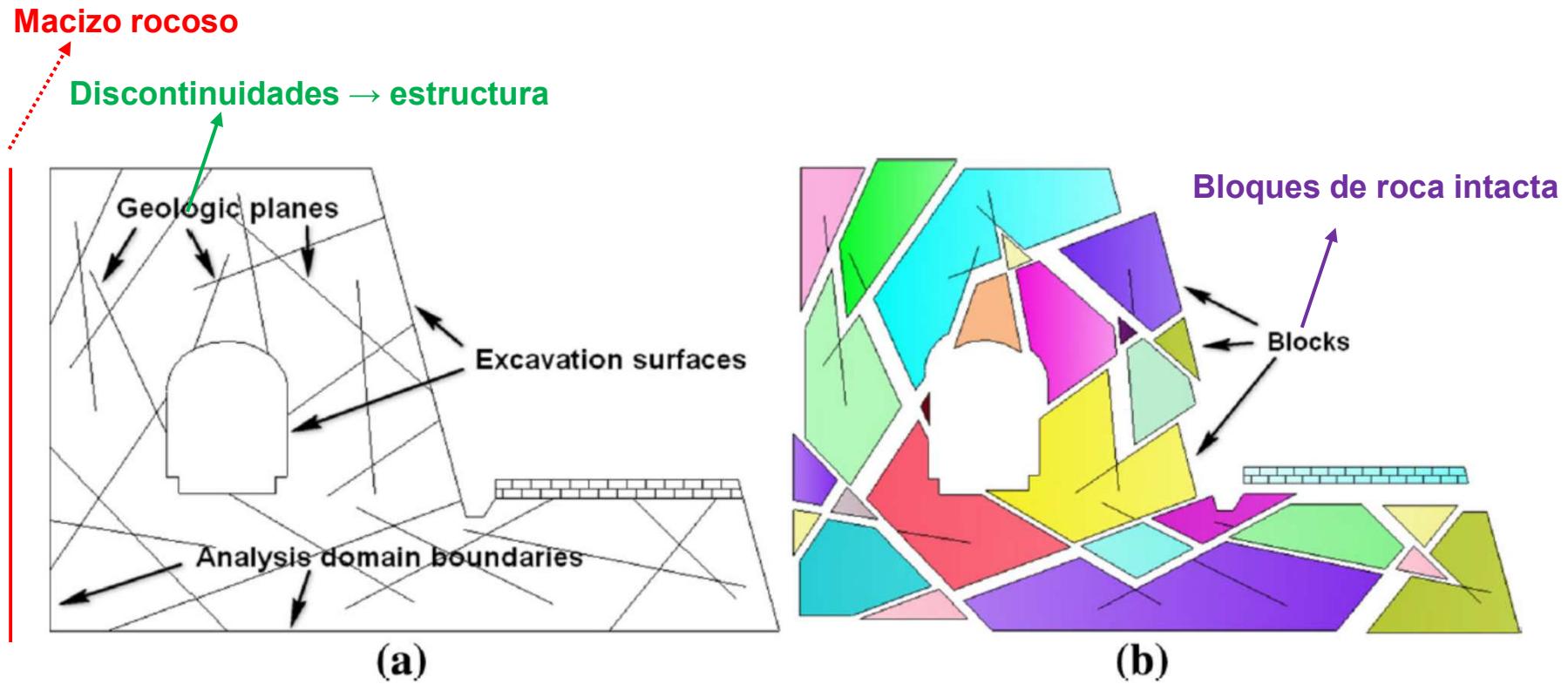
https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157625031979374

Clasificación de macizos rocosos y estimación de su resistencia.

Macizo rocoso

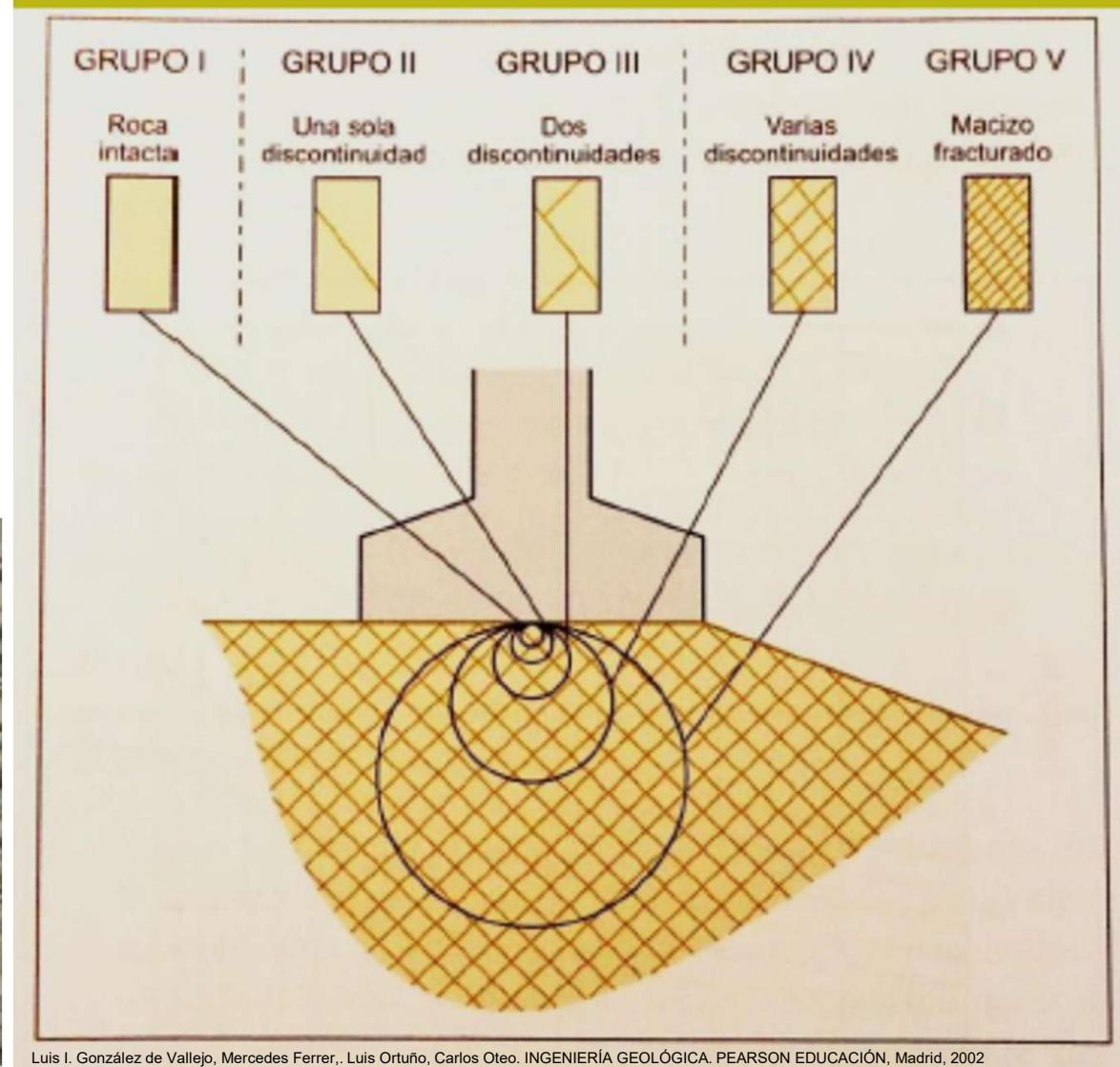
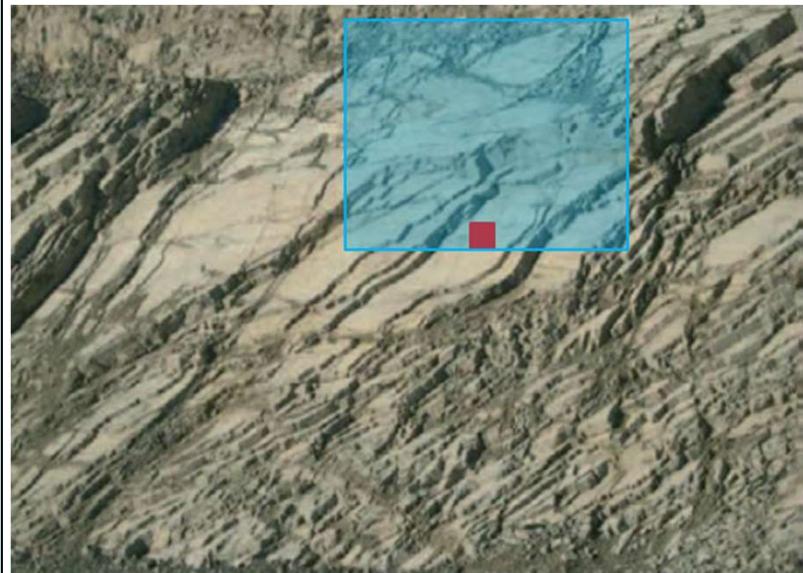
Roca matriz (roca intacta): agregado sólido formado por uno o más minerales, no afectado por discontinuidades observables. Bloques de roca homogénea.

Discontinuidades: planos de origen geológico que separan bloques de roca. Estructura de un macizo rocoso. Ej.: diaclasas, fallas, grietas, planos de estratificación.



Efecto de escala

Heterogeneidad y anisotropía del MR \leftrightarrow discontinuidades (estructura)
→ efecto de escala: respuesta del MR a cargas depende del volumen afectado.



Luis I. González de Vallejo, Mercedes Ferrer, Luis Ortúñoz, Carlos Otero. INGENIERÍA GEOLÓGICA. PEARSON EDUCACIÓN, Madrid, 2002

Grupo I: Roca → propiedades de la roca matriz

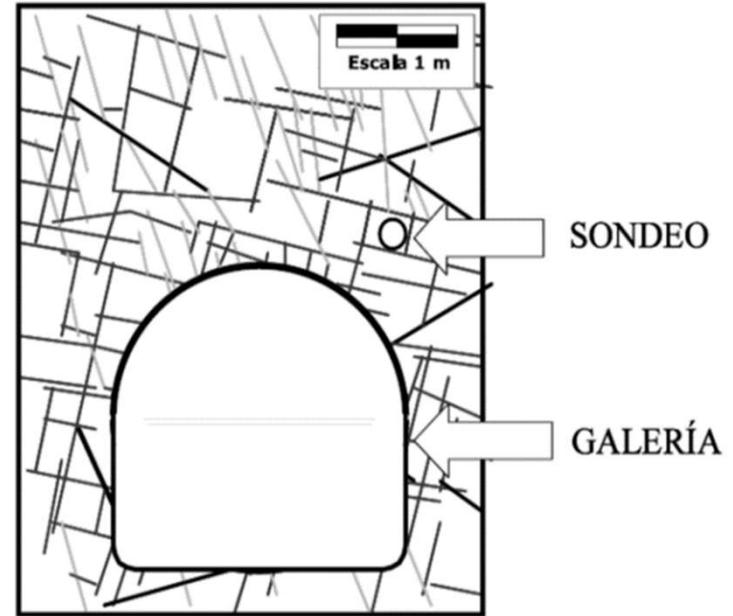
Grupo IV: Roca matriz + Discontinuidades

Enorme volumen de material heterogéneo → propiedades de la roca y las discontinuidades.

Comportamiento del macizo rocoso depende de la escala de observación y del volumen involucrado.



2 escalas de trabajo: sondeo y galería



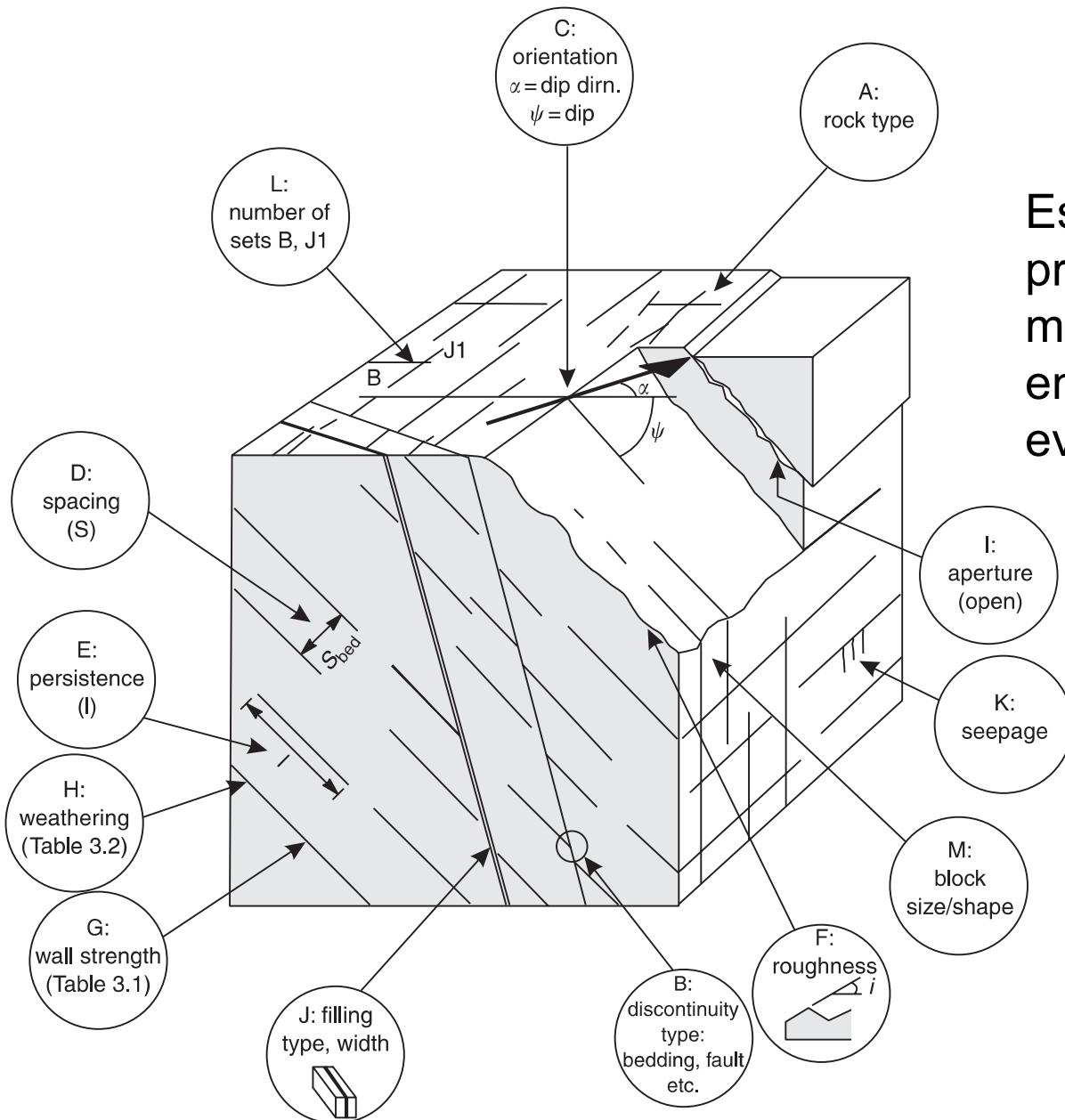
https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes



Sondeo ($\Phi = 6,3 \text{ cm}$) → propiedades roca intacta

Galería (sección = $6,8 \text{ m}^2$) → propiedades discontinuidades

Variables que controlan el comportamiento mecánico de los MR



Estimación de las propiedades del MR ↔ roca matriz, discontinuidades, entorno geológico y su evolución.

Variables que controlan el comportamiento mecánico

- ✓ **Discontinuidades:** tipo, cantidad, número de familias, orientación, espaciado, abertura, persistencia, estado de la superficie de sus caras (rellenos, rugosidad, alteración), circulación de agua.
- Fracturas ↔ dimensiones de los bloques de roca intacta.**
- ✓ **Roca matriz (intacta):** tipo de roca, composición mineralógica, química, porosidad, permeabilidad, densidad, tamaño de granos, alteración, etc.
- ✓ **Otras:** historia geológica del área, estructura regional, estado tensional del MR (ambiente tectónico, sismicidad, vulcanismo, etc.), susceptibilidad de la roca a la meteorización, grado de alteración, etc.

Resistencia de macizos rocosos

Propiedades mecánicas del macizo rocoso controladas por las propiedades de la roca y las discontinuidades.
Medio heterogéneo y anisótropo.

- 1) **Medir la resistencia de la roca matriz.**
- 2) **Estudiar las discontinuidades y determinar su resistencia.**



Estimación de la resistencia del macizo rocoso.

- Criterios empíricos.
- Ensayos de laboratorio.
- Ensayos en campo.

Criterio de rotura de Hoek & Brown (1980, 2019)

- Mecánica de rocas: predecir la resistencia de una roca ante un campo de tensiones, se refiere a la resistencia de pico (ensayos de compresión triaxial).
- Diseño de excavaciones subterráneas en macizos rocosos de rocas competentes.
- **Estimación de la resistencia de macizos rocosos.**
- **Criterio empírico** → estimar la rotura de un medio rocoso a partir de características geotécnicas y geológicas.
- Relación entre σ_1 y σ_3 al momento de la rotura.

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(s - m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$$

Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. London Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.

Hoek, E & Brown, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division;106(GT9), p.:1013-1035.
<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Empirical-Strength-Cruiterion-for-Rock-Masses-1980.PDF>

Hoek, E. & Brown, E.T. (2018). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, 2019, p: 445-463: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

Parámetros de Hoek-Brown calibrados para roca matriz (σ_{ci} , m_i , s , a)

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(s - m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$$

σ_{ci} : resistencia a la compresión simple de la roca.

s , a , m_i : constantes que dependen del tipo de roca.

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(s - m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$$

σ_{ci} : resistencia a la compresión simple de la roca.

- Ensayos de laboratorio sobre muestras de roca sin fracturas.
- Tablas.

s : a partir de ensayos de resistencia a compresión simple ($\sigma_3 = 0$): $\sigma_1 = -\sigma_{ci}$

$$-\sigma_{ci} = 0 - \sigma_{ci} \left(s - m_i \frac{0}{\sigma_{ci}} \right)^a \rightarrow s = 1$$

Resistencia a compresión simple σ_{ci}

Tabla 1 : ESTIMACIÓN EN TERRENO DE LA RESISTENCIA EN COMPRESIÓN UNIAXIAL

Clase (a)	Calificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Estimación en terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente Resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico sólo causan descostramientos superficiales en la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita.
R5	Muy Resistente	100 – 250	4 – 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba.
R4	Resistente	50 – 100	2 – 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, mármol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras.
R3	Moderadamente Resistente	25 – 50	1 – 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas.
R2	Débil	5 – 25	(b)	Un golpe con la punta del martillo geológico deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con una cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy Débil	1 – 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o muy meteorizada.
R0	Extremadamente Débil	0,25 – 1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

(a) Clases según Brown [2].

(b) Para rocas con una resistencia en compresión uniaxial menor que 25 MPa los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables.

https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/MI46B/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D143138

m_i : Ensayos de resistencia a tracción triaxial ($\sigma_1 = \sigma_3 = c_p$).

C_p : resistencia de la roca intacta a la tracción.

Tablas: rangos de magnitud de **m_i** para diferentes rocas.

$$c_p = c_p - \sigma_{ci} \left(1 - m_i \frac{c_p}{\sigma_{ci}} \right)^a \rightarrow m_i = \frac{\sigma_{ci}}{c_p}$$

$a = 0,5$ para rocas (valor empírico: 0,48-0,52)

Parámetro m_i

Valores de m_i para roca intacta. Los valores entre paréntesis son estimados. Rocas ensayadas perpendicularmente a la estratificación o foliación.

Wyllie D. C & Mah C. W. (2004). Rock Slope Engineering. Civil and mining. 4th Ed., Taylor & Francis e-Library, 2005:
https://civilengineering.files.wordpress.com/2014/10/rock_slope_engineering_civil_and_mining.pdf

$$m_i = \frac{\sigma_{ci}}{c_p}$$

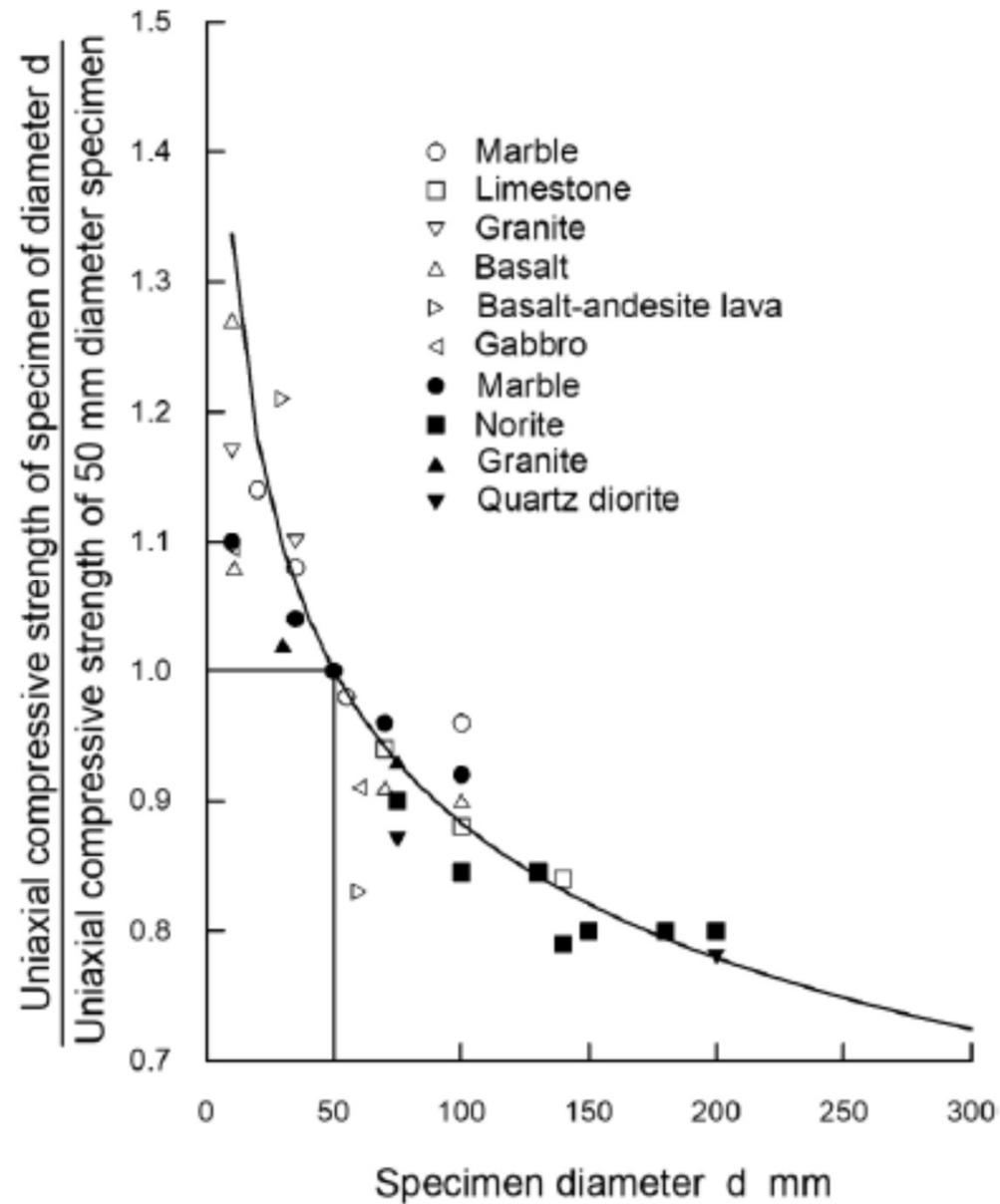
Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21±3)	Sandstones 17±4	Siltstones 7±2	Claystones 4±2
			Breccias (19±5)		Greywackes (18±3)	Shales (6±2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12±3)	Sparitic Limestones (10±2)	Micritic Limestones (9±2)	Dolomites (9±3)
		Evaporites		Gypsum 8±2	Anhydrite 12±2	
		Organic				Chalk 7±2
	Non foliated		Marble 9±3	Hornfels (19±4)	Quartzites 20±3	
METAMORPHIC	Slightly foliated		Migmatite (29±3)	Amphibolites 26±6	Gneiss 28±5	
	Foliated*			Schists 12±3	Phyllites (7±3)	Slates 7±4
	Plutonic	Light	Granite 32±3	Diorite 25±5		
				Granodiorite (29±3)		
IGNEOUS	Dark		Gabbro 27±3	Dolerite (16±5)		
			Norite 20±5			
	Hypabyssal		Porphyries (20±5)		Diabase (15±5)	Peridotite (25±5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25±5)	Dacite (25±3)	Obsidian (19±3)
		Pyroclastic	Agglomerate (19±3)	Breccia (19±5)	Tuff (13±5)	

Efecto de escala en muestras de roca intacta (Hoek y Brown, 1980)

Disminución de la resistencia de la roca en compresión uniaxial (σ_c) a medida que aumenta el tamaño de la muestra \leftrightarrow mayor probabilidad de falla intra e intergranular al incluirse cada vez mayor cantidad de granos. Luego, la resistencia alcanza un valor constante al superarse una cantidad determinada de granos dentro de la muestra.

Relación entre la resistencia de una muestra de roca de diámetro d en compresión uniaxial (σ_{cd}) y muestra de 50 mm de diámetro (σ_{c50}) :

$$\sigma_{cd} = \sigma_{c50} \left(\frac{50}{d} \right)^{0.18}$$



Hoek E. & Brown E. T. (1980): Underground excavations in rock. Instn. Min. Metall., London:

<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>

Parámetros de Hoek-Brown (2002) calibrados para **macizos rocosos** (m_b , GSI , D)

Escala de la roca → escala de macizo rocoso: **modificaciones en los parámetros m y s.**

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(s - m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$$

Resistencia a la compresión simple del MR ($\sigma_3=0$)

$$\sigma_1 = \sigma_{ci} \cdot s^a$$

σ_{ci} : determinada sobre muestras inalteradas de roca intacta.

m_b depende de:

- Resistencia de la **roca** $\leftrightarrow m_i$
- **Discontinuidades**: índice **GSI** y factor **D**.

GSI: índice de resistencia geológica.

D: factor de alteración \leftrightarrow grado de perturbación por efecto de excavación.

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-1} D}$$

$s \leq 1 \leftrightarrow$ valor máximo GSI es 100 $\rightarrow s = e^0 = 1$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

$a = 0,5$ (valor empírico: 0,48-0,52)

Factor de alteración (D)

D: Factor de alteración

Depende del grado de perturbación del MR por efecto de la excavación y relajación de tensiones.

D se aplica sólo a la zona dañada por la excavación.

Se estima por **observación *in situ*** → valor determinado por tablas.

Varía de 0 para macizos rocosos poco o nada perturbados a 1 para macizos muy alterados.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante.	D=0
	Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloquen una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la figura.	D=0.5 No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3m en el macizo rocoso circundante.	D=0.8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensión resulta en alguna alteración.	D=0.7 Good blasting D=1.0 Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afectación a los taludes será menor.	D=1.0 Production blasting D=0.7 Mechanical excavation

Indice GSI (Geological Strength Index)

Marinos & Hoek (2000); Hoek & Brown (2002 y 2019).

- **Parámetro** que se usa para caracterizar al **macizo rocoso** a partir de estudios detallados *in situ*. Etapa exploratoria.
- Factores que controlan las propiedades mecánicas del MR: estructura del MR y características de las discontinuidades.
- Estimación de:
 - Propiedades geomecánicas del MR a partir de observaciones *in situ*.
 - Valores de resistencia del MR frente a diferentes condiciones geológicas: m_b , s y a (criterio de rotura de Hoek & Brown).
 - Indice de la calidad del MR.

P. Marinos, E. Hoek. (2000). GSI – a geologically friendly tool for rock mass strength. Proceedings GeoEng 2000, International conference on geotechnical and geological engineering, Technomic Publishing Co., Melbourne, Australia, Lancaster, PA (2000), pp. 1422-1440.

<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>

E. Hoek, E.T. Brown (2018). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, 2019, p: 445-463: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

Hoek, E & Carranza-Torres, C. & Corkum, Brent & Hoek, Evert & Carranza-Torres, Carlos. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition:

https://www.researchgate.net/publication/282250802_Hoek-Brown_failure_criterion_-_2002_Edition

Indice GSI

Macizos rocosos distintos pueden tener el mismo GSI y resistencias distintas.

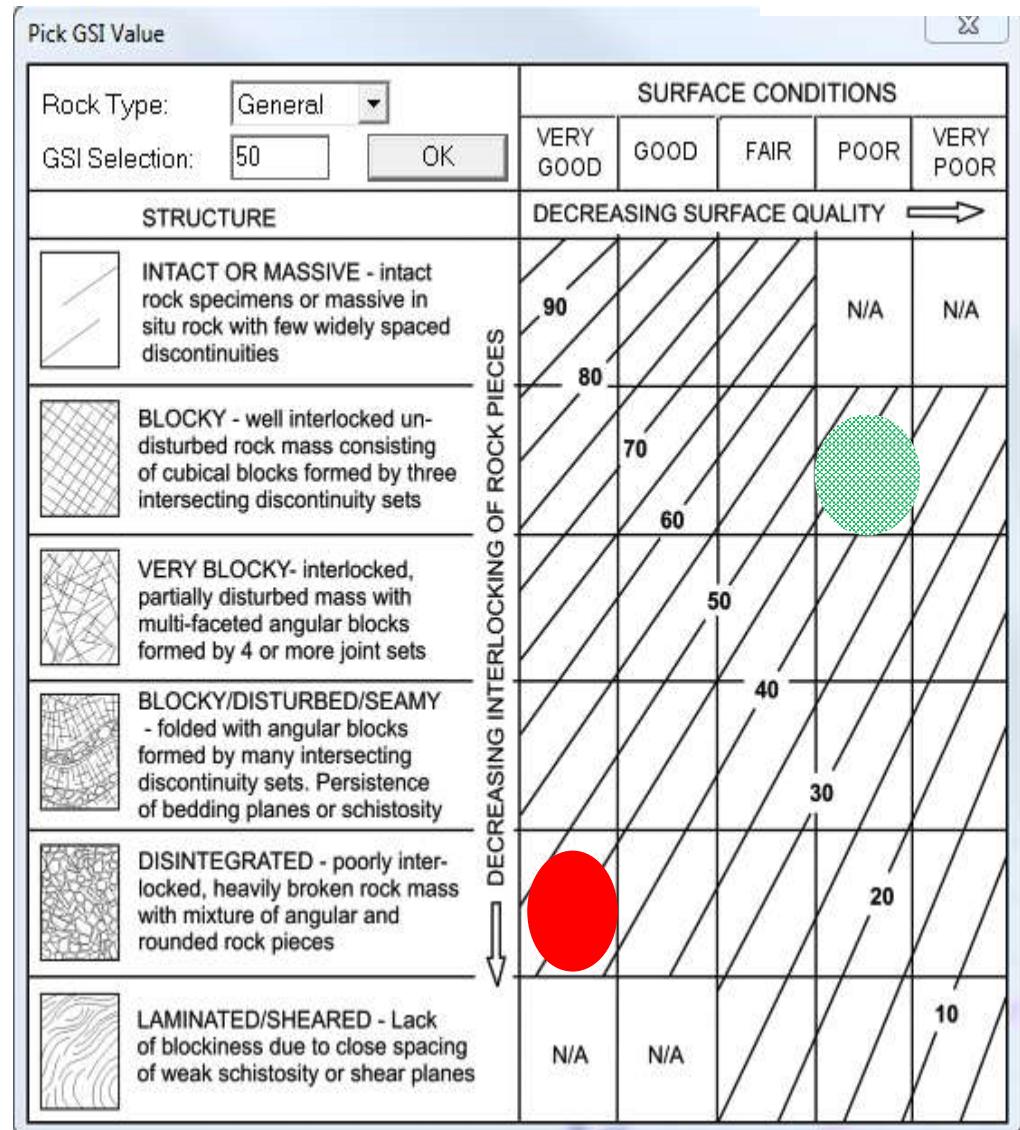
MR1 muy fracturado, desintegrado con paredes de fracturas en muy buen estado (rugosas y limpias): GSI ~ 40-50

MR2 fracturado en bloques, fracturas con superficies lisas y alteradas (malas): GSI ~ 40-50.

La estimación de la resistencia y rigidez de macizos rocosos se hace combinando ensayos de laboratorio sobre muestras de roca sana y métodos de clasificación (GSI, RMR, Q, ...)

Criterio de Hoek-Brown funciona porque está muy bien calibrado con gran cantidad de datos empíricos y de campo, y buenos modelos geológicos de los sitios.

Resultados estimativos.



Roca matriz: ensayos de resistencia

Resistencia a compresión simple σ_c : $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

Misma técnica probetas de hormigón.

Probetas de roca cilíndricas, $\Phi > 50$ mm, $h \sim 2,5 \Phi$, sin discontinuidades, caras planas y lisas → difícil tallar probetas adecuadas a partir de materiales obtenidos en afloramientos o pozos de sondeo.

Ensayo de carga puntual (Franklin)

Muestra de roca de cualquier forma, $\Phi \geq 50$ mm o

$$\text{factor de corrección } F = \left(\frac{De}{50} \right)$$

Fragmento irregular sometido a compresión entre

2 puntas cónicas de acero: $I_s = \frac{P}{De^2}$

I_s : índice de carga puntual

$$I_s = \frac{I_{s(50)}}{F}$$

P : carga de rotura (MPa)

De : diámetro equivalente de la muestra (mm)

Correlaciona con σ_c : $\sigma_c \cong 24 I_{s(50)}$



Resistencia a la tracción

- Directa
- Por flexión
- **Ensayo brasileño de compresión diametral**

Compresión vertical s/disco de roca ($\Phi \sim L$)

Rotura \leftrightarrow tensiones de tracción generadas en sentido \perp a la fuerza de compresión actuante.

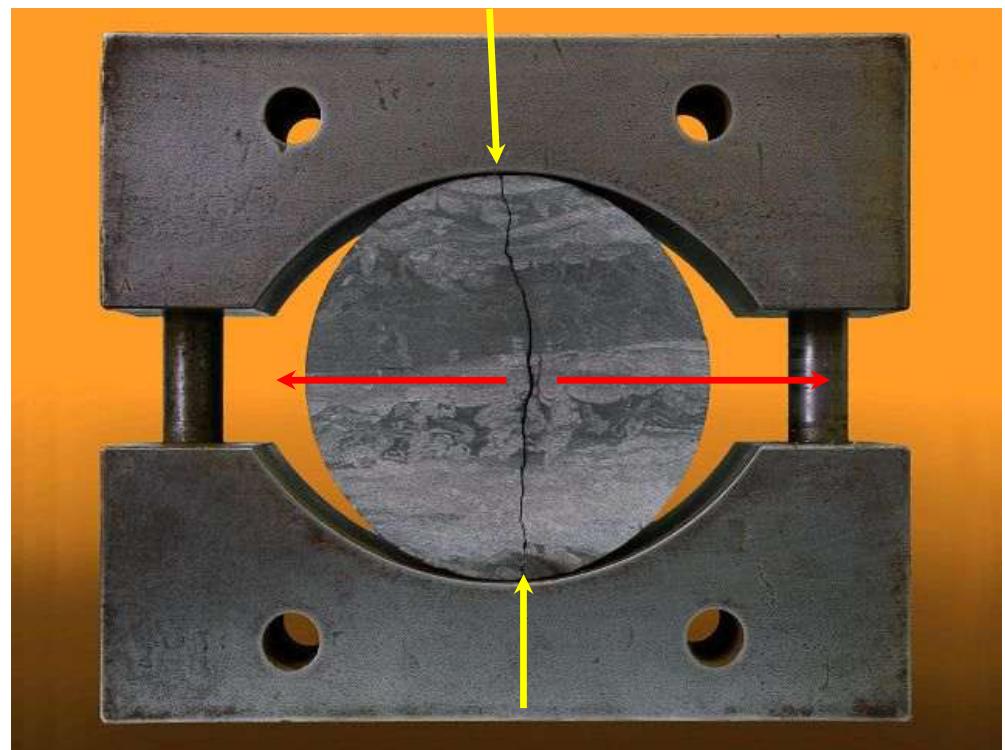
Al momento de la rotura se calcula la resistencia a la tracción:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

P : carga compresiva de rotura (MPa)

L : espesor del disco

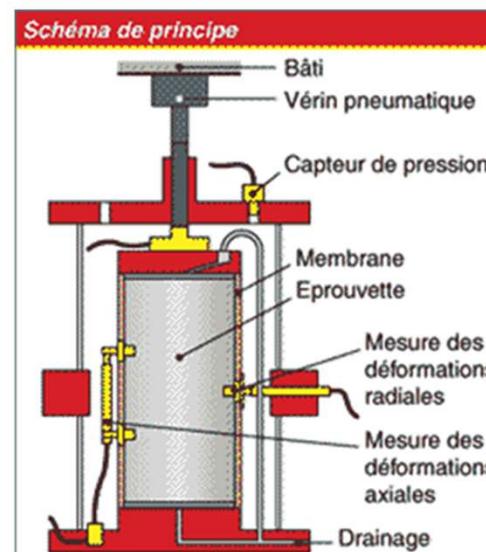
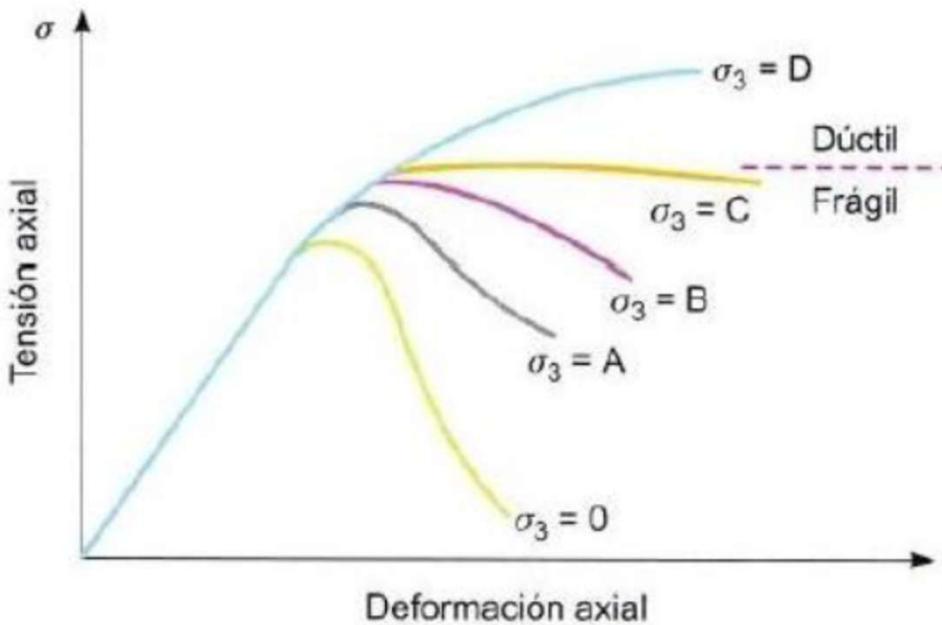
D : diámetro del disco



Roca matriz: ensayos triaxiales

$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$$

- Representa las condiciones de la roca *in situ*, confinamiento.
- Rocas duras: la resistencia de pico varía según P confinante (σ_3)
- A mayor σ_3 mayor resistencia de pico.
- Transición frágil-dúctil $\sim \sigma_1 > 3,5 \sigma_3$



<http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/ensayos-de-laboratorio-resistencia-de-los-suelos-3-ensayo-triaxial/>

Resistencia del macizo rocoso

Correlación entre las propiedades mecánicas de la roca matriz y las del macizo rocoso a partir de:

- Ensayos de resistencia sobre muestras de roca intacta *in situ* y en laboratorio.
- Datos experimentales.
- Índices de clasificación de macizos rocosos (GSI, Q, RMR, etc.)

Valores estimados de GSI, Q, RMR permiten estimar la resistencia a la compresión del macizo rocoso en función de σ_c de la roca matriz.

Resistencia macizo rocoso

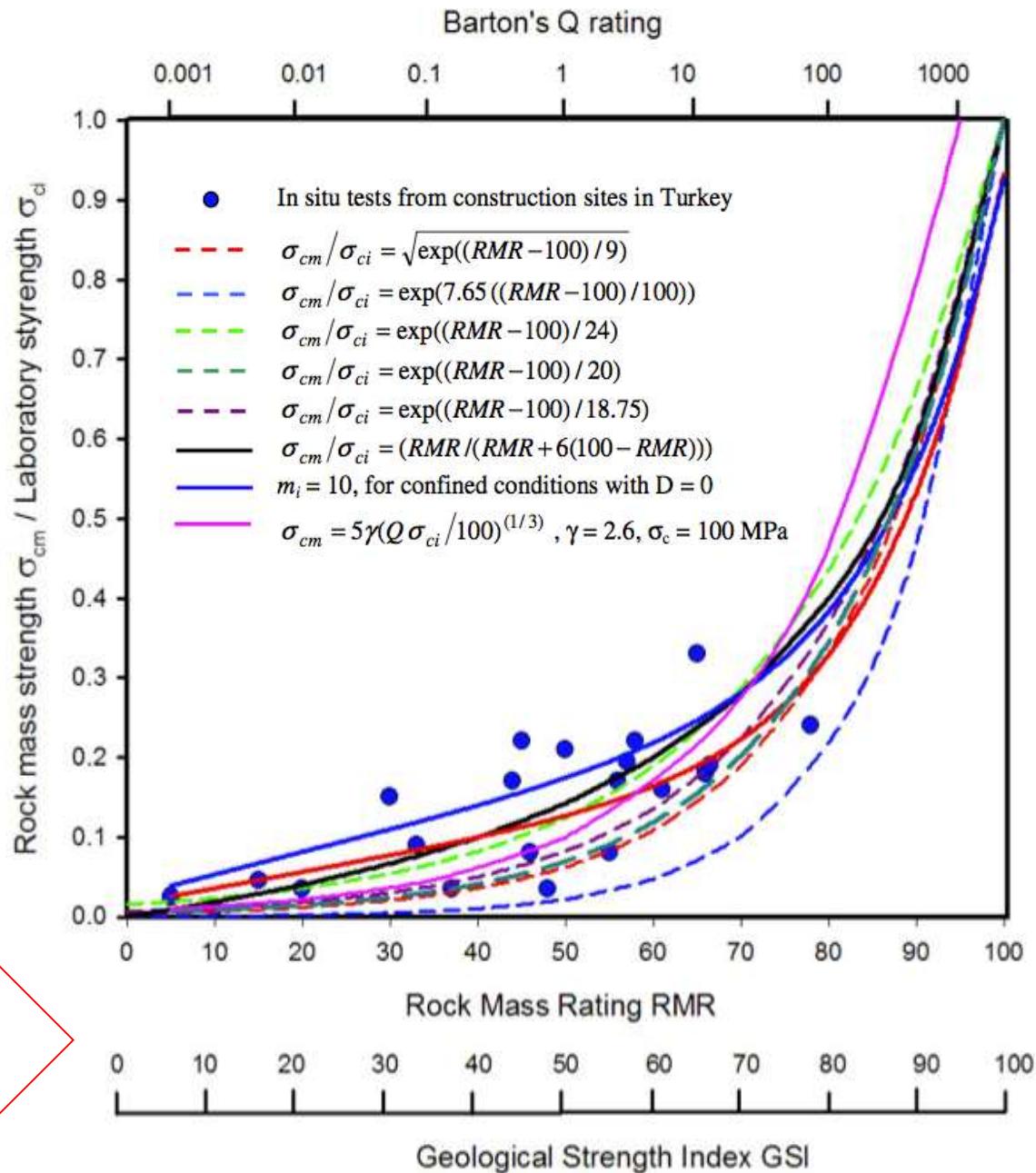
Correlaciones basadas en datos empíricos y modelos → pasar de la escala de la roca matriz (ensayos de laboratorio) a la escala del macizo rocoso.

RMR = 70%

σ_c Macizo rocoso / σ_c Roca $\sim 0,1 - 0,2$

σ_c Roca $\sim 10 - 20 \sigma_c$ Macizo rocoso

Indices que caracterizan al macizo



Deformación de macizos rocosos

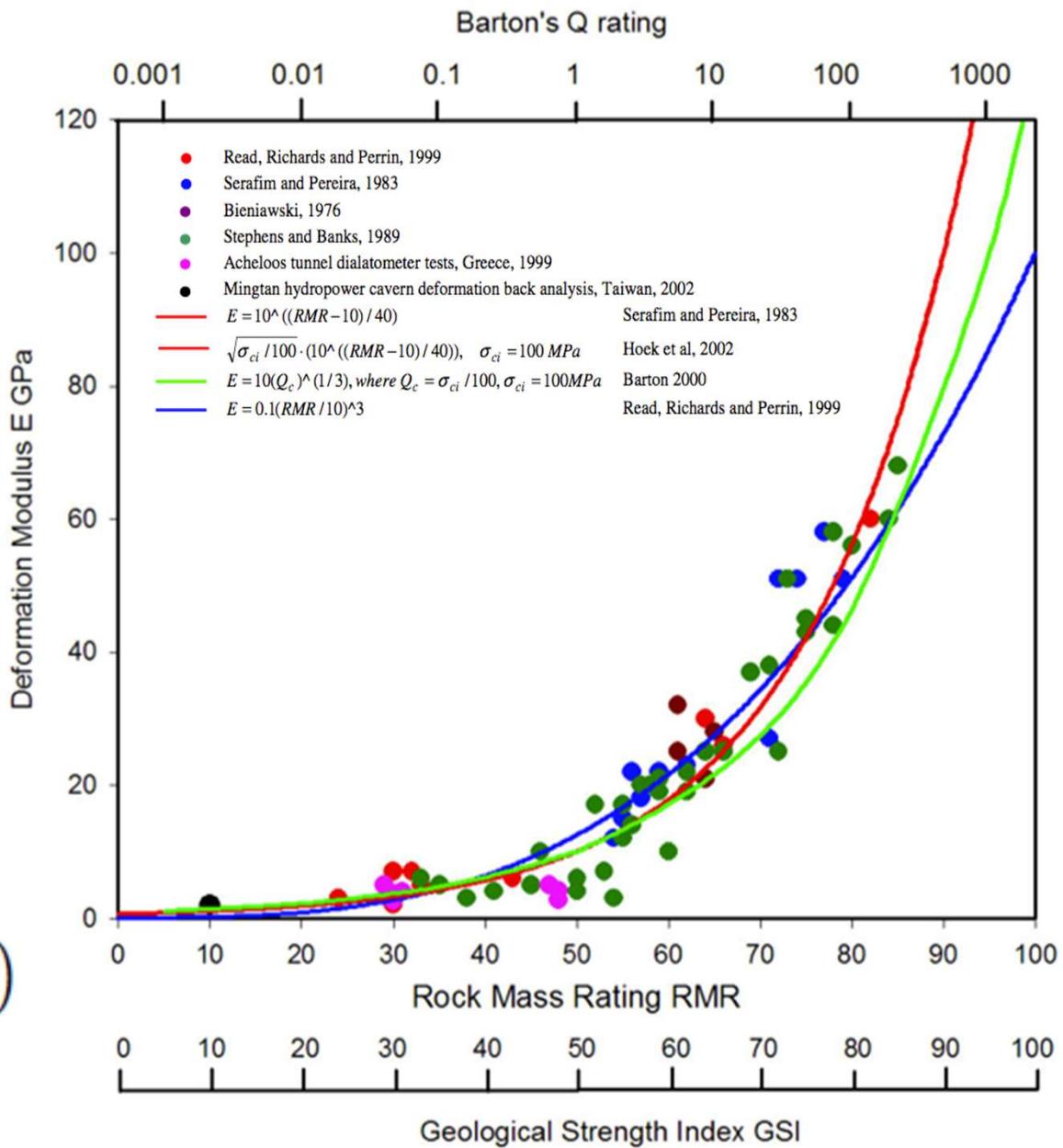
Correlaciones entre los índices de clasificación de macizos rocosos y la deformación del MR a partir de curvas:

- Datos empíricos.
- Datos de ensayos *in situ*.

Módulo de deformación (E) de un macizo rocoso depende de la rigidez de las discontinuidades y de la roca.

Hoek and Diederichs (2006):

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$



Hoek, Evert & Diederichs, Mark. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 43. 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
<https://www.researchgate.net/publication/223844376> Empirical estimation of rock mass modulus

Resistencia al corte

Controla el comportamiento mecánico de las discontinuidades en la naturaleza.

Parámetros que condicionan la resistencia al corte:

- Rugosidad de las paredes.
- Fricción.
- Grado de alteración.
- Puentes de roca.
- Rellenos.
- Presencia de agua y grado de saturación del relleno.



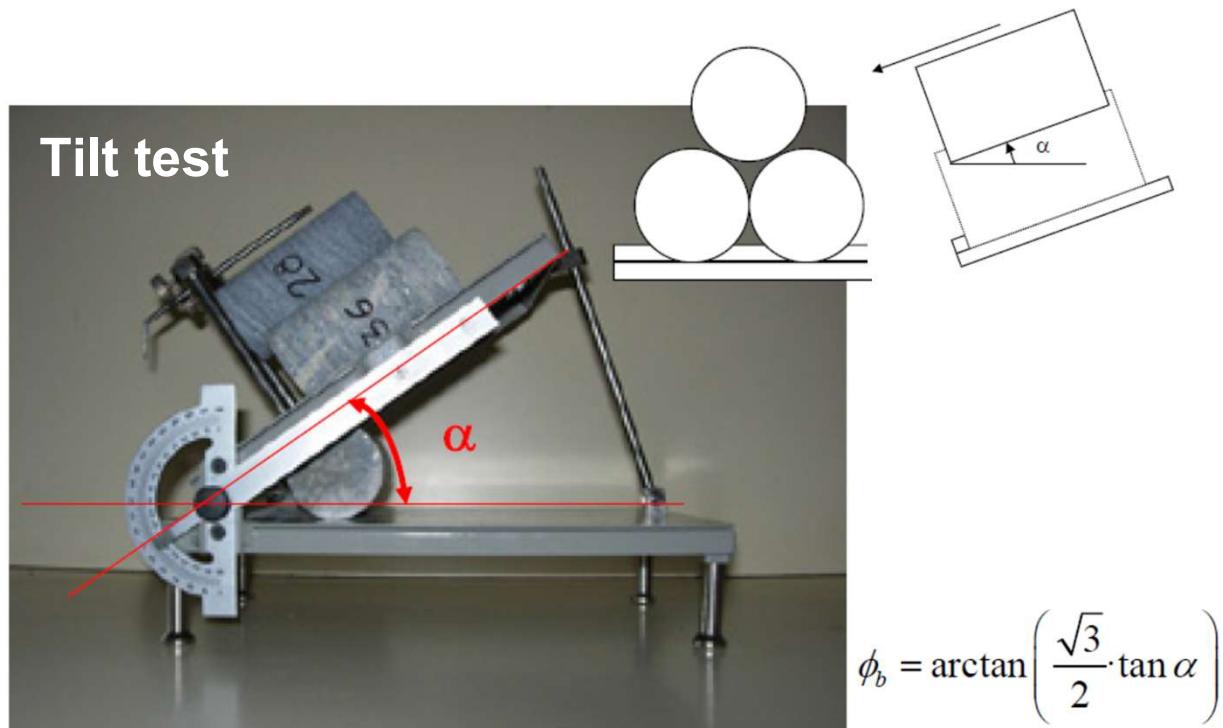
https://www.researchgate.net/publication/322715550_Tema_3_-Propiedades_mecanicas_de_las_discontinuidades

Ensayos de laboratorio, en campo y criterios empíricos.

Discontinuidades. Resistencia al corte.

Ensayo de corte directo y Ensayo de inclinación (Tilt test):

- Cohesión (**c**)
- Angulo de fricción básico (ϕ_b) de la discontinuidad → factor de corrección por rugosidad: ángulo de fricción residual (ϕ_r). El factor de rugosidad depende de la escala y se obtiene por estimaciones visuales *in situ*.



Alejano, Leandro & Arzúa, Javier & Veiga, María. (2018). Tema 3 - Propiedades mecánicas de las discontinuidades:
<https://www.researchgate.net/publication/322715550> Tema 3 - Propiedades mecánicas de las discontinuidades

Resistencia al corte de discontinuidades (τ).

Criterio de Barton-Bandis (Barton y Choubey, 1977)

Discontinuidades naturales: rugosas, irregulares, pueden estar llenas, alteradas.

Barton *et al.* (1970-1990): estudio del comportamiento de discontinuidades rugosas naturales sin relleno y cálculo de τ_p → **Criterio de Barton-Bandis**.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[\phi_r + JRC_n \cdot \log \left[\frac{JCS_n}{\sigma_n} \right] \right]$$

Parámetros

- ϕ_r : ángulo de fricción residual entre las paredes de la discontinuidad.
Estimación a partir de ensayos *in situ* (esclerómetro) sobre roca intacta o de tablas.
- JCS_n : resistencia a la compresión simple de las paredes de la discontinuidad.
Estimación en campo (esclerómetro) o laboratorio.
- JRC_n : índice de rugosidad normalizado.

Sistemas de clasificación de macizos rocosos

- Evaluar las características geomecánicas de los macizos rocosos y realizar una estimación cuantitativa de su calidad → estimación preliminar del comportamiento mecánico.
- Conocimiento del contexto geológico.
- Base empírica.
- Análisis retrospectivos.
- **ASTM D5878-19**

Standard Guides for Using Rock-Mass Classification Systems for Engineering Purposes.

<https://www.astm.org/d5878-19.html>

Indice RQD (Deere, 1967, 1989)

Parámetro de entrada para otras clasificaciones.

Etapa exploratoria del sitio. Testigos de perforaciones o pozos de sondeo.



$$R(\%) = \frac{\sum L_i}{L_c}$$

R: recuperación porcentual del testigo.

L_i : longitud de todos los fragmentos de roca intacta recuperados.

L_c : longitud de la carrera (longitud de avance del saca-testigos: 1m, 2m, 5m, ...)

$$RQD = \frac{\sum_{L>10cm} L_i}{L_c}$$

L_i : longitud de los fragmentos de roca intacta >10 cm.

Índice del grado de fracturación de un MR.

Recuperación del testigo (R) y RQD (Deere, 1967, 1989)

$$R = \frac{\sum L_i}{L_c}$$

$$\sum L_i = 85 \text{ cm} (40+1+2+2+30+5+5)$$

$$L_c = 100 \text{ cm}$$

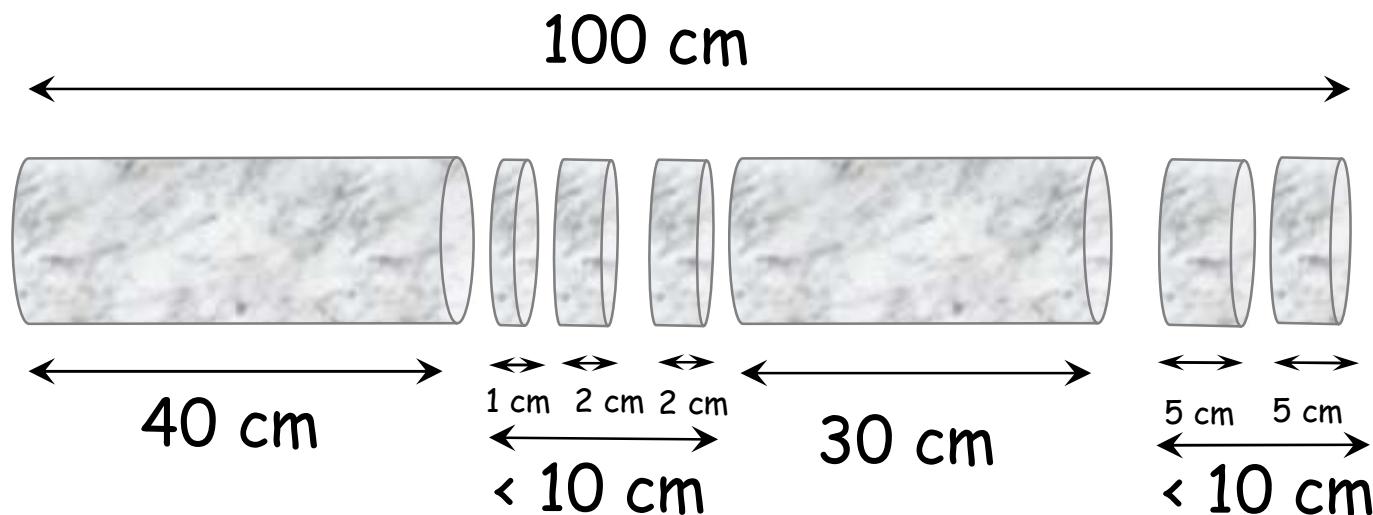
$$R = 0,85 \rightarrow R (\%) = 85\%$$

$$RQD = \frac{\sum_{L > 10 \text{ cm}} L_i}{L_c}$$

$$\sum_{L_i > 10 \text{ cm}} = 70 \text{ cm} (40+30)$$

$$L_c = 100 \text{ cm}$$

$$RQD = 0,70 \rightarrow RQD (\%) = 70\%$$



$$RQD = \frac{\sum L_{iRQD}}{L_c}$$

Roca Fresca I



Levemente
Meteorizada II



Moderadamente
Meteorizada III



Muy Meteorizada IV



Completamente
Meteorizada V



Suelo Residual VI



https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/GL5201/1/material_docente/bajar?id=391885

L_{iRQD} : longitud de los fragmentos de roca intacta >10 cm. Roca muy meteorizada (IV), completamente meteorizada (V) y suelo residual (VI) no se consideran.

L_c : longitud de la carrera (longitud de avance del saca-testigos)

Proporción de roca "buena" (competente), **fresca (I)** o de leve (II) a moderadamente (III) **meteorizada**, que se recupera en cada tramo de la perforación.

RQD (%)	Calidad del macizo rocoso
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 -75	Regular
75 – 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fracturas naturales entre fragmentos de roca >10 cm.

Fragmentos de rocas sólidas y duras.

No se consideran: las fracturas paralelas a la perforación ni las producidas por la herramienta.

A mayor RQD, mejor calidad y menor **grado de fracturación del MR**.

Deere, D.U. and Miller, D.W. (1967) The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 91-101: <https://doi.org/10.1520/STP48465S>

Deere, D.U. 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station: <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/collection/p266001coll1/id/6945/>

Rock Tunnelling Quality Index (Indice Q)

(Barton, Lien y Lunde, 1974)

Desarrollado para el diseño de túneles en rocas competentes

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

Parámetros considerados:

RQD (grado de fracturación del macizo rocoso)

J_n (cantidad de familias)

J_r (rugosidad de paredes)

J_a (alteración de paredes)

J_w (presencia de agua)

SRF (estado tensional del macizo rocoso \leftrightarrow confinamiento)

Discontinuidades

Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, 6, 189-236.

<https://doi.org/10.1007/BF01239496>

NGI (2022) Using the Q-System—Rock Mass Classification and Support Design. NGI Publication, Oslo, 56 p.: https://www.ngi.no/globalassets/bilder/forskning-og-radgivning/bygg-og-anlegg/handbook-the-q-system-may-2015-nettutg_update-june-2022.pdf

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

$$\frac{RQD}{J_n}$$

Estructura del macizo rocoso → medida relativa del **tamaño de bloques de roca intacta**.

$$\frac{J_r}{J_a}$$

Resistencia al corte de las discontinuidades ↔ fricción entre bloques, rugosidad, rellenos.

$$\frac{J_w}{SRF}$$

Estado tensional del MR ↔ acción de los esfuerzos tectónicos sobre el macizo (SRF) y presión de agua (J_w).

RQD (%)	Calidad del macizo rocoso
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 -75	Regular
75 – 90	Buena
90 - 100	Excelente

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

J_n : índice de familias de discontinuidades

DESCRIPCIÓN	J_n
- Roca masiva	0,5-1
- Una familia de diaclasas	2
- Una familia y algunas juntas ocasionales	3
- Dos familias	4
- Dos familias y algunas juntas	6
- Tres familias	9
- Tres familias y algunas juntas	12
- Cuatro o más familias, roca muy fracturada, "terrones de azúcar", etc.	15
- Roca triturada terrosa	20

En boquillas, se utiliza 2 J_n y en intersecciones de túneles 3 J_n

Diapositiva 41

VA0

Ver manual 2004 p 198 (214)

Victoria Altinier; 2023-05-04T20:35:04.164

J_r : índice de rugosidad de las discontinuidades

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

DESCRIPCIÓN	J_r
* Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento cortante de menos de 10 cm	
- Juntas discontinuas	4
- Junta rugosa o irregular ondulada	3
- Suave ondulada	2
- Espejo de falla, ondulada	1,5
- Rugosa o irregular, plana	1,5
- Suave plana	1
- Espejo de falla, plana	0,5
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ambas se desplazan lateralmente	J_r
- Zona conteniendo minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de la junta	1
- Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta	1
NOTA: Si el espaciado de la familia de juntas es mayor de 3 m hay que aumentar el J_r en una unidad.	
Para juntas planas con espejo de falla provisto de lineaciones, si éstas están orientadas en la dirección de mínima resistencia, se puede usar $J_r=0,5$	

DESCRIPCIÓN	J_a	φ'_r
* Contacto entre las dos caras de la junta.		
- Junta sellada dura, sin reblandecimiento, impermeable, p.ej. cuarzo, paredes sanas.	0,75	25-30
- Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25-30
- Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	2	25-30
- Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible.	3	20-25
- Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, p.ej. caolinita, muica, clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 ó 2 mm.	4	8-16
*Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de desplazamiento.	J_a	φ'_r
- Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla.	4	25-30
- Rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos, fuertemente sobreconsolidados. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	6	16-24
- Sobreconsolidación media o baja, reblandecimiento; rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	8	12-16
- Rellenos de arcillas expansivas, p.ej. montmorillonita, de espesor continuo de 5 mm. El valor J_a depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8-12	6-12
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ésta ha sufrido un desplazamiento cortante.	J_a	φ'_r
- Zonas o bandas de roca desintegrada o roca machacada y arcilla.	6-8 u 8-12	6-24 " "
- Zonas blandas de arcilla limpia o arenosa con pequeña fracción de arcilla, sin reblandecimiento.	5	6-24
- Milonitos arcillosos gruesos	10-13 ó 15-20	6-24 " "

J_a : índice de alteración de las discontinuidades

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

J_w : índice de P de agua en discontinuidades.

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

DESCRIPCIÓN	J_w	Presión agua kg/cm ²
- Excavaciones secas o de fluencia poco importante, p.ej. menos de 5 l/min localmente.	1	<1
- Fluencia o presión medias, ocasional lavado de los rellenos de las juntas.	0,66	1-2,5
- Fluencia grande o presión alta; considerable lavado de los rellenos de las juntas.	0,33*	2,5-10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas al dar las pegas, decayendo con el tiempo.	0,1-0,2*	>10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0,05-0,1*	>10

Los valores presentados con el signo * son sólo valores estimativos. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar J_w .
 Los problemas causados por la formación de hielo no se consideran.

DESCRIPCIÓN			
1. Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma.			SRF
A	Varias zonas débiles contenido arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad).	10	
B	Sólo una zona débil contenido arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación menor de 50 m).	5	
C	Sólo una zona débil contenido arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación mayor de 50 m).	2,5	
D	Varias zonas de fractura en roca competente (libre de arcilla), roca suelta alrededor (cualquier profundidad).	7,5	
E	Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad de excavación menor de 50 m).	5	
F	Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad mayor de 50 m).	2,5	
G	Juntas abiertas sueltas, muy fracturadas, etc. (cualquier profundidad).	5	
2. Rocas competentes, problemas de tensiones en las rocas.			SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie.	>200	2,5
J	Tensiones medias.	200-10	1,0
K	Tensiones altas, estructura muy compacta (normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales).	10-5	0,66-0,33
L	Explosión de roca suave (roca masiva).	5-2,5	0,33-0,16
M	Explosión de roca fuerte (roca masiva).	<2,5	0,16
σ_c y σ_t son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca; σ_1 es la tensión principal máxima que actúa sobre la roca.			
3. Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.			SRF
N	Presión de flujo suave.	5-10	
O	Presión de flujo intensa.	10-20	
4. Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.			SRF
P	Presión de expansión suave.	5-10	
R	Presión de expansión intensa.	10-20	
- Observaciones al SRF:			
i	Reducir los valores del SRF en un 25-50% si las zonas de rotura sólo influyen pero no intersectan a la excavación.		
ii	En los casos en que la profundidad de la clave del túnel sea inferior a la anchura del mismo, se sugiere aumentar el SRF de 2,5 a 5 (ver H).		
iii	Para campos de tensiones muy anisótropos (si se miden) cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reducir σ_c y σ_t a $0,8 \sigma_c$ y $0,8 \sigma_t$; cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reducir σ_c y σ_t a $0,2 \sigma_c$ y $0,6 \sigma_t$, donde σ_3 es la tensión principal mínima que actúa sobre la roca.		

SRF: factor de reducción de esfuerzos

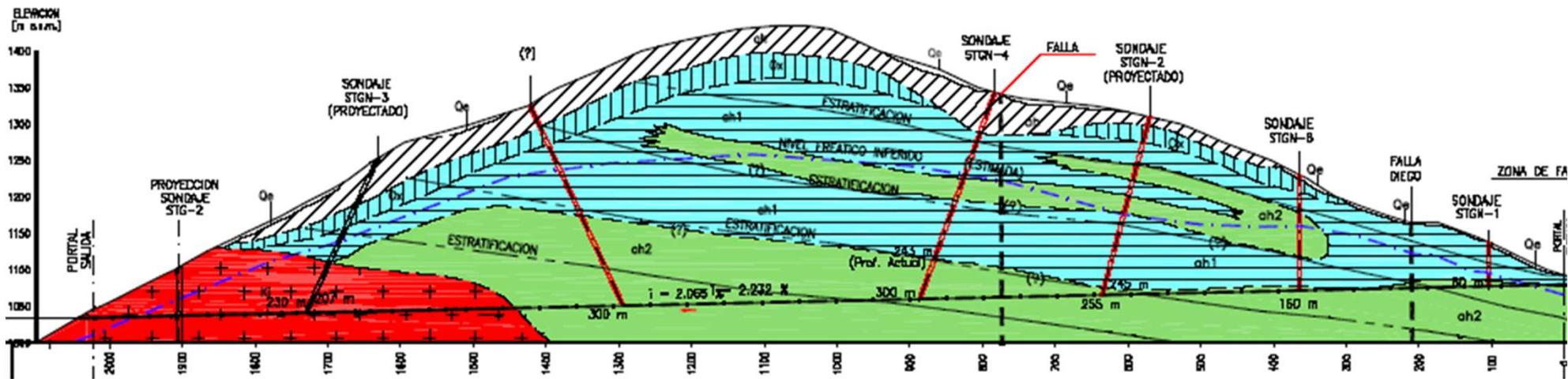
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

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

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente malo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy malo	$10^{-1} - 1$
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

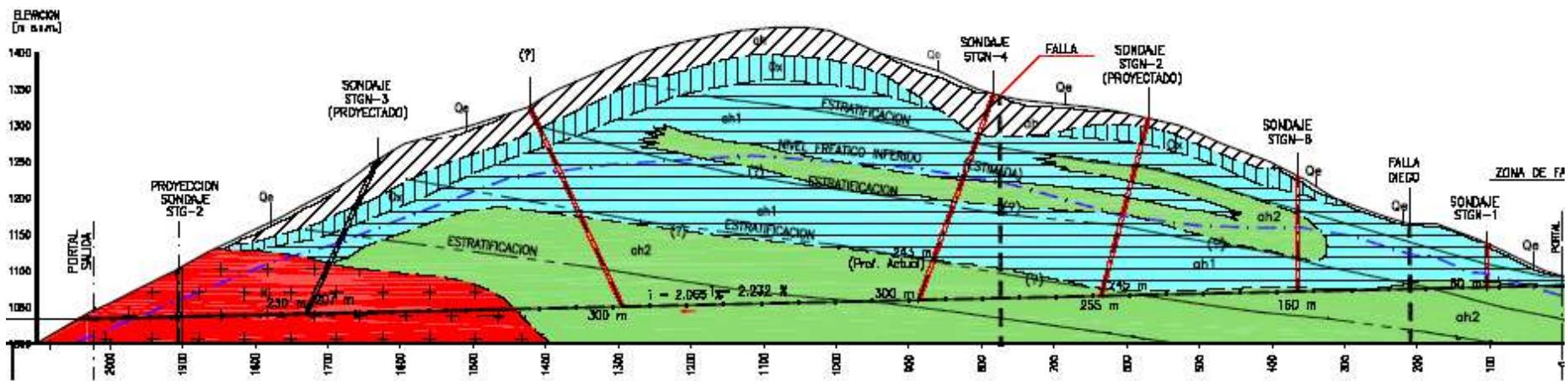
Indice Q

- Aplicación: diseño y excavación de túneles.
- Basado en datos empíricos ↔ distintos tipos y calidades de MR, excavaciones, dimensiones de túneles.
- Imposible predecir las condiciones geotécnicas a lo largo del trazado de un túnel → Estudio geotécnico detallado del sitio: conocimiento de tipos de roca, estructuras geológicas, propiedades mecánicas, riesgos asociados, etc.
- MR se estudia con el avance de la excavación ↔ medición de diversos parámetros, entre ellos Q → conocimiento de las condiciones geotécnicas.



Indice Q

- Estimación de Q en cada tramo de la excavación.
- Diferentes sistemas de soporte según valor Q.
- Elección del sistema de sostenimiento en función del material encontrado a medida que se excava.



Tramo 1: RI, sana, MR de calidad muy buena a buena (Q: 10-40 y 40-100)

Tramo 2: RS, varía calidad del MR → calidad MR regular a mala (Q: 2-10)

Tramo 3: RS, mayor cantidad de discontinuidades (ej.: planos de estratificación), variaciones en calidad y propiedades geomecánicas del MR → calidad MR muy mala (Q: 0,1-1)

Rock Mass Rating, RMR

(Bieniawski, 1976, 1989)

- Índice de calidad calculado como la suma del efecto de **6 parámetros**:
 1. Resistencia a la compresión uniaxial de la roca matriz (0 a 15).
 2. RQD (3 a 20).
 3. Espaciado entre discontinuidades (5 a 20).
 4. Condición de las discontinuidades (0 a 30).
 5. Presencia de agua (0 a 15).
 6. Orientación de las discontinuidades (ángulo de inclinación) con respecto al eje de la excavación (0 a -12).
- Según el valor de cada parámetro se asigna un **valor de contribución al RMR** (en tablas) → Suma de las contribuciones de todos los parámetros = valor RMR

Bieniawski, Z.T. (1976) Rock Mass Classification in Rock Engineering. In: Bieniawski, Z.T., Ed., Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 1, 97-106.

Bieniawski, Z.T. (1989) Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. Wiley, New York

https://iem.ca/pdf/resources/Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications_%20A%20Complete%20Manual%20for%20Engineers%20and%20Geologists%20in%20Mining,%20Civil,%20and%20Petroleum%20Engineering.pdf

**RMR
(Bieniawski, 1976, 1989)**

Parámetros de clasificación y valores para RMR
(Arvizu Lara & Dávila Serrano (2014), Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, (2004) Hoek & Brown (1980), en Jiménez López (2020):
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/17315/Material%20did%C3%A1ctico.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Parámetro		Intervalo de valores					
1	Resistencia de la roca intacta (MPa)	Ensayo de carga puntual	>50	4,0-10	2,0-4,0	1,0-2,0	Para esta escala tan baja es preferible la prueba de compresión simple
	Compresión Simple		>250	100-250	50-100	25-50	5,0-25 1,0-5 <1
	Puntuación		15	12	7	4	2 1 0
2	Porcentaje de RQD		90-100	75-90	50-75	25-50	<25
	Puntuación		20	17	13	8	3
3	Espaciamiento de las discontinuidades		>2m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm
	Puntuación		20	15	10	8	5
4	Condición de las discontinuidades		Superficies muy rugosas. Sin continuidad. Sin separación. Paredes de roca inalterada	Superficie ligeramente rugosa. Separación <1 mm. Paredes de roca ligeramente alteradas	Superficie ligeramente rugosa. Separación <1 mm. Paredes de roca altamente alteradas	Superficies pulidas o hendiduras <5 mm o juntas abiertas de 1 a 5 mm. Juntas continuas	Juntas abiertas >5 mm. Juntas continuas.
	Puntuación		30	25	20	10	0
5	Condiciones de agua subterránea	Filtraciones por 10 m de longitud de túnel (l/m)	Ninguna	<10	10,0-25	25-125	>125
		(Presión en discontinuidades)/esfuerzo principal σ	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
	Condiciones generales	Totalmente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo	
	Puntuación	15	10	7	4	0	
6	Orientación de las discontinuidades respecto a la excavación	Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	
	Puntuación	0	-2	-5	-10	-12	

RMR (Bieniawski, 1976, 1989)

Orientación de las discontinuidades ($\hat{\imath}$) con respecto al eje de la excavación: **valores de contribución** (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (I):

https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I

RUMBO PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL		RUMBO PARALELO AL EJE DEL TÚNEL		BUZAMIENTO 0°-20° (Independiente del rumbo)	
DIRECCIÓN SEGÚN BUZAMIENTO		DIRECCIÓN CONTRA BUZAMIENTO			
Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular

ORIENTACION DEL RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	REGULAR	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
VALORES	TUNELES Y MINAS	0	-2	-5	-10	-12
	CIMENTACIONES	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60

RMR (Bieniawski, 1976, 1989)

Suma de las contribuciones de todos los parámetros = valor RMR → Clase de macizo rocoso.

VALOR TOTAL DEL R.M.R	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
CLASE NUMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCION	MUY BUENO	BUENO	MEDIO	MALO	MUY MALO

Ramírez Oyanguren & Alejano Monge (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes (I):
<https://www.researchgate.net/publication/281459332> Mecánica de Rocas Fundamentos e Ingeniería de Taludes I

Geological Strength Index, GSI (Marinos & Hoek, 2000; Hoek & Marinos, 2018)

- Índice de resistencia geológica.
- Caracterización visual detallada en campo a partir de afloramientos o testigos de sondeos.
- Estimación de las propiedades geomecánicas del MR *in situ*: resistencia y deformación.
- Parámetros para estimar GSI:
 - ✓ Estructura del MR ↔ tamaño y forma de bloques de roca intacta.
 - ✓ Estado de las paredes de las discontinuidades ↔ resistencia al corte.

E. Hoek, E.T. Brown (2018). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, 2019, Pages 445-463.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

Indice GSI

Estimación preliminar de las propiedades geomecánicas del MR:

Resistencia

$$\sigma_{cMR} = \sigma_{ci} \cdot s^a$$

Deformación

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_{ci} \left(s - m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a$$

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-1} D}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3} D}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \sim 0,5$$

P. Marinos, E. Hoek. (2000). GSI – a geologically friendly tool for rock mass strength. Proceedings GeoEng 2000, International conference on geotechnical and geological engineering, Technomic Publishing Co., Melbourne, Australia, Lancaster, PA (2000), pp. 1422-1440.

<https://www.rockscience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>

E. Hoek, E.T. Brown (2018). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, 2019, p: 445-463: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

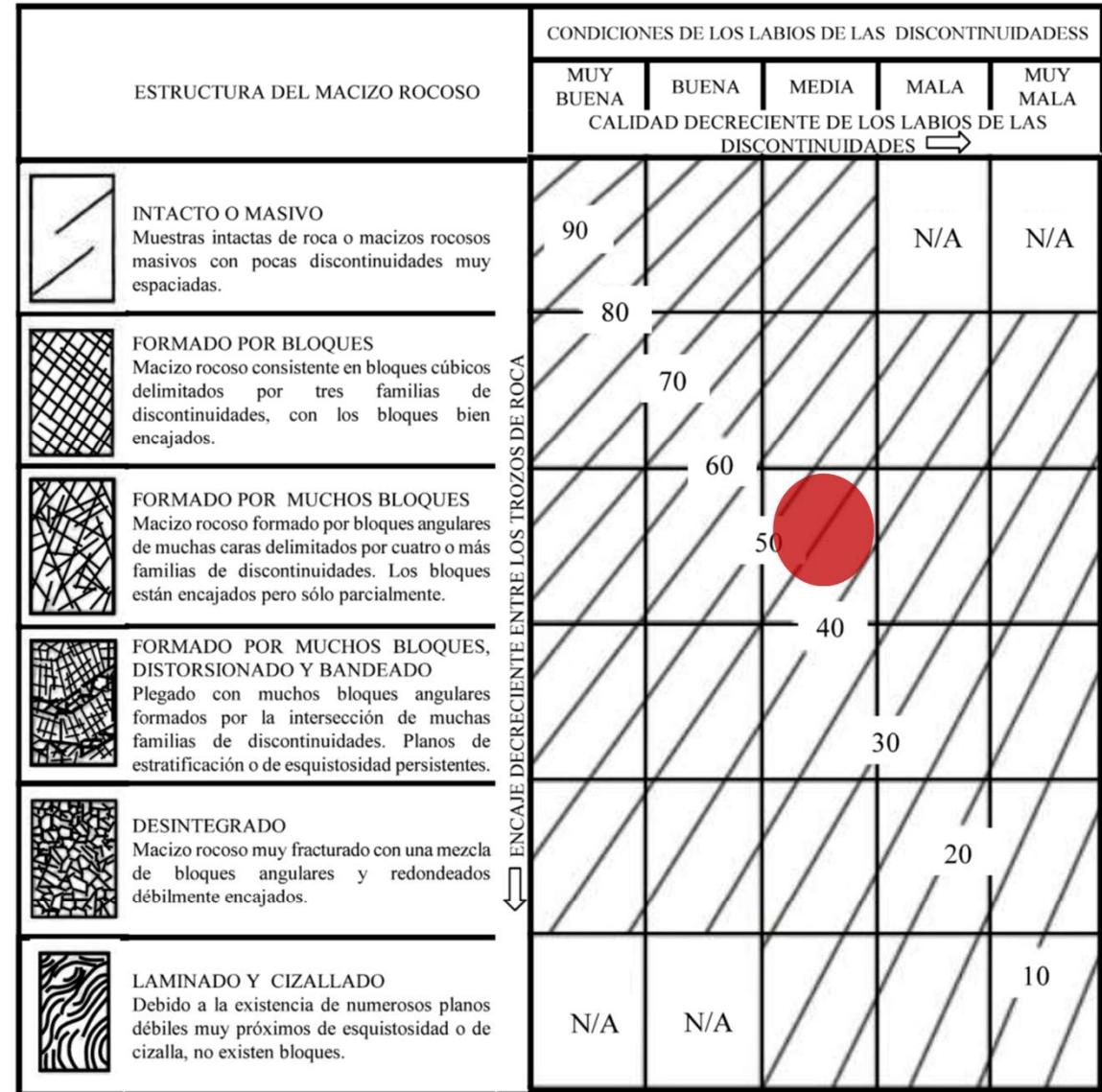
Hoek, E & Carranza-Torres, C. & Corkum, Brent & Hoek, Evert & Carranza-Torres, Carlos. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition:

https://www.researchgate.net/publication/282250802_Hoek-Brown_failure_criterion_-_2002_Edition

Indice GSI

- Categorías MR en base a la estructura: desde intacto hasta desintegrado.
- Calidad de las paredes de las discontinuidades: desde muy buena (paredes rugosas y sanas) a muy mala (lisas y muy alteradas o con rellenos blandos).

Ej.: MR fuertemente fracturado y las paredes de las diaclasas presentan superficies lisas y ligeramente alteradas → **estructura formada por muchos bloques y calidad de las paredes de las discontinuidades media: GSI ~ 40-50**



NOTAS SOBRE LAS CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES

MUY BUENA : superficies muy rugosas y sanas

BUENA : superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido

MEDIA : superficies lisas y moderadamente meteorizadas y alteradas

MALA : superficies con espejos de falla y altamente meteorizadas, con rellenos de fragmentos angulares o con recubrimientos compactos

MUY MALA : superficies con espejo de falla altamente meteorizadas con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas

Particularidades de los macizos rocosos

- **Materiales de origen natural, heterogéneos y anisótropos** → estimación de sus propiedades mediante un buen análisis geotécnico y ensayos sobre roca intacta y discontinuidades.
- **Roca intacta + Discontinuidades:** componentes de un macizo rocoso.
- **Efectos de escala:** respuesta de un macizo rocoso a las cargas aplicadas depende del volumen sobre el que actúan esas cargas.
- **Efecto de aguas subterráneas:** a) disminución de la resistencia al corte por presencia de agua en poros y fracturas; b) alteración de materiales ↔ disminución de la resistencia y aumento de deformabilidad.
- **Efecto de meteorización física y química:** macizos rocosos fuertemente meteorizados tienden a comportarse como un suelo.
- **Rotura de roca matriz:** predominio de campos tensionales compresivos. Inicio de la fracturación ↔ fricción entre superficies de microfracturas → resistencia de la roca depende de la tensión de confinamiento.
- **Resistencia a tracción baja:**

$$\sigma_t \sim \frac{\sigma_c}{10}$$

Bibliografía

- Wyllie D. C & Mah C. W. (2004). Rock Slope Engineering. Civil and mining. 4th Ed., Taylor & Francis e-Library, 2005:
https://civilenglineering.files.wordpress.com/2014/10/rock_slope_engineering_civil_and_mining.pdf
- Hoek E (2023). Practical Rock Engineering. Hoek's Corner, Rocscience:
<https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-E.Hoek-2023.pdf>
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground Excavations in Rock. London Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.
- Hoek, E & Brown, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division;106(GT9), p.:1013-1035.
<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Empirical-Strength-Criterion-for-Rock-Masses-1980.PDF>
- Hoek, E. & Brown, E.T. (2018). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, 2019, p: 445-463: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>

- P. Marinos, E. Hoek. (2000). GSI – a geologically friendly tool for rock mass strength. Proceedings GeoEng 2000, International conference on geotechnical and geological engineering, Technomic Publishing Co., Melbourne, Australia, Lancaster, PA (2000), pp. 1422-1440.
<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>
- Hoek, E & Carranza-Torres, C. & Corkum, Brent & Hoek, Evert & Carranza-Torres, Carlos. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition:
https://www.researchgate.net/publication/282250802_Hoek-Brown_failure_criterion_-2002_Edition
- E. Hoek, E.T. Brown (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 34, Issue 8, 1997, Pages 1165-1186:
[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Brady B. H. G. & Brown E. (2006). Rock mechanics. For underground mining. 3rd Ed., Springer Dordrecht Publ.
- Barton, Nick & Choubey, Vishnu. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. 10. 1-54.
https://www.researchgate.net/publication/227011689_The_shear_strength_of_rock_joints_in_theory_and_practice
- Nick Barton (2013). Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 5, Issue 4, 2013: 249-261
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775513000449>

International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering:

<https://www.isrm.net/>

Rock Mass Website, Geology Applied in Rock Construction:

<http://www.rockmass.net/>

Nick Barton. Hard and Soft Rock Engineering: <http://www.nickbarton.com>

Rocscience: <https://www.rocscience.com>

<https://www.rocscience.com/learning/hoeks-corner>

Espacio Bieniawski. Geocontrol:

<https://geocontrol.es/es/espacio-bieniawski>