

Macizos rocosos



Meteora, Grecia (M.V. Altinier, 2017)

Dra. María Victoria Altinier
maltinier@fi.uba.ar

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

Índice



- **Macizos rocosos**
- Resistencia de macizos rocosos
- Sistemas de clasificación

Macizos rocosos



Mecánica de rocas

- ✓ Objeto de estudio: macizos rocosos (MR).
- ✓ Respuesta de los macizos rocosos ante los campos de esfuerzos (MR y entorno).
- ✓ Estimar y predecir el comportamiento mecánico de un MR → ciclo de vida de una obra.
- ✓ Obra de ingeniería → modificaciones:
 - Campos de esfuerzos → Fracturación o deformación del MR.
 - Morfología del terreno → prever que ocurrirá con la estructura y su entorno ante la acción de procesos geológicos.

Macizos rocosos



Materiales naturales.

Propiedades físicas y mecánicas heterogéneas.

Afectados por parámetros que no controlamos, ej.: tensiones litostáticas, tectónicas y sísmicas, esfuerzos diferenciales que provocan deformaciones, etc.



Conocer o estimar propiedades físicas y comportamiento mecánico:

- Observaciones detalladas.
- Ensayos.
- Mediciones de parámetros físicos, mecánicos y químicos.



In situ y
laboratorio

Macizo rocoso: Roca matriz (intacta) + Discontinuidades

Manera en que se presentan las rocas en la naturaleza.

Anisótropos ↔ propiedades físicas y mecánicas variables.

Discontinuos ↔ estructurado en bloques.

Heterogéneos ↔ discontinuidades y anisotropía.



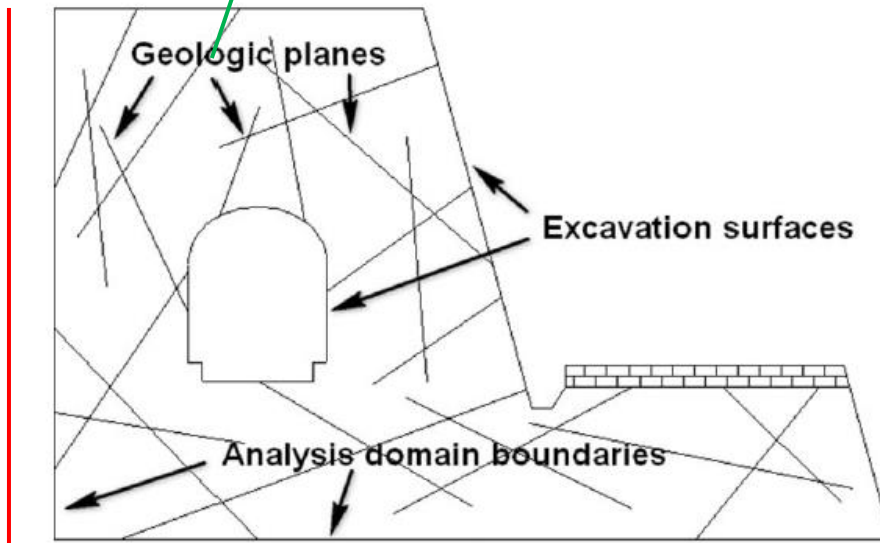
Macizo rocoso

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

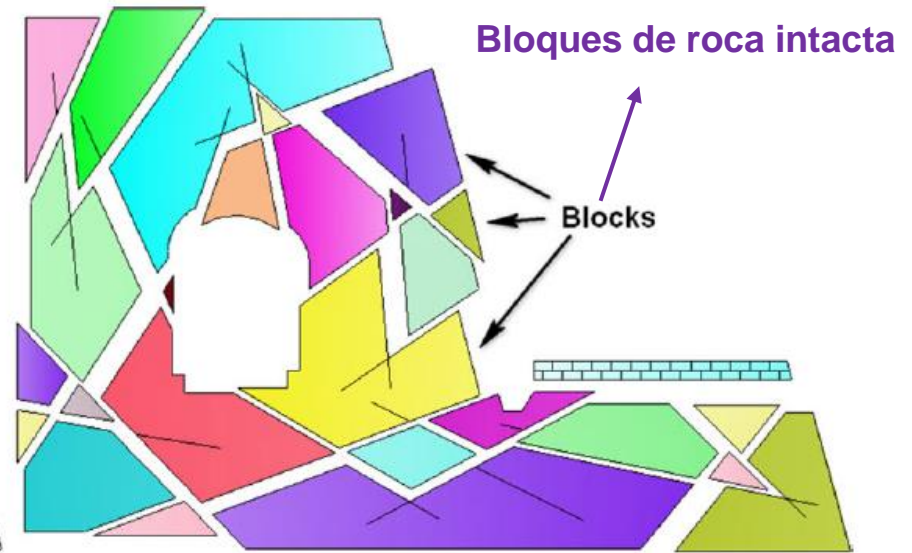
Discontinuidades: planos de origen geológico que separan bloques de roca. Estructura de un macizo rocoso. Ej.: diaclasas, fallas, grietas, planos de estratificación.

Macizo rocoso

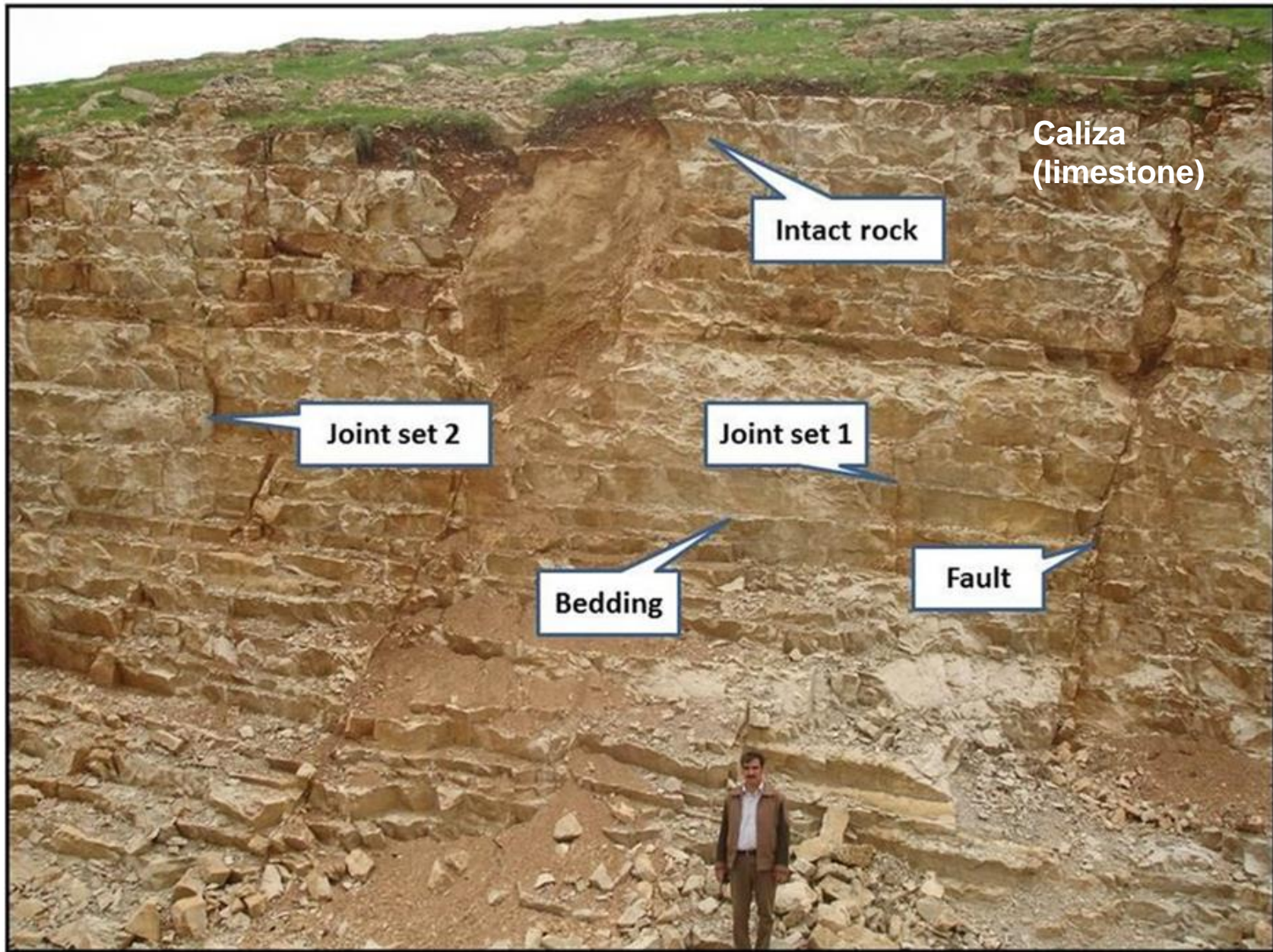
Discontinuidades → estructura



(a)



(b)



Caliza
(limestone)

Intact rock

Joint set 2

Joint set 1

Bedding

Fault

Alshkane, Younis Mustafa Ali (2015) *Numerical modelling investigation of rock mass behaviour under gravity dams*. PhD thesis, University of Nottingham. <http://eprints.nottingham.ac.uk/id/eprint/29317>

Macizos rocosos

Macizo rocoso: Roca matriz + Discontinuidades

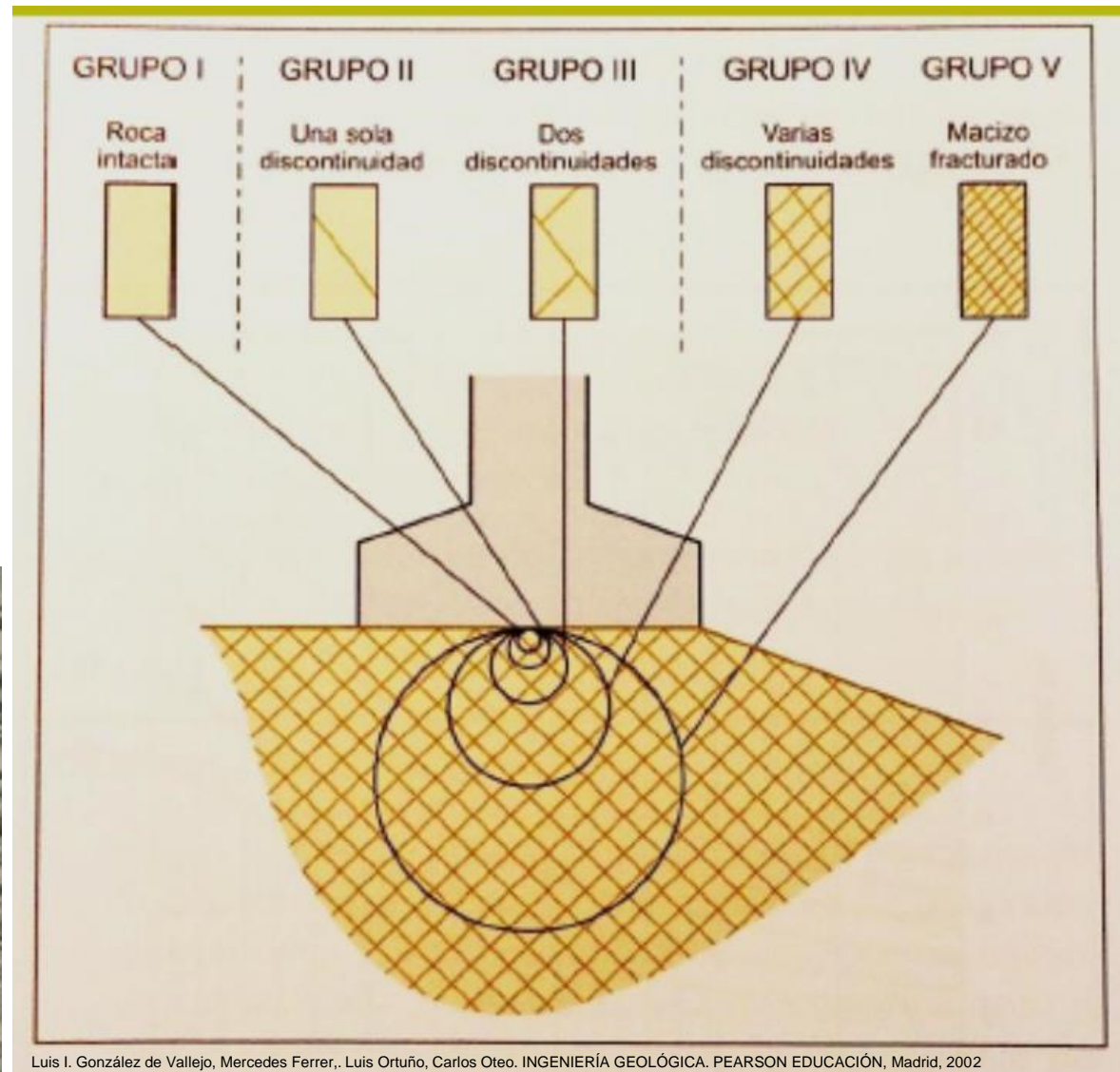
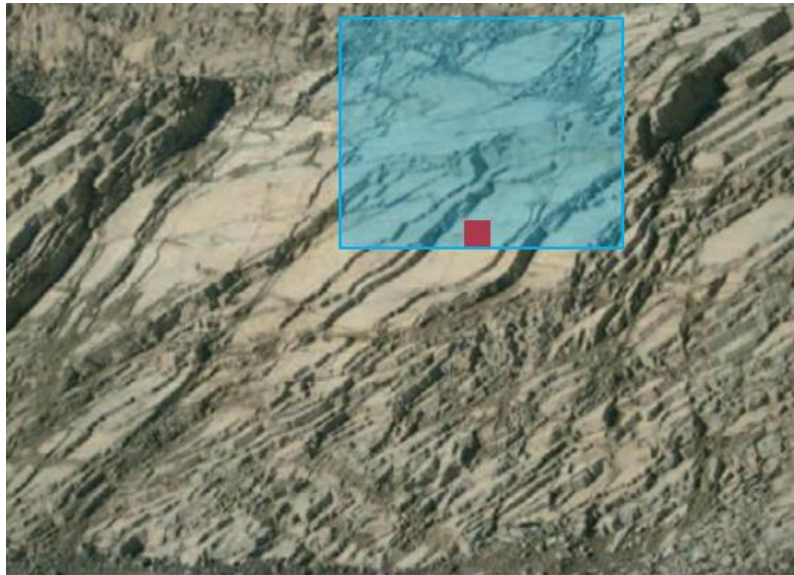
Propiedades mecánicas
controladas por:

- **Roca matriz:** litología, mineralogía, tamaño de grano, porosidad, microfisuras, alteración, meteorización, deformabilidad, resistencia, etc.
- **Discontinuidades:** tipo, orientación, espaciado, apertura, rellenos, alteración, etc.



Efecto de escala

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



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

Grupo I: Roca → propiedades de la roca matriz

Grupo IV: Roca matriz + Discontinuidades

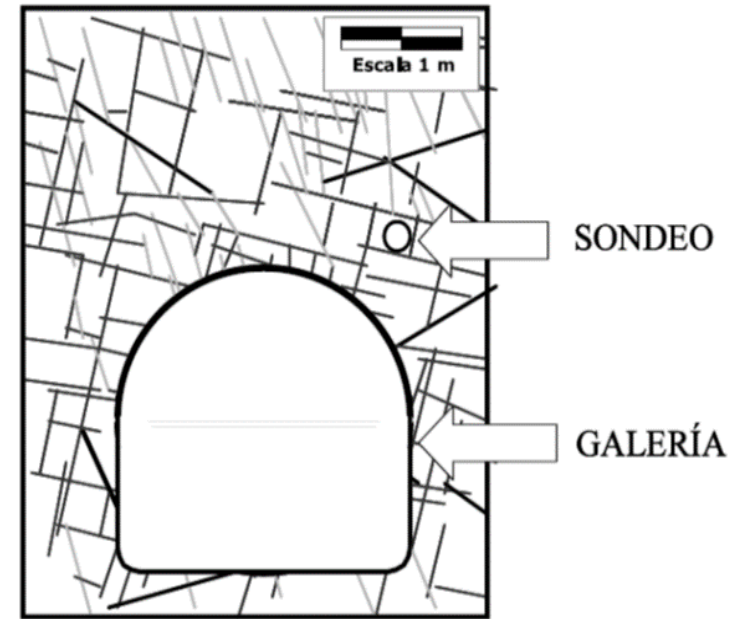
Enorme volumen de material heterogéneo → propiedades de la roca y las discontinuidades.

Efecto de escala

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



2 escalas de trabajo:
sondeo y galería

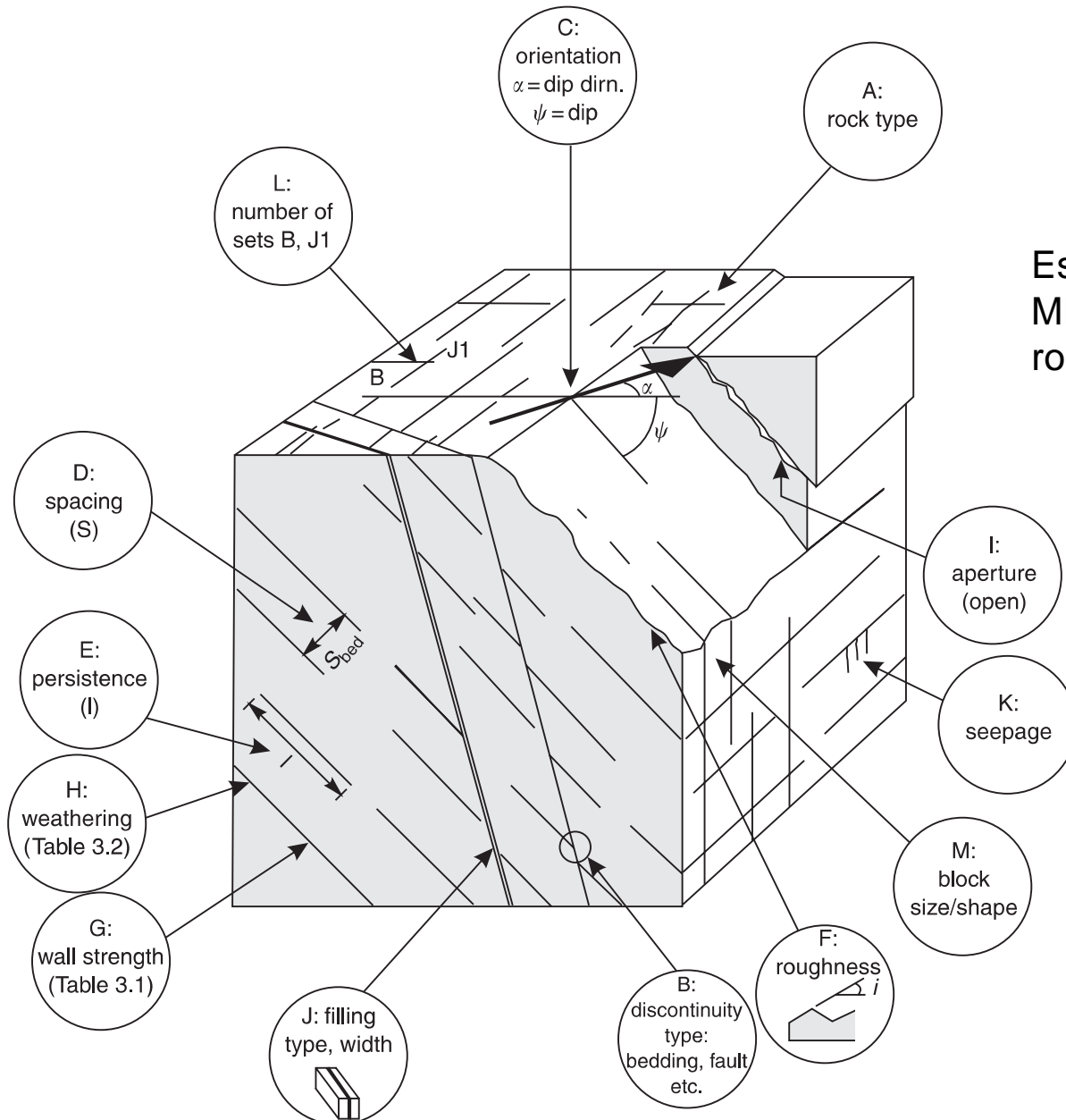


https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes_I



Sondeo ($\Phi = 6,3 \text{ cm}$) \rightarrow propiedades roca intacta
Galería (sección = $6,8 \text{ m}^2$) \rightarrow propiedades discontinuidades

Variables que controlan el comportamiento mecánico de un macizo rocoso



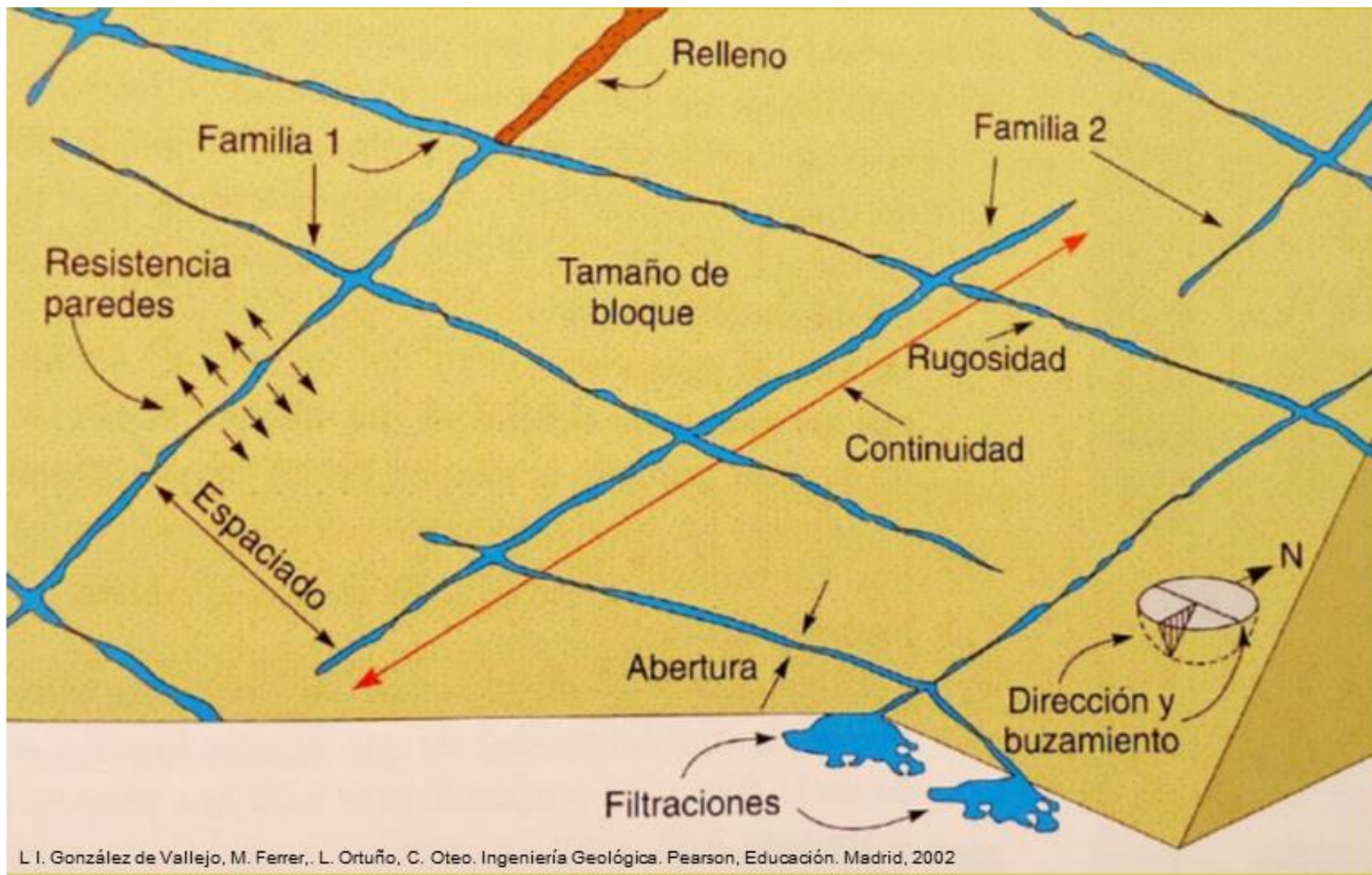
Estimación de las propiedades de MR es compleja ↔ estudio de la roca matriz y las discontinuidades.

Variables que controlan el comportamiento mecánico de macizos rocosos



- ✓ **Discontinuidades:** tipo, cantidad, número de familias, orientación, espaciado, abertura, persistencia, estado de la superficie de sus caras (reellenos, 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.

Discontinuidades



- **Familia:** grupo de discontinuidades del mismo tipo aproximadamente paralelas.
- **Sistema:** intersección de 2 o más familias de discontinuidades.

Fracturas

Discontinuidades estrechas y planas.
Comportamiento frágil de la roca.



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

(a) Fallas

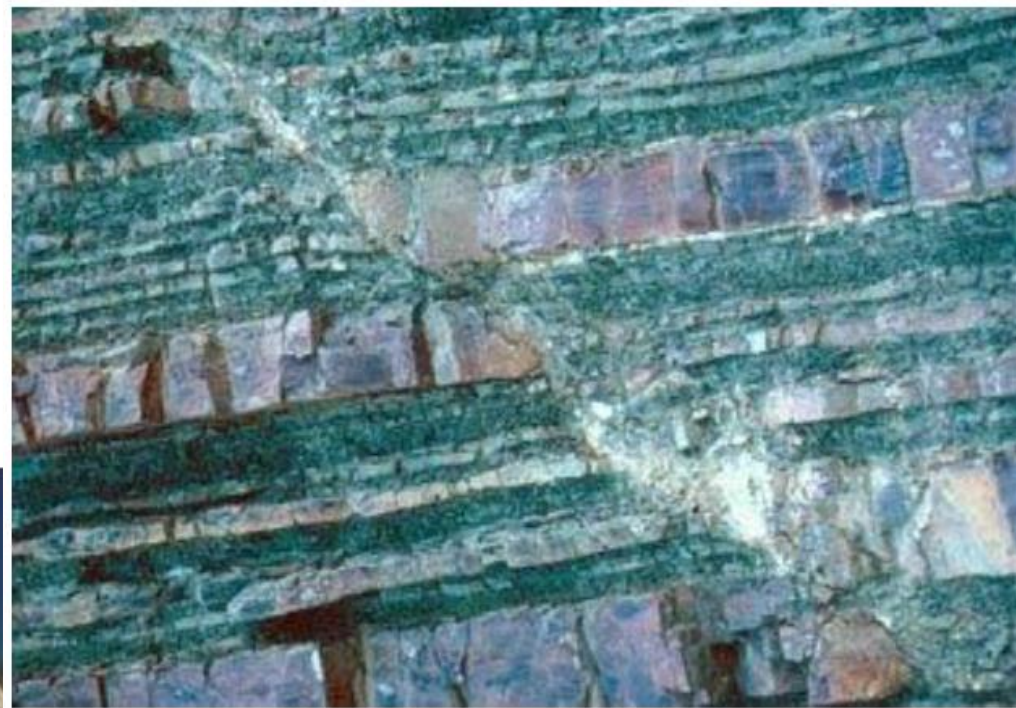
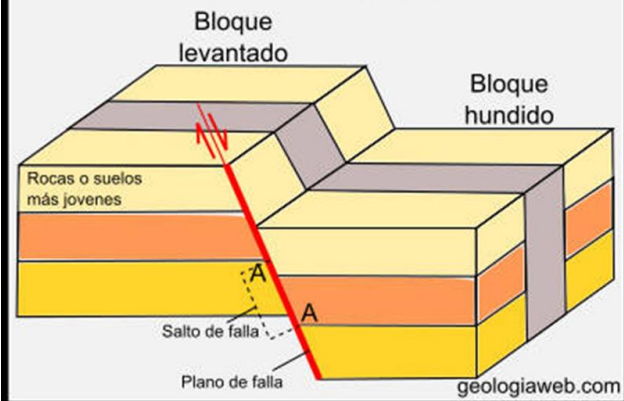
Desplazamiento entre bloques
paralelo al plano de fracturación.

(b) Diaclasas

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



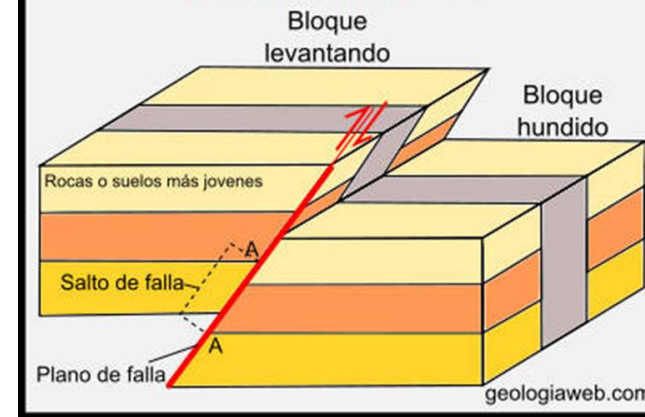
Falla Normal



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



Falla inversa



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

Diaclasas

- Clasificación de macizos rocosos y estimación de su resistencia.
- Fracturas con o sin desplazamiento de bloques. Si hay desplazamiento, es perpendicular al plano de fracturación.



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



Origen: tectónico, enfriamiento, reducción de carga litostática.

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

Diaclasas de origen tectónico

Cambios en la magnitud y dirección de esfuerzos tectónicos.



<https://blogs.agu.org/mountainbeltway/2012/05/18/friday-fold-bedford-canyon-fm-california/>



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

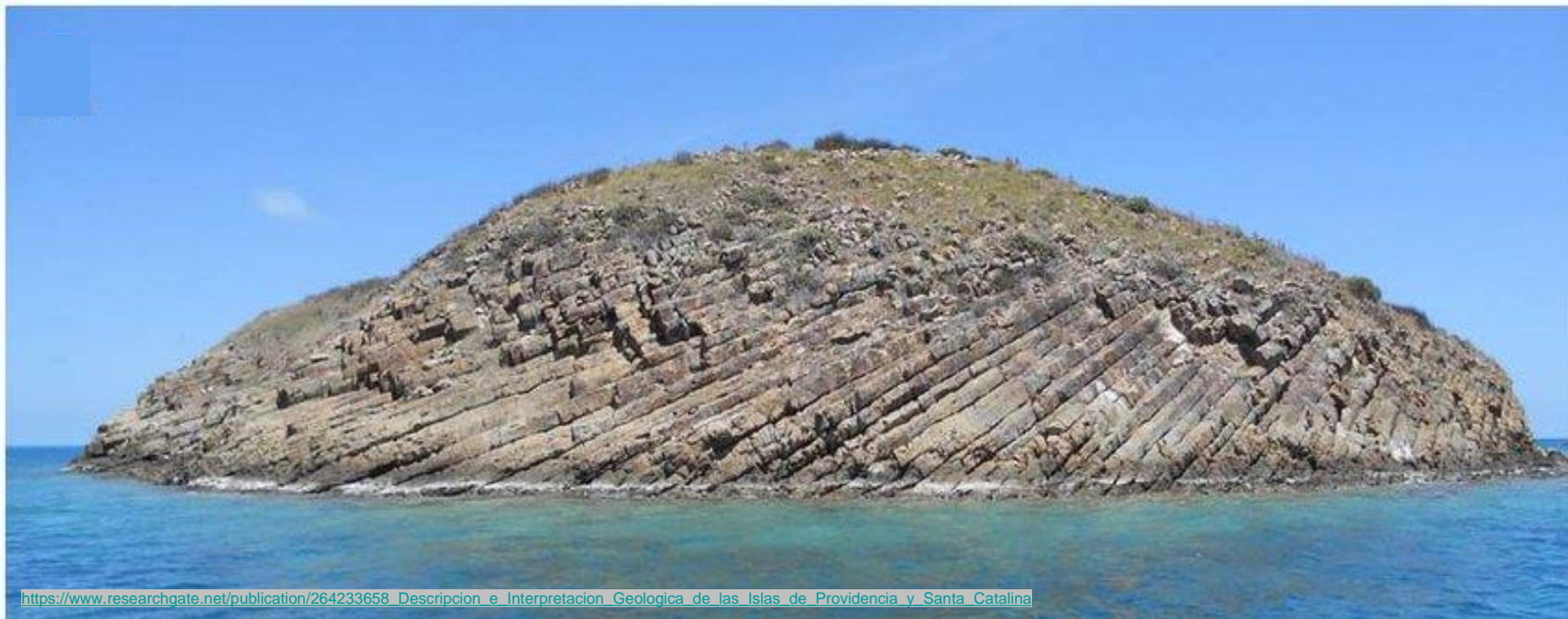


Diaclasas por enfriamiento



Basaltos

Dacitas



<https://www.flic>

<https://www.researchgate.net/publication/264233658> Descripción e Interpretación Geológica de las Islas de Providencia y Santa Catalina

Diaclasas por reducción de carga litostática



Descompresión por erosión, excavaciones.

Diaclasas de foliación. Granitos



Índice



- Macizos rocosos
- **Resistencia de macizos rocosos**
- Sistemas de clasificación



¿Cómo estimar la resistencia de un macizo rocoso?

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

Criterio de rotura de Hoek & Brown (1980, 2018)



- Mecánica de rocas: predecir la resistencia de una roca ante un campo de tensiones, se refiere a la resistencia de pico.
- Diseño de excavaciones subterráneas en macizos rocosos de rocas competentes y comportamiento isótropo.
- **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.rockscience.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>

Criterio de rotura de Hoek-Brown



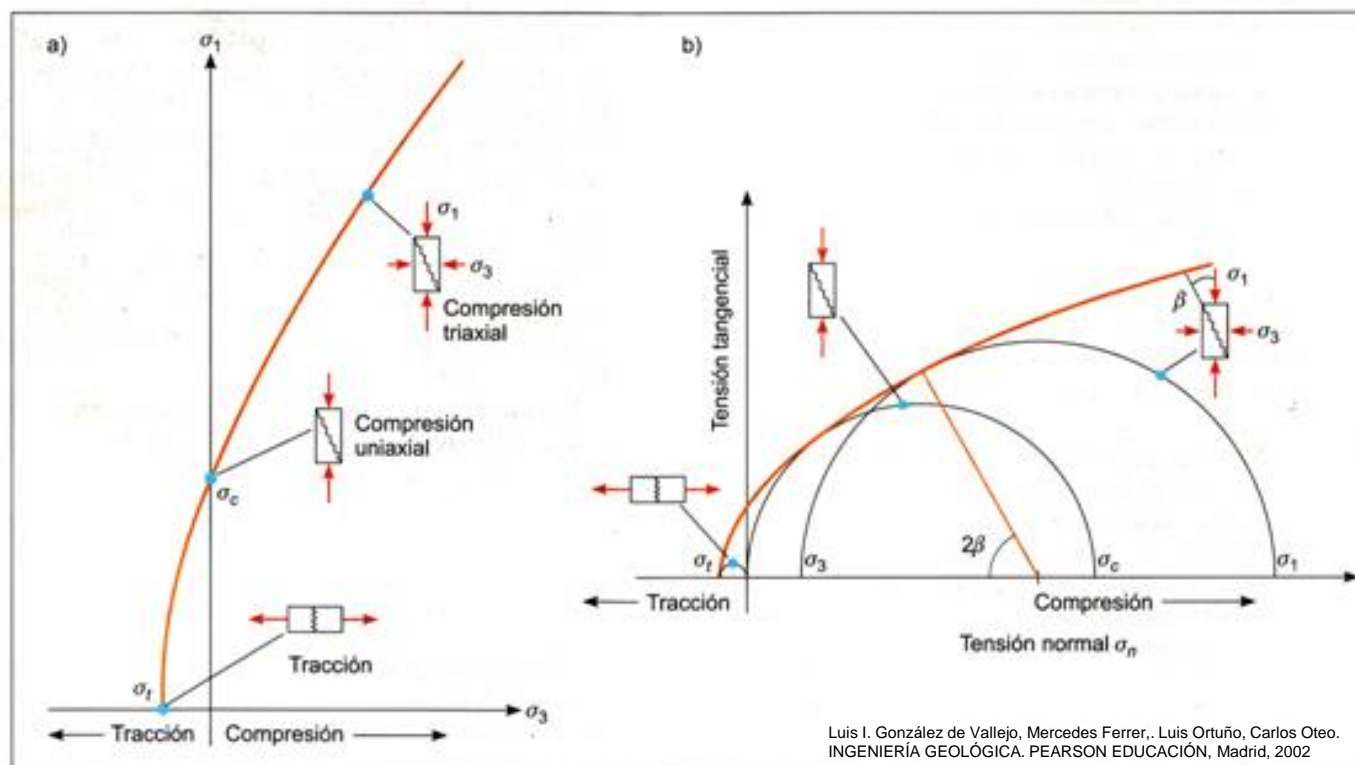
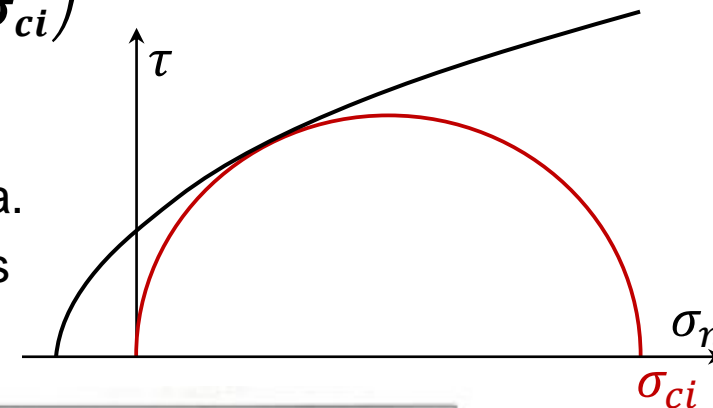
Empírico.

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

Parámetros: σ_{ci} , m , s , a

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

m , s , a : constantes que dependen de las características del material.



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. Ensayos de laboratorio sobre muestras de roca sin fracturas o, en su defecto, de tablas.

s , a , m_i : constantes características de la roca.

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

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

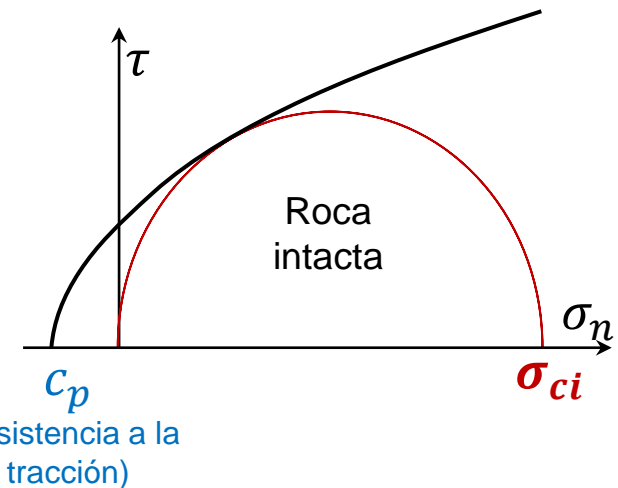
m_i : Ensayos de resistencia a tracción triaxial ($\sigma_1 = \sigma_3 = c_p$).

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

c_p : resistencia de la roca intacta a la tracción.

Tablas: rangos de magnitud de m_i para diferentes rocas.

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



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)	Indice 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.

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

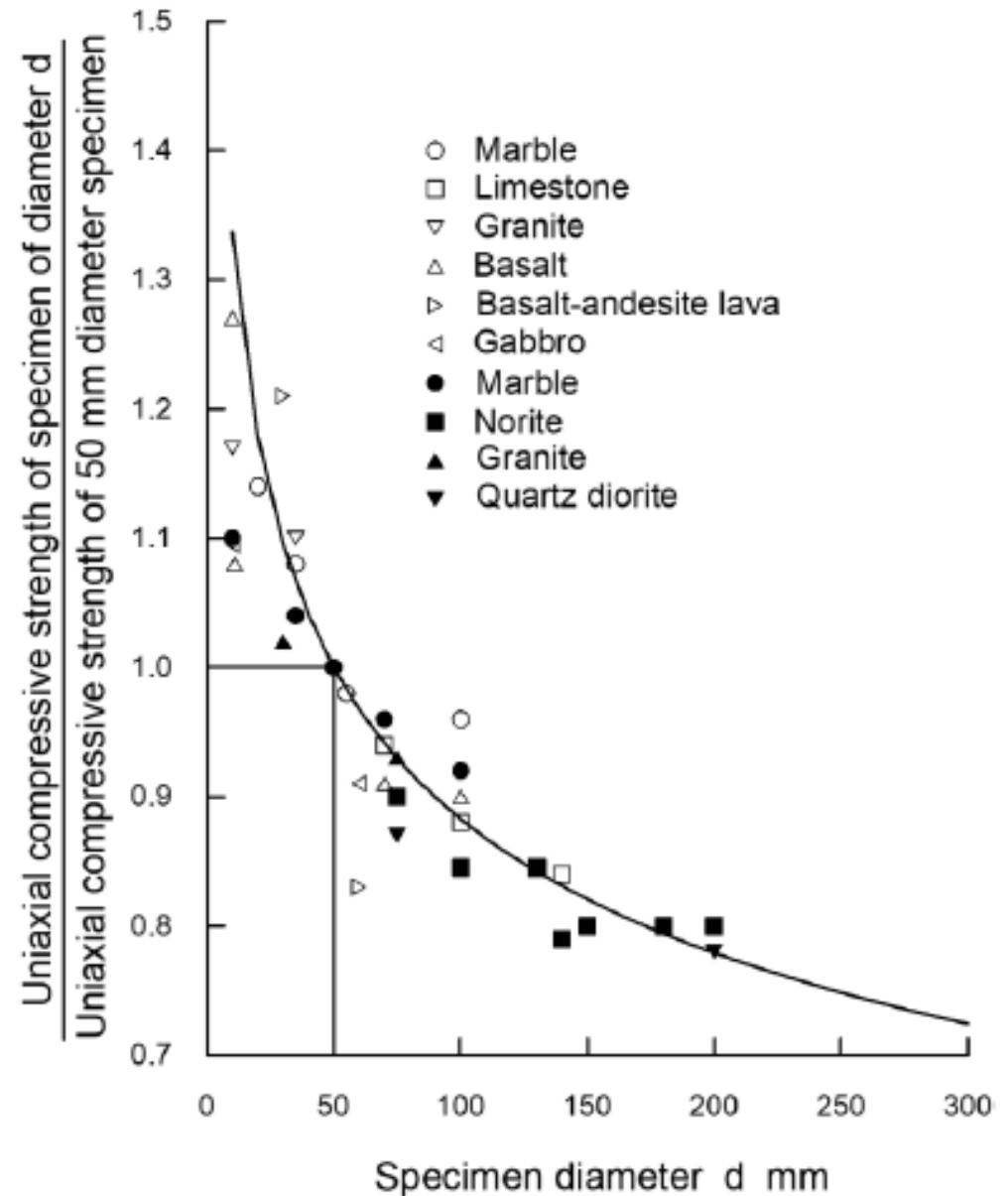
Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21±3) Breccias (19±5)	Sandstones 17±4	Siltstones 7±2 Greywackes (18±3)	Claystones 4±2 Shales (6±2) Marls (7±2)
		Carbonates	Crystalline Limestone (12±3)	Sparitic Limestones (10±2)	Micritic Limestones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

Resistencia a la compresión simple del MR ($\sigma_3=0$)
→ $\sigma_1 = \sigma_{ci} \cdot s^a$

m_b depende de:

- Resistencia de la roca ↔ m_i
- Características de las discontinuidades: índice GSI (observaciones en campo) y factor D .

GSI: índice de resistencia geológica.

D : factor de alteración asociado al grado de perturbación del MR por efecto de excavación y relajación de tensiones.

$s \leq 1$ ↔ valor máximo GSI es 100 → $s = e^0 = 1$

$a = 0,5$

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

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

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

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

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

Roca matriz

Macizo rocoso

D : Factor de alteración

Factor de alteración (D)

D: Factor de alteración

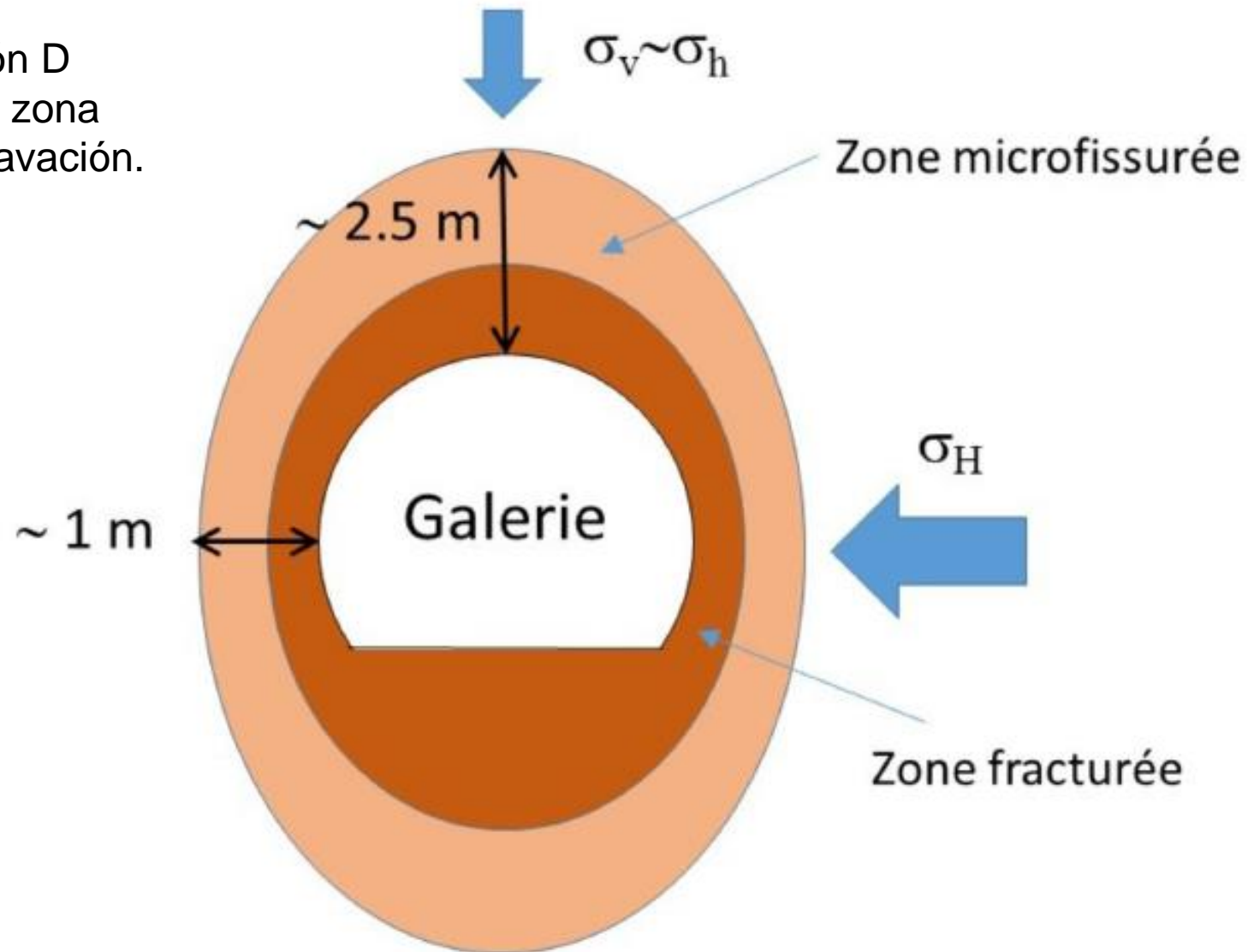
Depende del grado de perturbación del MR por efecto de la excavación y relajación de tensiones. **D se aplica sólo a la zona dañada por la excavación.**

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. 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 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 afección a los taludes será menor.	D=1.0 Production blasting D=0.7 Mechanical excavation

Factor de alteración D
Se aplica sólo a la zona
dañada por la excavación.



Modelo conceptual de la zona dañada por la excavación ■■■

Galería: $r \sim 2\text{ m}$ (Laboratorio Meuse/Haute Marne, Francia). P. Cosenza *et al.* : Rev. Fr. Geotech. 2017, 148, 4:

<https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/2016/03/geotech160024.pdf>

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*.
- Factores básicos que influyen en 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 → Calidad del MR.
 - Constantes m_i , s y a (criterio de Hoek & Brown).

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

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA EVALUAR SU RESISTENCIA

Basándose en la apariencia del afloramiento de roca, escoja la categoría que, según su criterio, mejor describe la condición "típica" del macizo rocoso in situ en condición no perturbada. Note que superficies expuestas de roca que han sido generadas por tronadura pueden dar una impresión errónea de la calidad de la roca subyacente. Puede ser necesario considerar algún ajuste por tronadura, y un examen de testigos de sondajes y/o superficies definidas con precorte o tronaduras amortiguadas puede ayudar en la definición de este ajuste. Es también importante entender que el criterio de Hoek-Brown solo debe aplicarse a macizos rocosos en que el tamaño del bloque "típico" es pequeño con respecto al tamaño de la excavación considerada.

CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES

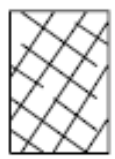
MUY BUENA Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)	MUY BUENA Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con patinas de óxido de hierro	REGULAR Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas	MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con rellenos de fragmentos granulares y/o arcillosos firmes	MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos
--	---	---	--	--

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO

EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES



DISMINUYE LA TRABAZON DE LOS BLOQUES DE ROCA



FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY)
MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SÍ.

FB/MB FB/B FB/R FB/M FB/MM



FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY)
MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA TRABADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.

FF/MB FF/B FF/R FF/M FF/MM



FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED)
MACIZO ROCOSO PLEGADO Y/O AFECTADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCION DE NUMEROSOS SETS DE ESTRUCTURAS.

FP/MB FP/B FP/R FP/M FP/MM



DESINTEGRADO (DISINTEGRATED)
MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS

D/MB D/B D/R D/M D/MM

INDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA

De los códigos de letra que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (en Tabla 4), seleccione el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia, **GSI**, de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para **GSI**, por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor, por ejemplo 38.

https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/M146B/1/material_doc/ente/bajar%3Fid_material%3D143138

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO

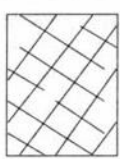
CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES

MUY BUENA Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)	MUY BUENA Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)	REGULAR Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas	MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con rellenos de fragmentos granulares y/o arcillosos firmes	MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos
--	--	---	--	--

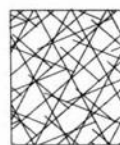
EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES



DISMINUYE LA TRABAZON DE LOS BLOQUES DE ROCA



FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY)
MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SÍ.



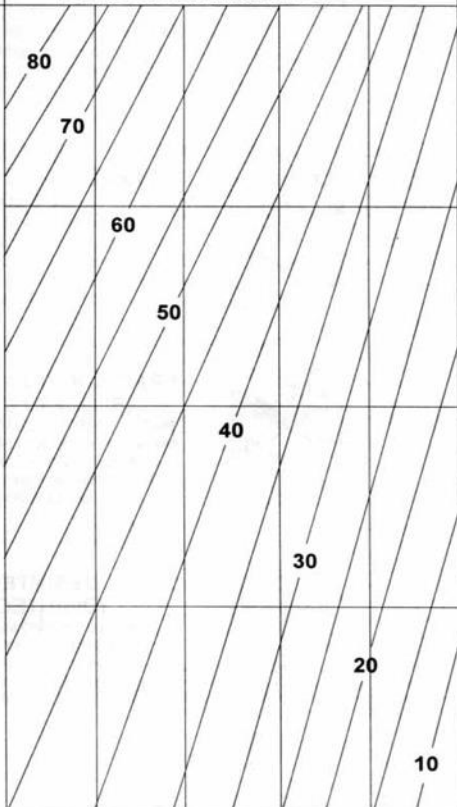
FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY)
MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA TRABADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.



FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED)
MACIZO ROCOSO PLEGADO Y/O AFECTADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCION DE NUMEROSOS SETS DE ESTRUCTURAS.



DESINTEGRADO (DISINTEGRATED)
MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS



Indice GSI



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

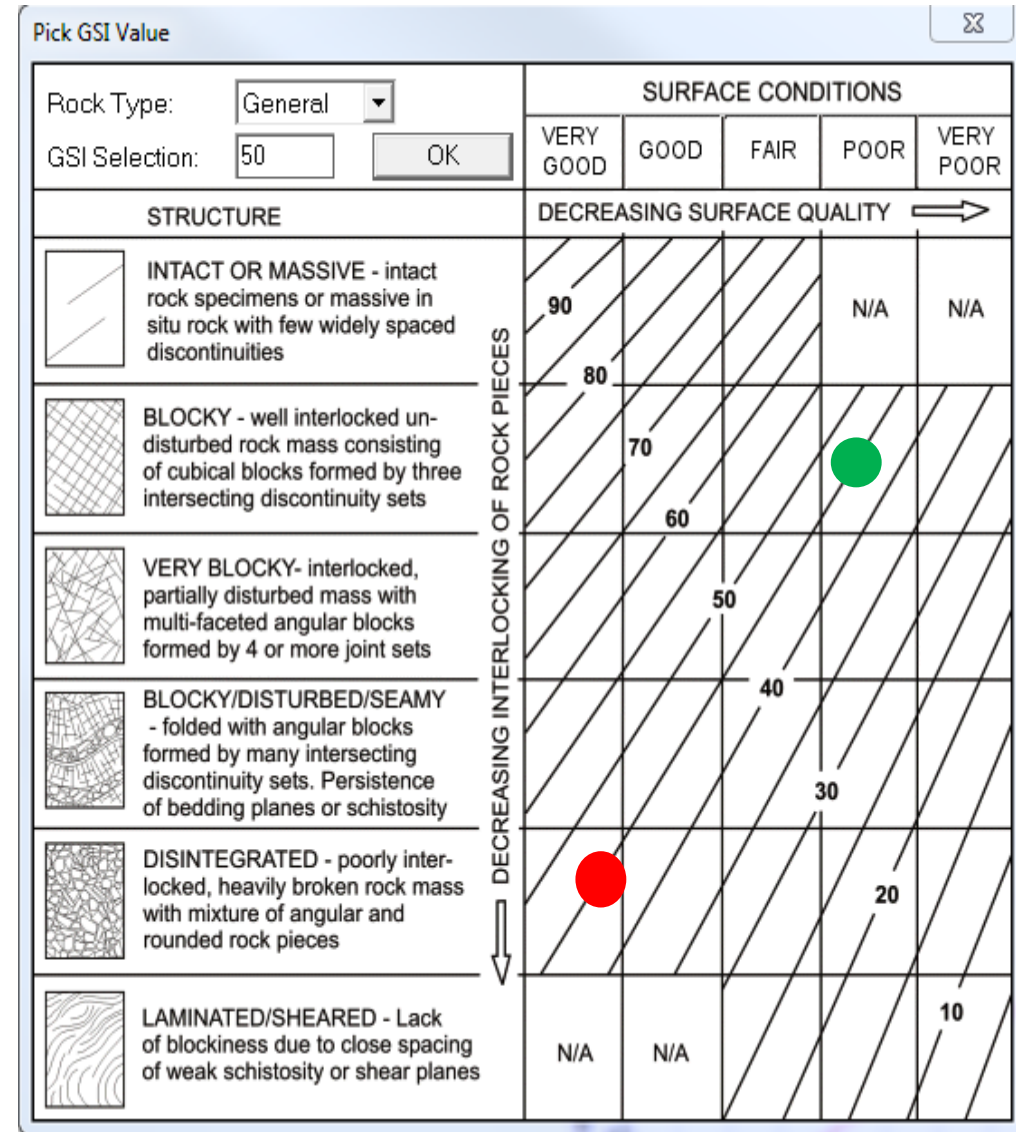
MR1 muy fracturado, desintegrado con paredes de fracturas en muy buen estado (rugosas y limpias): GSI ~ 45

MR2 fracturado en bloques, fracturas con superficies lisas y alteradas (malas): GSI ~ 45

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.

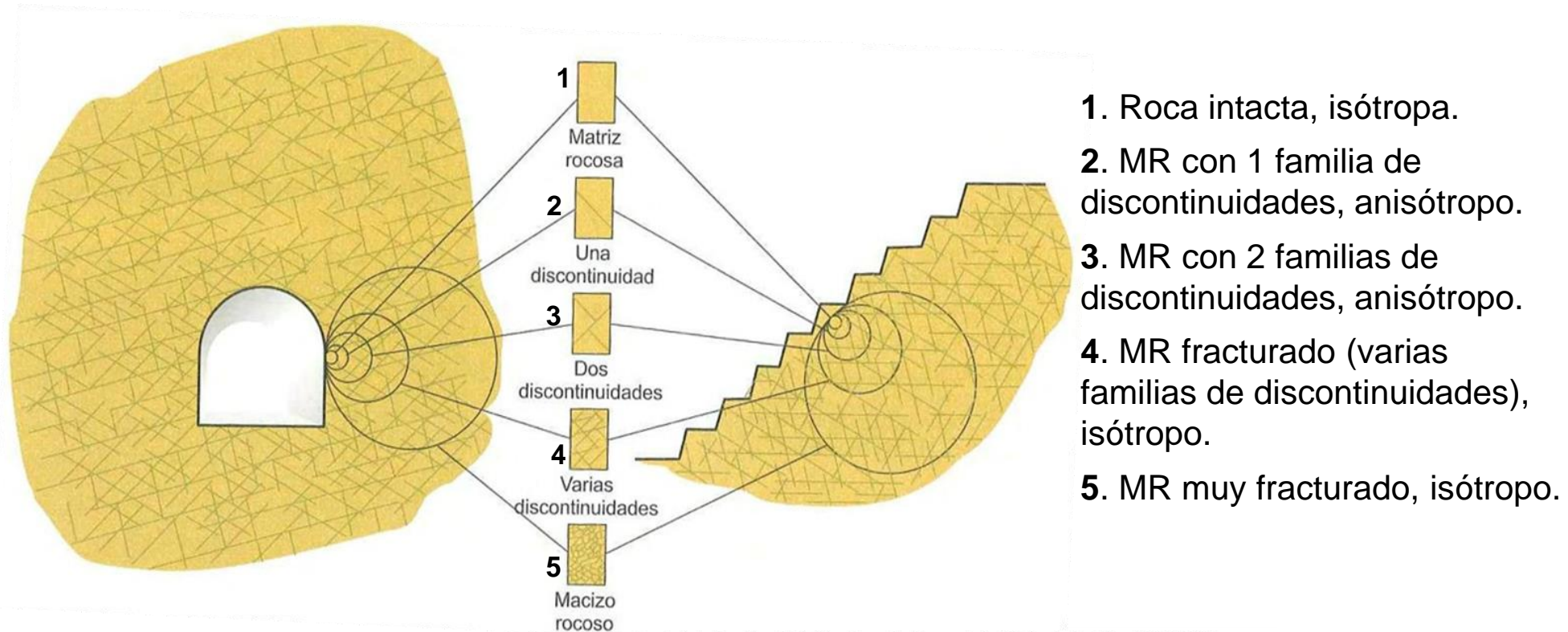
Resultados estimativos.



Efecto de escala

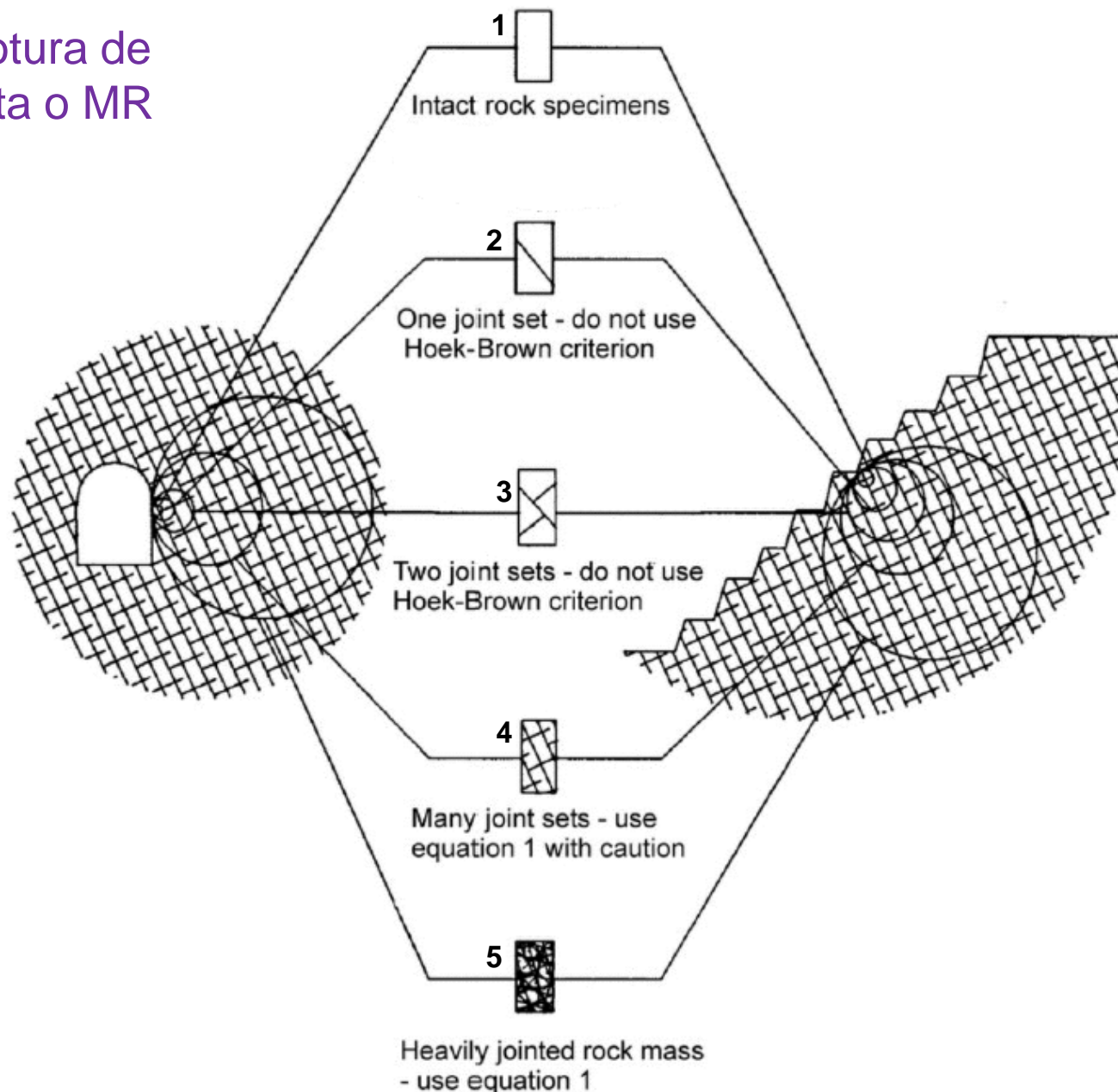


- Correlación: efecto de escala en roca matriz y MR.
- Bloques de roca intacta suficientemente pequeños con respecto al MR → Resistencia del MR alcanza valores constantes.
- Respuesta del MR a esfuerzos depende del volumen afectado.



Aplicación del criterio de rotura de Hoek y Brown a roca intacta o MR considerados isótropos y homogéneos: 1, 4 y 5

1. Roca intacta, isótropa.
2. MR con 1 familia de discontinuidades, anisótropo.
3. MR con 2 familias de discontinuidades, anisótropo.
4. MR fracturado (varias familias de discontinuidades), isótropo.
5. MR muy fracturado, isótropo.

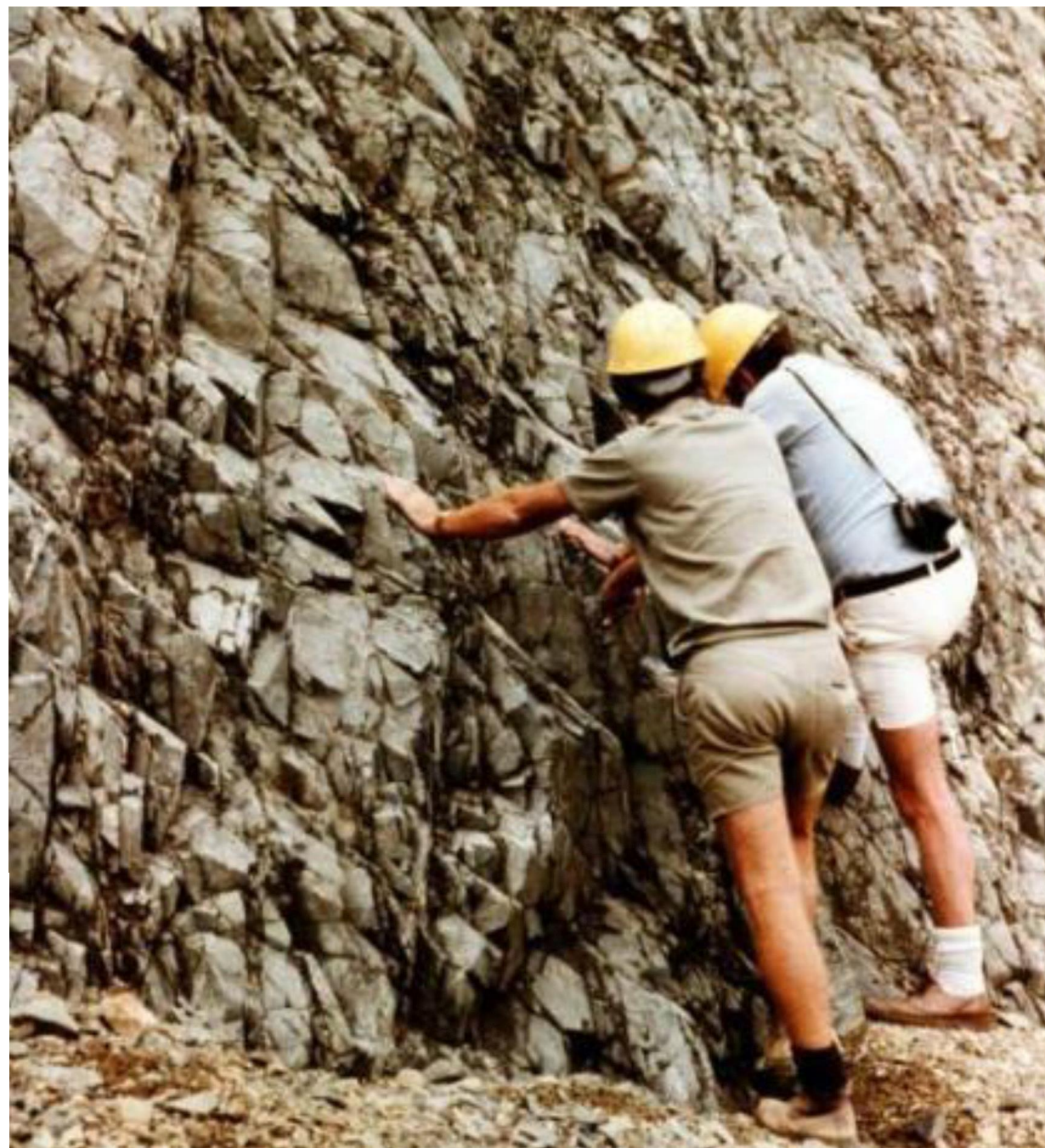


Aplicación del criterio de rotura de Hoek y Brown.
MR homogéneo e isótropo.

MR de bloques angulosos y bien encastrados de rocas competentes, andesita y granodiorita, en la mina a cielo abierto de Bougainville en Papúa Nueva Guinea (Hoek & Brown, 1980a y 1980b, en Hoek y Brown, 2019)

E. Hoek, E.T. Brown (2019).
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>



Rotura en cuña \leftrightarrow 2 familias de diaclasas + roca matriz + factores desencadenantes externos. No aplica Hoek & Brown.



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



Caída de bloques por gravedad.
No aplica Hoek y Brown.



<https://www.lmneuquen.com/por-caida-rocas-elaboran-informe-n167729>

Villa Paur, Neuquén, Argentina (2012)



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 \rightarrow 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, $\Phi = 50$ mm o factor de corrección $F = \left(\frac{De}{50}\right)$

Fragmento irregular sometido a compresión entre 2 puntas cónicas de acero: $I_s = \frac{P}{De^2}$

$$I_s : \text{índice de carga puntual} \qquad I_s = \frac{I_{s(50)}}{F}$$

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.

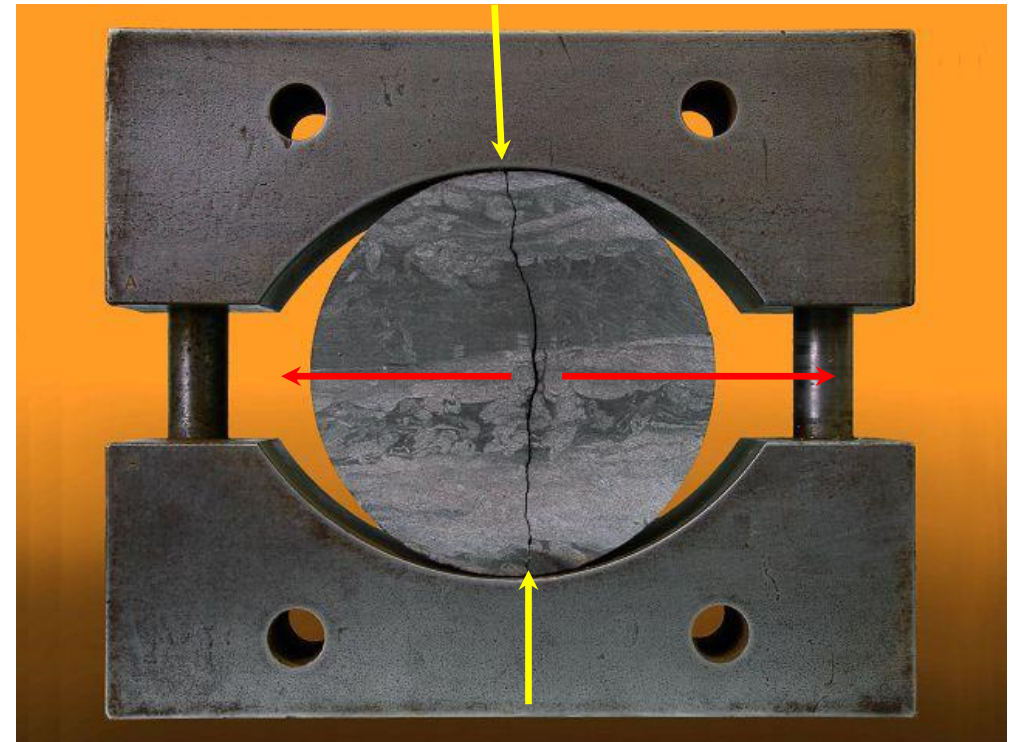
Al momento de la rotura se calcula la resistencia a la tracción:

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

P : carga compresiva de rotura (MPa)

L : espesor del disco

D : diámetro del disco

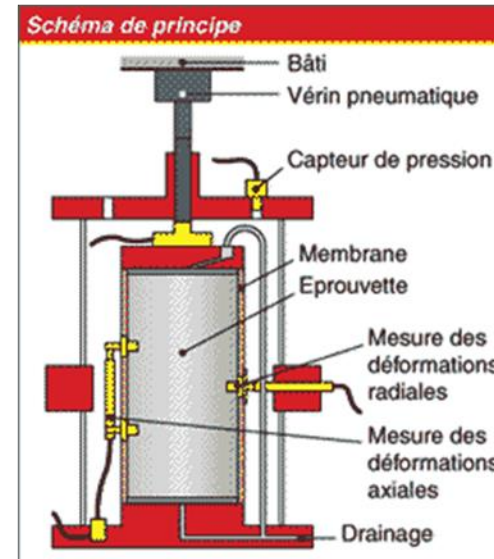
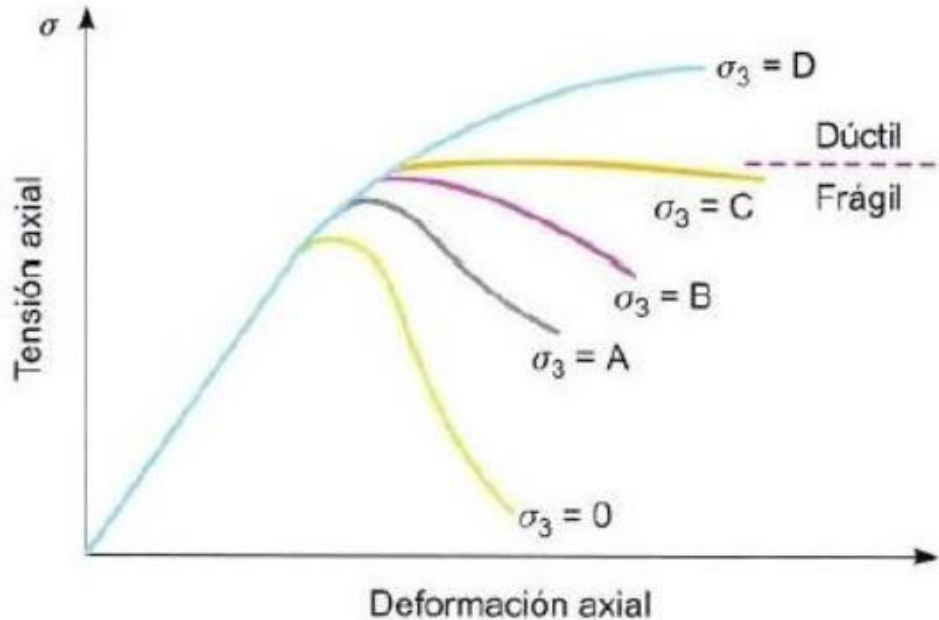


Roca matriz: ensayos triaxiales



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

- 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 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 en laboratorio e *in situ*.
- 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.



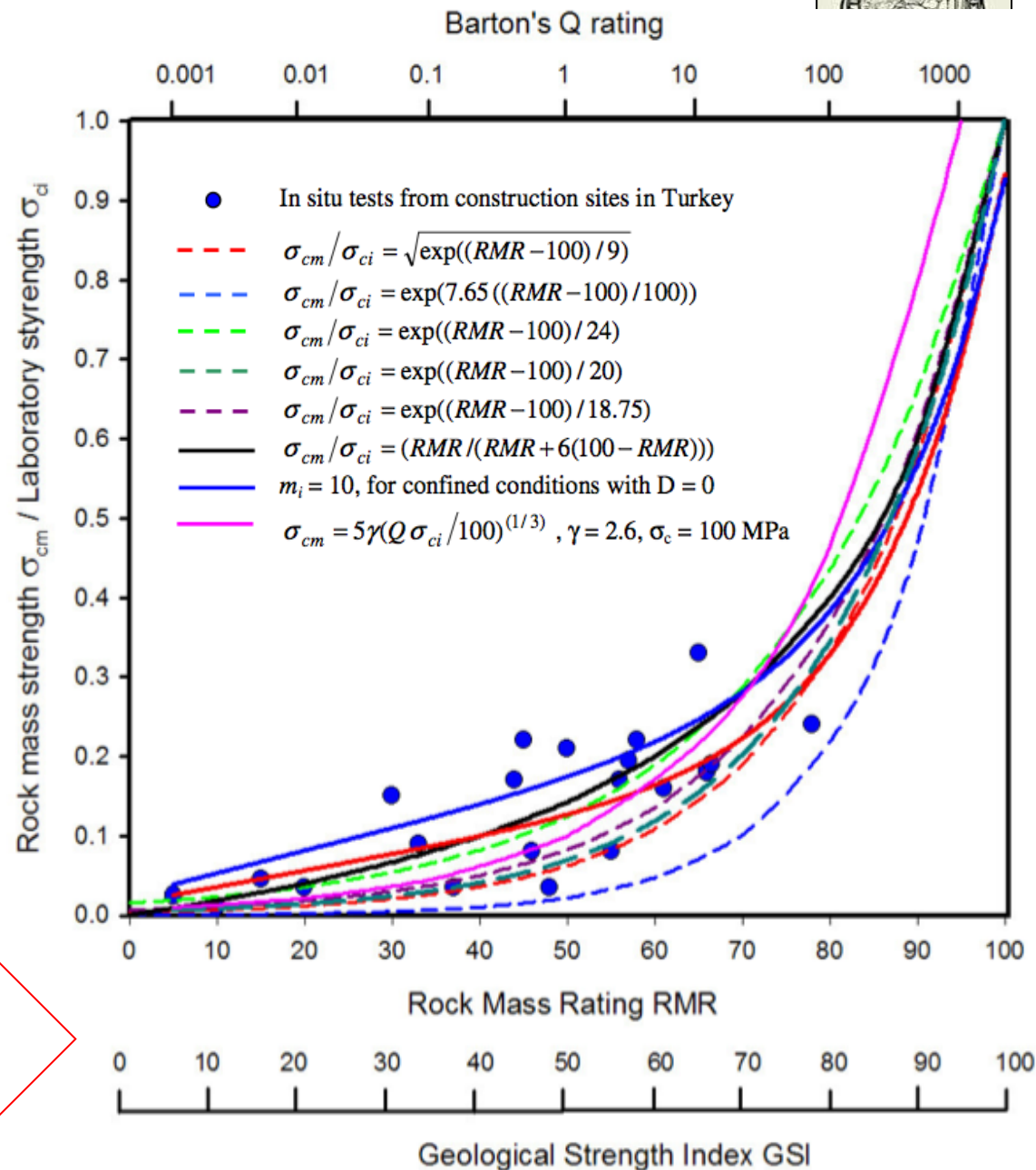
Resistencia macizo rocoso

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

$$GSI = RMR = 70\%$$

$$\sigma_{C \text{ Macizo rocoso}} / \sigma_{C \text{ Roca}} \sim 0,1 - 0,2$$

$$\sigma_{C \text{ Roca}} \sim 10 - 20 \sigma_{C \text{ Macizo rocoso}}$$



Indices que caracterizan al macizo

Deformación de macizos rocosos

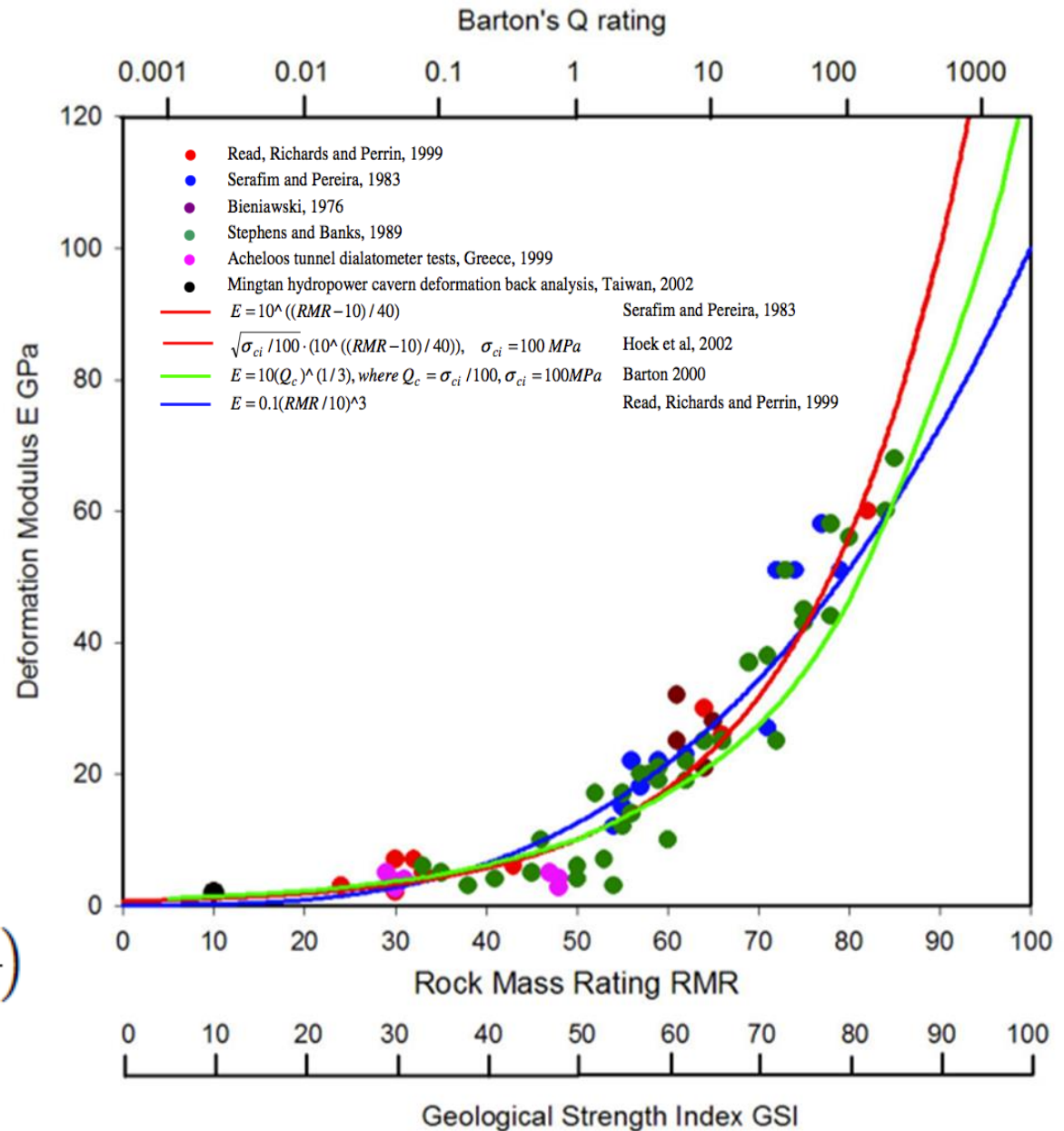
Correlaciones entre los índices de clasificación de macizos rocosos y la deformación del MR a partir de curvas:

- 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

Discontinuidades

- Orientación: rumbo, buzamiento
- Frecuencia
- Continuidad
- Apertura
- Puentes roca
- Fricción
- Rugosidad
- Rellenos
- Presencia de agua
- **Resistencia al corte**



https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/5023538705/in/album-72157624907827319/

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

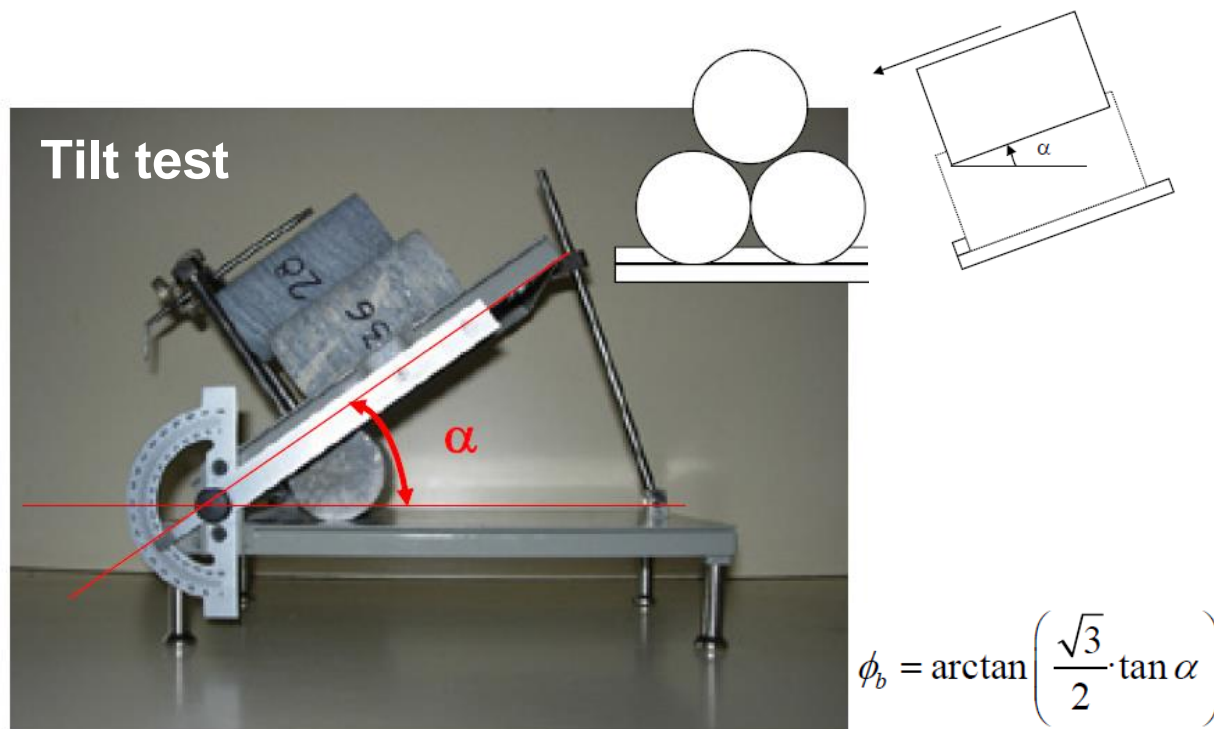
Ensayos de laboratorio, en campo y criterios empíricos.

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 \rightarrow 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*.



Resistencia al corte de discontinuidades (s).

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



Discontinuidades naturales: rugosas, irregulares, pueden estar rellenas, alteradas.
Barton *et al.* (1970-1990): estudio del comportamiento de discontinuidades rugosas naturales sin relleno y cálculo de $\tau_p \rightarrow$ **Modelo: 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.
- JCS_n : resistencia a compresión simple de las paredes de la discontinuidad.

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

- JRC_n : índice de rugosidad normalizado $JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0}$

Resistencia al corte de discontinuidades (s).

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



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

- ϕ_r : ángulo de fricción residual entre las paredes de la discontinuidad.

Estimación a partir de ensayos: $\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R}$

r : número de golpes del esclerómetro sobre la discontinuidad; R : número de golpes del esclerómetro sobre la roca intacta.

Tablas.

- JCS_n : resistencia a compresión simple de las paredes de la discontinuidad

$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03 JRC_0}$ Estimación en campo (esclerómetro) o laboratorio.

- JRC_n : índice de rugosidad normalizado $JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0}$

Estimación visual de la rugosidad y ondulación de la fractura a lo largo de 10 cm (L_0) → selección de un valor tabulado: índice de rugosidad para L_0 : JRC_0 → se mide la longitud real de la fractura (L_n) para el cálculo de JRC_n .

Estimación en campo: rugosímetro.

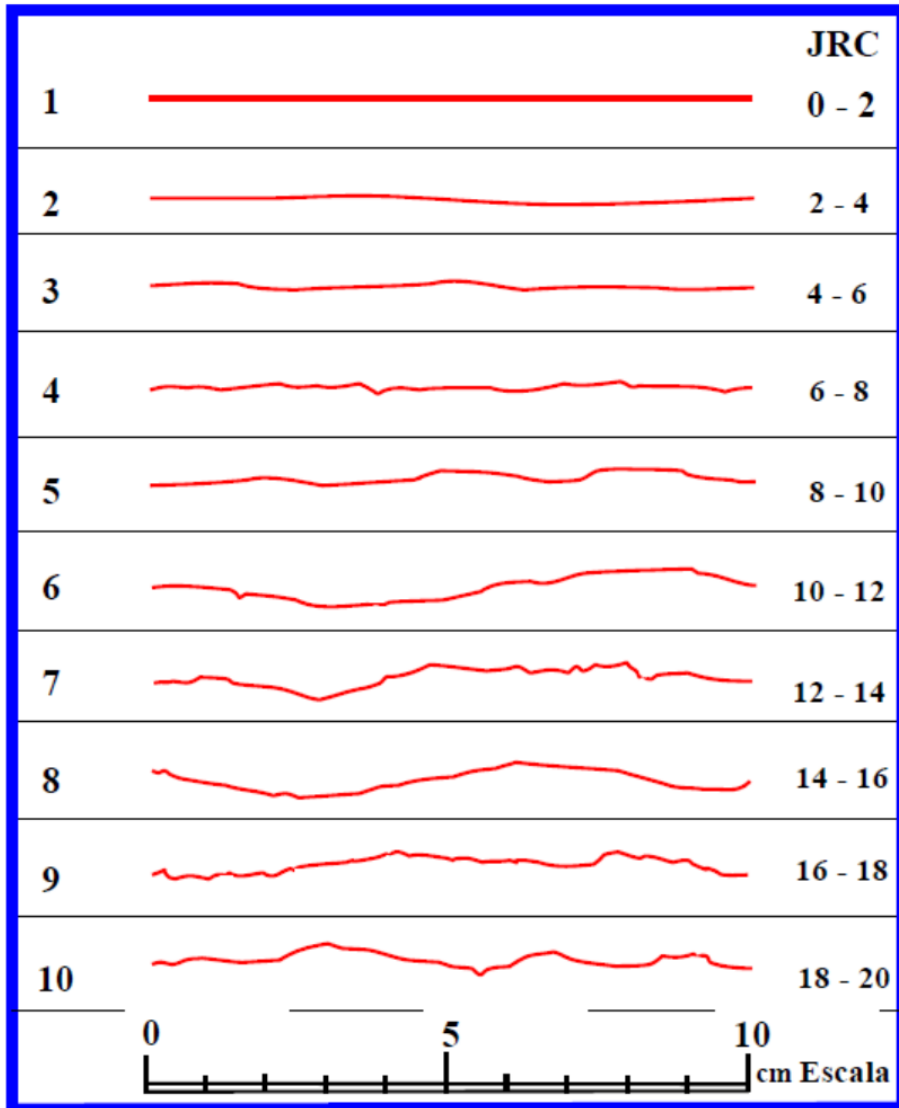
Resistencia al corte de discontinuidades (s). Criterio de Barton-Bandis. (Barton y Choubey, 1977)

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

Discontinuidades con relleno

Roca	Descripción	c' (MPa) de pico	φ° de pico	c' (MPa) residual	φ° residual
Basalto	Brecha basáltica arcillosa, amplia variación del contenido en arcilla y basalto	0.24	42		
Bentonita	Filón bentonítico en creta	0.015	7.5		
	Capas estrechas	0.09-0.12	12-17		
	Ensayos triaxiales	0.06-0.1	9-13		
Pizarra Bentonítica	Ensayos triaxiales	0-0.27	8.5-29		
	Ensayos de corte directo			0-0.03	8.5
Arcillas	Sobreconsolidadas, deslizamientos, juntas y cizallamientos menores	0-0.18	12-18.5	0-0.003	10.5-16
Lutita arcillosa	Ensayos triaxiales	0.06	32		
	Superficies de estratificación			0	19-25
Lutitas en carbón	Capas de arcillas milonítica, 10 a 25 mm	0.012	16	0	11-11.5
Dolomita	Capa de lutita alterada	0.04	14.5	0.02	17
Diorita, grano-diorita y pórfido	Relleno arcilloso (arcilla 2 %, IP = 17%)	0	26.5		
Granito	Fallas rellenas de arcilla	0-0.1	24-45		
	Relleno de falla arenoso	0.05	40		
	Zona de cizalla tectónica, granitos esquistosos y rotos, roca desintegrada y arcilla.	0.24	42		
Grauwaca	1-2 mm de arcilla en planos de estratificación.			0	21
Caliza	capa de 6 mm de arcilla			0	13
	10-20 mm de relleno arcilloso	0.1	13-14		
	<1 mm relleno de arcilla	0.05-0.2	17-21		
Caliza, marga y lignito	Capas de lignito interestratificadas	0.08	38		
	contacto marga / lignito	0.1	10		
Caliza	Juntas margosas, 20 mm de espesor	0	25	0	15-24
Lignito	Contacto entre lignito y arcilla	0.014-0.03	15-17.5		
Montmorillonita y arcilla bentonítica	Capas de 80 mm de bentonita (montmorillonita) arcilla en lutitas	0.36	14	0.08	11
		0.016-0.02	7.5-11.5		
Esquisto, cuarcita, y esquisto silíceo	Relleno arcilloso de 10-15 mm	0.03-0.08	32		
	Estratificación con arcilla en capas finas	0.61-0.74	41		
	Estratificación con arcilla en capas gruesas	0.38	31		
Pizarra metamórfica	Finamente laminada y alterada	0.05	33		
Cuarzo / caolín / pirolusita	Ensayos triaxiales sobre muestras remodeladas	0.042-0.09	36-38		

Estimación de JRC_n (Barton y Choubey, 1977)



Indice de rugosidad normalizado

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

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

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://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.05.008>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775513000449>

Estimación de JRC (Barton y Choubey, 1977)

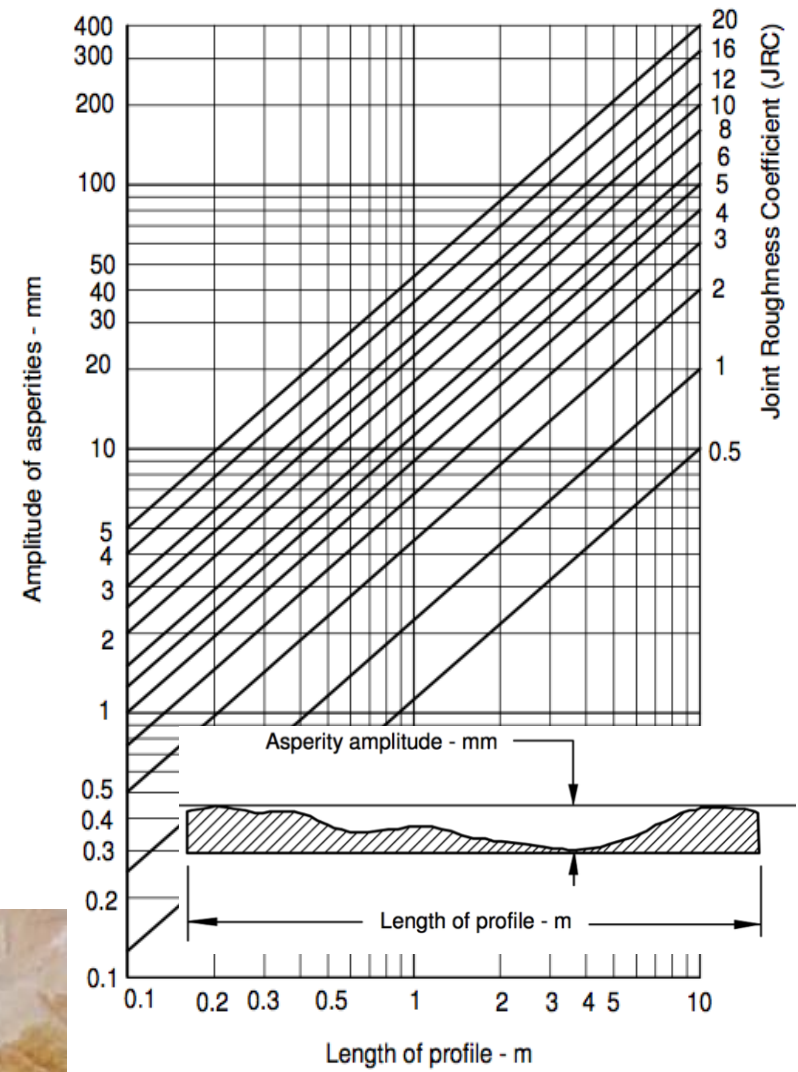


<http://www.adatec.co.cr/route.php?url=perfilometrosrugosímetros>

Rugosímetro
(Peine de Barton)



<https://enriquemontalar.com/el-perfilometro-y-la-rugosidad-de-la-junta/>



Índice



- Roca intacta y macizo rocoso
- Resistencia de macizos rocosos
- **Sistemas de clasificación**

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.

- **RQD – Rock Quality Designation** (Deere, 1967)
- **Q-System** (Barton, Lien y Lunde, 1974)
- **GSI – Geological Strength Index** (Hoek y Brown, 1997; Marinos y Hoek, 2000, 2001, 2005)
- **RMR – Rock Mass Rating** (Bienawski, 1973, 1976, 1989)
- **RME – Rock Mass Excavability** (Bienawski, 2006, 2018)
- ...

ASTM D5878-19

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

Indice RQD (Deere, 1967, 1989)



Parámetro de entrada para otras clasificaciones.

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



<https://www.structuralguide.com/what-is-rqd-and-core-recovery/>

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

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)



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

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

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

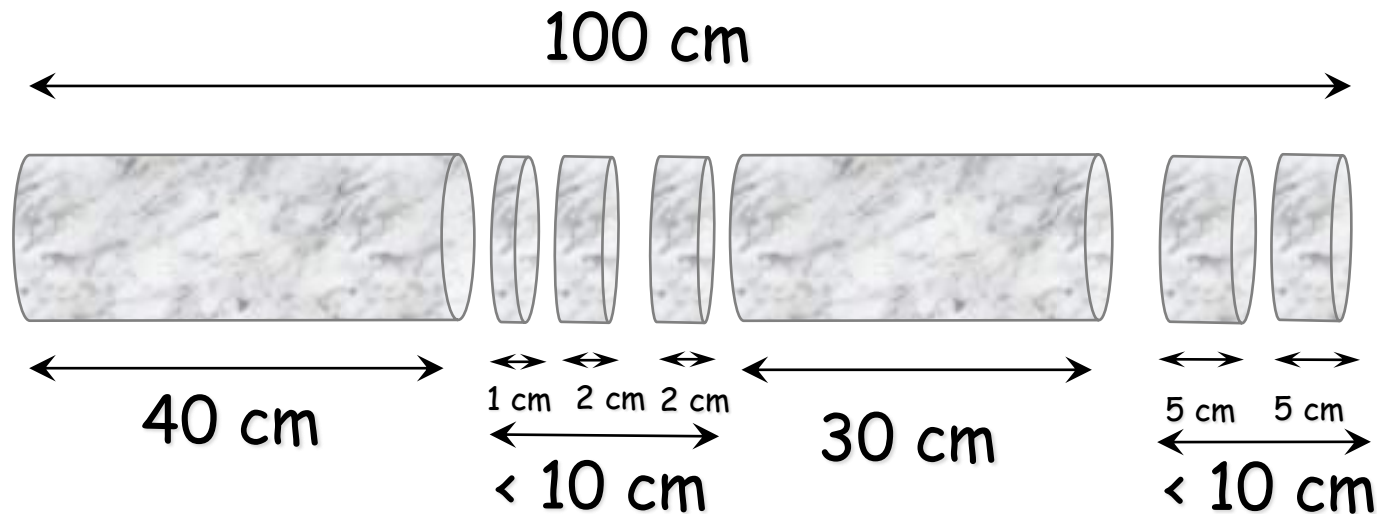
$$R = 0,85 \rightarrow R (\%) = 85\%$$

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

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

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

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



Indice RQD (Deere, 1967, 1989)

Proporción de roca "buena" (competente), poco o nada 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 testigos de $L_i > 10$ 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. 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 Tunneling Quality Index, 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 ↔ confinamiento)

Discontinuidades

Indice Q (Barton, Lien y Lunde, 1974)



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

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

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 $3 J_n$

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

Junta ~ Diaclasa

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 $J_r=0,5$	



J_a : índice de alteración de las discontinuidades

DESCRIPCIÓN	J_a	Ψ_r
* Contacto entre las dos caras de la junta.		
- Junta sellada dura, sin reblandecimiento, impermeable, p.ej. cuarzo, paredes sanas.	0,75	
- 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, mica, 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	Ψ_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	Ψ_r
- Zonas o bandas de roca desintegrada o roca machacada y arcilla.	6-8 u 8-12	6-24 "
- Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla, sin reblandecimiento.	5	6-24
- Milonitos arcillosos gruesos	10-13 ó 13-20	6-24 "

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

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.



SRF: factor de reducción de esfuerzos

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

DESCRIPCIÓN				
1. Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma.			SRF	
A	Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad).		10	
B	Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación menor de 50 m).		5	
C	Sólo una zona débil conteniendo 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.	$\sigma_c/\sigma_1 > 200$	$\sigma_3/\sigma_1 > 13$	2,5
J	Tensiones medias.	200-10	13-0,66	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	0,5-2,0
L	Explosión de roca suave (roca masiva).	5-2,5	0,33-0,16	5-10
M	Explosión de roca fuerte (roca masiva).	<2,5	<0,16	10-20
σ_c y σ_1 son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca; σ_3 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_1 a $0,8 \sigma_c$ y $0,8 \sigma_1$; cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reducir σ_c y σ_1 a $0,2 \sigma_c$ y $0,6 \sigma_1$, donde σ_3 es la tensión principal mínima que actúa sobre la roca.				



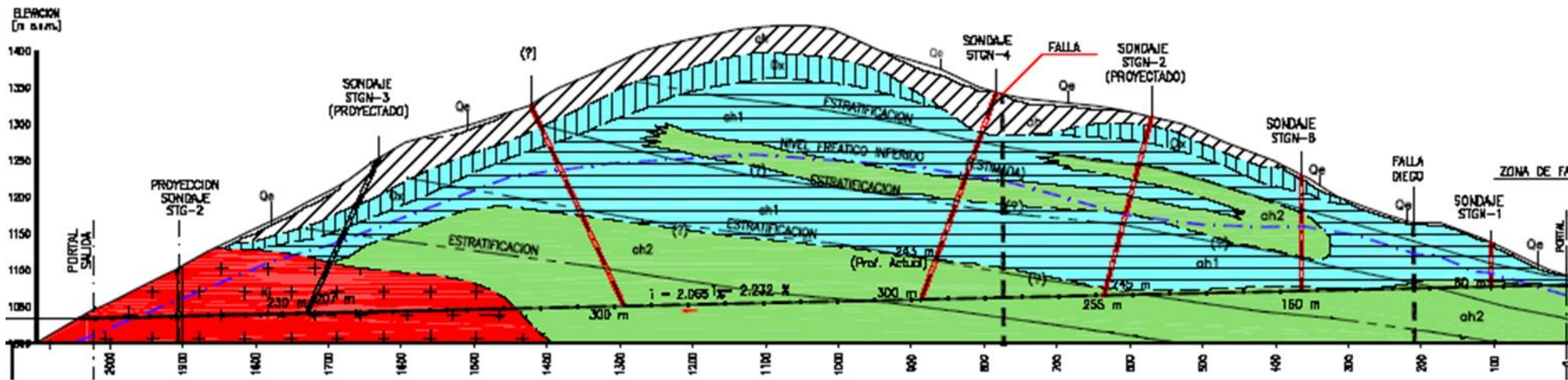
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

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 \leftrightarrow distintos tipos y calidades de MR, excavaciones, dimensiones de túneles.
- Imposible predecir las condiciones geotécnicas a lo largo del trazado de un túnel \rightarrow 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 \leftrightarrow medición de diversos parámetros, entre ellos Q \rightarrow conocimiento de las condiciones geotécnicas.

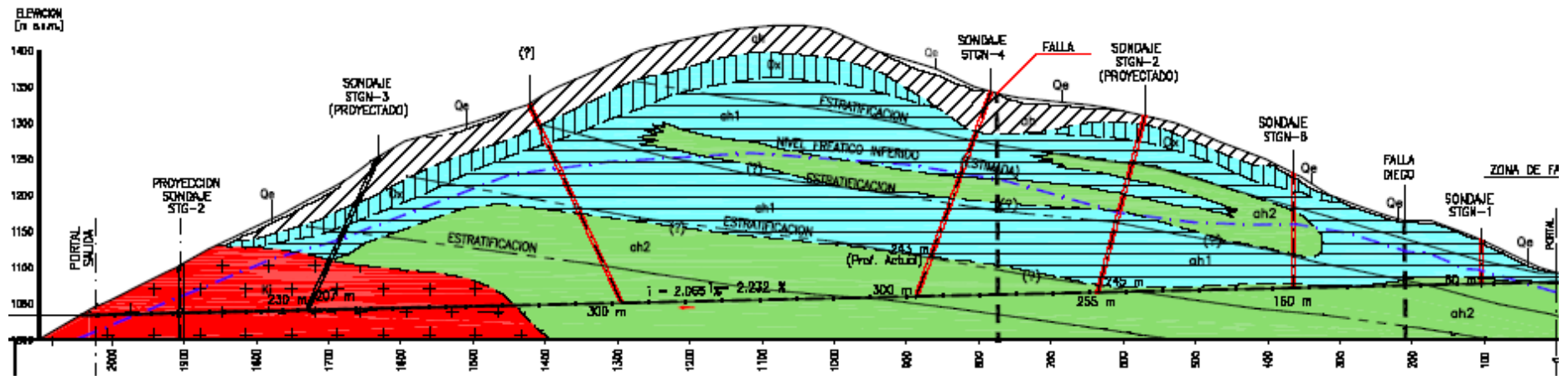


Indice Q



- 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.

Macizos rocosos



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

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)/es fuerza 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 (i) 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	Desfavorable

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_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_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

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

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

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

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

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

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.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>


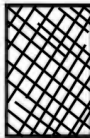




Hoek, E & Carranza-Torres, C. & Corkum, Brent & Hoek, Evert & Carranza-Torres, Carlos. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition:

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

Indice GSI

- 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 ~ 65-70**

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
		MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
		CALIDAD DECRECIENTE DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES →				
	INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.	90		●	N/A	N/A
	FORMADO POR BLOQUES Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.	80				
	FORMADO POR MUCHOS BLOQUES Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.		60			
	FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DISTORSIONADO Y BANDEADO Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.			40		
	DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.				20	
	LAMINADO Y CIZALLADO Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.	N/A	N/A			10

↑ ENCAJE DECRECIENTE ENTRE LOS TROZOS DE ROCA ↓

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

CARACTERISTICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA EVALUAR SU RESISTENCIA

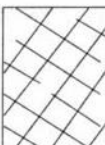



Basándose en la apariencia del afloramiento de roca, escoja la categoría que, según su criterio, mejor describe la condición "típica" del macizo rocoso in situ en condición no perturbada. Note que superficies expuestas de roca que han sido generadas por tronadura pueden dar una impresión errónea de la calidad de la roca subyacente. Puede ser necesario considerar algún ajuste por tronadura, y un examen de testigos de sondajes y/o superficies definidas con precorte o tronaduras amortiguadas puede ayudar en la definición de este ajuste. Es también importante entender que el criterio de Hoek-Brown solo debe aplicarse a macizos rocosos en que el tamaño del bloque "típico" es pequeño con respecto al tamaño de la excavación considerada.

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES				
DISMINUYE LA TRABAZON DE LOS BLOQUES DE ROCA	 <p>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY) MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SÍ.</p>	FB/MB	FB/B	FB/R	FB/M	FB/MM
	 <p>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY) MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA TRABADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	FF/MB	FF/B	FF/R	FF/M	FF/MM
	 <p>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED) MACIZO ROCOSO PLEGADO Y/O AFECTADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCION DE NUMEROSOS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	FP/MB	FP/B	FP/R	FP/M	FP/MM
	 <p>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED) MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS</p>	D/MB	D/B	D/R	D/M	D/MM
		EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES				
		<p>MUY BUENA Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)</p> <p>BUENA Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con patinas de óxido de hierro</p> <p>REGULAR Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas</p> <p>MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con rellenos de fragmentos granulares y/o arcillosos firmes</p> <p>MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos</p>				

INDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA

De los códigos de letra que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (en Tabla 4), seleccione el cuadro apropiado en esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia, **GSI**, de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para **GSI**, por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor, por ejemplo 38.

https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/M146B/1/material_doc/ente/bajar%3Fid_material%3D143138

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES				
DISMINUYE LA TRABAZON DE LOS BLOQUES DE ROCA	 <p>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY) MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SÍ.</p>	80				
	 <p>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY) MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA TRABADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	70				
	 <p>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED) MACIZO ROCOSO PLEGADO Y/O AFECTADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCION DE NUMEROSOS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	60				
	 <p>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED) MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS</p>	50				
		40				
		30				
		20				
		10				
		EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES				
		<p>MUY BUENA Superficies rugosas y de cajas frescas (sin señales de intemperización ni de alteración)</p> <p>BUENA Superficies rugosas, cajas levemente intemperizadas y/o alteradas, con patinas de óxido de hierro</p> <p>REGULAR Superficies lisas, cajas moderadamente intemperizadas y/o alteradas</p> <p>MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas intemperizadas y/o alteradas, con rellenos de fragmentos granulares y/o arcillosos firmes</p> <p>MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, cajas muy intemperizadas y/o alteradas, con rellenos arcillosos blandos</p>				

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



Básica

- Goodman, R (1991). Introduction to Rock Mechanics. 2nd Ed. Wiley.
- Goodman, R (1993) Engineering Geology. Wiley
- 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

Complementaria

- 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>
- Brady B. H. G. & Brown E. (2006). Rock mechanics. For underground mining. 3rd Ed., Springer Dordrecht Publ.



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>