.UBAfiuba
FACULTAD DE INGENIERÍA

Macizos rocosos

Paso Cristo Redentor, Mendoza (2025)

Mecánica de Suelos y Geología

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

Índice

- Componentes del Macizo Rocoso
  - Propiedades fundamentales de las rocas
  - Matriz rocosa
  - Discontinuidades
- Estudios geológicos del Macizo Rocoso
- Clasificación geomecánica del Macizo Rocoso

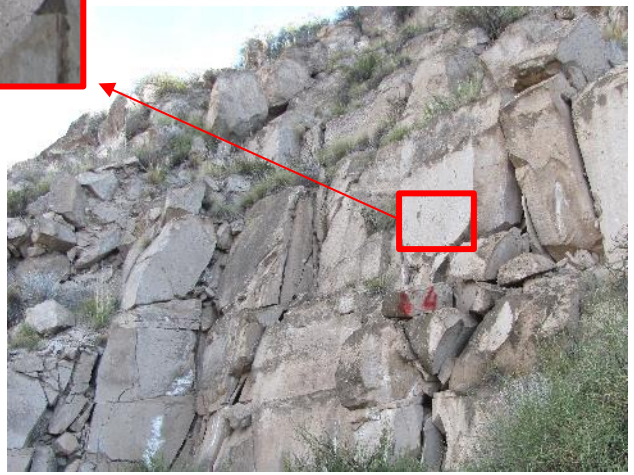
Componentes del MR

Macizo rocoso - *Rock Mass* (ISRM, 1978):

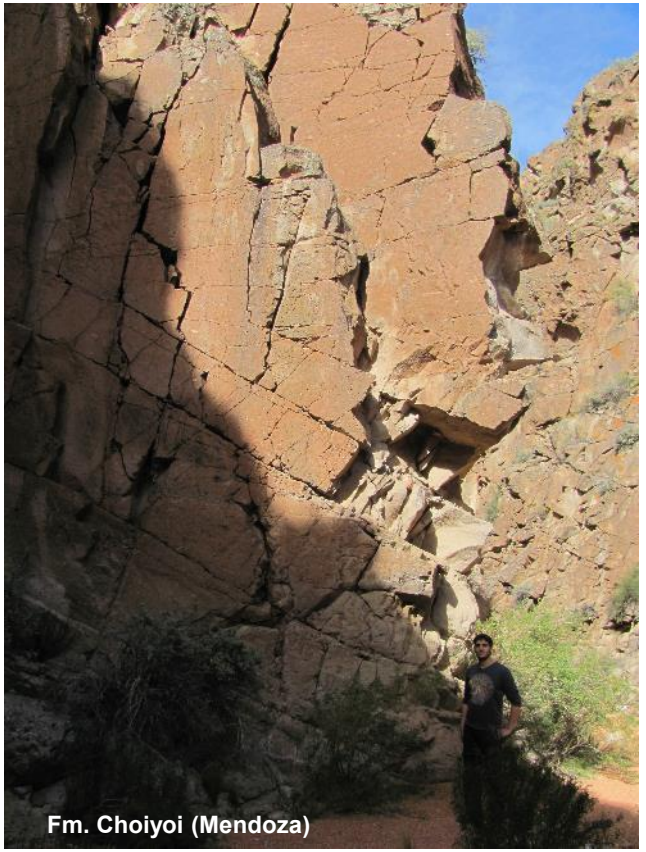
Volumen total de roca que incluye tanto **matriz rocosa** ("roca intacta") como todas las **discontinuidades** que lo afectan.

= "roca intacta" + discontinuidades

+



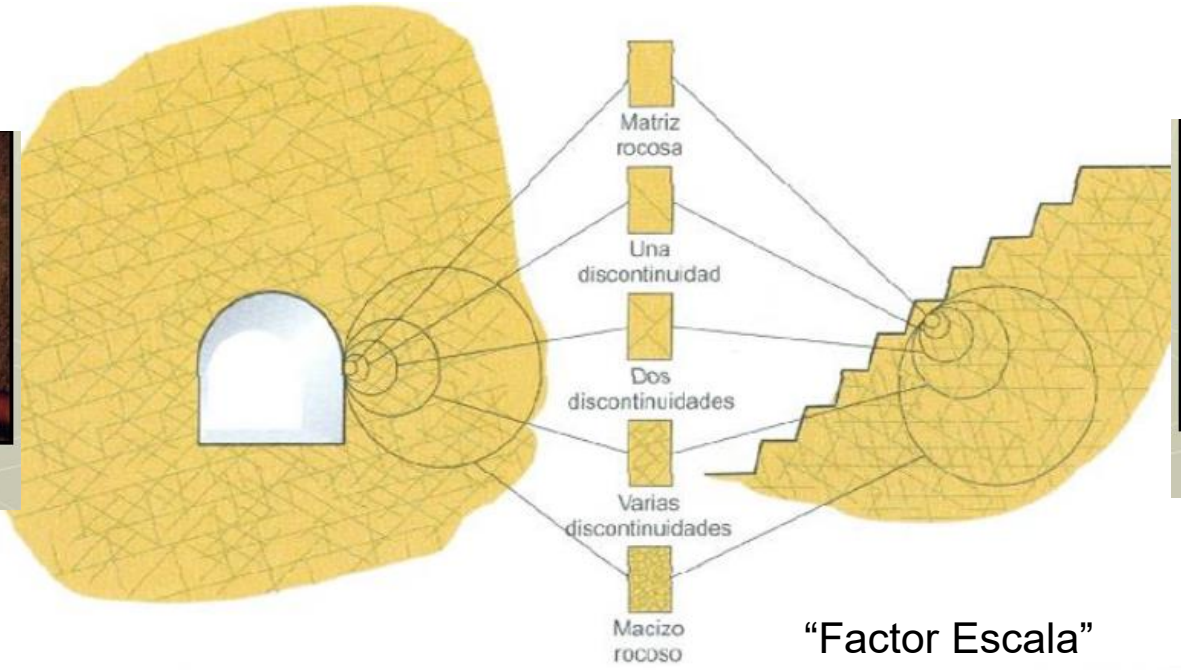
=



Componentes del MR

Macizo rocoso - *Rock Mass* (ISRM, 1978):
Volumen total de roca que incluye tanto **matriz rocosa** (“roca intacta”) como todas las **discontinuidades** que lo afectan.
= “roca intacta” + discontinuidades

Matriz Rocosa.



“Factor Escala”

Discontinuidades.

Componentes del MR

Macizo rocoso - *Rock Mass* (ISRM, 1978)

El comportamiento del MR depende de:

- Propiedades físicas y mineralógicas de la roca intacta
- Estructuras geológicas = discontinuidades (propiedades mecánicas del MR)
- Condiciones hidrogeológicas y ambientales

Índice

- Componentes del Macizo Rocoso
  - Propiedades fundamentales de las rocas
  - Matriz rocosa
  - Discontinuidades
- Estudios geológicos del Macizo Rocoso
- Clasificación geomecánica del Macizo Rocoso

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

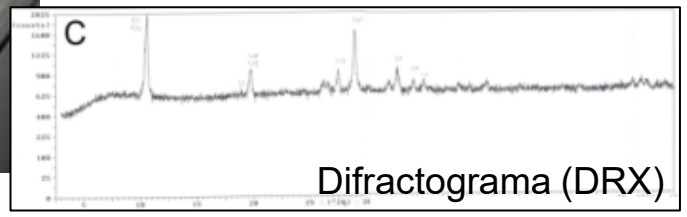
I) Ensayos de identificación:

- **Descripción petrográfica:** Composición mineral, texturas, anisotropías, tipo y grado de alteración, etc…
  - Identificación de minerales primarios y de alteración
  - Tipo de roca (clasificación petrográfica)
  - Presencia de arcillas, sulfatos y sales

Muestra de mano (macro)

Corte delgado (micro)

- Examen visual (a ojo desnudo)
- Lupa binocular (1-40X)
- Microscopio petrográfico (25-500X)
- Difracción de rayos X



Difractograma (DRX)

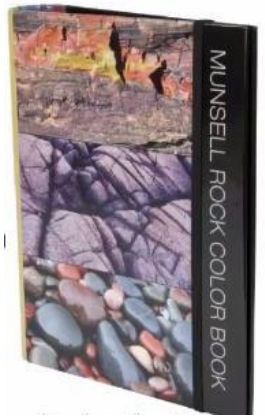
Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

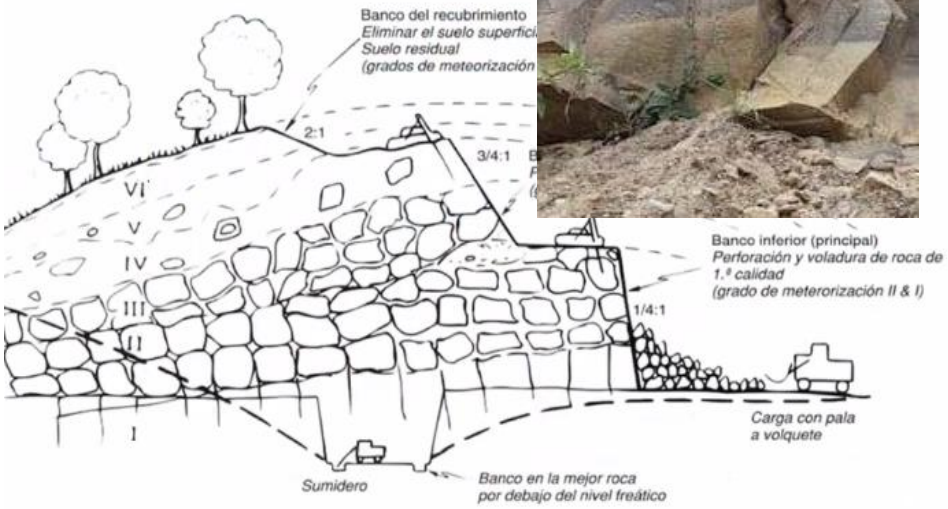
Propiedades fundamentales de las rocas

I) Ensayos de identificación:

- **Color:** apariencia estética de la roca → posible **grado de alteración**



- **Grado de meteorización:** descomposición y/o desintegración de la roca



- **Grado VI: suelo residual.** Toda la roca está convertida en suelo.
- **Grado V: completamente meteorizada**: Toda la roca está convertida en suelo, pero la estructura original del macizo
- **Grado IV: fuertemente meteorizada.** Más de la mitad de la roca descompuesta a suelo.
- **Grado III: moderadamente meteorizada**: Menos de la mitad de la roca esta desintegrada a suelo. aislados.
- **Grado II: ligeramente meteorizada**. La roca esta decolorada.
- **Grado I: roca sana**: Sin signos visibles de meteorización.

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

II) Ensayos de estado:

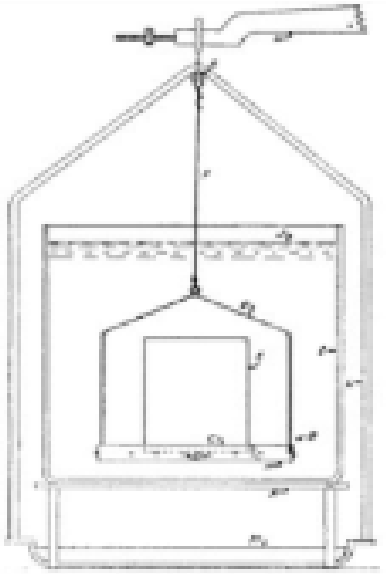
- **Densidad, porosidad y absorción de agua:** Relación entre el material sólido (peso específico) y los espacios vacíos (poros – fisuras)

Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas

Roca	Peso específico (g/cm³)	Porosidad (%)
Andesita	2,2-2,35	10-15
Anfibolita	2,9-3,0	—
Arenisca	2,3-2,6	5-25 (16,0)
Basalto	2,7-2,9	0,1-2
Caliza	2,3-2,6	5-20 (11,0)
Carbón	1,0-2,0	10
Cuarcita	2,6-2,7	0,1-0,5
Creta	1,7-2,3	30
Diabasa	2,9	0,1
Diorita	2,7-2,85	—
Dolomía	2,5-2,6	0,5-10
Esquisto	2,5-2,8	3
Gabro	3,0-3,1	0,1-0,2
Gneiss	2,7-3,0	0,5-1,5
Granito	2,6-2,7	0,5-1,5 (0,9)
Grauvaca	2,8	3
Mármol	2,6-2,8	0,3-2 (0,6)
Lutita	2,2-2,6	2-15
Pizarra	2,5-2,7	0,1-1
Riolita	2,4-2,6	4-6
Sal	2,1-2,2	5
Toba	1,9-2,3	14-40
Yeso	2,3	5

Entre paréntesis algunos valores medios de porosidad eficaz. Datos seleccionados a partir de Goodman (1989), Rahn (1986), Walthan (1999), Farmer (1968).

Tomado de González de Vallejo *et al*., 2002



Ej. método ASTM C97: Peso seco de la muestra, peso hidrostático y peso saturado de agua

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

II) Ensayos de estado:

- **Velocidad sónica (ultrasonido):** Relación entre el material sólido (peso específico) y los espacios vacíos (poros – fisuras)

Ej. método ASTM D2845: Medición de la velocidad de propagación

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\gamma}} \qquad V_T = \sqrt{\frac{G}{\gamma}}$$

VL y VT: velocidades longitudinal y transversal;

E: módulo de Young (deformación)

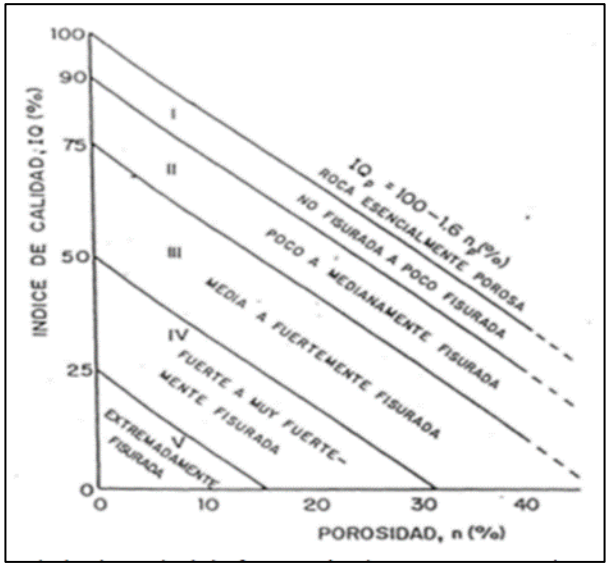
G: módulo de rigidez transversal

VL*: velocidad teórica longitudinal (depende de los minerales) si no existiesen discontinuidades

Valores de V_{Li} para minerales	
Mineral	V_{Li} (m/sg)
Anfibolita	7200
Augita	7200
Calcita	6600
Cuarzo	6050
Dolomita	7500
Epidota	7450
Magnetita	7400
Moscovita	5800
Olivino	8400
Ortoclasa	5800
Pirita	8000
Plagioclasa	6250
Yeso	5200

Valores de V_L para rocas sanas	
Roca	V_L (m/sg)
Gabro	7000
Basalto	6500-7000
Caliza	6000-6500
Dolomía	6500-7000
Arenisca y cuarcita	6000
Rocas graníticas	5500-6000

Fourmaintreaux (1976)



$$IQ = \frac{V_L}{V_L^*} \cdot 100$$

IQ: índice de calidad de la roca

Componentes del MR

Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Resistencia a la compresión simple (UCS) → σ_c**: $\sigma_1 \neq 0$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$
- **Deformabilidad: Mód. de Young** ($E = \sigma_c / \varepsilon_{ax}$) – **Coef. de Poisson** ($\upsilon = \varepsilon_t / \varepsilon_{ax}$)

Obtención de probetas

Ensayo UCS

Medición de la elasticidad y deformación

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

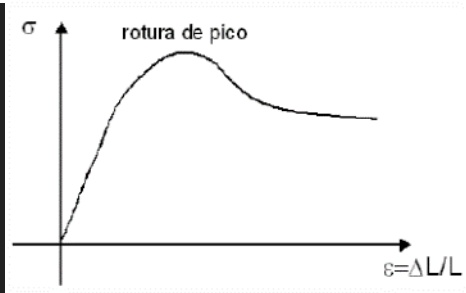
Propiedades fundamentales de las rocas

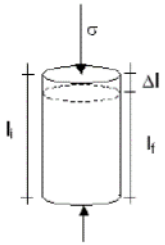
III) Ensayos de resistencia y deformación:

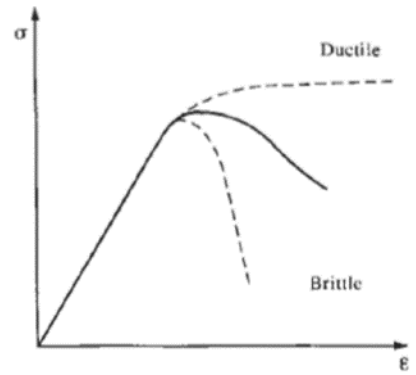
- **Resistencia a la compresión simple (UCS) → σ_c**: $\sigma_1 \neq 0$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$

Clasificación IAEG (1979)

Clase	Descripción	Resistencia a la compresión simple (σc, MPa)	Ejemplo típico
R0	Extremadamente débil	< 1	Arcillas muy duras, margas blandas
R1	Muy débil	1 – 5	Lutitas blandas, tobas alteradas
R2	Débil	5 – 25	Areniscas poco cementadas, calizas margosas
R3	Moderadamente resistente	25 – 50	Calizas compactas, basaltos alterados
R4	Fuerte	50 – 100	Granitos o basaltos sanos, cuarcitas medianamente compactas
R5	Muy fuerte	100 – 250	Granitos frescos, cuarcitas duras
R6	Extremadamente fuerte	> 250	Cuarcitas muy compactas, basaltos muy densos







Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

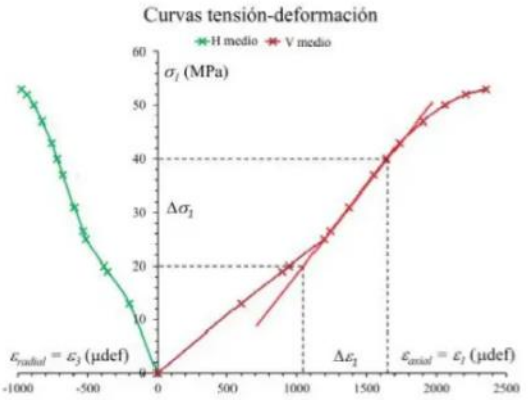
III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Deformabilidad: Mód. de Young** ($E = \sigma_c / \varepsilon_{ax}$) **– Coef. de Poisson** ($\upsilon = \varepsilon_t / \varepsilon_{ax}$)

Clasificación IAEG (1979)

Clase	Descripción	Módulo de Elasticidad (E, GPa)	Ejemplo típico de roca
E0	Muy bajo	< 1	Rocas muy alteradas, margas blandas
E1	Bajo	1 – 5	Lutitas blandas, tobas poco consolidadas
E2	Medio	5 – 20	Areniscas, calizas medianamente compactas
E3	Alto	20 – 50	Basaltos o granitos medianamente sanos
E4	Muy alto	50 – 100	Granitos compactos, cuarcitas
E5	Extremadamente alto	> 100	Cuarcitas muy densas, basaltos muy frescos

$$E_{tg} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{40-20}{1660\cdot10^{-6}-1050\cdot10^{-6}} = 32786{,}89\ \text{MPa} = 32{,}8\ \text{GPa}$$



Cálculo del módulo de elasticidad tangente para un 50% de tensión.

(Javier Arzúa,Leonardo Alejano,Ignacio Perez-Rey, 2016)

$E = \Delta\sigma_c / \Delta\varepsilon_{ax}$ → corresponde a tangente a la curva trazada por el punto al 50% de la carga de rotura)

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

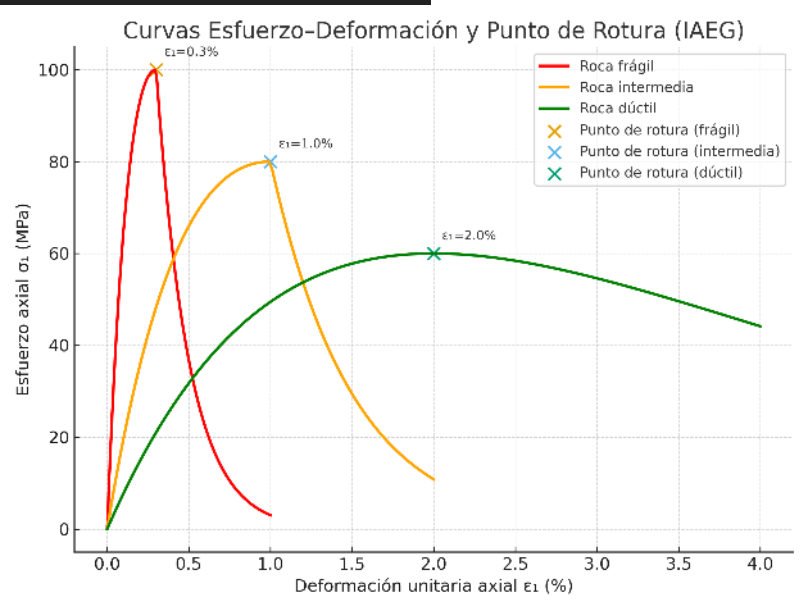
III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Resistencia a la compresión simple (UCS) → σ_c**: $\sigma_1 \neq 0$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$
- **Deformabilidad: Mód. de Young** ($E = \sigma_c / \varepsilon_{ax}$) – **Coef. de Poisson** ($\upsilon = \varepsilon_t / \varepsilon_{ax}$)

Deformación unitaria axial (ε_1)

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Clase	Descripción	Deformación unitaria a compresión simple (ε_1, %)
D0	Muy frágil	< 0.2
D1	Frágil	0.2 – 0.5
D2	Moderadamente frágil	0.5 – 1.0
D3	Moderadamente dúctil	1.0 – 2.0
D4	Dúctil	> 2.0



Por ejemplo:

- Una roca es **resistente pero frágil** → alta σ_c, alto E, baja ε_1 → granito
- Una roca es **débil pero dúctil** → baja σ_c, bajo E, alta ε_1 → lutita

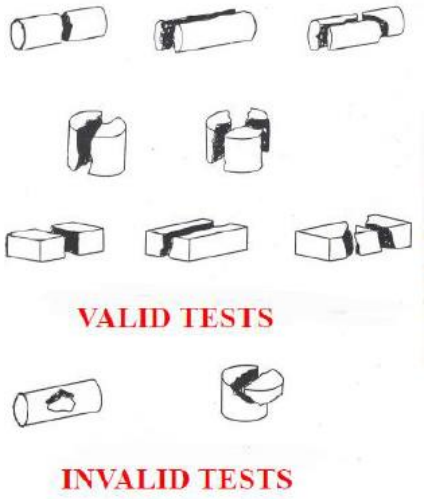
Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Resistencia a la carga puntual (PLT)**

$$I_s = \frac{P}{De^2}$$

I_s *:* índice de carga puntual
P: carga de rotura (MPa)
D: diámetro 50 mm de la muestra



Cuando el D es distinto de 50 mm, utilizo un De y se debe hacer una corrección F y obtener un $I_{s(50)}$

$$De = \sqrt{\frac{4}{\pi} WD} \qquad F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \qquad I_s = \frac{I_{s(50)}}{F}$$

De: diámetro equivalente de la muestra (mm)
W: anchura media de la muestra (semisuma de sus anchuras máxima y mínima, si no es cilíndrico)
D: distancia entre las puntas de los conos en el momento de la rotura

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

➢ Resistencia a la carga puntual (PLT)

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

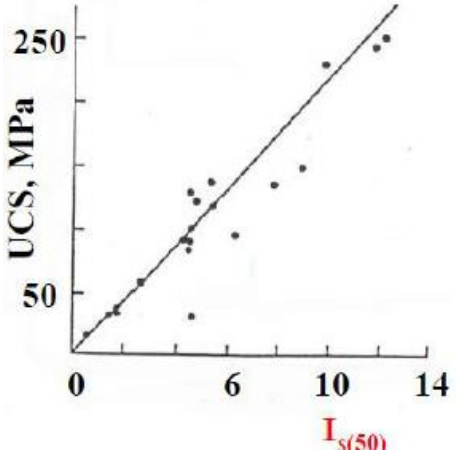
Clase (a)	Calificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial (MPa)	Indice de carga puntual (MPa)	Estimación en terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente Resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico sólo causan descostramientos superficiales en la roca.	Basalto fresco, 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.

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

Correlaciona con σ_c: $\boldsymbol{\sigma_c \cong C \,.\, I_{s(50)}}$

Core Size (mm)	Generalized value of C
20	17.5
30	19
40	21
50	23
54	24
60	24.5



Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

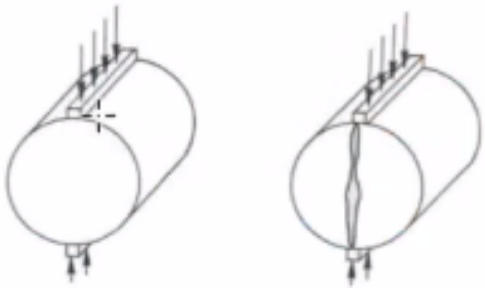
III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Ensayo a la tracción indirecta (compresión diametral o brasileño)**

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



Una aproximación a partir del PLT:

$$\sigma_t = \frac{I_{s(50)}}{0,8}$$

Resistencia	σ_t (MPa)
Muy alta	> 30
Alta	10-30
Media	5-10
Débil	2-5
Muy débil	0-2

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

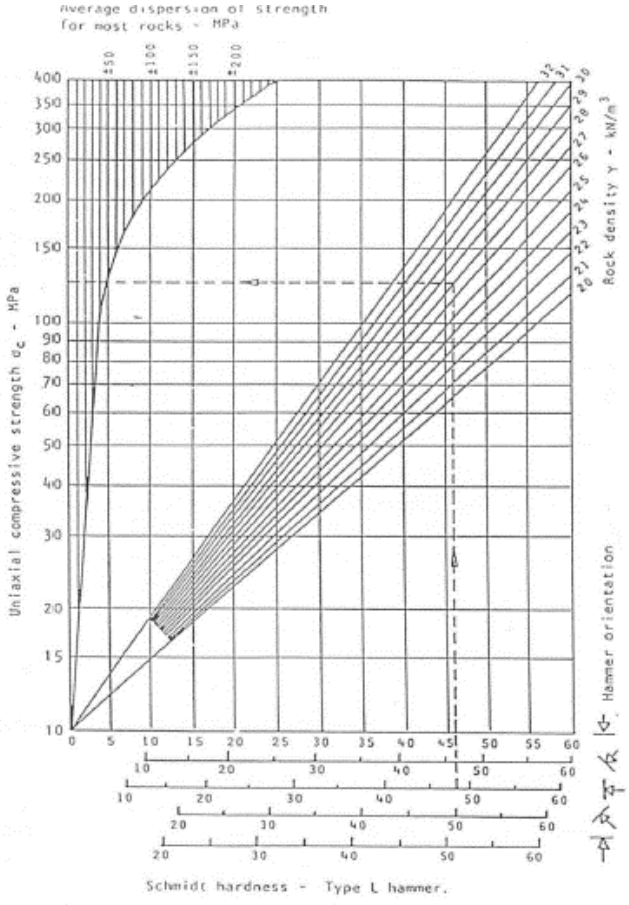
- **Dureza superficial - Martillo Schmidt**

Correlación con UCS aceptable

TABLA XII

VALORES MEDIOS DE LA DUREZA SCHMIDT DE ALGUNAS ROCAS COMUNES (ELABORACIÓN PROPIA)

ROCA	DUREZA SCHMIDT
Rocas ígneas	
Granito	40 - 60
Andesita	65 - 70
Basalto	60
Rocas Sedimentarias	
Caliza	30 - 50
Creta	10 - 20
Arenisca	10 - 40
Grauvaca	55 - 65
Rocas Metamórficas	
Pizarra	40
Gneis	50
Esquisto	30



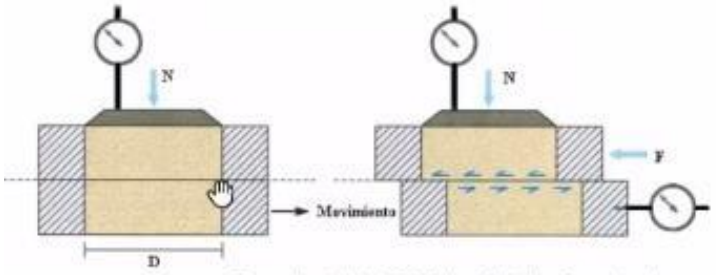
Componentes del MR

Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Ensayo de corte directo**

Utilizado para medir resistencia al corte de las discontinuidades (con o sin relleno) y rocas (sin anisotropías)



Pérez Ayala, H.I. 2016 http://biblioteca2.ucab.edu.ve

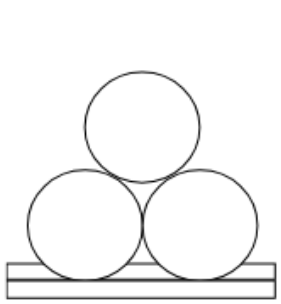
https://anddesgeolab.com/

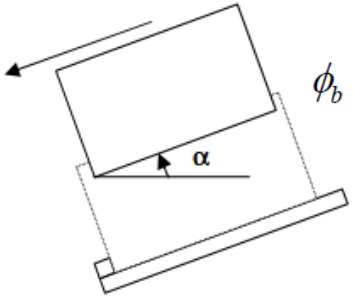
Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

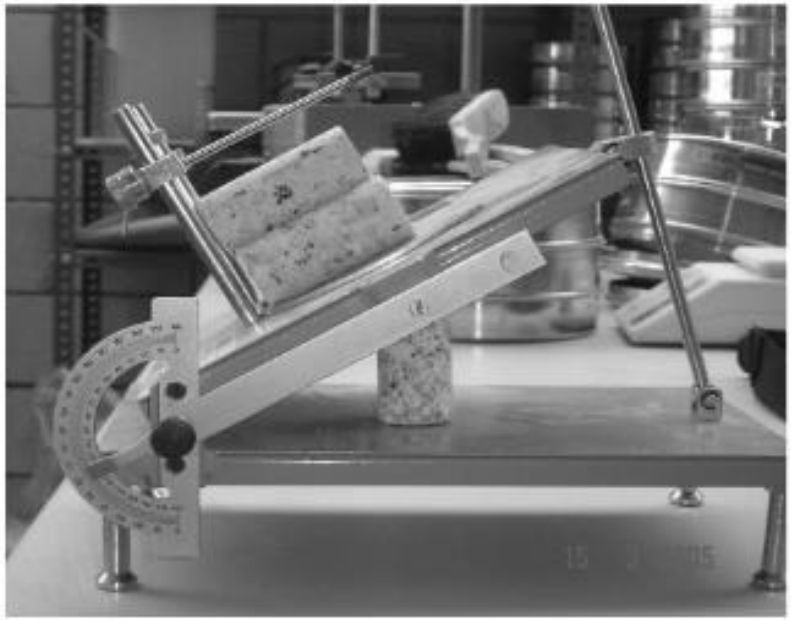
- **Ensayo de inclinación para el ángulo de fricción básico ("tilt-test")**

Stimpson (1981) observó que el ángulo de inclinación (α) de muestras cilíndricas de roca sobre otras, en el momento del deslizamiento, será el ángulo de fricción básico ($\boldsymbol{\varphi_b}$)





$$\phi_b = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\tan\alpha\right)$$



Factor de corrección por rugosidad: ángulo de fricción residual ($\boldsymbol{\varphi_r}$). El factor de rugosidad depende de la escala y se obtiene por estimaciones visuales *in situ*.

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Ensayo de compresión triaxial**

  Cuando se requiere conocer la resistencia de la roca en condiciones de confinamiento (profundidad) → p. e. cimentaciones de presas, túneles y minería subterránea.

Criterio de Mohr-Coulomb:
- Cohesión, *c*
- Ángulo de rozamiento interno, ϕ ϕ_P, y residual, ϕ_R)

Criterio de Hoek y Brown
- Parámetros *m* y *s*

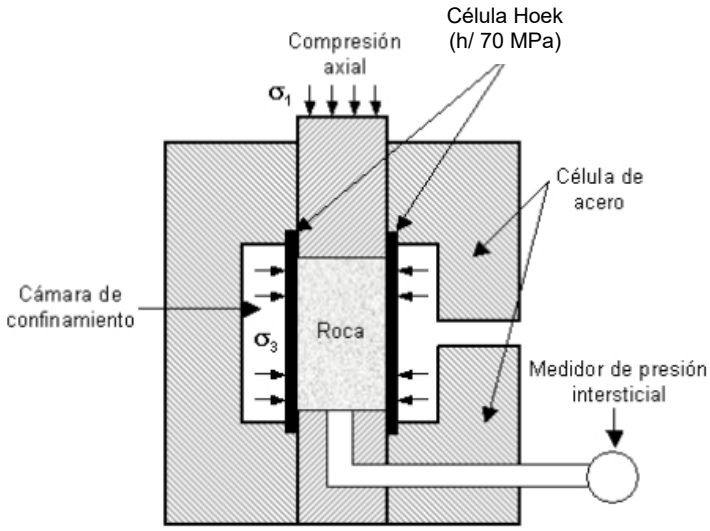
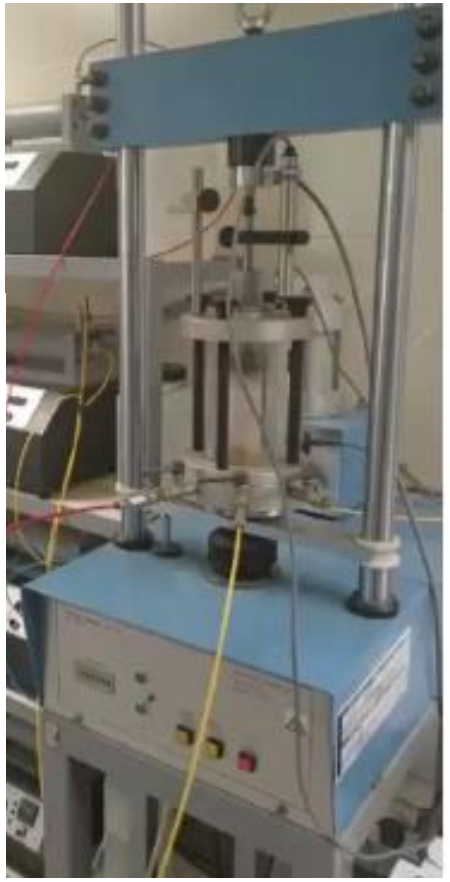


Figura 2.8. Esquema del ensayo de compresión triaxial



Componentes del MR

Propiedades fundamentales de las rocas

III) Ensayos de resistencia y deformación:

- **Ensayo de compresión triaxial**

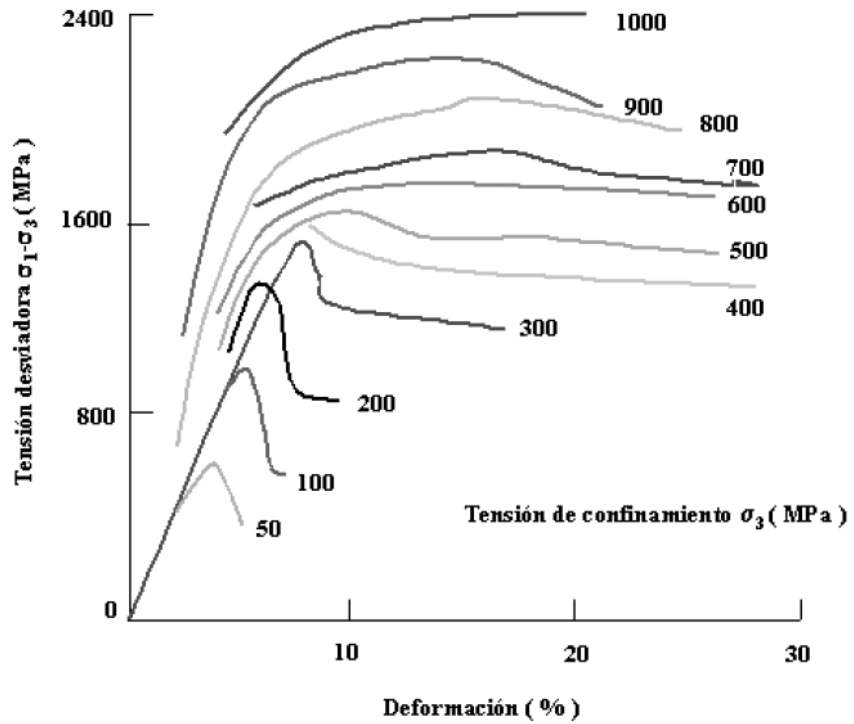


Figura 2.22. Comportamiento de las rocas en función de la presión de confinamiento (Hadizadeh y Rutter, 1983).

- Rocas duras: la resistencia de pico varía según P confinante (σ_3)
- A mayor σ_3 mayor resistencia de pico
- A mayor σ_3 más dúctil
- Transición frágil-dúctil ~ $\sigma_1 > 3{,}5\ \sigma_3$

Componentes del MR

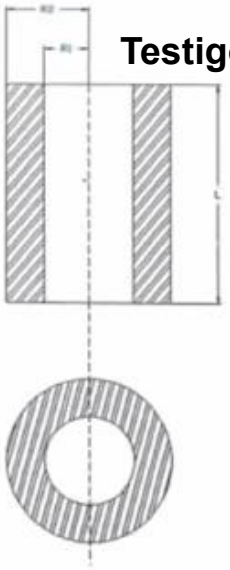
.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

IV) Ensayos de permeabilidad:

- **Ensayo de laboratorio (testigos) e "in situ" (Lugeon)**

Testigo perforado



$$K = \frac{q}{2\pi\, L\, \Delta h}\, \ln\frac{R_2}{R_1}$$

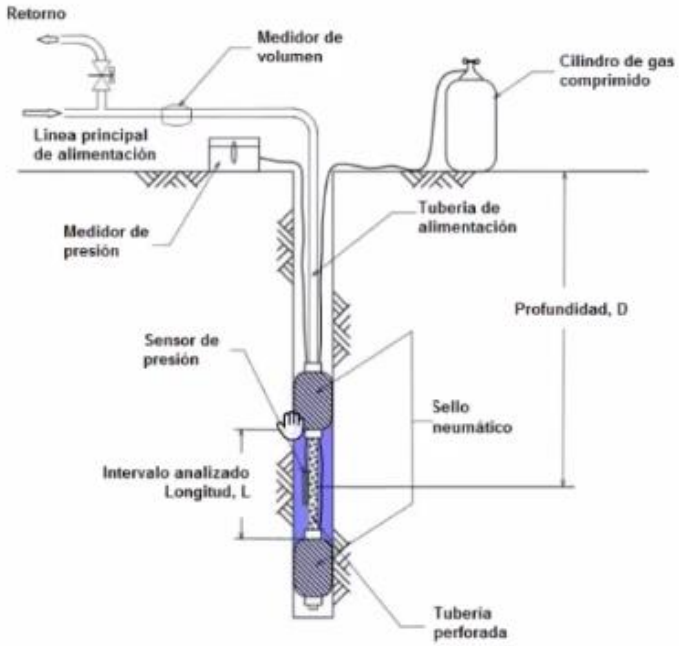
q es el caudal de agua introducido
Δh es la pérdida de carga total.

TABLA XIII

VALORES MEDIOS DE LA PERMEABILIDAD DE ALGUNAS ROCAS COMUNES (GOODMAN, 1989)

ROCA	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (cm/sg)	
	LABORATORIO	CAMPO
Arenisca	3.10^{-3} a 8.10^{-8}	1.10^{-3} a 3.10^{-4}
Grauvaca	3.10^{-8}	
Pizarra	10^{-8} a 5.10^{-13}	10^{-8} a 10^{-11}
Caliza y Dolomía	10^{-5} a 10^{-13}	10^{-3} a 10^{-7}
Basalto	10^{-12}	10^{-2} a 10^{-7}
Granito	10^{-7} a 10^{-11}	10^{-4} a 10^{-5}
Esquisto	10^{-8}	2.10^{-7}
Esquisto fisurado	10^{-4} a 3.10^{-4}	

Permeabilidad en célula triaxial:
Se somete la probeta a diferentes presiones de confinamiento → cierre de fisuras → baja la conductividad hidráulica.



Ensayo Lugeon "in situ"

wikipedia

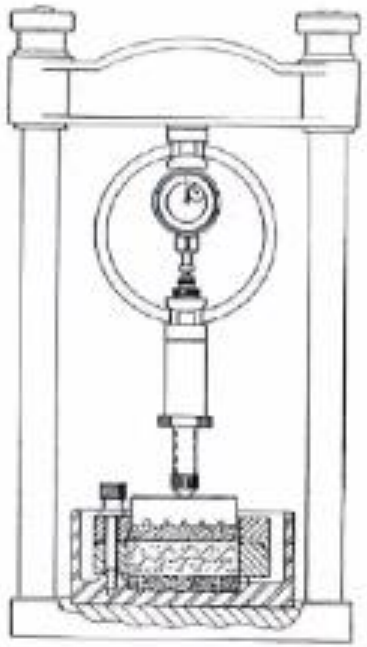
Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

V) Ensayos de alterabilidad:

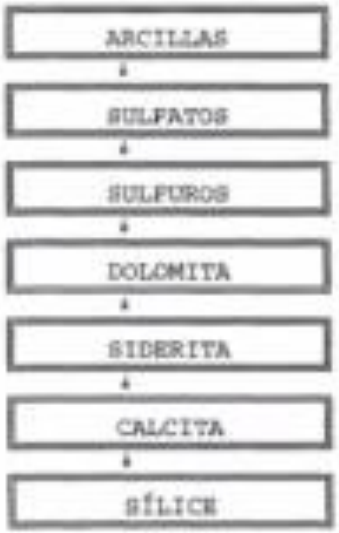
- **Ensayo de hinchamiento (Aparato de Lambe – Edómetro)**



Cambio potencial del volumen	Grado de expansión
>6	Muy crítico
4 – 6	Crítico
2 – 4	Marginal
<2	No Crítico

TABLA XIV

ESCALA DE ESTABILIDAD DE MINERALES FRENTE A CAMBIOS DE VOLUMEN (DAPENA, 1994)



Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Propiedades fundamentales de las rocas

V) Ensayos de alterabilidad:

- **Ensayo de desgaste "Los Angeles"**

  Se debe triturar la roca a tamaño agregado grueso (4,75 – 75 mm)

  La muestra sufre desgaste y fragmentación en un tambor giratorio junto con esferas abrasivas

- Máquina de los Ángeles

- Carga abrasiva (esferas)

Tipo de Roca	Coeficiente de desgaste
Granito	20 – 30 %
Basalto	10 – 20 %
Caliza	25 – 35 %
Arenisca	30 – 40 %
Dolomía	20 – 35 %
Pizarra	35 – 50 %
Gneis	25 – 35 %
Cuarcita	10 – 20 %
Ofita	15 – 25 %

Propiedades fundamentales de las rocas

V) Ensayos de alterabilidad:

- **Ensayos de durabilidad por:**
  - Humedad-Secado
  - Calentamiento-Enfriamiento
  - Congelamiento-Deshielo
  - Cristalización de sales
  - Ataque de sulfatos

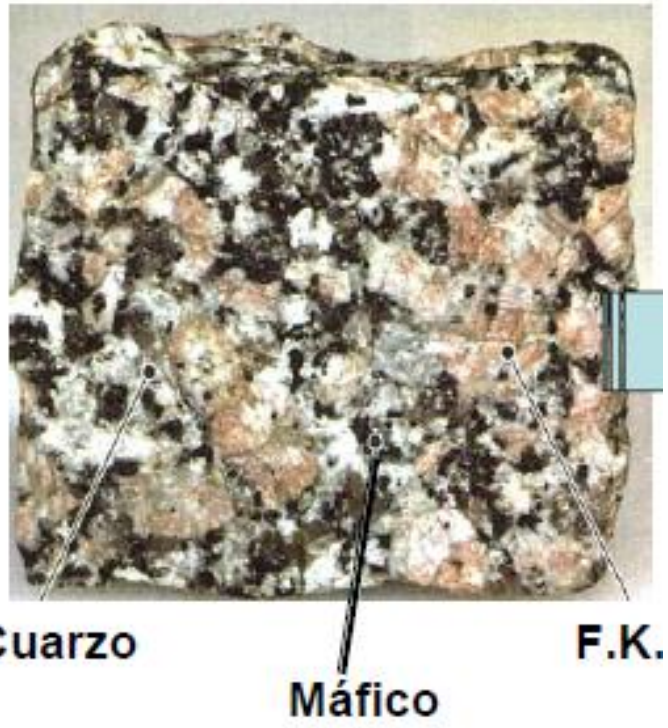
Ej. Ciclo de congelamiento y deshielo

Índice

- Componentes del Macizo Rocoso
  - Propiedades fundamentales de las rocas
  - Matriz rocosa
  - Discontinuidades
- Estudios geológicos del Macizo Rocoso
- Clasificación geomecánica del Macizo Rocoso

Componentes del MR

Matriz rocosa - *Rock Material o Intact Rock* (ISRM, 1981):
Es el **material rocoso (roca intacta) entre discontinuidades**, considerado como un bloque o material continuo, homogéneo e isótropo a escala de laboratorio.



- Representa el **"material base" del macizo rocoso**, cuyas propiedades son modificadas por las discontinuidades.
- Sus **características físicas y mineralógicas** se determinan con ensayos de laboratorio.

Componentes del MR

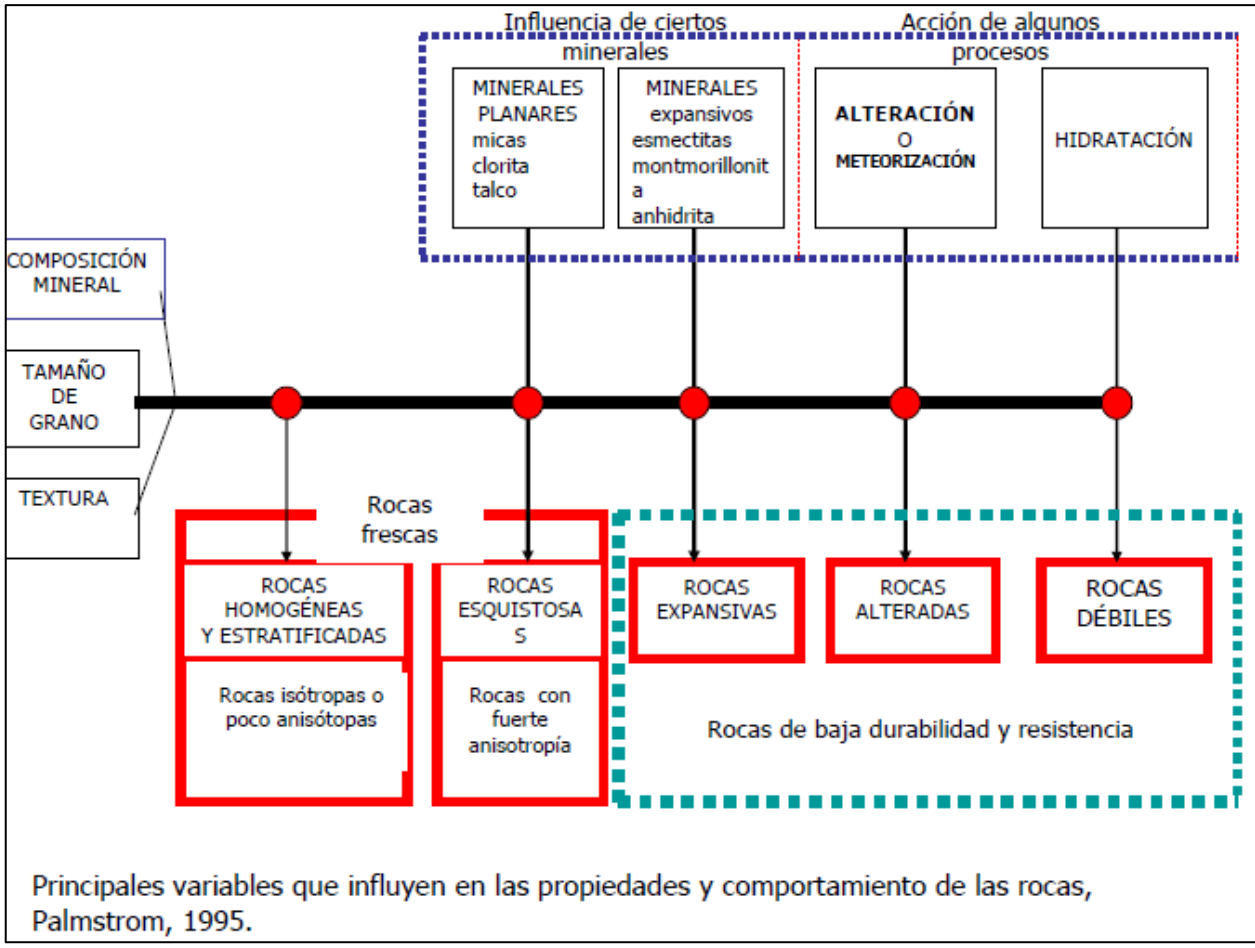
Matriz rocosa - *Rock Material o Intact Rock* (ISRM, 1981):

"Rocas duras":

- Minerales duros y abrasivos
- Problema: Abrasividad – Difícil excavación

"Rocas débiles":

- Minerales de resistencia media a baja - Alterables
- Problema: Falla en taludes – Deformabilidad en túneles – Alteración con el tiempo



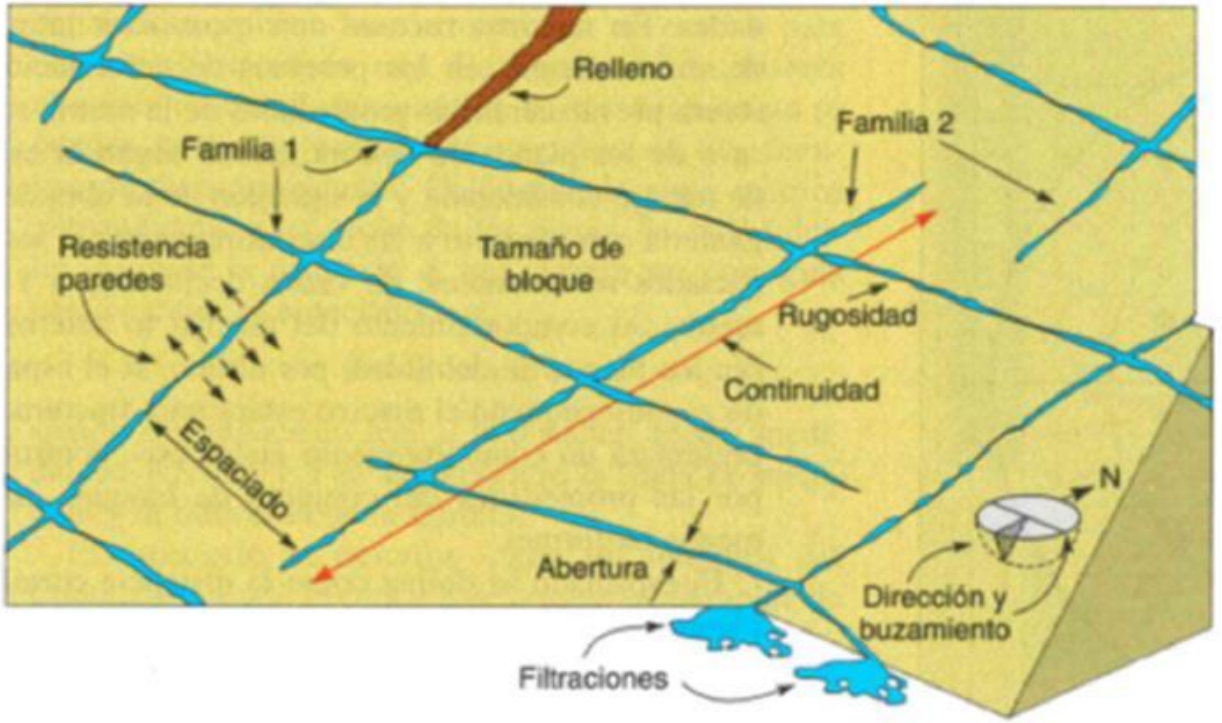
Principales variables que influyen en las propiedades y comportamiento de las rocas, Palmstrom, 1995.

Índice

- Componentes del Macizo Rocoso
  - Propiedades fundamentales de las rocas
  - Matriz rocosa
  - Discontinuidades
- Estudios geológicos del Macizo Rocoso
- Clasificación geomecánica del Macizo Rocoso

Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)
Cualquier plano o zona de debilidad mecánica dentro del macizo rocoso que **separa bloques de roca** y reduce su continuidad estructural.



Componentes del MR

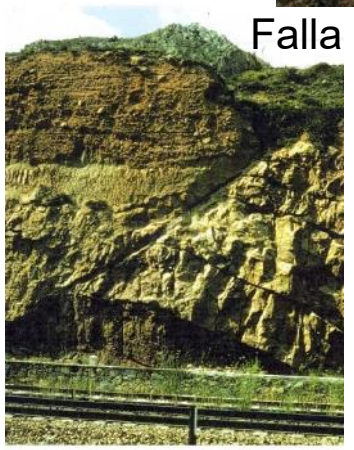
Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)
Cualquier plano o zona de debilidad mecánica dentro del macizo rocoso que **separa bloques de roca** y reduce su continuidad estructural.

Diaclasas

Tipos de discontinuidades:

- Sistemáticas:
  - Diaclasas (o juntas)
  - Planos de estratificación (= rocas sed)
  - Planos de esquistosidad (= rocas MM)

- Singulares:
  - Fallas
  - Diques
  - Ejes de pliegues


Falla

Estratificación

Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Escala de discontinuidades:

EXTENSIÓN	NATURALEZA DE LA DISCONTINUIDAD	OBSERVACIONES
0,1 A º	ionización, estados excitados	Microfisuras de orientación desordenada. campo de estudio de la cristalografía y petrografía (muestras en laboratorio)
10 A º	lagunas, átomos intersticiales	
0,1 micrones	dislocamiento de la red cristalina	
10 micrones	contacto entre granos, clivaje	
1 mm	foliación	
10 cm	esquistosidad (espesor mm) estratificación (espesor cm)	Macrofacturas: con orientación definida. escala de obras de ingeniería. métodos de estudio geología estructural y mecánica de rocas Según Talobre (1957)
10 m	diaclasas (espaciamiento dm)	
1 km	Fallas, pliegues	

Falla

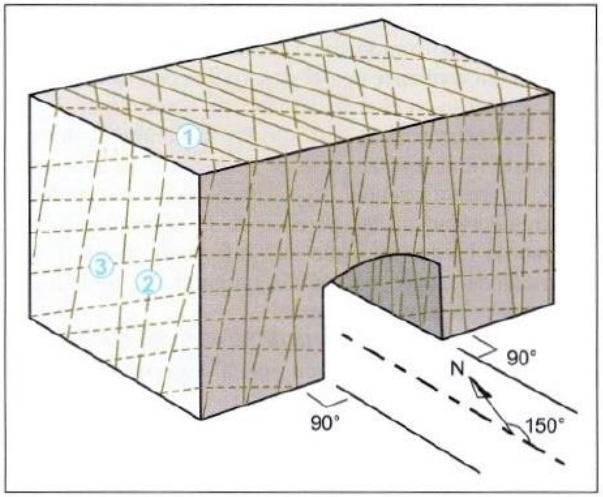
Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978):

Características de las discontinuidades:

1) Número de familias: cantidad de juegos de discontinuidades según patrones similares (tipo, dirección, inclinación, etc)

TIPO DE MACIZO ROCOSO	Nº DE FAMILIAS	DESCRIPCIÓN
Masivo o intacto	0 a 1 familia	Rocas **casi sin fracturas**. El macizo se comporta como un bloque continuo; solo pueden aparecer diaclasas aisladas o planos de estratificación sin intersección.
Poco fracturado	2 familias	Existen **dos sistemas principales** de discontinuidades, generalmente subparalelos o con intersección limitada. Se forman **bloques tabulares o prismáticos grandes**.
Moderadamente fracturado	3 familias	**Tres sistemas de discontinuidades bien desarrollados**; los bloques son **de tamaño medio y de forma poliédrica**. La permeabilidad y deformabilidad aumentan.
Muy fracturado	4 familias	**Cuatro sistemas principales** de discontinuidades intersecándose entre sí. Los **bloques son pequeños e irregulares**. El macizo presenta una marcada reducción de resistencia.
Desintegrado o triturado	>4 familias o zonas cataclásticas	El macizo está **completamente fracturado**; los bloques son pequeños o el material se presenta como **brecha**. Se comporta más como un **suelo de textura gruesa (o regolito)** que como una roca.

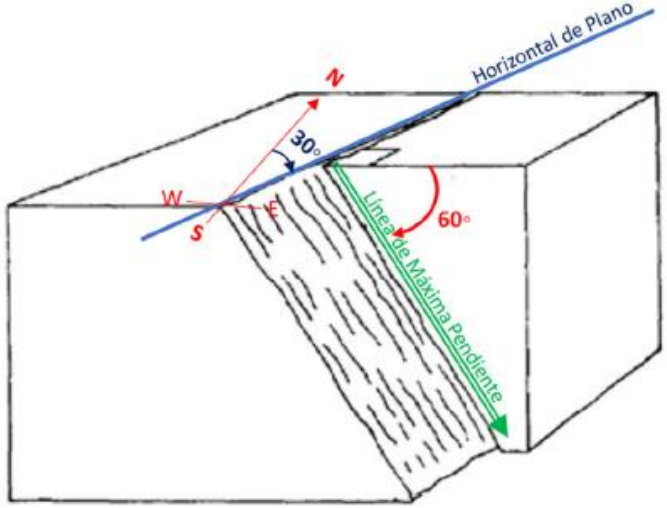


Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

2) Orientación: de cada tipo o familia/grupo → varias mediciones

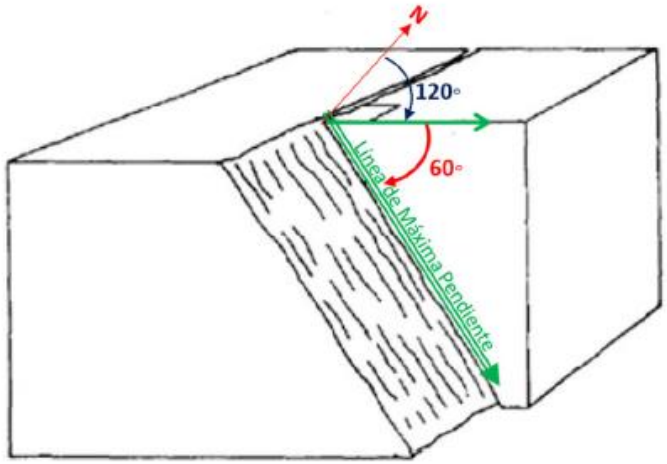


Dirección o rumbo: N30°E

Cantidad de buzamiento: 60°

Sentido de buzamiento: SE

Notación: **N30°E/60°SE**



Dirección de buzamiento 120°

Cantidad de buzamiento: 60°

Notación: **120°/60°**

Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

2) Orientación: de cada tipo o familia/grupo → varias mediciones

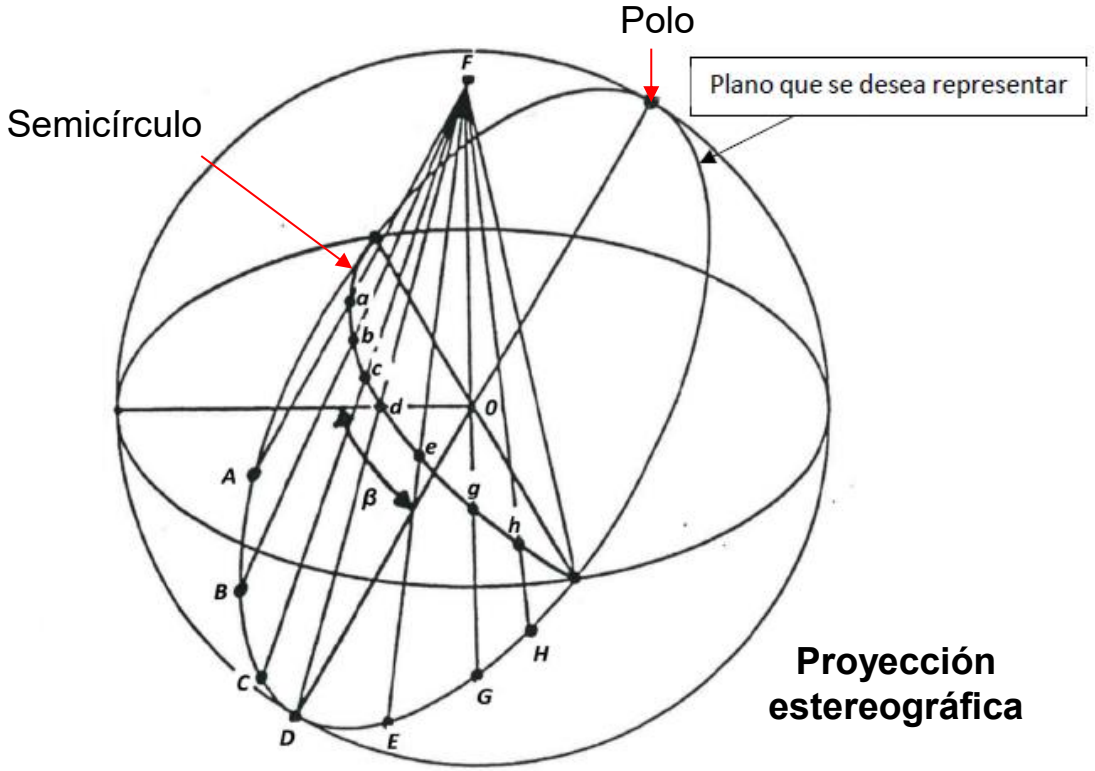


Figura 13. Representación de un plano en proyección estereográfica (vista 3D).

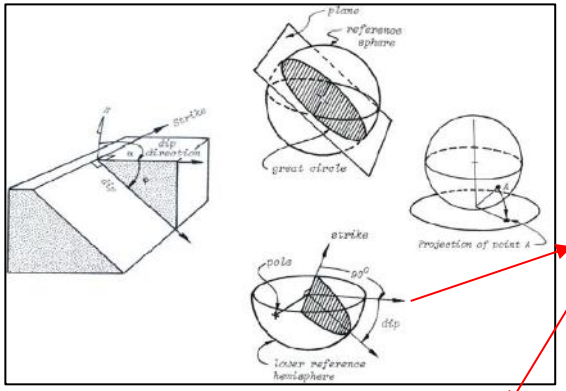
Componentes del MR

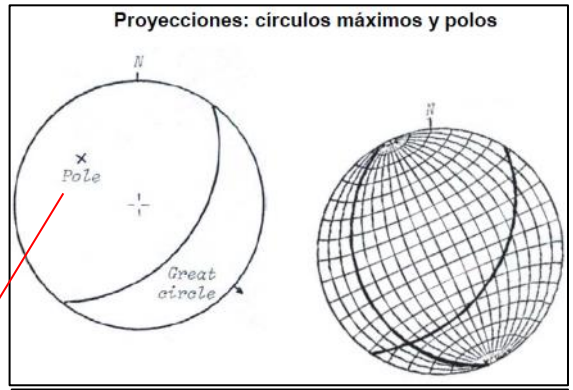
Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

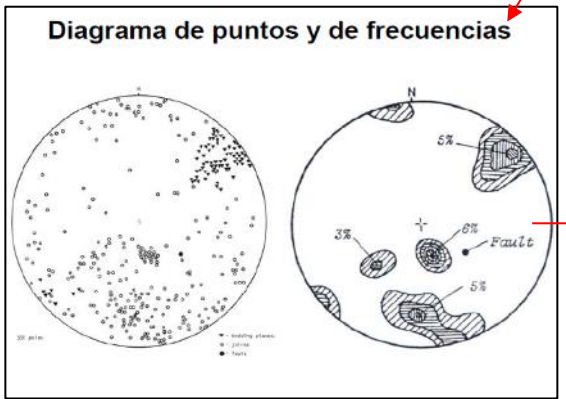
Características de las discontinuidades:

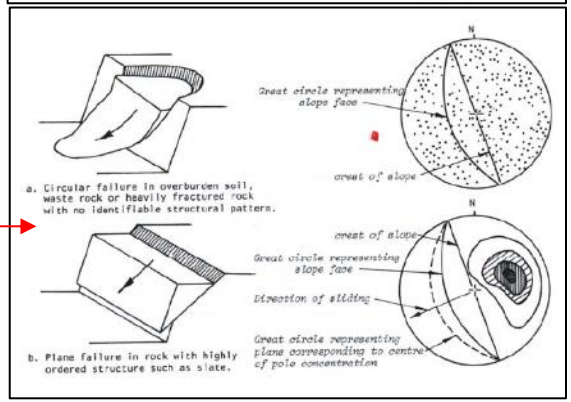
2) Orientación: de cada tipo o familia/grupo → varias mediciones

Proyección estereográfica (polos y planos semicirculares)

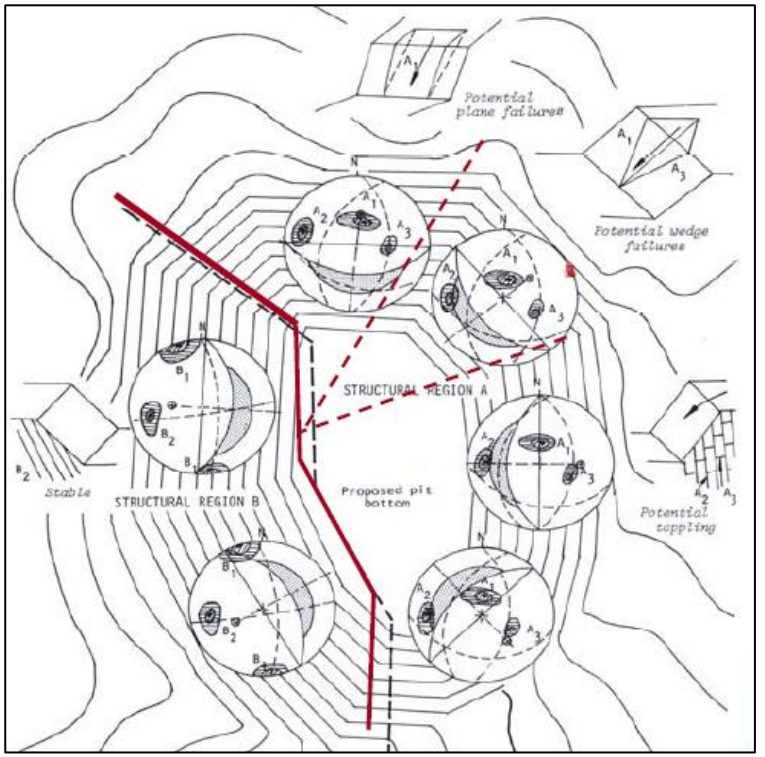








Análisis geológico estructural (ejemplo Open Pit)

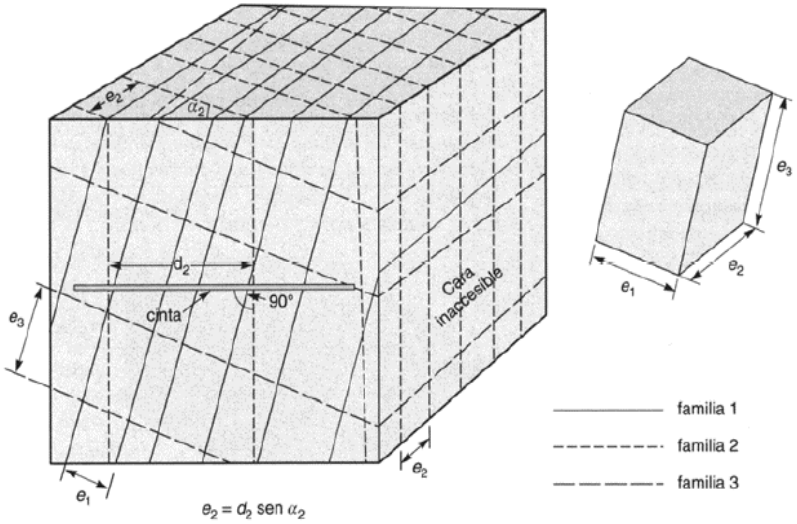


Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

3) Espaciado: distancia perpendicular medida entre dos planos de discontinuidad de una misma familia → define el tamaño medio de bloques



Medida del espaciamiento en una cara expuesta (ISRM)

descripción	espaciado
extremadamente junto	<20mm
muy junto	20-60mm
junto	60-200mm
moderadamente junto	200-600mm
separado	600-2000mm
muy separado	2000-6000mm
extremadamente separado	>6000mm

descripción del espaciado según el ISRM, 1981

Si la medición no es normal al rumbo: $e = d \cdot \text{sen } \alpha$

e = espaciado real

d = distancia medida con la cinta

α = ángulo entre la línea de medición y la dirección de la familia

→ También **R.Q.D.** = manera indirecta

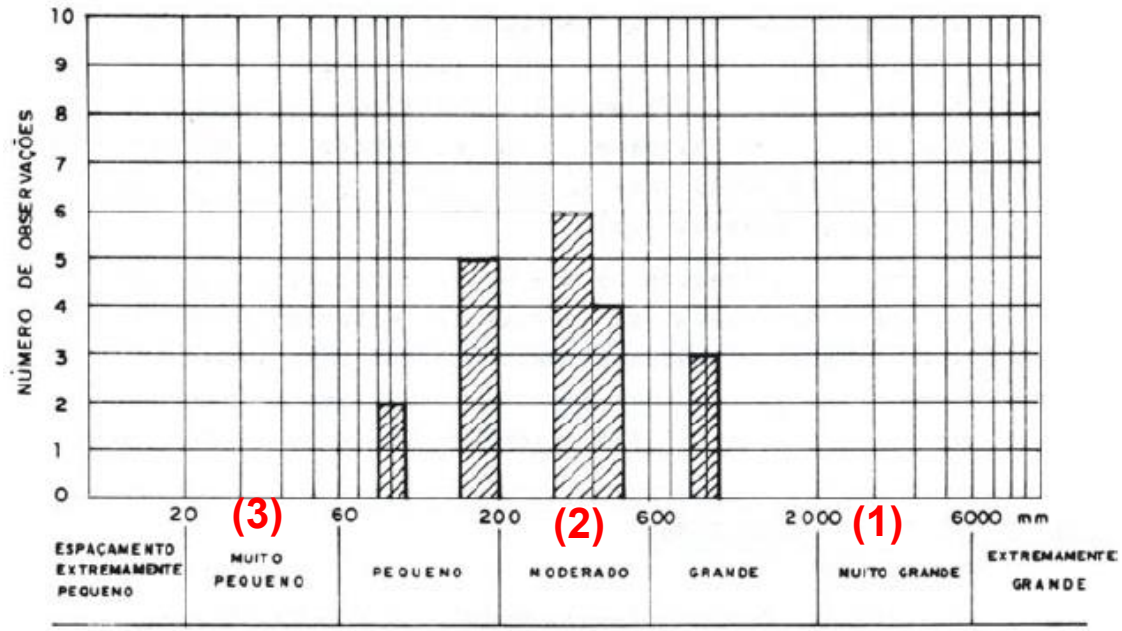
Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

3) Espaciado: distancia perpendicular medida entre dos planos de discontinuidad de una misma familia → define el tamaño medio de bloques

Histograma de espaciamiento



→ **Comportamiento del macizo**

1) Espaciados grandes: gobierna la matriz rocosa (deformabilidad y rotura)

2) Espaciados moderados: dependerá de las características de las discontinuidades

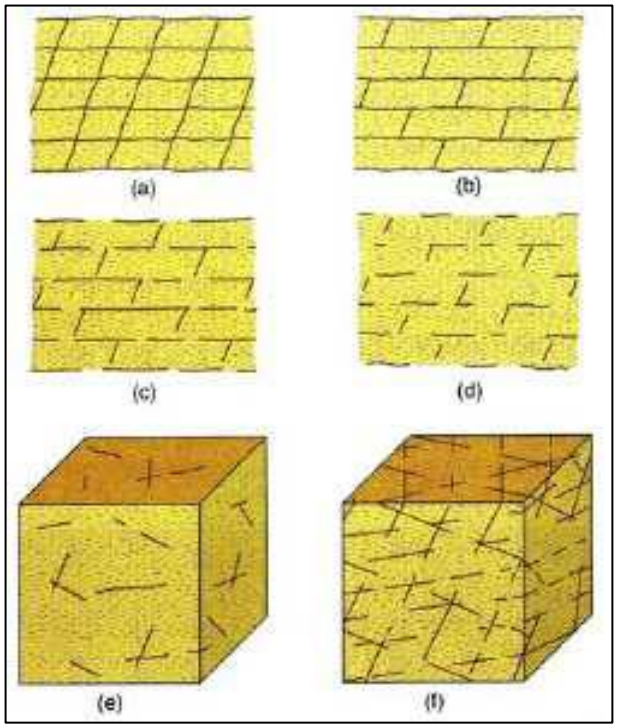
3) Espaciados muy juntos: gobernado por el conjunto de los bloques (comportamiento isótropo)

Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

4) Persistencia: longitud superficial de la continuidad del plano, medida según la dirección e inclinación de la discontinuidad → define en parte la resistencia de rotura del macizo



Difícil de cuantificar…

Es importante destacar la cantidad de discontinuidades que terminan en roca y la cantidad que lo hacen terminando en otras discontinuidades.

continuidad	longitud
muy baja	< 1m
baja	1-3m
media	3-10m
alta	10-20m
muy alta	>20m

descripción de la continuidad según ISRM, 1981

Componentes del MR

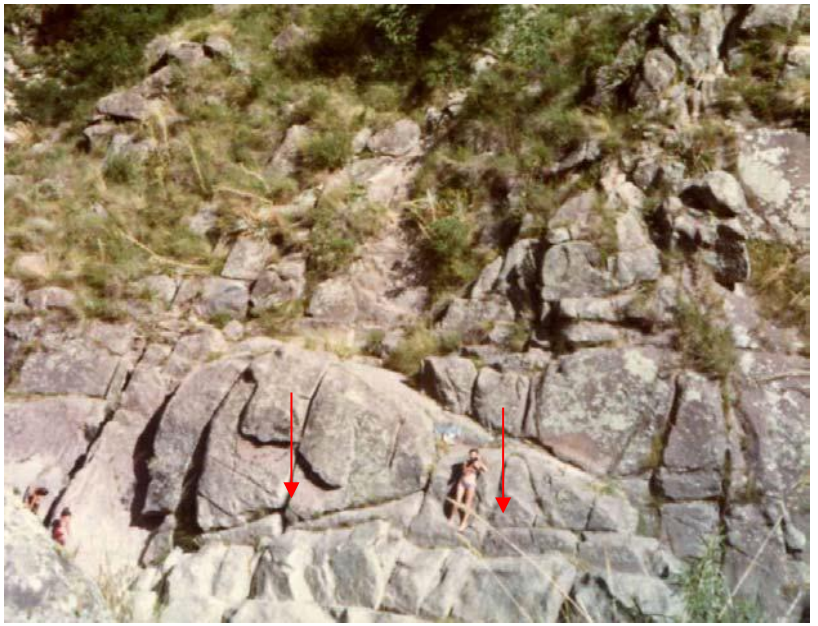
Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

4) Persistencia: longitud superficial de la continuidad del plano, medida según la dirección e inclinación de la discontinuidad → define en parte la resistencia (rotura) del macizo

Diaclasa que termina en macizo rocoso

Diaclasas que se interceptan



Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

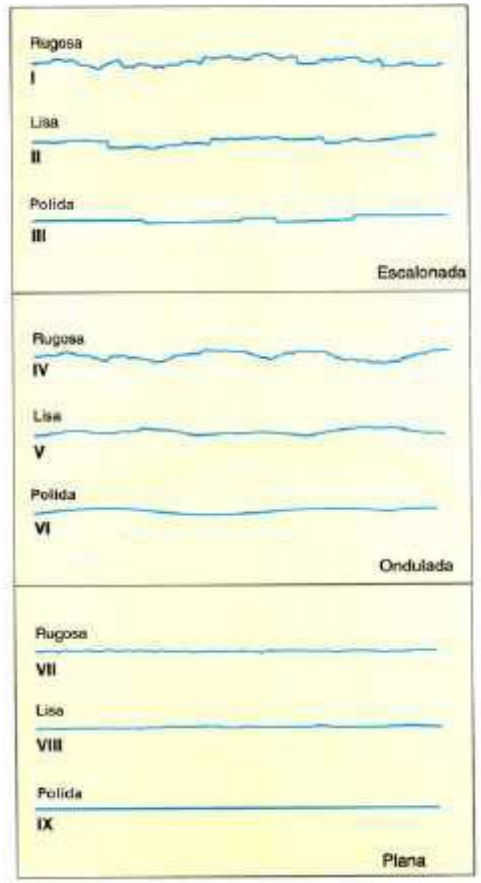
5) Rugosidad: determina la dificultad del movimiento entre bloques (rozamiento) → define en parte la resistencia al corte del macizo (más si no hay relleno)

Involucra 2 términos:

- **Ondulación (o discontinuidades de 1er orden)**: Observaciones a escala métrica. En la práctica estas condicionan la dirección de un dislocamiento.

- **Rugosidad *sensu stricto* (o anfractuosidad, o discontinuidades de 2º orden):** A escala milimétrica o centimétrica. Estas condicionan la resistencia al corte propiamente dicho.

Rugosidad (ISRM): método de campo y sencillo

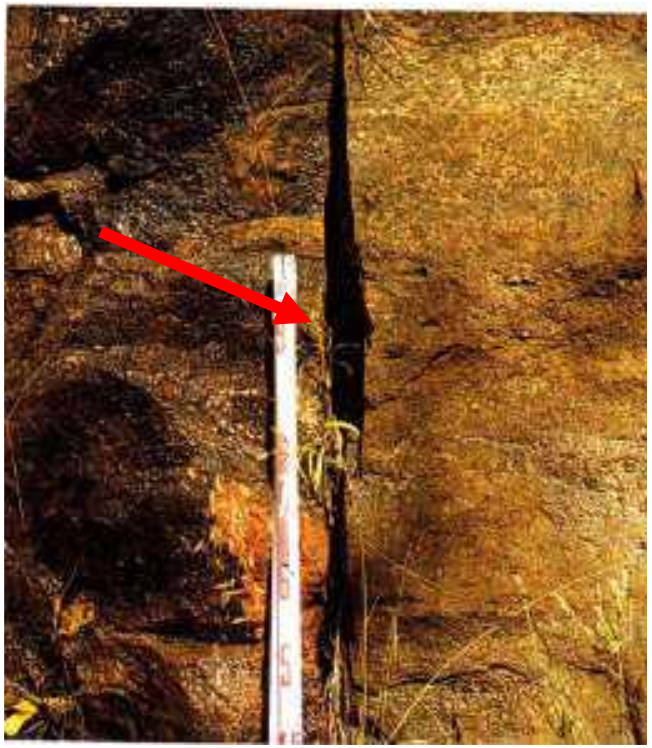


Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

6) Abertura: espacio o distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad → varía en longitud y tanto en la superficie como en profundidad



Abertura	Descripción
<0,1mm	muy cerrada
0,1-0,25mm	cerrada
0,25-0,5mm	parcialmente abierta
0,5-2,5mm	abierta
2,5-10mm	moderadamente ancha
>10mm	ancha
1-10cm	muy ancha
10-100cm	extremadamente ancha
>1m	cavernosa

Descripción de la abertura según el ISRM (1981)

Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

7) Relleno: material presente en las aberturas, diferente a la matriz rocosa → puede estar o no presente, y su composición, resistencia mecánica y espesor influyen en el comportamiento del macizo (resistencia al corte, deformabilidad, permeabilidad)

Composiciones más comunes:

- **Sílice**: en forma de cuarzo, u otras variedades de la sílice, a partir de sílice disuelta en el agua que circula por la fractura.
- **Calcita**: carbonato de calcio que a menudo rellena fracturas.
- **Yeso**: especialmente en zonas áridas o con evaporitas.
- **Arcillas**: producto de la alteración mineral de la matriz rocosa
- **Salbanda (matriz arcillosa):** producto del movimiento de la falla.

Componentes del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

8) Filtraciones: circulación del agua en las fracturas → su presencia reduce la resistencia al corte (disminuye las presiones efectivas).

Factores hidrogeológicos:

- Precipitaciones
- Fluctuación del nivel piezométrico
- Dirección de flujo
- Barreras al flujo del agua (como diques, relleno en fracturas rellenas, etc.) = permeabilidad del macizo
- Modificaciones antrópicas: embalses, bombeos-inyección, riegos, etc…

Descripción de las filtraciones en discontinuidades

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua.	Relleno húmedo pero sin agua libre.
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Junta húmeda pero sin agua libre.	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar el caudal en l/min.).
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo.	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión).
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min. y la presión).	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

(ISRM, 1981).

Tomado de González de Vallejo *et al*., 2002

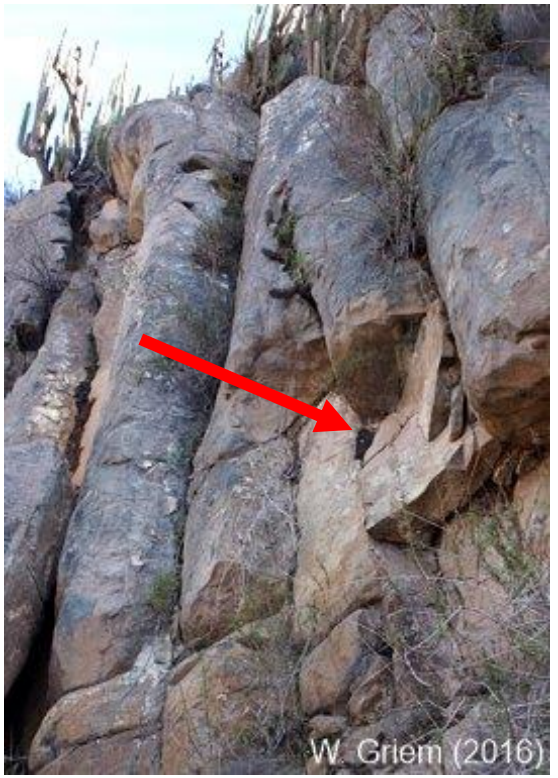
Componentes del MR

Discontinuidades - *Discontinuities* (ISRM, 1978)

Características de las discontinuidades:

9) Resistencia de las paredes: UCS y deformabilidad de la matriz rocosa (roca intacta) → depende del tipo de roca, grado de alteración (pared) y existencia de relleno o no (en abertura)

- Discontinuidades sanas y limpias = misma resistencia que matriz rocosa
- Disminuye con la meteorización/alteración superficial
- Relleno??
  - Relleno duro (sílice) y de poco espesor puede mejorar la resistencia del macizo rocoso.
  - Relleno blando (yeso), plástico (arcillas), de gran espesor y/o alterado, baja la resistencia del macizo.



Índice

- Componentes del Macizo Rocoso
  - Propiedades fundamentales de las rocas
  - Matriz rocosa
  - Discontinuidades
- Estudios geológicos del Macizo Rocoso
- Clasificación geomecánica del Macizo Rocoso

Estudios geológicos del MR

Descripción general del afloramiento y división en zonas

1.- Descripción de las características generales del afloramiento: litología general y edades (Formaciones Geológicas), rasgos estructurales generales (estratificación, fallas, fracturas), presencia de suelos, zonas con agua, etc…

2.- División en zonas y descripción general de cada zona: sectores más o menos homogéneos, a partir de criterios fundamentalmente litológicos y estructurales, extensión de las zonas y objetivo y detalle del trabajo.

3.- Descripción detallada de cada zona: características y propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y de las discontinuidades (datos y ensayos de campo y de laboratorio)

4.- Descripción de los parámetros y clasificación geomecánica del Macizo Rocoso: fase final del proceso descriptivo y de las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo → clasificaciones geomecánicas que proporcionan información sobre la calidad y resistencia del macizo

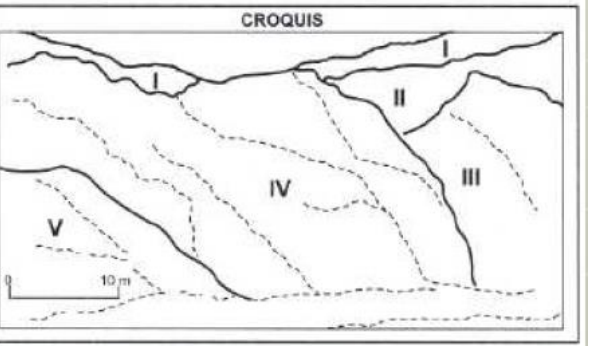
Estudios geológicos del MR

Descripción general del afloramiento y división en zonas

ESTACIÓN GEOMECÁNICA							
	Universidad de Burgos. EPS Área de Ingeniería del Terreno C/ Villadiego s/n 09001 Burgos						
EST	PROYECTO LOCALIZACIÓN FOTOS			REALIZADO POR: FECHA:			
LITOLOGÍA	NATURALEZA				POTENCIA	FORMACIÓN Y EDAD	
FORMACIONES SUPERFICIALES	NATURALEZA Y TEXTURA			MORFOLOGÍA			ESPESOR
ESTRUCTURA	PLIEGUES		FALLAS			OTROS	
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m3	Muy grandes < 1	Grandes 1 a 3	Medios 3 a 10	Pequeños 10 a 30	Muy pequeños > 30	Muy brechificada > 60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremad. Blanda Uña 0	Muy Blanda Navaja 1	Blanda Punta martillo 2	Media 1 Golpe martillo 3	Dura >1 Golpe martillo 4	Muy Dura Varios golpes 5	Extremad. Dura Sólo raya con martillo 6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizada	IV Muy meteorizada	V Completamente meteorizada	VI Suelo residual	
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (con señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo	CAUDAL ESTIMADO	
RESISTENCIA "R" ESCLERÓMETRO				OBSERVACIONES			
CROQUIS:						ESCALA	

FOTO

CROQUIS



Estudios geológicos del MR

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

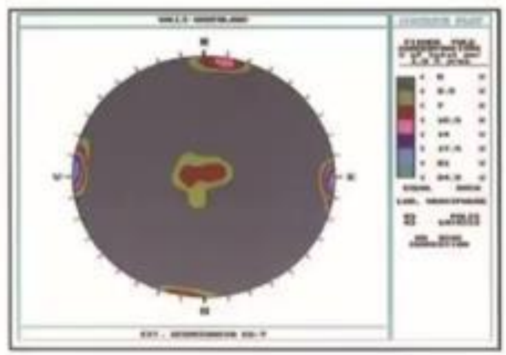
Descripción general del afloramiento y división en zonas

HOJA DE DATOS DE AFLORAMIENTOS

PROYECTO	AUTOVÍA VALLS - MONTBLANC	ESTACIÓN Nº	EG-7	HOJA 1 DE 3
LITOLOGÍA	CALIZAS ALGO RECRISTALIZADAS DEL EOCENO	OBSERVADOR FECHA	P. SANZ	23-01-06
ESTRUCTURA	ESTRATIFICADA. BUZAMIENTO SUBHORIZONTAL ONDULADO	REVISOR FECHA		
TEXTURA, COLOR	MICRÍTICA. GRIS CLARO	COORDENADAS	X: Y:	

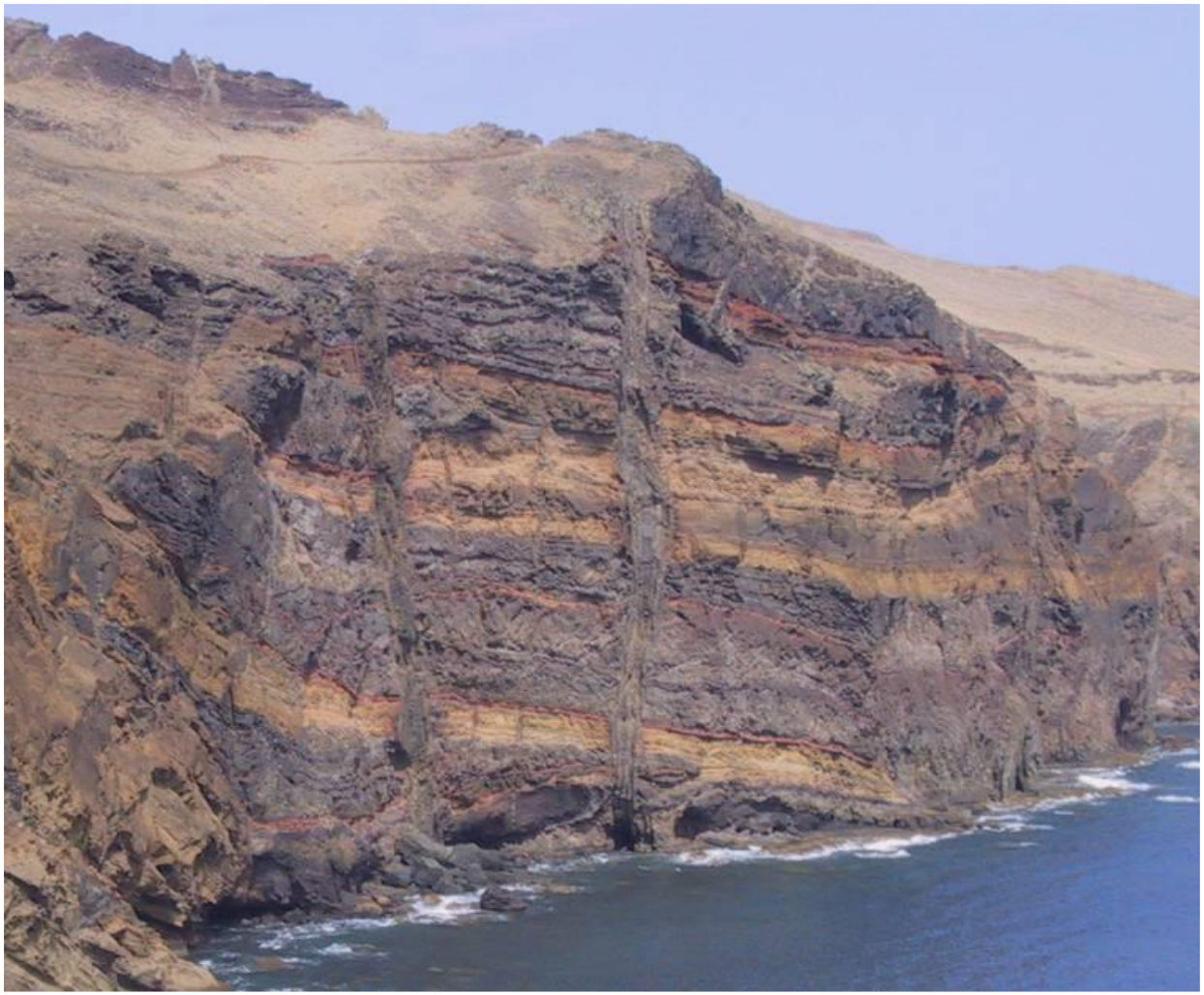
METEORIZACIÓN	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	RESISTENCIA	A	B	C	D	E	F	ESPESOR DE ESTRATOS	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5

TIPO		S_0	S_0	S_0	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J
DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO		220	135	102	270	195	278	320	95	185	40	272	270	358	190
BUZAMIENTO		88	45	85	86	87	88	68	86	88	53	88	86	88	89
CONTINUIDAD D (m)	< 0,6										X		X		
	0,6 - 2		X	X	X		X	X	X			X			X
	2 - 6	X				X								X	
	6 - 20														
	> 20														
ESPACIADO O (m)	< 0,06														
	0,06 - 0,2														
	0,2 - 0,6														
	0,6 - 2	X		X	X	X	X		X			X	X		
	> 2														
ABERTURA (mm)	0														
	0 - 2		X		X		X						X		
	2 - 6			X				X	X						
	6 - 20											X			
	20 - 60														
	>60														
JRC		8-10	14	12	10-12	12-14	10	14	10	12	10	8	8	8-10	8-10
RELLENO Y ESTADO DE LAS PAREDES															
AGUA	SECO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	HÚMEDO														
	SURGENCIA														



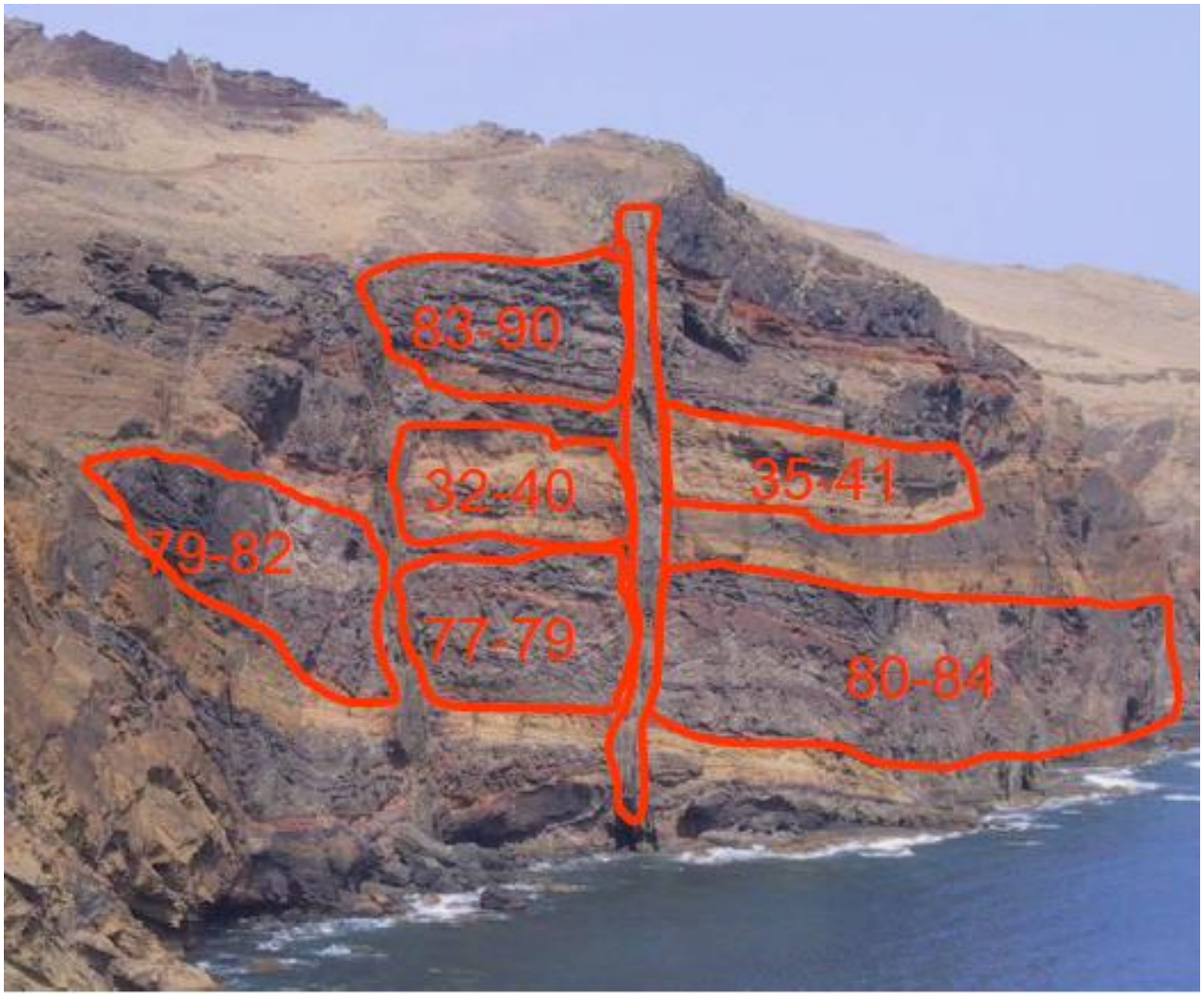
Estudios geológicos del MR

Descripción general del afloramiento y división en zonas



Estudios geológicos del MR

Descripción general del afloramiento y división en zonas



Clasificación RMR

Índice

- Componentes del Macizo Rocoso
  - Propiedades fundamentales de las rocas
  - Matriz rocosa
  - Discontinuidades
- Estudios geológicos del Macizo Rocoso
- Clasificación geomecánica del Macizo Rocoso

Clasificación geomecánica

Métodos más conocidos y utilizados:

- Clasificación de Terzaghi (1946)
- Rock Quality Designation (RQD), de Deere *et al.* (1967)
- Rock Mass Rating (RMR), de Bieniawski (1973, 1979, 1984, 1989)
- Tunnelling Quality Index (Q), de Barton *et al.* (1974)
- Geological Strength Index (GSI), de Hoek & Brown (1980)

Clasificación geomecánica

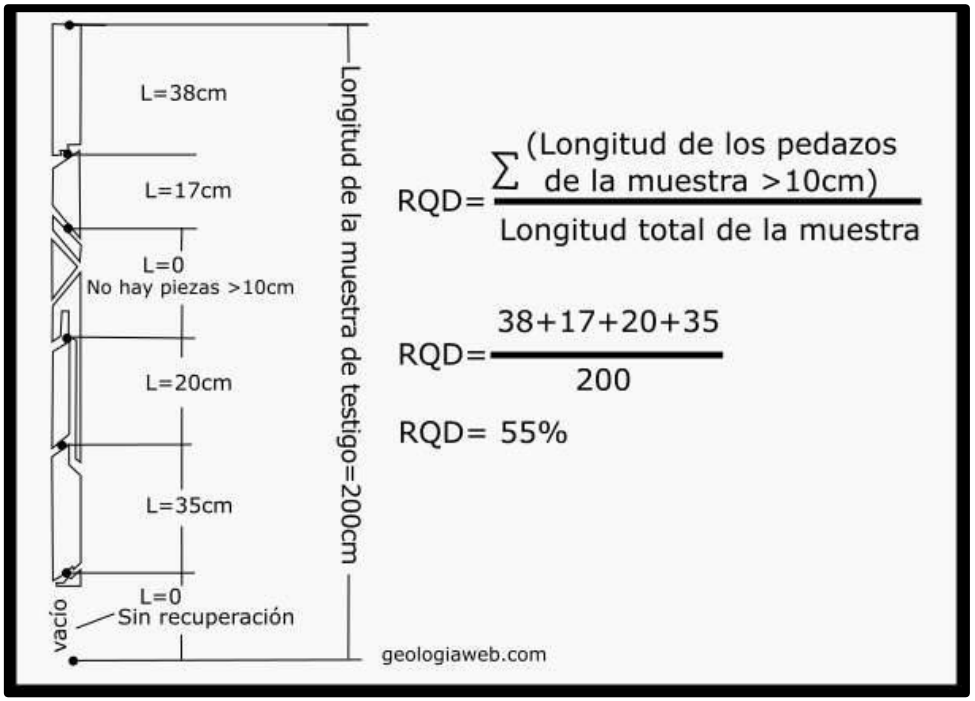
Clasificación de Terzaghi (1946)

- **Roca intacta / inalterada**: Sin fisuras, no se rompe en planos preferenciales. Rotura violenta de pedazos de roca (rock burst).
- **Roca estratificada**: capas sin resistencia a la separación, más debilitada si hubiere fracturas transversales. Desprendimientos comunes.
- **Roca medianamente fisurada**: Con fisuras pero soldadas. Paredes verticales sin necesidad de refuerzo. Posible rock burst.
- **Roca en bloques poco alterada**. Bloques separados entre sí. Necesidad de sostenimiento lateral.
- **Roca triturada poco alterada**. Asimilable a un suelo (ing). Debajo del nivel freático, similar a arena saturada.
- **Roca comprimida** sin aumento perceptible de volumen hacia el túnel. Presencia de micas y minerales de arcilla no expansivas.
- **Roca expansiva** con aumento de volumen hacia el túnel. Presencia de arcillas expansivas como montmorillonita.

Clasificación geomecánica

Rock Quality Designation (RQD) - *Deere et al. (1967)*

- Muy utilizado y de amplia aplicación
- Relativamente simple y rápido
- Permite conocer el interior del macizo
- Permite obtener muestras de roca (testigos) para análisis y ensayos
- Determina el grado de fracturación de la roca, no del macizo → es un parámetro más aplicado a otras clasificaciones…



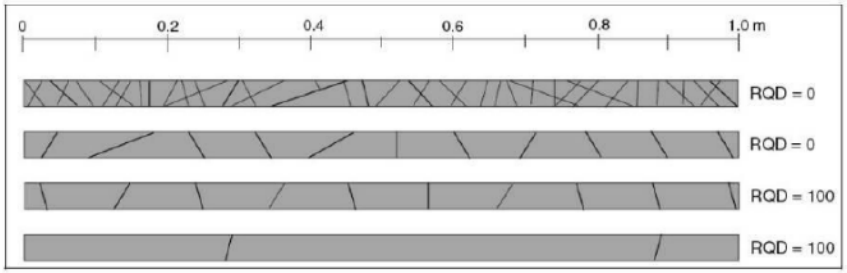
Calidad de la roca	Calificación	RQD (%)
Muy mala (roca completamente meteorizada)	I	<25%
Mala (roca meteorizada)	II	25 a 50%
Media (Roca levemente meteorizada)	III	51 a 75%
Buena (Roca dura)	IV	76 a 90%
Muy buena (Roca fresca o intacta)	V	91 a 100%

Clasificación geomecánica

Rock Quality Designation (RQD) - *Deere et al. (1967)*

- Solo para frecuencias de diaclasas. Omite características como orientación o relleno.
- Poco preciso pero bueno para comenzar
- Se suele aplicar también sobre la pared rocosa (talud) o en afloramientos, aunque no es recomendable.

Su interpretación puede ser arbitraria, depende de la orientación de perforación y representa poco rango de valores:



Ejemplos de máximo y mínimo RQD en diferentes densidades de fracturación (Palmström, 2001)

Cajas de testigos

Carreras 0m a 5m

Caja Nº2:
Carreras 5 a 8.30m

Caja Nº3:
Carreras 8.30 a 12.80m

Clasificación geomecánica

Rock Mass Rating (RMR) - *Bieniawski (1989)*

Índice de calidad **RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B**

Los primeros 5 parámetros permiten **definir zonas homogéneas** con precisión (zonas de comportamiento similar) y su extensión. Cada uno tiene un "valor ponderal" (peso)

A1 = Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta (0 a 15);
A2 = R.Q.D. (3 a 20);
A3 = Espaciamiento de las discontinuidades (5 a 20);
A4 = Características de las discontinuidades (0 a 30);
A5 = Presencia de agua (0 a 15)

Se suma la **orientación de las discontinuidades** con respecto a la excavación, aportando el componente de estabilidad del macizo:

B = Efecto del rumbo y buzamiento de las discontinuidades (0 a -12)

Clasificación geomecánica

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Clasificación geomecánica RMR

Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)

Parámetros de clasificación

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 %-100 %	75 %-90 %	50 %-75 %	25 %-50 %	< 25 %		
	Puntuación		20	17	13	8	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	< 0,06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Índice de calidad

RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B

Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	−2	−5	−10	−12
	Cimentaciones	0	−2	−7	−15	−25
	Taludes	0	−5	−25	−50	−60

Clasificación

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20

Cuadro 3.26 (Gonzalez de Vallejo *et al*, 2002)

Clasificación geomecánica

Clasificación geomecánica RMR

Índice de calidad **RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B**

Corrección por la orientación de las discontinuidades

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	−2	−5	−10	−12
	Cimentaciones	0	−2	−7	−15	−25
	Taludes	0	−5	−25	−50	−60

DIRECCIÓN PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL				DIRECCIÓN PARALELA AL EJE DEL TÚNEL		BUZAMIENTO 0°-20° CUALQUIER DIRECCIÓN
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento				
Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	Buz. 45° - 90°	Buz. 20° - 45°	
Muy Favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy Desfavorable	Media	Desfavorable

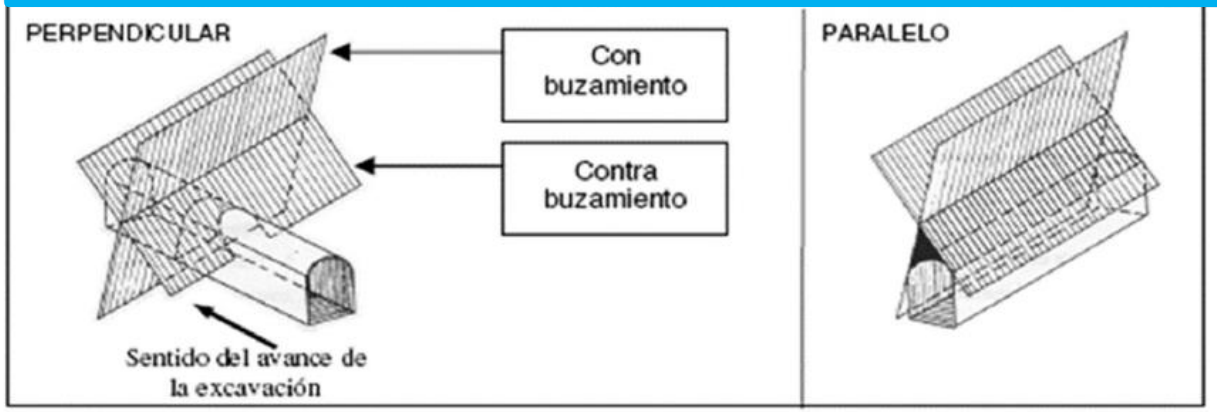


Figura 5.2. Tabla para determinar el valor de la corrección por orientación de las discontinuidades en túneles

Clasificación geomecánica

Clasificación geomecánica RMR

Índice de calidad **RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B**

CLASE	I	II	III	IV	V
CALIDAD	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
VALORACIÓN	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

CLASE	I	II	III	IV	V
TIEMPO DE MANTENIMIENTO Y LONGITUD	10 años con 5 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2,5 m de vano	30 min con 1 m de vano
COHESIÓN (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	15°

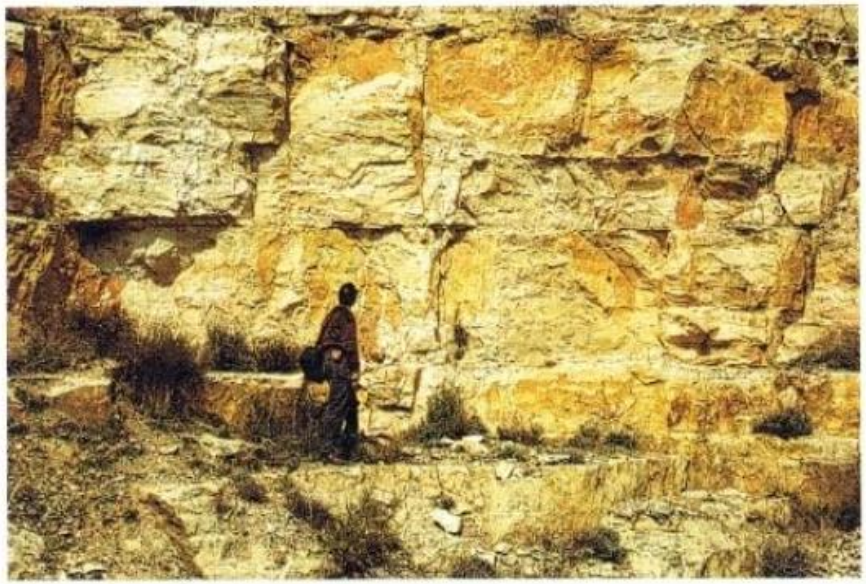
Tiempo de mantenimiento para excavaciones subterráneas – Parámetro de resistencia del macizo rocoso

Clasificación geomecánica

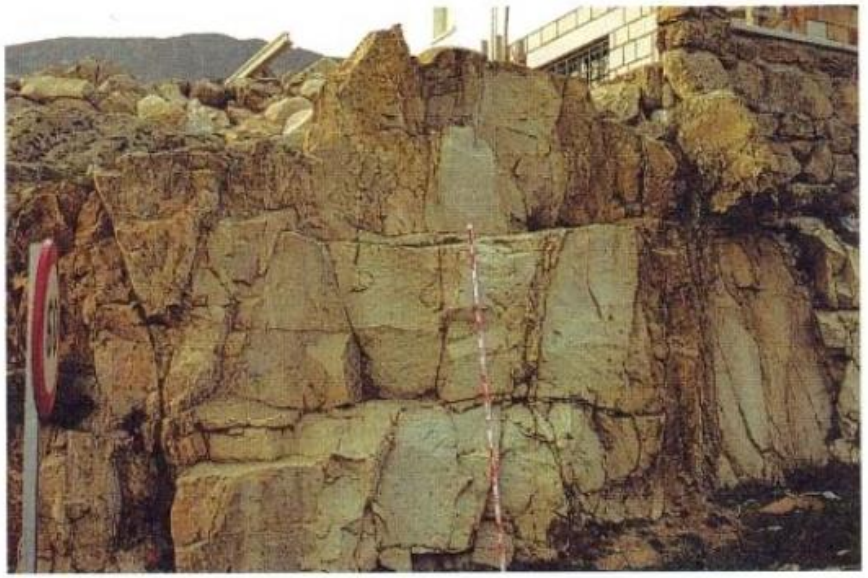
Clasificación geomecánica RMR

Índice de calidad **RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B**

Macizos de Clase I (RMR = 81 – 100) y Clase II (RMR = 61 – 80)



Dolomías cretácicas. Calidad muy buena.
Dos familias de discontinuidades principales.



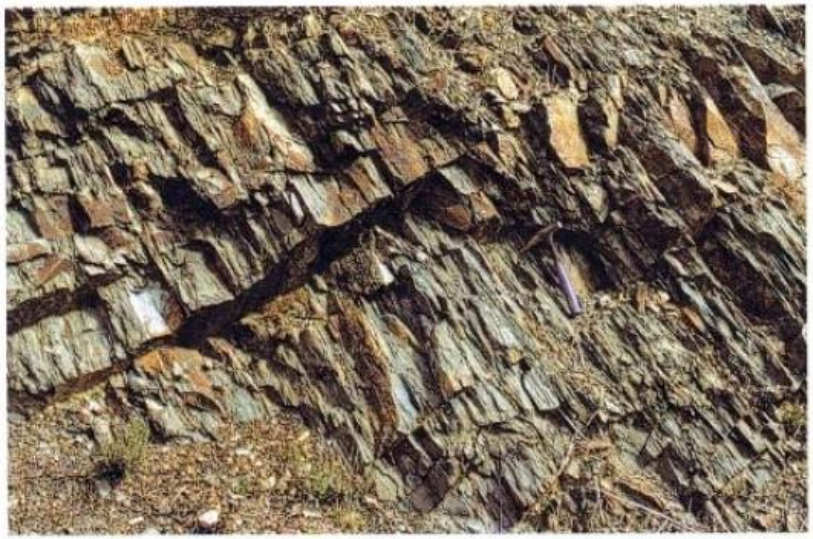
Granito. Calidad buena. Varias familias de discontinuidades alteradas.

Clasificación geomecánica

Clasificación geomecánica RMR

Índice de calidad **RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B**

Macizos de Clase III (RMR = 41 – 60)



Pizarras ordovícicas. Calidad media. Grado de facturación alto. Grado de meorización: III.

Cuarcitas ordovícicas. Calidad media. Grado de fracturación alto. Matriz rocosa muy resistente.

Clasificación geomecánica

Clasificación geomecánica RMR

Índice de calidad **RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B**

Macizos de Clase IV (RMR = 21 – 40) y Clase V (RMR ⩽ 20)

Cuarcitas ordovícicas. Calidad mala. Macizo alterado y brechificado.

Pizarras paleozoicas. Calidad muy mala. Fracturación muy intensa. Grado de meteorización V.

Clasificación geomecánica

Tunnelling Quality Index (Q) - *Barton et al. (1974)*

- Desarrollado por el Instituto Noruego de Geotecnia, con alto número de casos en túneles y más de 50 tipos de rocas → alto grado de fiabilidad
- Método más específico y detallado → Muy bueno, pero más complejo para valorizar parámetros

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

RQD (grado de fracturación)
J_n (cantidad de familias)
J_r (rugosidad de la discontinuidad)
J_a (alteración de la discontinuidad)
J_w (presencia de agua)
SRF (estado tensional del macizo rocoso ↔ confinamiento)

Clasificación geomecánica

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Tunnelling Quality Index (Q) - *Barton et al. (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.

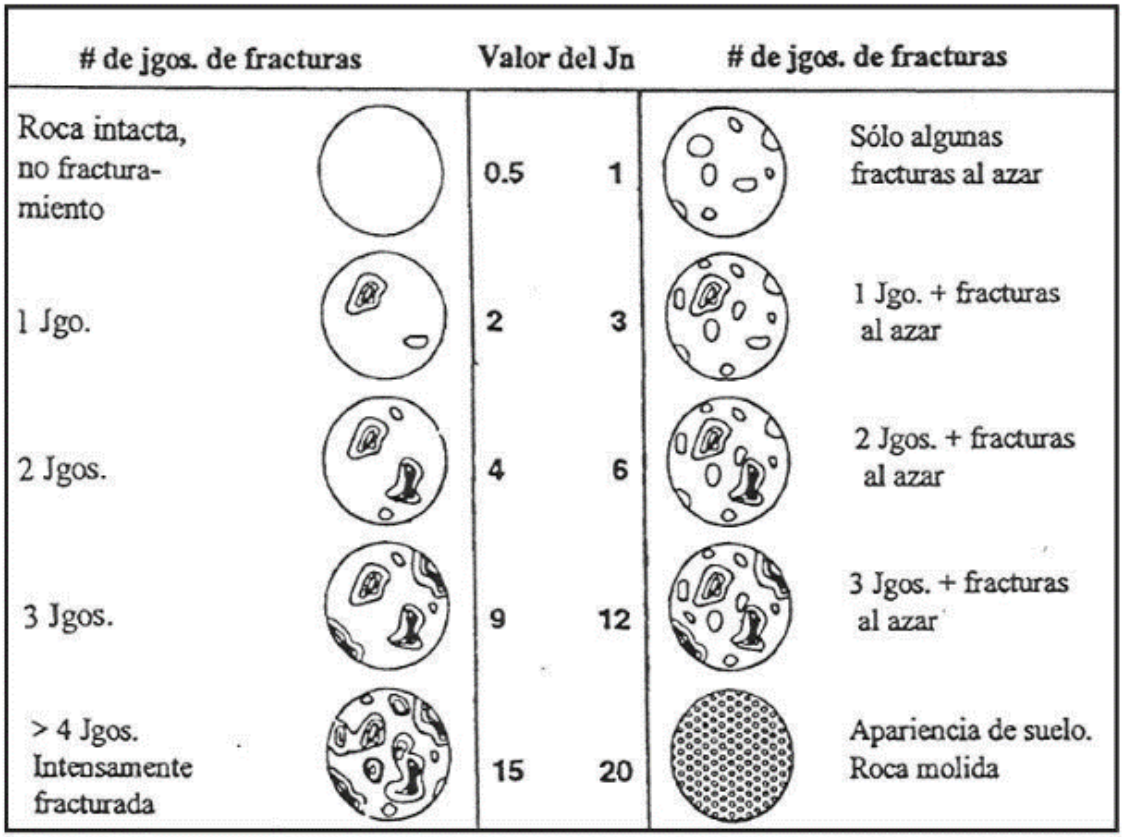
$\frac{J_w}{SRF}$ **Estado tensional del MR** ↔ acción de los esfuerzos tectónicos sobre el macizo (SRF) y presión de agua (J_w).

Clasificación geomecánica

Tunnelling Quality Index (Q) - *Barton et al. (1974)*

Calidad de la roca	Calificación	RQD (%)
Muy mala (roca completamente meteorizada)	I	<25%
Mala (roca meteorizada)	II	25 a 50%
Media (Roca levemente meteorizada)	III	51 a 75%
Buena (Roca dura)	IV	76 a 90%
Muy buena (Roca fresca o intacta)	V	91 a 100%

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



A partir de datos estadísticos relevados en campo sobre la frecuencia y disposición de discontinuidades (estructura) - Fuente: Barton et al. (1974)

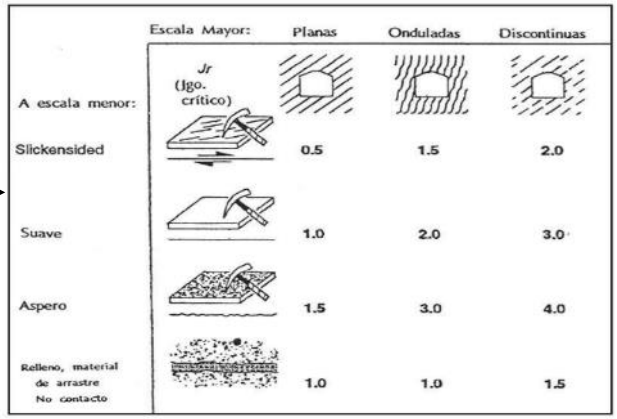
Clasificación geomecánica

Tunnelling Quality Index (Q) - *Barton et al. (1974)*

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

Índice de alteración de las discontinuidades Ja	Valor
Discontinuidad cerrada, paredes sanas	0,75
Inalterada, ligeramente decolorada	1
Ligera alteración	2
Alteraciones arcillosas limosas o arenosas	3
Alteraciones arcillosas blandas	4
Relleno arenoso de pequeño espesor	4
Relleno arcilloso duro sobre-consolidado (< 5 mm)	6
Ídem poco consolidado (< 5 mm)	8
Relleno de arcillas expansivas (< 5 mm)	8 – 12
Milonitos de roca y arcilla	6 – 12
Milonitos de arcilla limosa o arenosa	5
Milonitos arcillosos gruesos	10 - 20

Índice de rugosidad Jr	Valor
Discontinuidades rellenas sin contacto entre paredes	1
Discontinuidades limpias	
Discontinuas	4
Onduladas, rugosas	3
Onduladas, lisas	2
Planas, rugosas	1,5
Planas, lisas	1,0
Lisos o espejos de fallas	
Ondulados	1,5
Planos	0,5



Simplificado de Barton et al, 1974. Tomado de Ferrer et al, 2007.

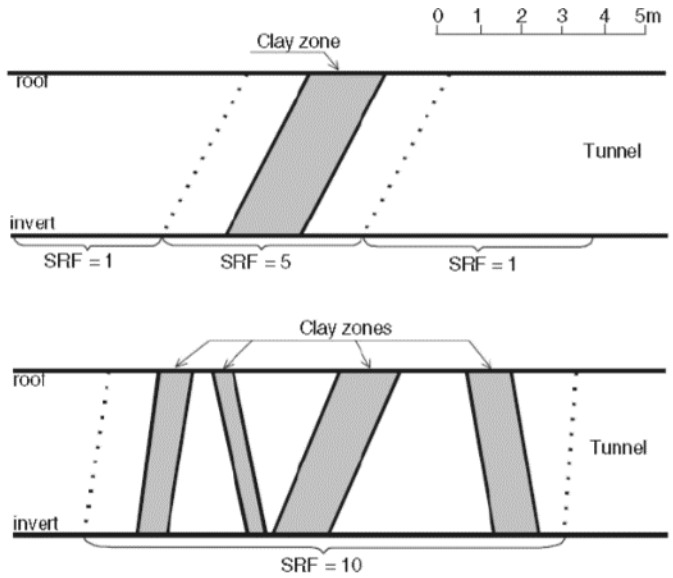
Clasificación geomecánica

Tunnelling Quality Index (Q) - *Barton et al. (1974)*

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

Coeficiente reductor por la presencia de agua Jw	Presión de agua (kg/cm²)	Valor
Excavaciones secas o con afluencias locales < 5 l/m	< 1	1
Afluencia media con lavado de algunas discontinuidades	1 – 2,5	0,66
Afluencia importante por discontinuidades limpias	2,5 – 10	0,5
Ídem con lavado de rellenos de discontinuidades	2,5 – 10	0,33
Afluencia excepcionalmente alta inicialmente, decreciente	> 10	0,2 – 0,1
Ídem mantenida	> 10	0,1 – 0,05

Condiciones tensionales de la roca – Parámetro SFR	Valor
Zonas débiles:	
Múltiples zonas débiles o milonitos	10,0
Zonas débiles aisladas con arcilla o roca descompuesta (cobertura ≤ 50 m)	5,0
Ídem con cobertura > 50 m	2,5
Abundantes zonas débiles en roca competente	7,5
Zonas de fractura aisladas en roca competente (cobertura < 50 m)	5,0
Ídem con cobertura > 50 m	2,5
Terreno en bloques muy fracturado, discontinuidades abiertas	5
Roca competente:	
Tensiones pequeñas, cerca de la superficie	2,5
Tensiones medias (cobertera media)	1,0
Tensiones elevadas (gran cobertera)	0,5 – 2,0
Rocas deformables:	
Con presión de deformación baja	5 – 10
Con presión de deformación alta	10 – 20
Terreno expansivo:	
Con presión de hinchamiento baja	5 – 10
Con presión de hinchamiento alta	10 – 15



Ejemplos de asignación del factor SFR según el índice Q en una sección de túnel (Palmström, 2006)

Clasificación geomecánica

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Tunnelling Quality Index (Q) - *Barton et al. (1974)*

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

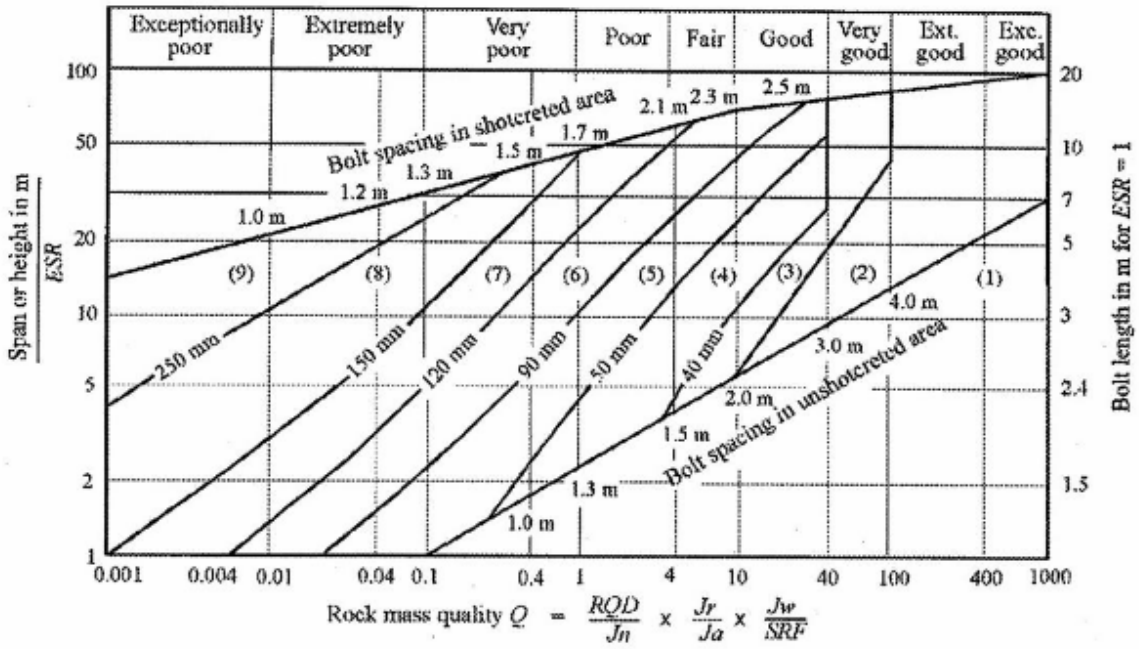
$$Q = \frac{RQD}{J_n}\frac{J_r}{J_a}\frac{J_w}{SRF}$$

- Siempre complementarlo con otro (RMR, por ejemplo)
- Correlación → **RMR = 9 log Q + 44** (según Bieniawski, 1976)

Clasificación geomecánica

Tunnelling Quality Index (Q) - *Barton et al. (1974)*

Categorías de sostenimientos



REINFORCEMENT CATEGORIES

1) Unsupported
2) Spot bolting
3) Systematic bolting
4) Systematic bolting with 40-100 mm unreinforced shotcrete
5) Fibre reinforced shotcrete, 50 - 90 mm, and bolting
6) Fibre reinforced shotcrete, 90 - 120 mm, and bolting
7) Fibre reinforced shotcrete, 120 - 150 mm, and bolting
8) Fibre reinforced shotcrete, > 150 mm, with reinforced ribs of shotcrete and bolting
9) Cast concrete lining

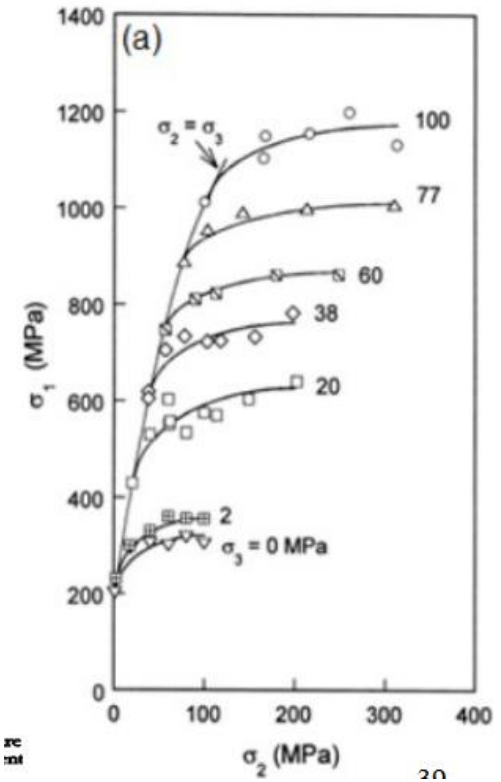
Fuente: Barton et al. (1974)

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

- Permite determinar la resistencia (ϕ y c) y deformabilidad de macizo rocoso
- Se basa a partir del **criterio generalizado de Hoek & Brown**
- El criterio inicial supone al macizo como un medio con comportamiento elasto-plástico, homogéneo, isótropo y continuo
- Es muy útil para macizo de baja calidad
  → medios más isótropos (≈suelos)

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} = \sqrt{m \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s}$$



Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Se incorporan al criterio índices geológicos y procedimientos constructivos:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i \, e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}$$

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

σ'_1 y σ'_3: esfuerzos efectivos principales mayor y menor, respectivamente, en la condición de falla

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

m_i: constante que depende del tipo de matriz rocosa

m_b: constante m del macizo rocoso (valor reducido de m_i)

GSI: índice geológico de resistencia

D: factor de alteración

s y a: constantes que dependen de las características del macizo rocoso (s=1, para roca intacta; a≈0,5)

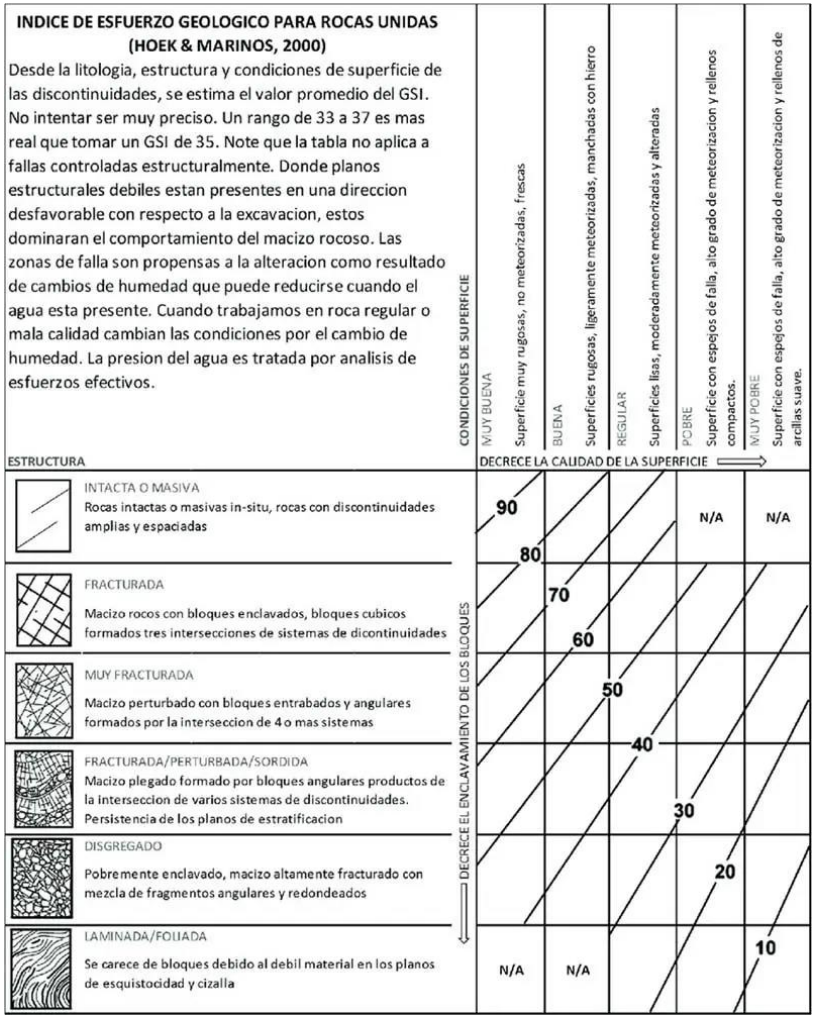
Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

GSI - Índice Geológico de Resistencia

Valores GSI (adoptar rangos) basados en la evaluación visual de las propiedades geológicas en el campo

- Estructura del MR → tamaño y trabazón de los bloques entre sí
- Estado de las paredes → características de las discontinuidades (= resistencia al corte del MR)



Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Constante m_i

CUADRO 3.14

Valores de la constante m_i para la matriz rocosa

Tipo de roca y valor de la constante m_i				
Sedimentarias clásticas	Conglomerado	(22)	Lutita	4
	Arenisca	19	Grauvaca	(18)
	Limolita	9		
Sedimentarias no clásticas	Caliza margosa	7	Caliza micrítica	8
	Brecha caliza	(20)	Yeso	16
	Caliza esparítica	(10)	Anhidrita	13
Metamórficas	Mármol	9	Gneiss (*)	33
	Cuarcita	24	Esquisto (*)	4-8
	Migmatita	(30)	Filita (*)	(10)
	Anfibolita	25-31	Pizarra (*)	9
	Milonita	(6)		
Ígneas	Granito	33	Diorita	(28)
	Riolita	(16)	Andesita	19
	Granodiorita	(30)	Gabro	27
	Dacita	(17)	Basalto	(17)
Ígneas extrusivas piroclásticas	Aglomerado	(20)	Toba	(15)
	Brecha	(18)		

Hoek y Brown, 1997. Los valores entre paréntesis son estimados.
(*) Valores obtenidos de ensayos en matriz rocosa con dirección de aplicación de la carga normal a los planos de foliación. El valor de m_i será significativamente diferente si la rotura ocurre a favor de los planos de debilidad.

Tomado de González de Vallejo *et al.*, 2002

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Constantes m_b y s

CUADRO 3.19

Relaciones aproximadas entre la calidad de los macizos rocosos y los valores de las constantes m y s

Criterio de rotura empírico $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{ci}\sigma_3 + s\sigma_{ci}^2}$ σ_1 y σ_3: esfuerzos principales mayor y menor σ_{ci}: esfuerzo compresivo uniaxial de la matriz rocosa m y s: constantes empíricas del macizo rocoso	Constantes del material: m y s	Rocas carbonatadas: dolomías, calizas y mármol	Rocas arcillosas: arcillitas, limolitas, lutitas y pizarras	Rocas arenosas: areniscas y cuarcitas	Rocas ígneas cristalinas de grano fino: andesitas, dolerita, diabasas y riolitas	Rocas cristalinas ígneas de grano grueso y metamórficas: anfibolitas, gabros, gneises, granitos, noritas y cuarzodioritas
Valores para el macizo rocoso alterado o afectado por voladuras *(disturbed)* / *Valores para el macizo rocoso sin alterar (undisturbed)*						
Muestras de roca intacta Muestras de tamaño de probeta de laboratorio sin discontinuidades. RMR = 100 Q = 500	m	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0
	s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	m	*7,0*	*10,0*	*15,0*	*17,0*	*25,0*
	s	*1,0*	*1,0*	*1,0*	*1,0*	*1,0*
Macizo rocoso de muy buena calidad Bloque de roca sana. Juntas sin meteorizar y con espaciado de 1 a 3 m. RMR = 85 Q = 100	m	2,40	3,43	5,14	5,82	8,56
	s	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082
	m	*4,10*	*5,85*	*8,78*	*9,95*	*14,63*
	s	*0,189*	*0,189*	*0,189*	*0,189*	*0,189*
Macizo rocoso de calidad buena Bloques de roca sana o ligeramente meteorizada, con juntas espaciadas de 1 a 3 m. RMR = 65 Q = 10	m	0,575	0,821	1,231	1,395	2,052
	s	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293
	m	*2,006*	*2,865*	*4,298*	*4,871*	*7,163*
	s	*0,0205*	*0,0205*	*0,0205*	*0,0205*	*0,0205*
Macizo rocoso de calidad media Varias familias de discontinuidades moderadamente meteorizadas con espaciados de 0,3 a 1 m. RMR = 44 Q = 1	m	0,128	0,183	0,275	0,311	0,458
	s	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009
	m	*0,947*	*1,353*	*2,030*	*2,301*	*3,383*
	s	*0,00198*	*0,00198*	*0,00198*	*0,00198*	*0,00198*
Macizo rocoso de calidad mala Numerosas juntas meteorizadas con algo de relleno. Brechas compactas sin rellenos. Espaciado de 0,03 a 0,5 m. RMR = 23 Q = 0,1	m	0,029	0,041	0,061	0,069	0,102
	s	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003
	m	*0,447*	*0,639*	*0,959*	*1,087*	*1,598*
	s	*0,00019*	*0,00019*	*0,00019*	*0,00019*	*0,00019*
Macizo rocoso de calidad muy mala Numerosas juntas intensamente meteorizadas con rellenos. Espaciado < 0,05 m. Brechas con rellenos arcillosos. RMR = 3 Q = 0,01	m	0,007	0,010	0,015	0,017	0,025
	s	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
	m	*0,219*	*0,313*	*0,469*	*0,532*	*0,782*
	s	*0,00002*	*0,00002*	*0,00002*	*0,00002*	*0,00002*

Hoek y Brown, 1988.

Tomado de González de Vallejo *et al.*, 2002

Clasificación geomecánica

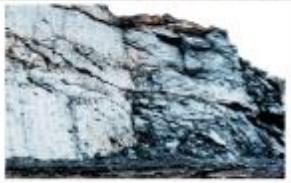
Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Estimación del factor de alteración, D

= grado de alteración del macizo rocoso por:

a) voladuras

b) relajación de esfuerzos

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 rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m 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 tensiones 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 tensiónes 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

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Para **macizos rocosos de mala calidad**, con materiales blandos y alterados, los parámetros usados para un material "disturbed" no dan buen resultado, por lo que se ha desarrollado otros parámetros

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

$$m_b = m_i \, e^{\left(\frac{GSI-100}{28}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9}\right)}$$

$$a = 0{,}5$$

Para macizos con GSI>25
(Muy Buena - Media calidad)

$$s = 0$$

$$a = 0{,}65 - \frac{GSI}{200}$$

Para macizos con GSI<25
(Mala - Muy Mala calidad)

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Criterio generalizado de Hoek & Brown

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

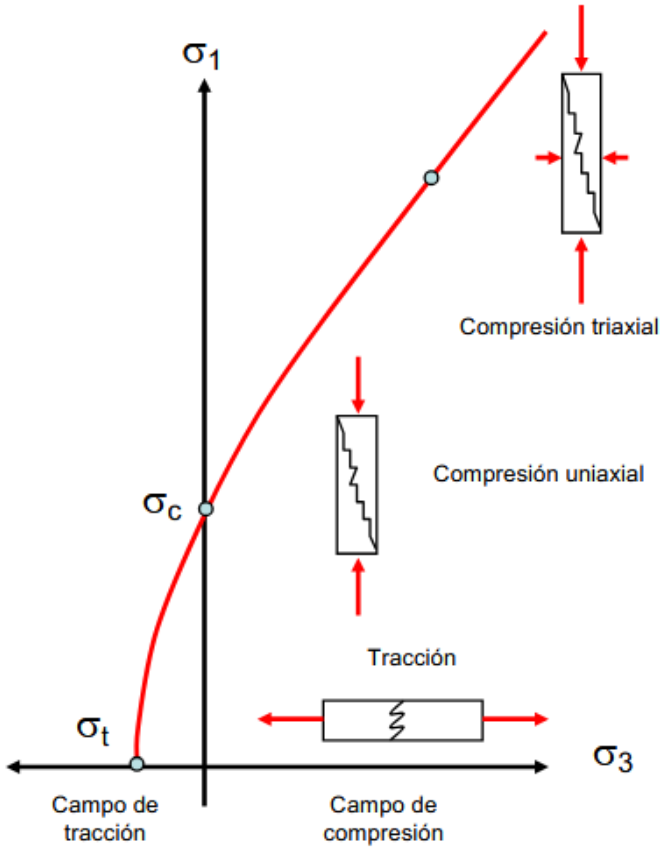
- Para la resistencia a la compresión uniaxial $\sigma_c = \sigma_{ci} s^a$
  → $\sigma'_1 = \sigma_c$ y $\sigma'_3 = 0$
- Para la resistencia a la tracción $\sigma_t = -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b}$
  → $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$
- Módulo de deformación:

$$E_m\,[GP_a] = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{Ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \qquad [12]$$

SI $\sigma_{ci} \leq 100$ MPa

$$E_m\,[GP_a] = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \qquad [13]$$

SI $\sigma_{ci} > 100$ MPa



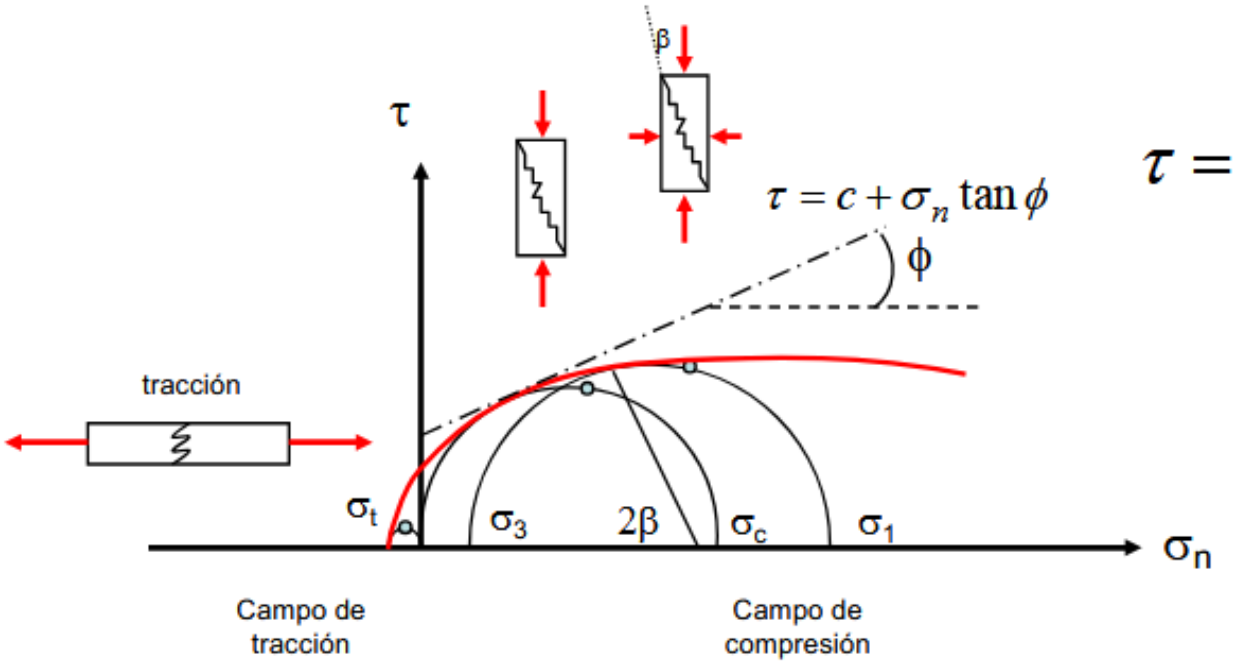
Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Empleando los valores correspondientes a las condiciones de macizo rocoso alterado:

$$\sigma_{tm} = -\frac{s\sigma_{ci}}{m}$$

$$\tau = A\sigma_{ci}\left(\frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}}\right)^B$$



A y B son constantes del material,

σ_n es el esfuerzo normal en el punto de interés,

σ_{tm} es la resistencia a la tracción del macizo

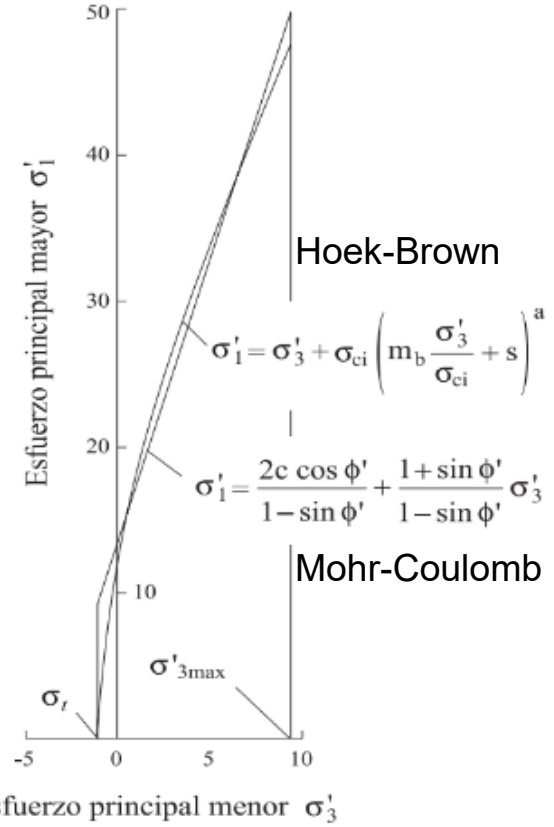
La determinación de los parámetros c y ϕ mediante este método no es inmediata → **criterio no lineal** → ambos parámetros no son constantes en función del valor del esfuerzo σ_n

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Los autores proponen un método de evaluación donde la ecuación lineal del criterio de Mohr-Coulomb es entonces ajustada a la curva de Hoek y Brown, para un determinado valor de σ_n

→ permite calcular los valores de c y ϕ (Hoek y Brown, 1977), para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$,



Relaciones entre esfuerzos principales mayores y menores para el criterio de Hoek y brown y Mohr Coulomb tomado de https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7713.pdf

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

CUADRO 3.21

Criterios de rotura en macizos rocosos y datos necesarios para su aplicación

Características del macizo rocoso	Rotura a favor de los planos de discontinuidad	Rotura a través de la matriz rocosa
Macizo rocoso masivo sin discontinuidades.	No es posible.	Hoek y Brown (m_i para roca intacta y $s = 1$).
Macizo rocoso estratificado.	Mohr-Coulomb (c y ϕ de las discontinuidades).	Hoek y Brown (m_i para roca intacta y $s = 1$).
Macizo rocoso con dos familias de discontinuidades.	Mohr-Coulomb (c y ϕ de las discontinuidades).	Hoek y Brown (m_i para roca intacta y $s = 1$).
Macizo rocoso con tres familias de discontinuidades ortogonales.	Hoek y Brown (m, s y α del macizo).	Generalmente no es posible. Si lo fuera se aplican iguales criterios que para el caso de 2 familias.
Macizo rocoso con cuatro o más familias de discontinuidades.	Hoek y Brown (m, s y α del macizo).	No es posible.

Tomado de González de Vallejo et al., 2002

Mohr-Coulomb → rotura por discontinuidades

Hoek-Brown → rotura en medios isótropos

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

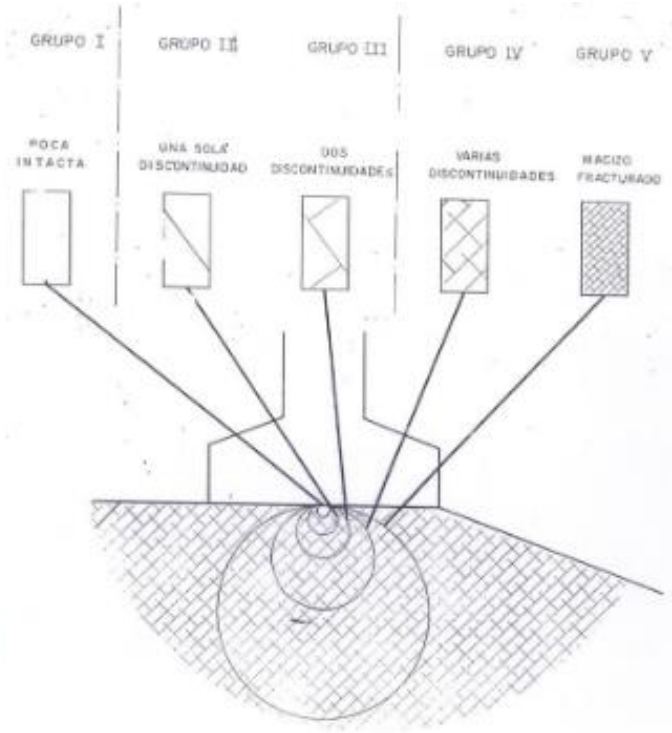
Aplicabilidad del método de Hoek y Brown

- **Relación de espaciamiento**

$$SR = B \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{S_i(m)}$$

B: ancho de la cimentación en m

S_i: espaciamiento entre discontinuidades (m)



- Si SR > 60 → Es aplicable el criterio de Hoek y Brown

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Aplicabilidad del método de Hoek y Brown

- **Cálculo de la carga de hundimiento:**

$$P_h = \beta \cdot (N_\beta - \zeta)$$

$$\beta = \frac{m \cdot \sigma_c}{8}$$

$$\zeta = \frac{8 \cdot s}{m^2}$$

N_β: *coeficiente de la carga de hundimiento*

σ_c: *resistencia a compresión uniaxial de la roca matriz*

VALORES DEL COEFICIENTE DE CARGA (N_β) (SUPERFICIE HORIZONTAL) PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DE LA CARGA APLICADA

σ_{01} \ i	0°	5°	10°	15°	20°	25°
0,01	5,00	4,35	3,70	3 08	2,51	1,98
0,02	5,55	4,84	4,13	3,45	2,80	2,22
0,03	5,94	5,19	4,44	3,70	3,01	2,39
0,05	6,53	5,72	4,89	4,09	3,33	2,63
0,07	6,98	6,12	5,25	4,39	3,57	2,82
0,10	7,54	6,62	5,68	4,75	3,86	3,04
0,15	8,29	7,29	6,26	5,23	4,25	3,33
0,20	8,90	7,84	6,73	5,63	4,56	3,56
0,30	9,92	8,74	7,52	6,28	5,07	-
0,50	11,51	10,16	8,74	7,28	5,85	-
0,70	12,80	11,33	9,74	8,09	6,54	-

$$\sigma^*_{o1} = (\sigma_1 / \beta) + \zeta$$

siendo σ_1 la carga externa, por ejemplo el sobrepeso equivalente de tierras.

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Aplicabilidad del método de Hoek y Brown

- **Cálculo de la carga de hundimiento:**

Los valores de m y s también se pueden obtener a partir del índice RMR

$$m = m_o \exp \frac{RMR - 100}{a}$$

$$s = \exp \frac{RMR - 100}{b}$$

donde a = 28 y b = 9 para macizos rocosos inalterados, (p.ej. roca cuidadosamente volada con explosivos o excavada mediante maquinaria), y

a = 14 y b = 6 para macizos rocosos alterados, (p.ej. en taludes o en roca dañada por explosivos).

A su vez m_o es el valor del parámetro m para rocas intactas (Hoek y Brown, 1980; Betournay et al. 1991; Wood, 1991; Hoek et al.; 1992).

$$\beta = \frac{m_o \sigma_c}{8} \exp \frac{RMR - 100}{a}$$

m_o es una constante de la matriz rocosa (por ensayos triaxiales o tablas),

Si el medio rocoso está totalmente sano (RMR=100) $m=m_i$ y $s=1$

Clasificación geomecánica

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Aplicabilidad del método de Hoek y Brown

✓ **Cálculo de la carga admisible. Coeficientes de seguridad**

$$\sigma_{adm} = P_h / F$$

CONSIDERACIONES:

- El coeficiente de seguridad global (F) depende del modelo matemático, de los tipo de rotura posibles y de la incertidumbre de los datos iniciales.
- La magnitud de F está vinculada a la probabilidad de rotura del cimiento (Po). Es habitual adoptar un valor de probabilidad de rotura Po = 10^{-4} en casos normales. La probabilidad de rotura puede variar en una proporción de 1.000.000, con el mismo F, si por ejemplo hay 5 ensayos en lugar de 20.

Clasificación geomecánica

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Aplicabilidad del método de Hoek y Brown

✓ **Cálculo de la carga admisible. Coeficientes de seguridad**

$$\sigma_{adm} = P_h / F$$

Coeficiente de seguridad global: F = Fp · Fm

1) Fp tiene en cuenta la variación de los parámetros de la roca

2) Fm cubre la posible rotura por fragilidad de una parte o todo el cimiento

1) Para estimar **Fp** hay que analizar las distribuciones estadísticas de las variables σ_c, m_o, y RMR.

- Se utilizan los Coeficientes de Variación de cada una de ellas (COV)
- Fp oscila entre 5 y 40

2) Fm, oscila entre 5 y 8 en rotura frágil (σc>100MPa); en rotura dúctil (σ_c <12,5 Mpa) → Se considera Fm=1

Clasificación geomecánica

.UBAfiuba FACULTAD DE INGENIERÍA

Geological Strength Index (GSI) - *Hoek & Brown (1980)*

Aplicabilidad del método de Hoek y Brown

Cálculo de la carga admisible. Coeficientes de seguridad

$$\sigma_{adm} = P_h / F$$

$$p_h = \frac{\sigma_c \; m_o}{8} \exp\left(\frac{RMR_o + RMR_\sigma - 100}{a}\right)\left(N_\beta(\zeta) - \zeta\right)$$

donde "a" y "b" son los parámetros anteriormente citados, y

$$\zeta = \frac{8}{m_o^2} \exp \frac{RMR_o + RMR_\sigma - 100}{b'}$$

donde b' = ab/(a-2b).

Bibliografía

- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuno, L., y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica.
- Ramírez Oyanguren y Alejano Monge (2004) - Mecánica de Rocas.
- Goodman, R (1989) Introduction to Rock Mechanics. 2 da Ed. Wiley
- Hoek, E (2002) Practical Rock Engineering. www.rocscience.com

Consultas/Contacto:
ccocchiarale@fi.uba.ar
ccocchiarale@gmail.com