

# Macizos rocosos



# Mecánica de rocas

- ✓ Comportamiento mecánico de rocas y macizos rocosos (MR).
- ✓ **Respuesta de los macizos rocosos ante los campos de esfuerzos** → **Deformación**, se manifiesta en todas las escalas ↔ geología estructural.
- ✓ Interés: estimar y predecir el comportamiento mecánico de un MR → ciclo de vida de una obra.
- ✓ Obra de ingeniería → modificación de condiciones naturales:
  - 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.

# Geología estructural

- Análisis del esfuerzo y la deformación en la corteza terrestre.
- Respuesta de las rocas frente al esfuerzo: deformación.
- Acción de procesos endógenos: movimiento de placas tectónicas, vulcanismo, sismos.

# Variables que controlan la deformación:

- Tipo y magnitud de esfuerzos.
- Tipo de roca.
- Temperatura.
- Presión de confinamiento.
- Tiempo de aplicación de esfuerzos.
- Presencia y presión de fluidos.
- Anisotropías preexistentes.

# Esfuerzos diferenciales

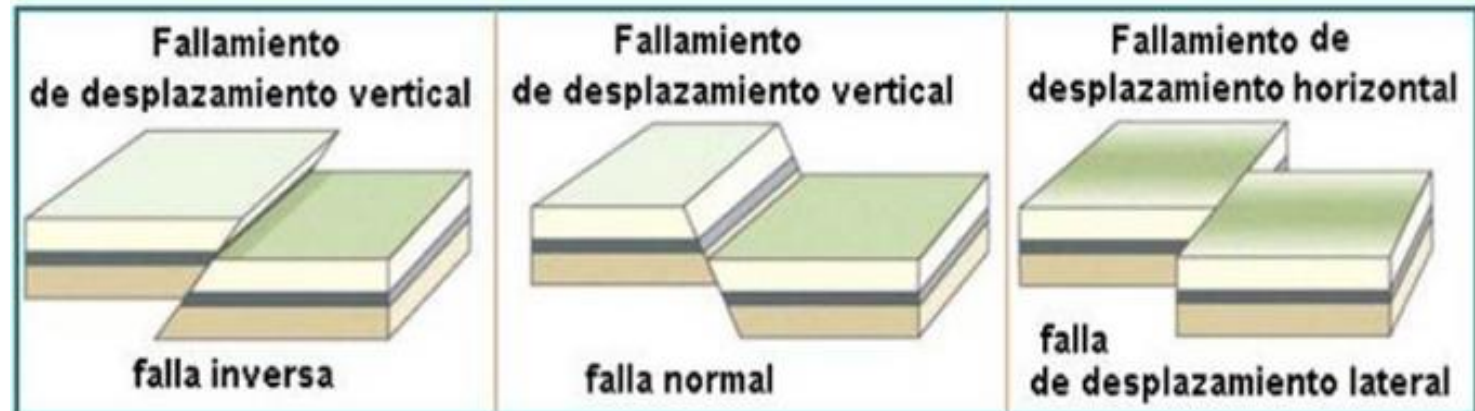
Compresión:  
engrosamiento de  
CT.

Extensión/Tracción:  
alargamiento o  
separación.  
Adelgazamiento de CT.

Cizalla: desplazamiento  
o ruptura a lo largo de  
planos.



**Estructuras resultantes de cada tipo de esfuerzos**



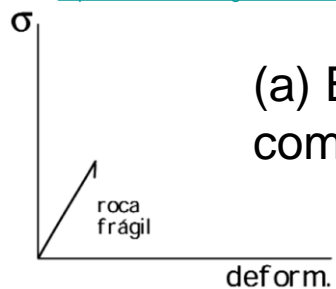
# Tipo de roca

La misma roca en distintos ambientes geológicos se deforma de manera diferente.

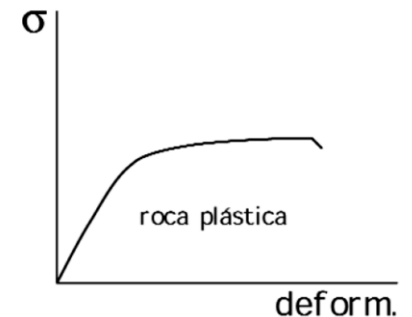
Ej.: cuarcitas de Sierra de la Ventana.



<https://hablemosdeargentina.com/c-buenos-aires/sierra-de-la-ventana/>



(b) 20 km de  
profundidad  
deformación plástica



# Tipo de roca

En el mismo ambiente geológico distintas rocas se deforman de manera diferente.



Rocas incompetentes: se deforman bajo acción de tensiones bajas a moderadas.  
Ej.: rocas arcillosas, deformación plástica



Isla Blå Jungfrun, Suecia (M.V. Altinier, 2019)

Rocas competentes: se deforman por acción de grandes tensiones.  
Ej.: granitos y granodioritas, comportamiento frágil

# Pliegues

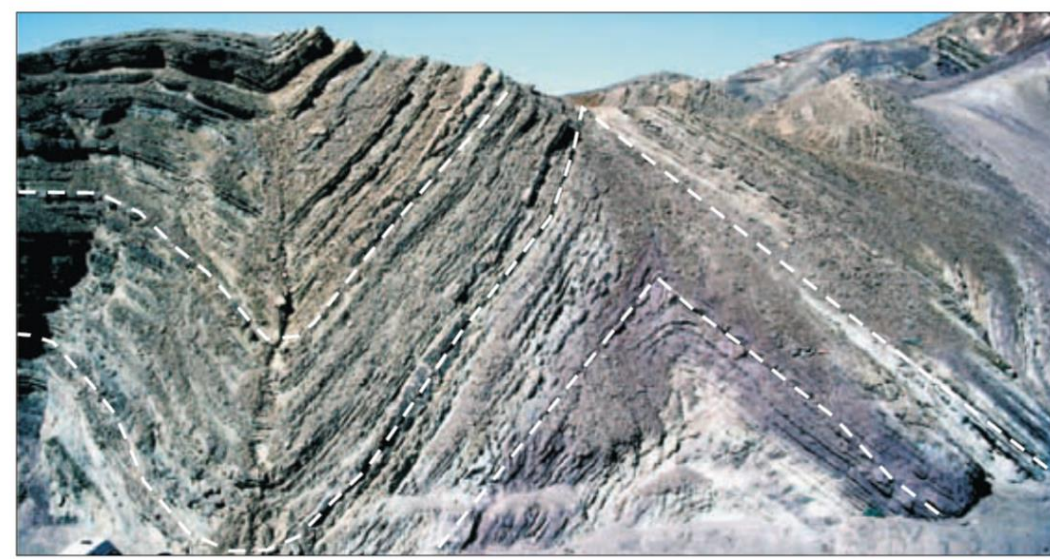
Esfuerzos compresivos.  
Deformación plástica.  
Engrosamiento de la  
corteza terrestre.



- Reacción plástica a la aplicación del esfuerzo.
- Estado plástico: profundidad (P y T) depende del tipo de roca.



# Partes de un pliegue



Tarback y Lutgens (2005)

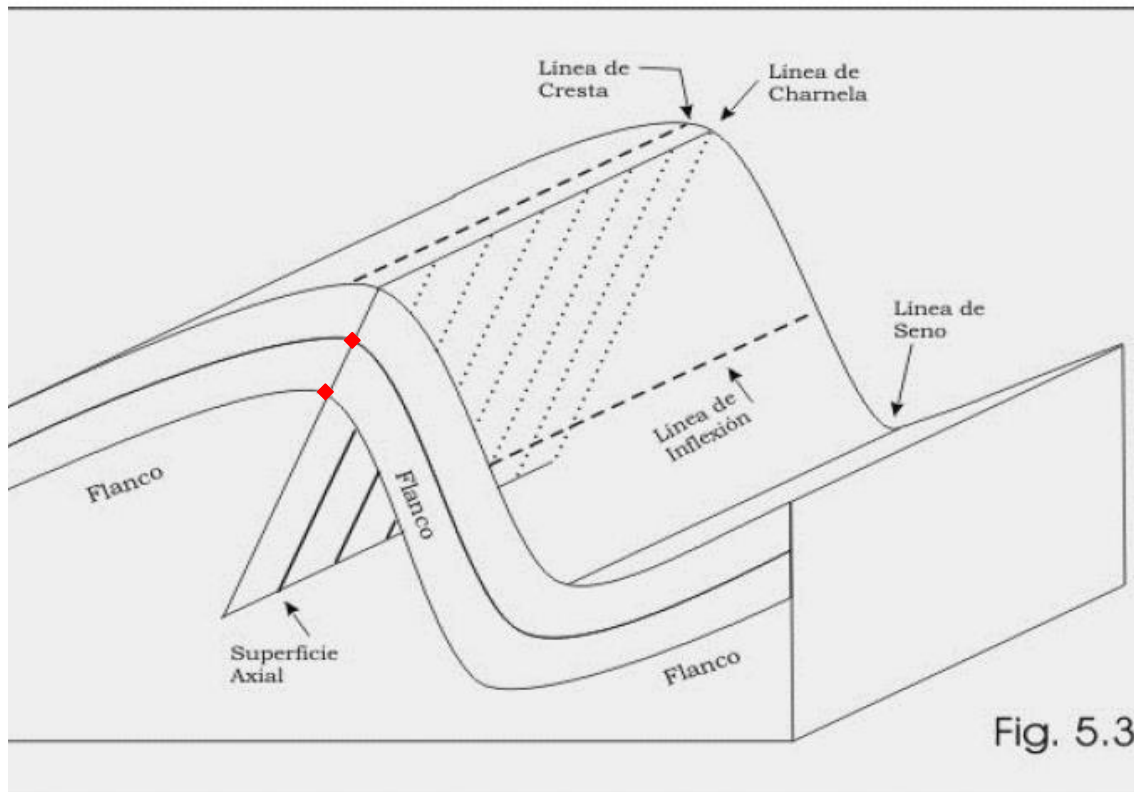
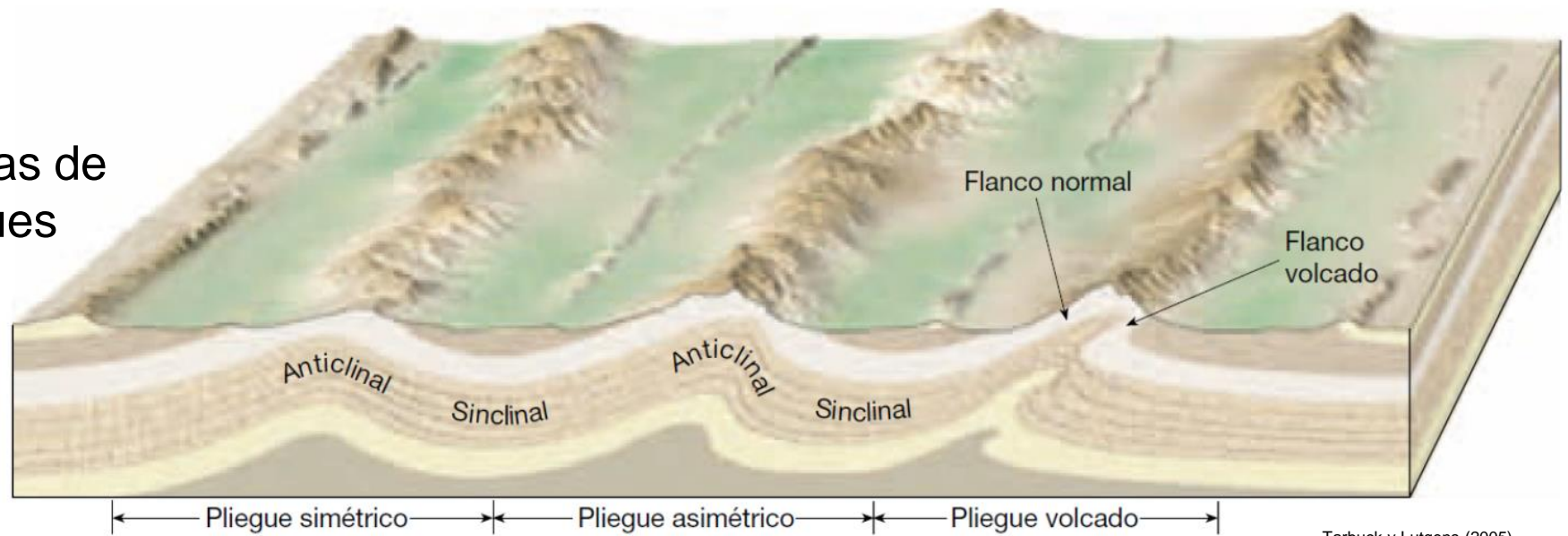


Fig. 5.3

- Charnela: punto o zona de máxima curvatura de cada estrato
- Eje o línea de charnela: línea que une los puntos de máxima curvatura
- Superficie axial: superficie imaginaria que une los puntos de máxima curvatura de todos los estratos
- Flanco: superficie menos curvada del pliegue (lado)

## Formas de pliegues



Tarbuck y Lutgens (2005)

### • Anticlinal

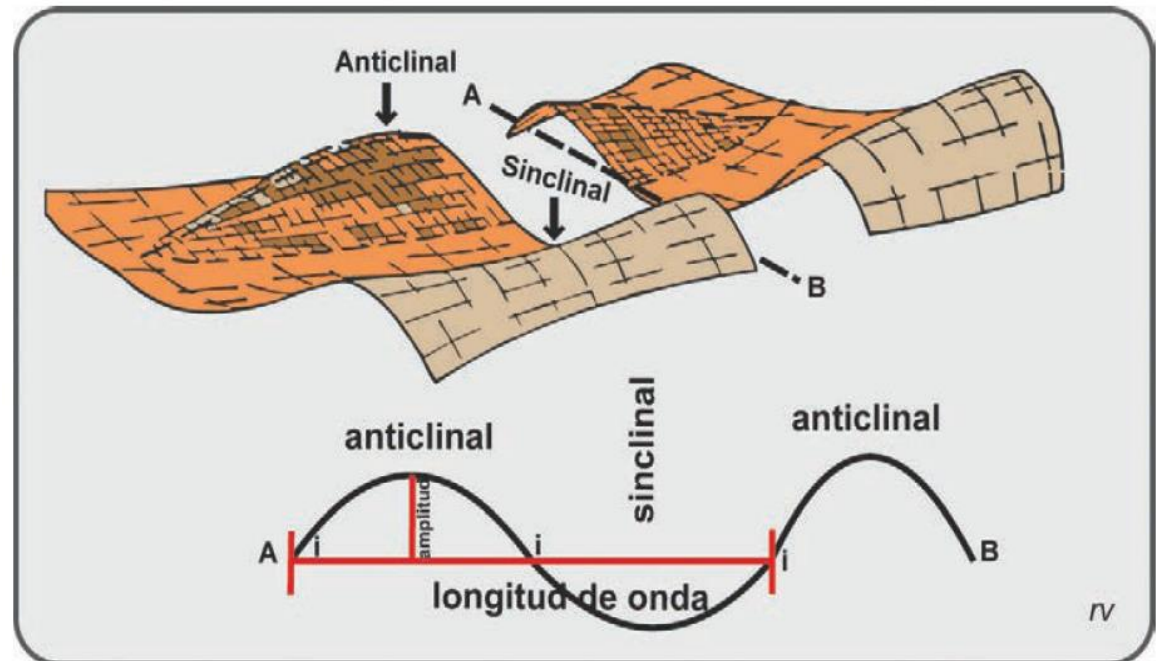
Pliegue convexo.

Centro de la cubeta: rocas más jóvenes.

### • Sinclinal

Pliegue cóncavo.

Centro de la cubeta: rocas más viejas.



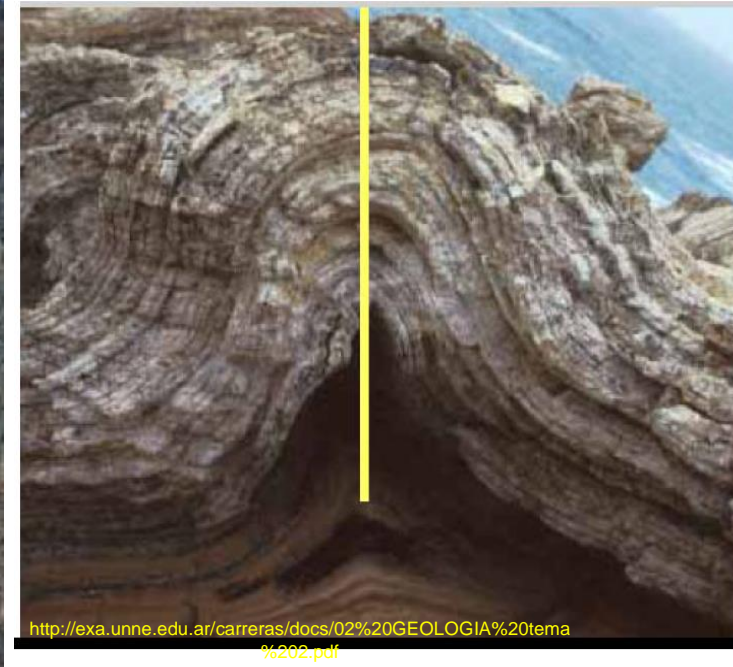
rv

# Anticlinales y sinclinales

Sinclinal



Anticlinal



# Fracturas

Elemento estructural de interés en análisis de MR.

Discontinuidades estrechas y planas.

Comportamiento frágil de la roca.

Superficies de debilidad:  
fragmentación de roca, desagregación de material, circulación de fluidos.



[https://www.flickr.com/photos/banco\\_imagenes\\_geologicas/albums/72157625031979374/with/5023313701/](https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157625031979374/with/5023313701/)

## (a) Diaclasas

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

## (b) Fallas

Desplazamiento entre bloques paralelo al plano de fracturación.

# Diaclasas

Fracturas con o sin desplazamiento de bloques.

Si hay desplazamiento, es perpendicular al plano de fracturación.



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



Clasificación de macizos rocosos y estimación de su resistencia.

[https://www.flickr.com/photos/banco\\_imagenes\\_geologicas/albums/72157625031979374](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/](https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157625031979374/with/5023313701/)

Diaclasas por  
enfriamiento



Basaltos

Dacitas





Diaclasas por reducción de carga litostática

Descompresión por erosión, excavaciones.

Diaclasas de foliación. Granitos



[https://www.flickr.com/photos/banco\\_imagenes\\_geologicas/44887920802/in/album-72157624907313759/](https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/44887920802/in/album-72157624907313759/)



# Fallas

Esfuerzos: tensionales, cizalla, compresivos.

Comportamiento frágil.

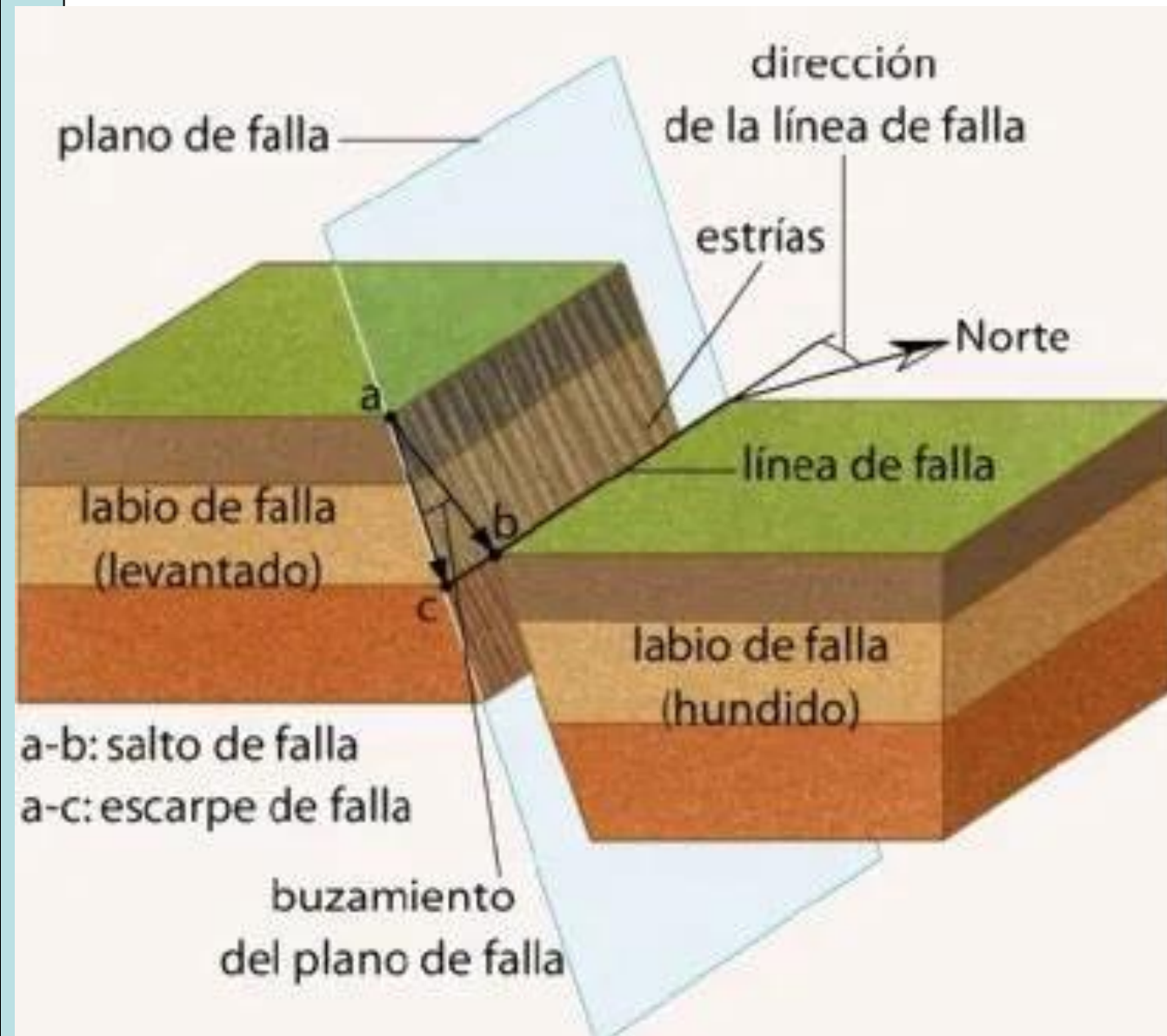
Desplazamiento de bloques paralelo al plano de fracturación.



[https://www.flickr.com/photos/banco\\_imagenes\\_geologicas/albums/72157625032368696/with/42571213492/](https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157625032368696/with/42571213492/)

Valle de rift - Grábrók (Islandia)

# Fallas de desplazamiento vertical



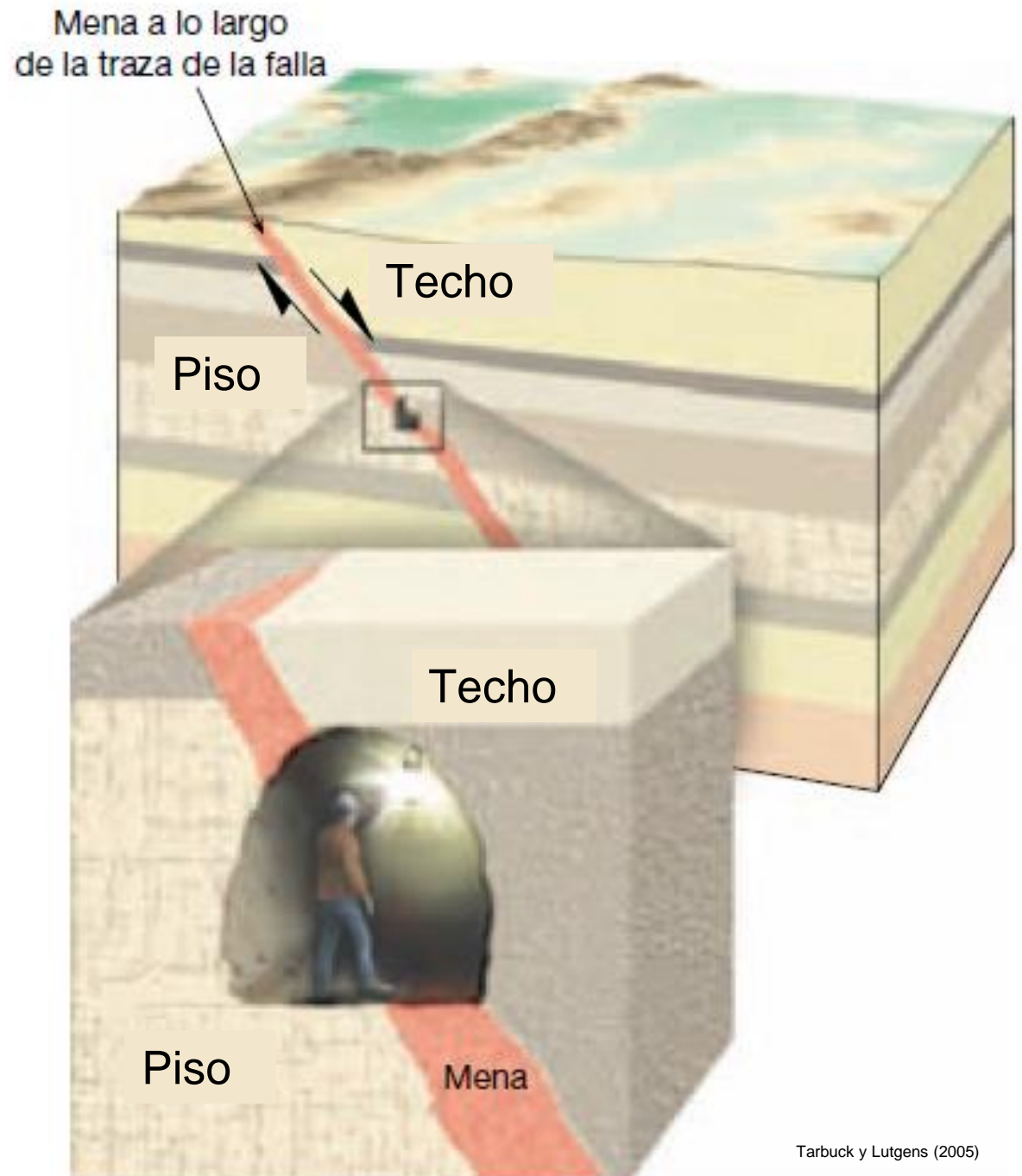
Plano de falla:  
superficie de rotura sobre la que se produce el desplazamiento de bloques.

Bloques de falla (Labios):  
cada uno de los bloques que se desplaza.

Salto de falla:  
desplazamiento de un bloque con respecto al otro medido en las componentes vertical y horizontal

Bloque de piso o bloque inferior: bloque ubicado debajo del plano de falla.

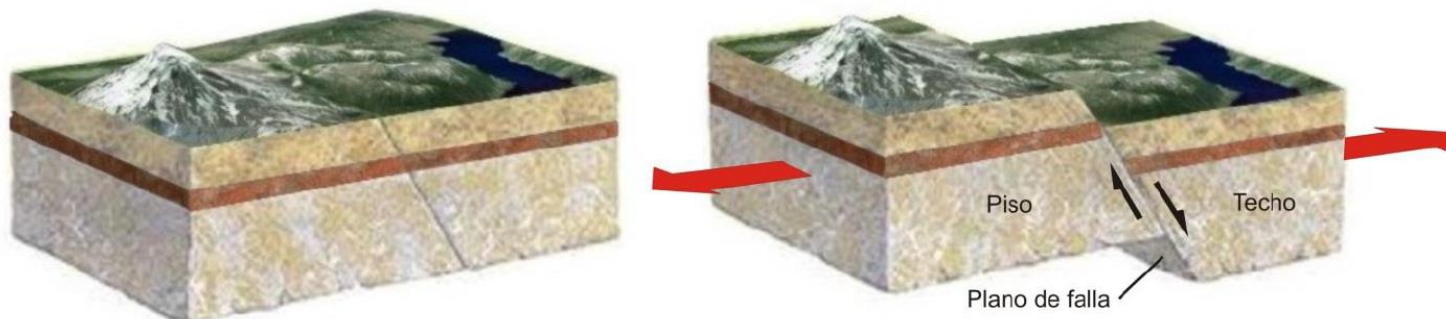
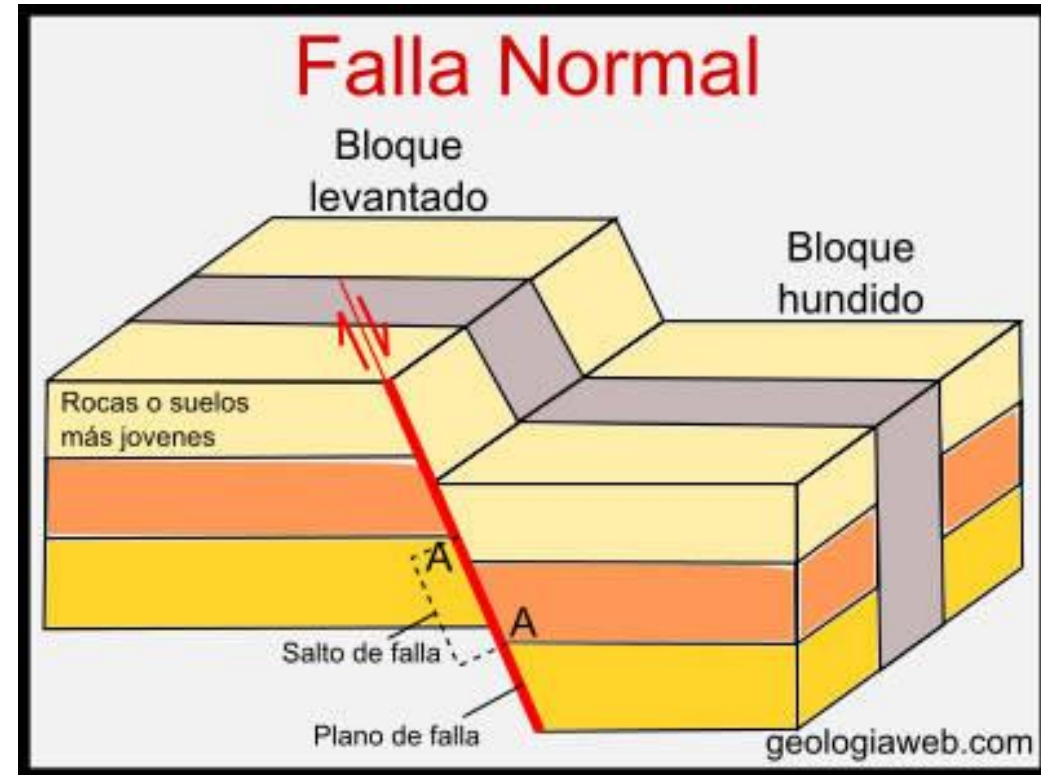
Bloque de techo o bloque superior: bloque ubicado encima del plano de falla.



# Fallas normales. Desplazamiento vertical.

Bloque superior: desliza hacia abajo.

Bloque inferior: desliza hacia arriba.



Tensión horizontal.  
Alargamiento del terreno.  
Adelgazamiento CT.

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

# Falla normal



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

# Falla normal

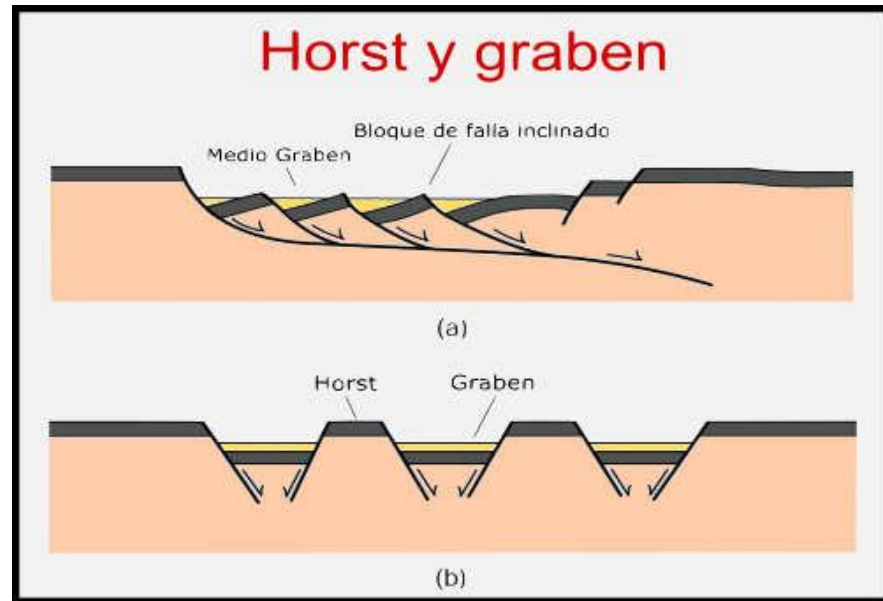


[https://www.flickr.com/photos/banco\\_imagenes\\_geologicas/albums/72157624907549475/with/5023987322/](https://www.flickr.com/photos/banco_imagenes_geologicas/albums/72157624907549475/with/5023987322/)

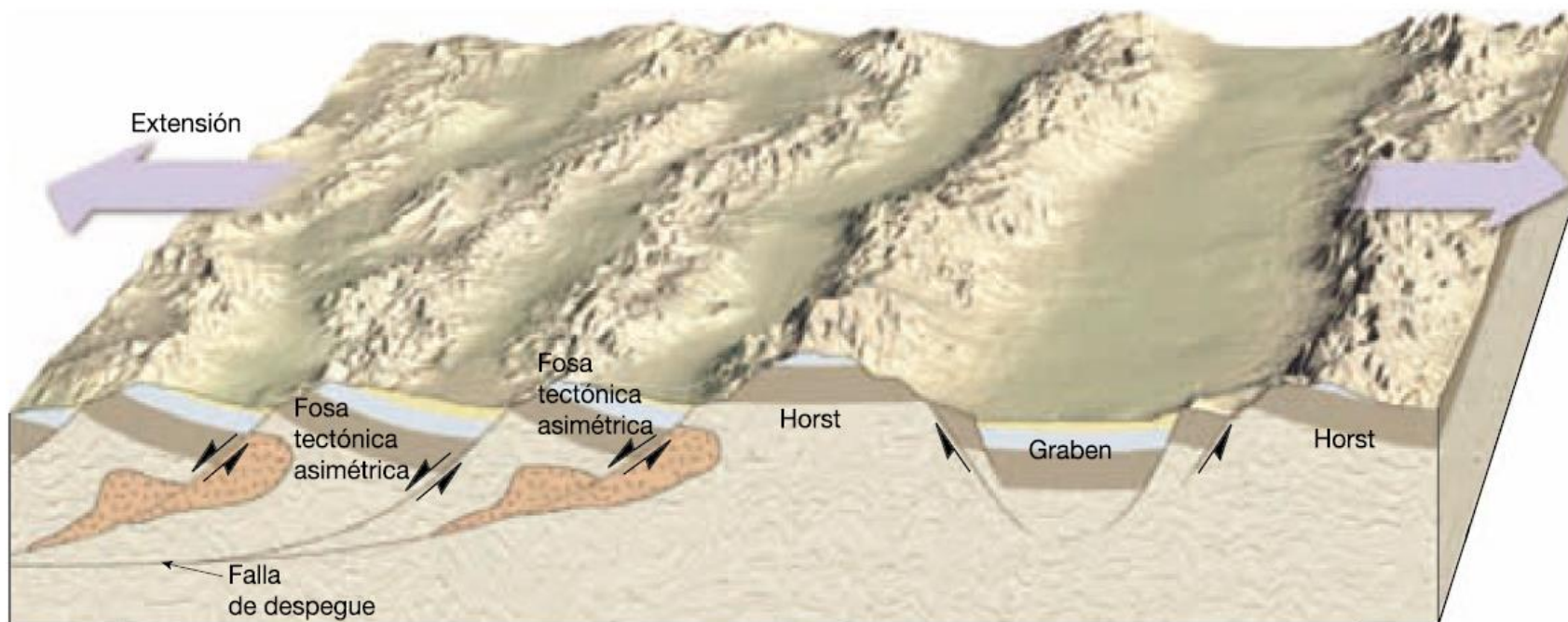
# Fallas normales

Sistemas de fallas normales ↔ zonas de extensión cortical (rift, dorsales oceánicas)

Estructuras asociadas: graben, horst, hemigraben



<https://geologiaweb.com/geologia-general/fallas-geologicas/>

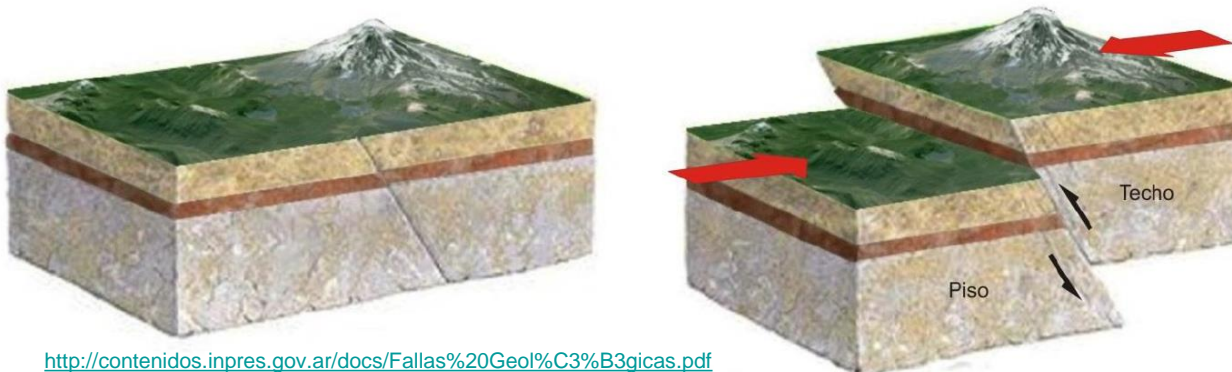
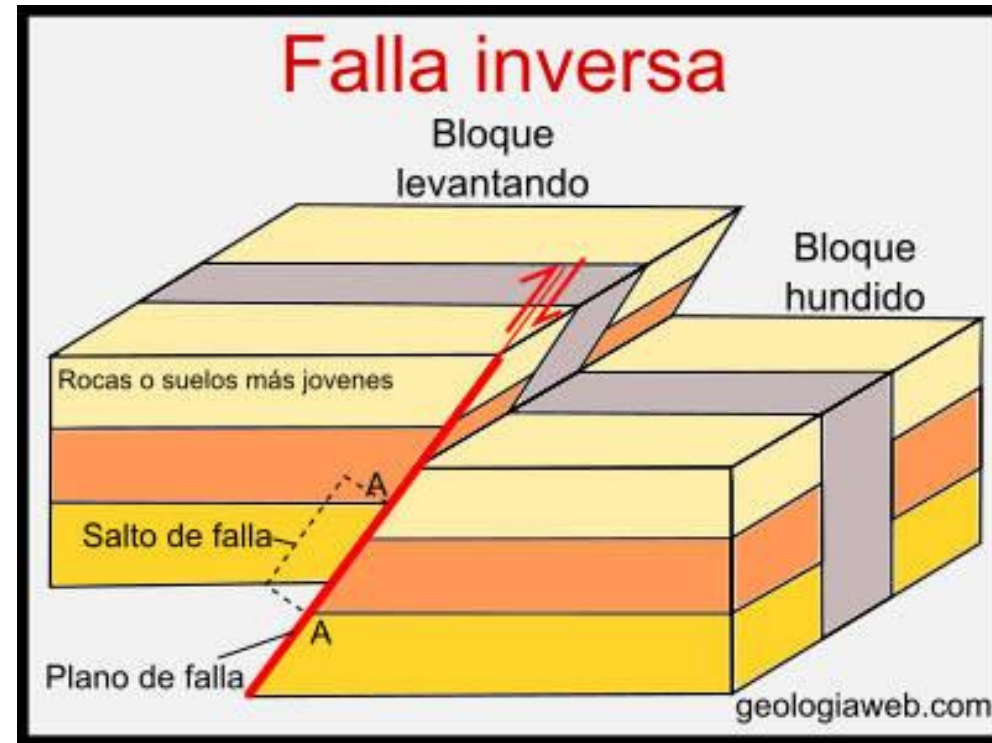


Tarback y Lutgens (2005)

# Fallas inversas. Desplazamiento vertical.

Bloque superior (techo): desliza hacia arriba.

Bloque inferior (piso): desliza hacia abajo.



Compresión horizontal.  
Acortamiento del terreno.  
Engrosamiento CT.

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



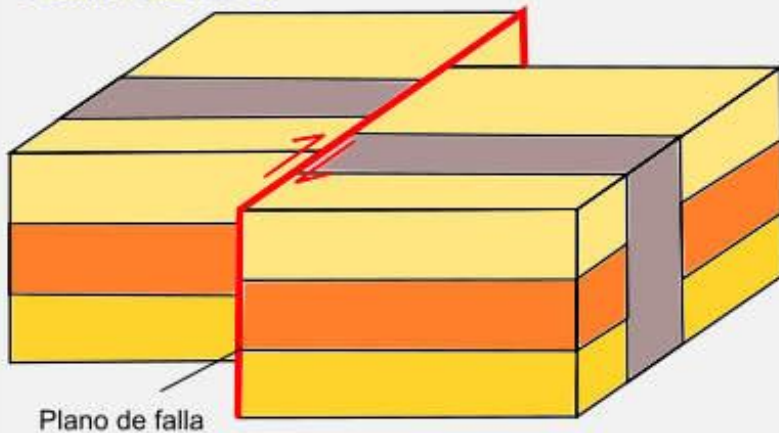
# Fallas inversas



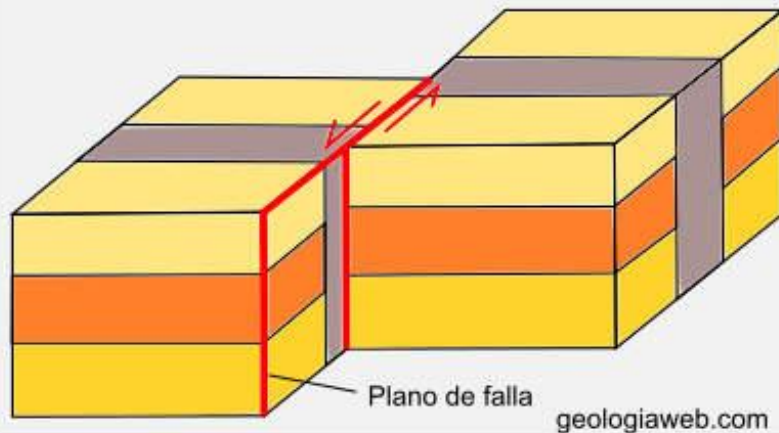
<http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>

## Fallas de desgarre

### Falla dextral



### Falla Sinistral



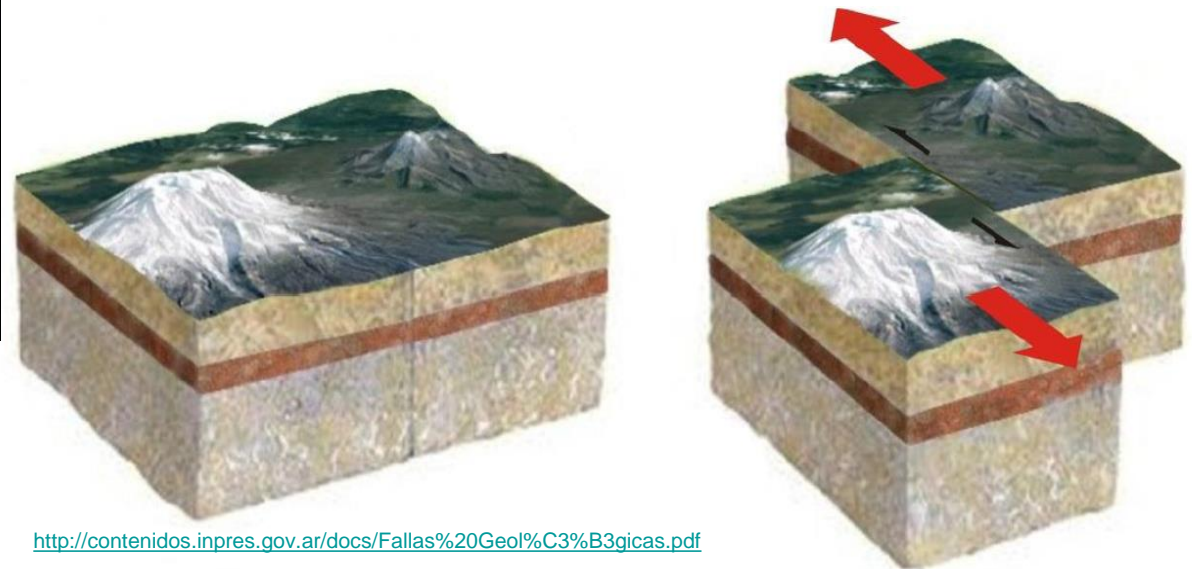
Fallas de desgarre o transcurrentes.  
Desplazamiento horizontal.

Zonas de fallas → varios km.

Planos de falla verticales.

Esfuerzos de cizalla.

Desplazamiento de bloques paralelo a  
la superficie del terreno.



# Fallas de desgarre o transcurrentes



Falla de San Andrés (<https://static3.a24.com/images/2019/9/6/r19K7JUH-900x000.jpeg>)

# Macizos rocosos



<https://civilgeeks.com/2021/04/24/clasificaciones-geomecanicas-de-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.



Estimar propiedades físicas y comportamiento mecánico:

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

*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**  
estructurados en bloques.

**Heterogéneos**  
discontinuidades y anisotropía.



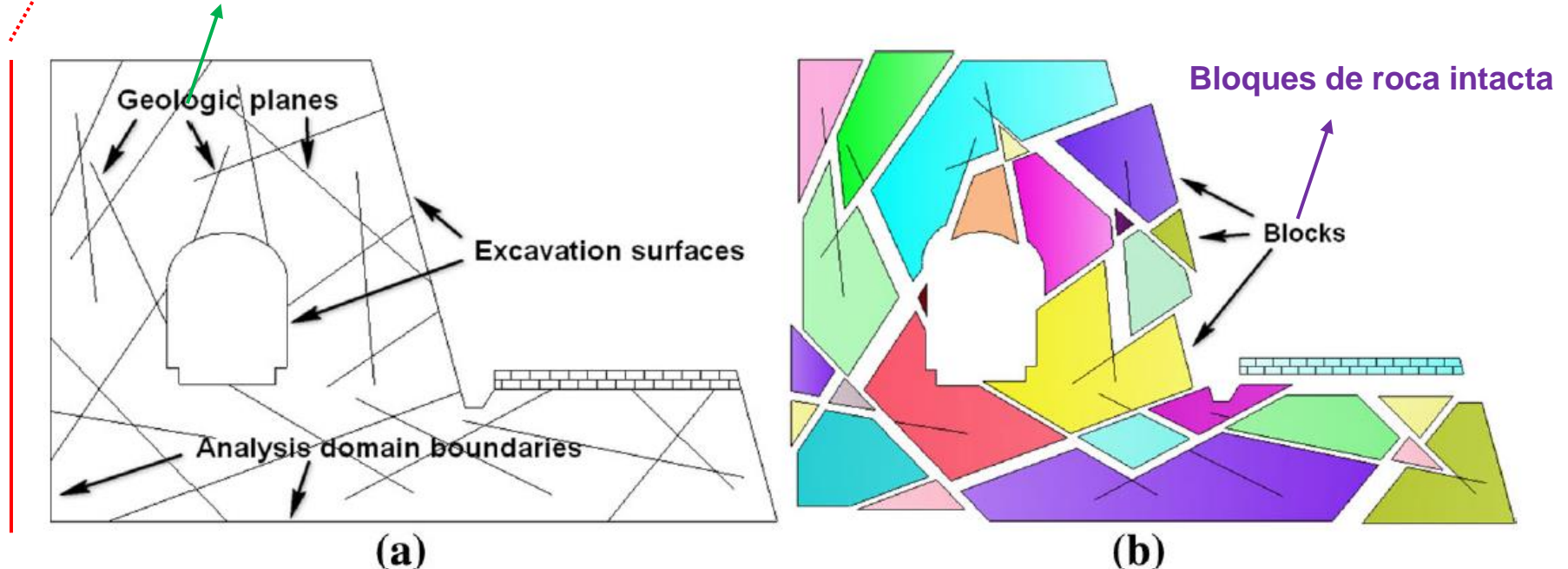
# Macizo rocoso

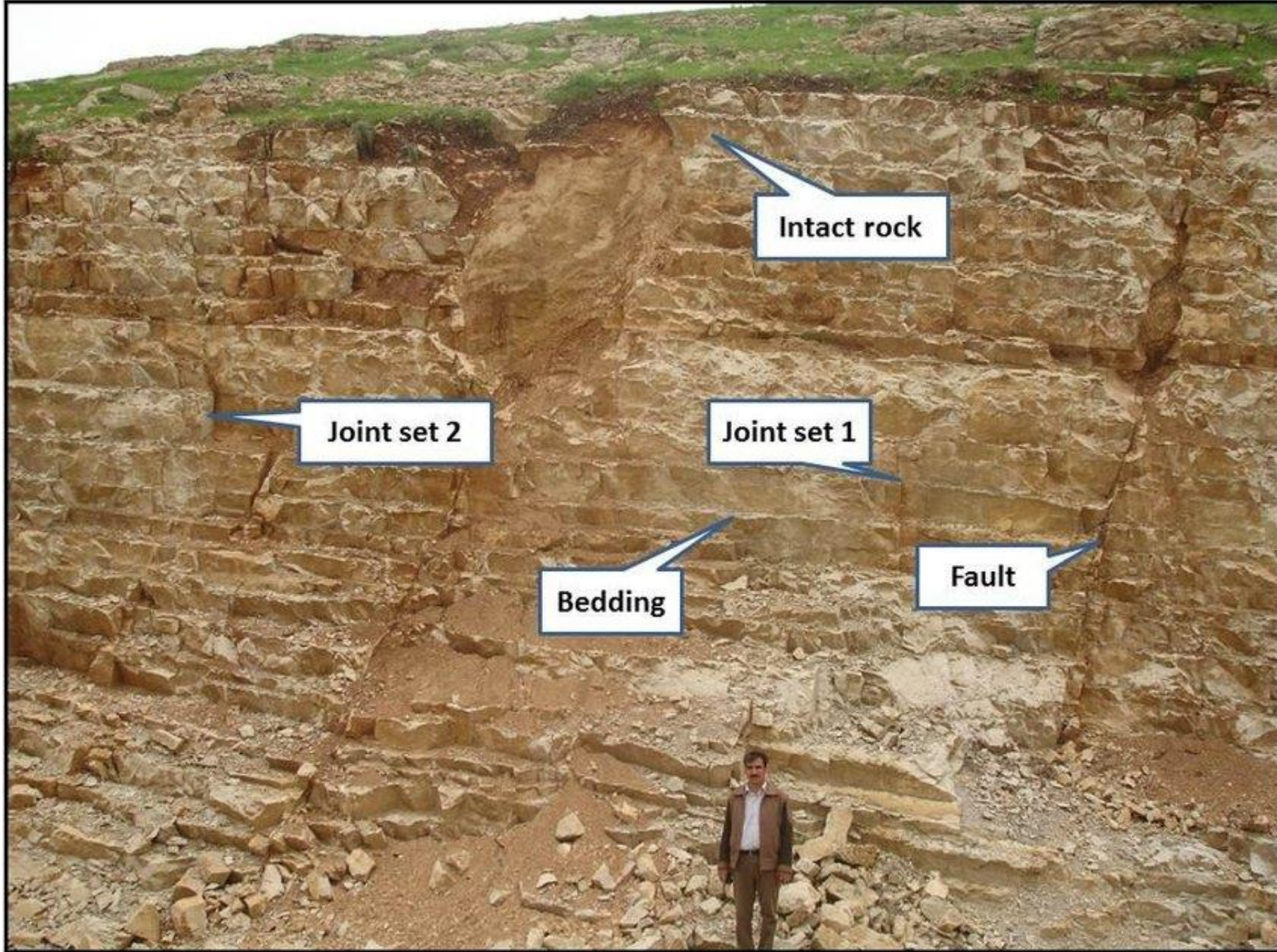
**Roca matriz (roca intacta):** agregado sólido formado por uno o más minerales, no afectado por discontinuidades observables. Bloques de roca homogénea.

**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





Bedding:  
plano de  
estratificación.

Joint set:  
familia de  
diaclasas.

Fault: falla.

Intact rock:  
roca matriz.

Limestone:  
caliza.

Alshkane, Younis. (2015). Numerical Modelling Investigation of Rock Mass Behaviour under Gravity Dams.

[https://www.researchgate.net/publication/280096369\\_Numerical\\_Modelling\\_Investigation\\_of\\_Rock\\_Mass\\_Behaviour\\_under\\_Gravity\\_Dams](https://www.researchgate.net/publication/280096369_Numerical_Modelling_Investigation_of_Rock_Mass_Behaviour_under_Gravity_Dams)



# Macizo rocoso: Roca matriz + Discontinuidades

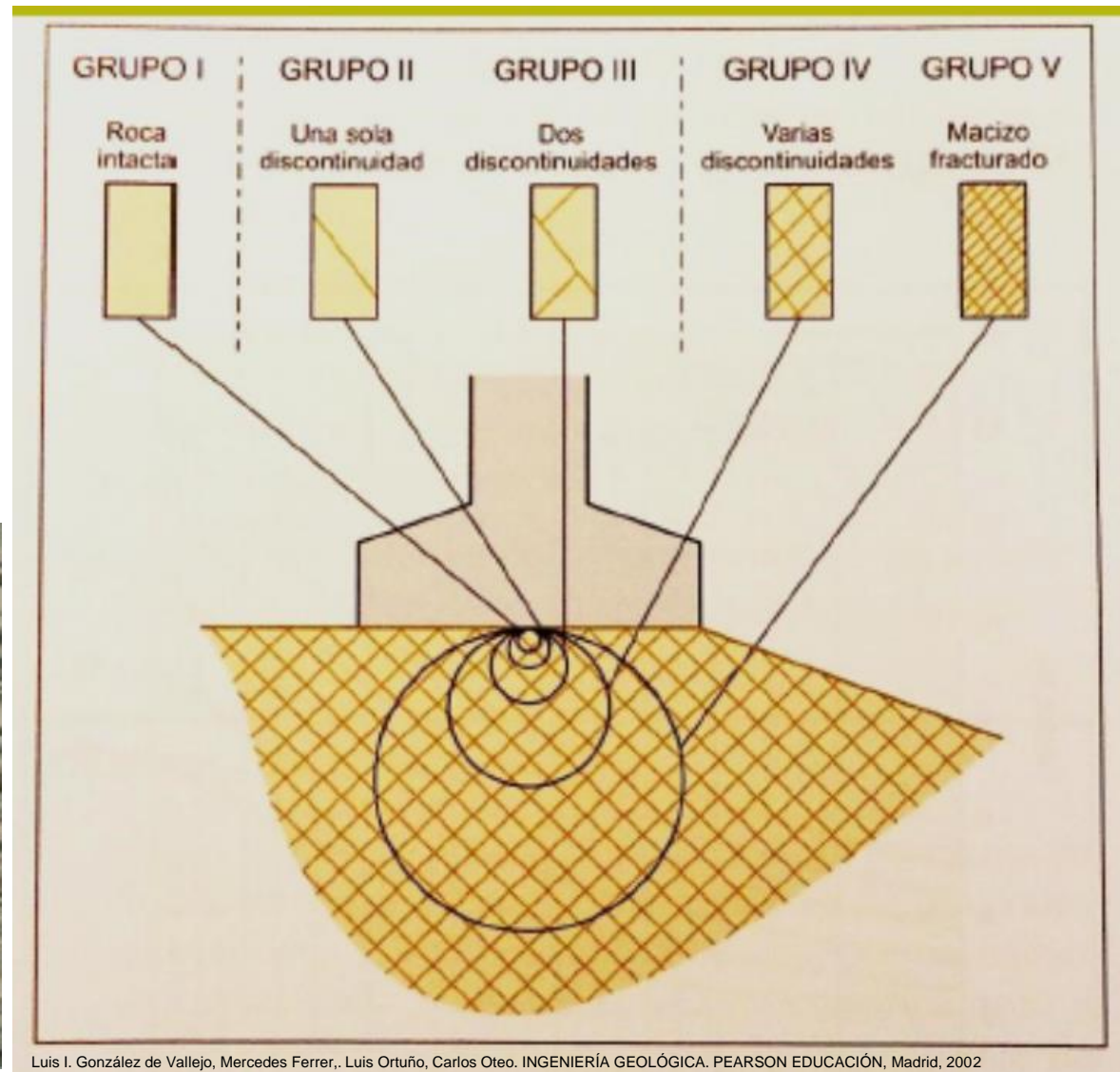
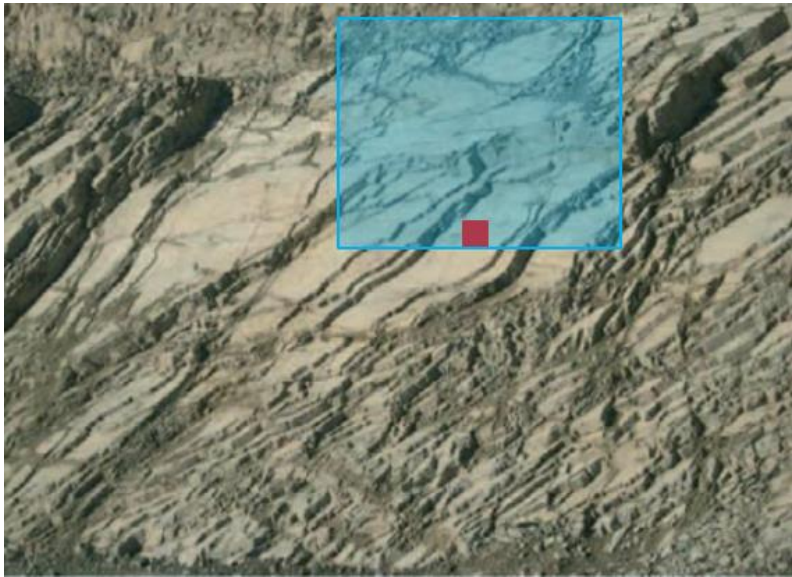
**Propiedades mecánicas**  
controladas por:

- **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  $\leftrightarrow$  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

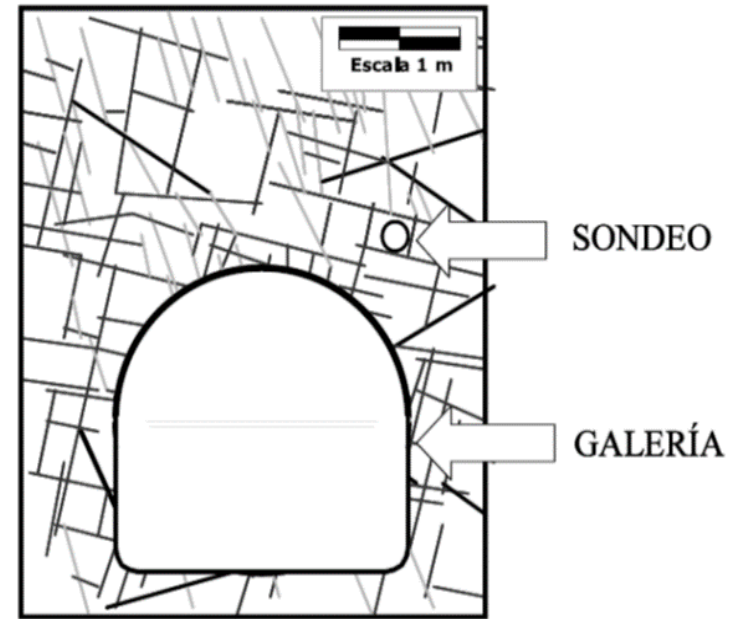
**Grupo IV: Roca matriz + Discontinuidades**

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

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



2 escalas de trabajo: sondeo y galería

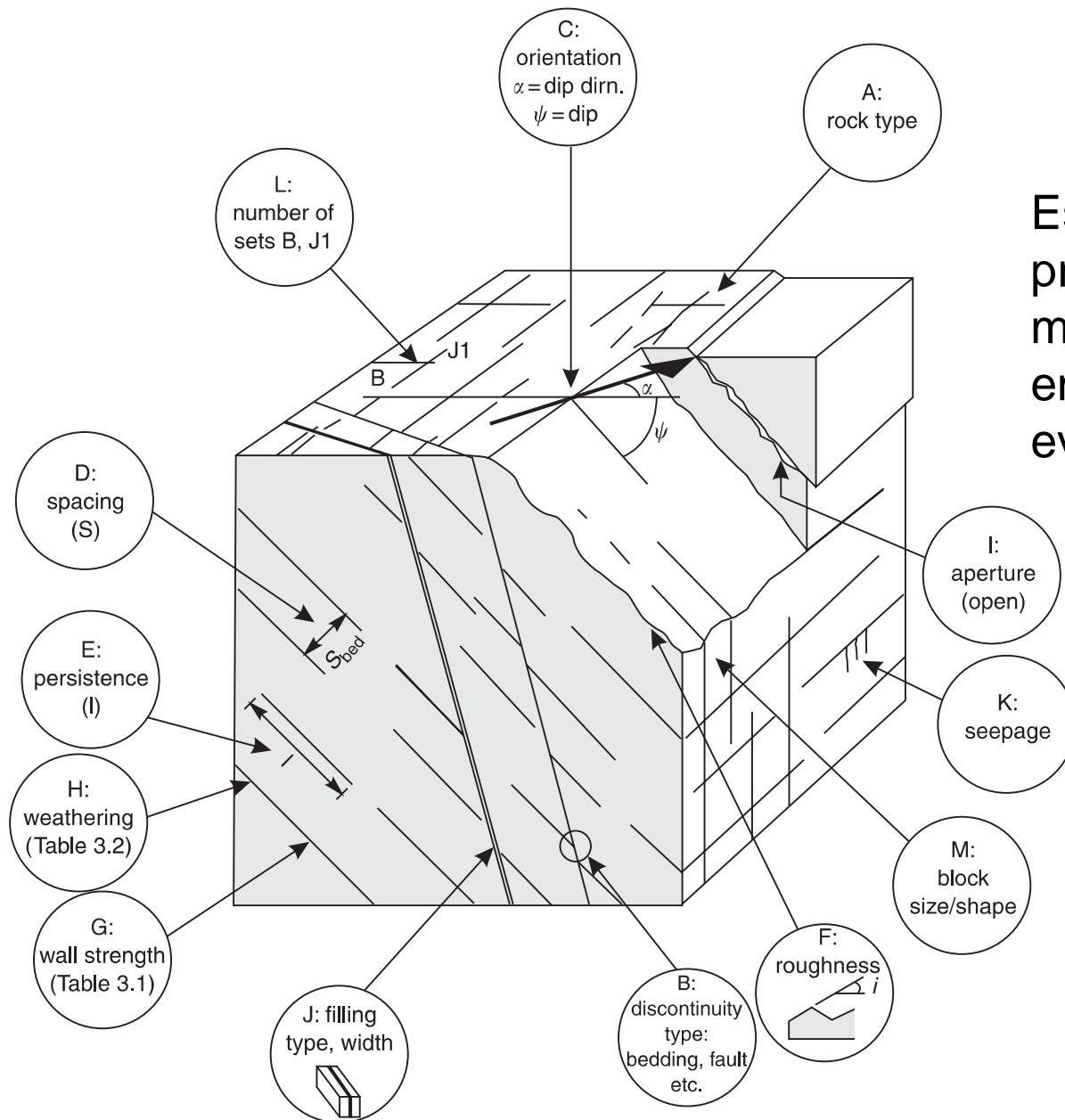


[https://www.researchgate.net/publication/281459332\\_Mecanica\\_de\\_Rocas\\_Fundamentos\\_e\\_Ingenieria\\_de\\_Taludes](https://www.researchgate.net/publication/281459332_Mecanica_de_Rocas_Fundamentos_e_Ingenieria_de_Taludes)



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

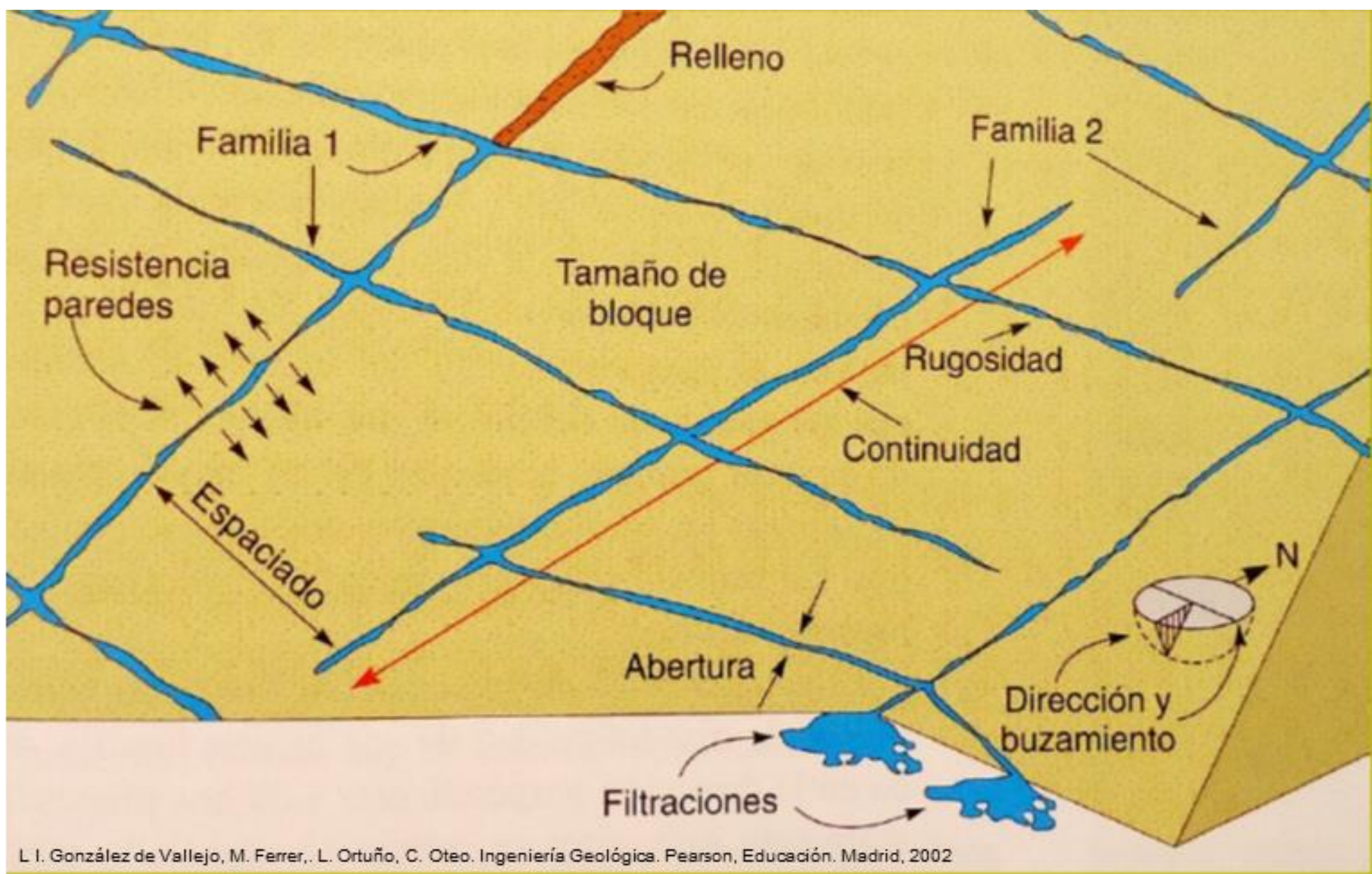
# Variables que controlan el comportamiento mecánico de los MR



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

# Variables que controlan el comportamiento mecánico

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



L I. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo. Ingeniería Geológica. Pearson, Educación. Madrid, 2002

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

# Resistencia de macizos rocosos

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

Medio heterogéneo y anisótropo.

**1) Medir la resistencia de la roca matriz.**

**2) Estudiar las discontinuidades y determinar su resistencia.**



**Estimación de la resistencia del macizo rocoso.**

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

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

- Mecánica de rocas: predecir la resistencia de una roca ante un campo de tensiones, se refiere a la resistencia de pico (ensayos de compresión triaxial).
- Diseño de excavaciones subterráneas en macizos rocosos de rocas competentes.
- **Estimación de la resistencia de macizos rocosos.**
- **Criterio empírico** → estimar la rotura de un medio rocoso a partir de características geotécnicas y geológicas.
- Relación entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  al momento de la rotura.

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

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

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



# Parámetros de Hoek-Brown calibrados para **roca** matriz ( $\sigma_{ci}$ , $m_i$ , $s$ , $a$ )

---

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

$\sigma_{ci}$  : resistencia a la compresión simple de la roca.

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

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

$\sigma_{ci}$  : resistencia a la compresión simple de la roca.

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

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

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

# Resistencia a compresión simple $\sigma_{ci}$

**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.

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

$c_p$ : resistencia de la roca intacta a la tracción.

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

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

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

# Parámetro $m_i$

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

Wyllie D. C & Mah C. W. (2004). Rock Slope Engineering. Civil and mining. 4th Ed., Taylor & Francis e-Library, 2005:

[https://civilengineering.files.wordpress.com/2014/10/rock\\_slope\\_engineering\\_civil\\_and\\_mining.pdf](https://civilengineering.files.wordpress.com/2014/10/rock_slope_engineering_civil_and_mining.pdf)

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

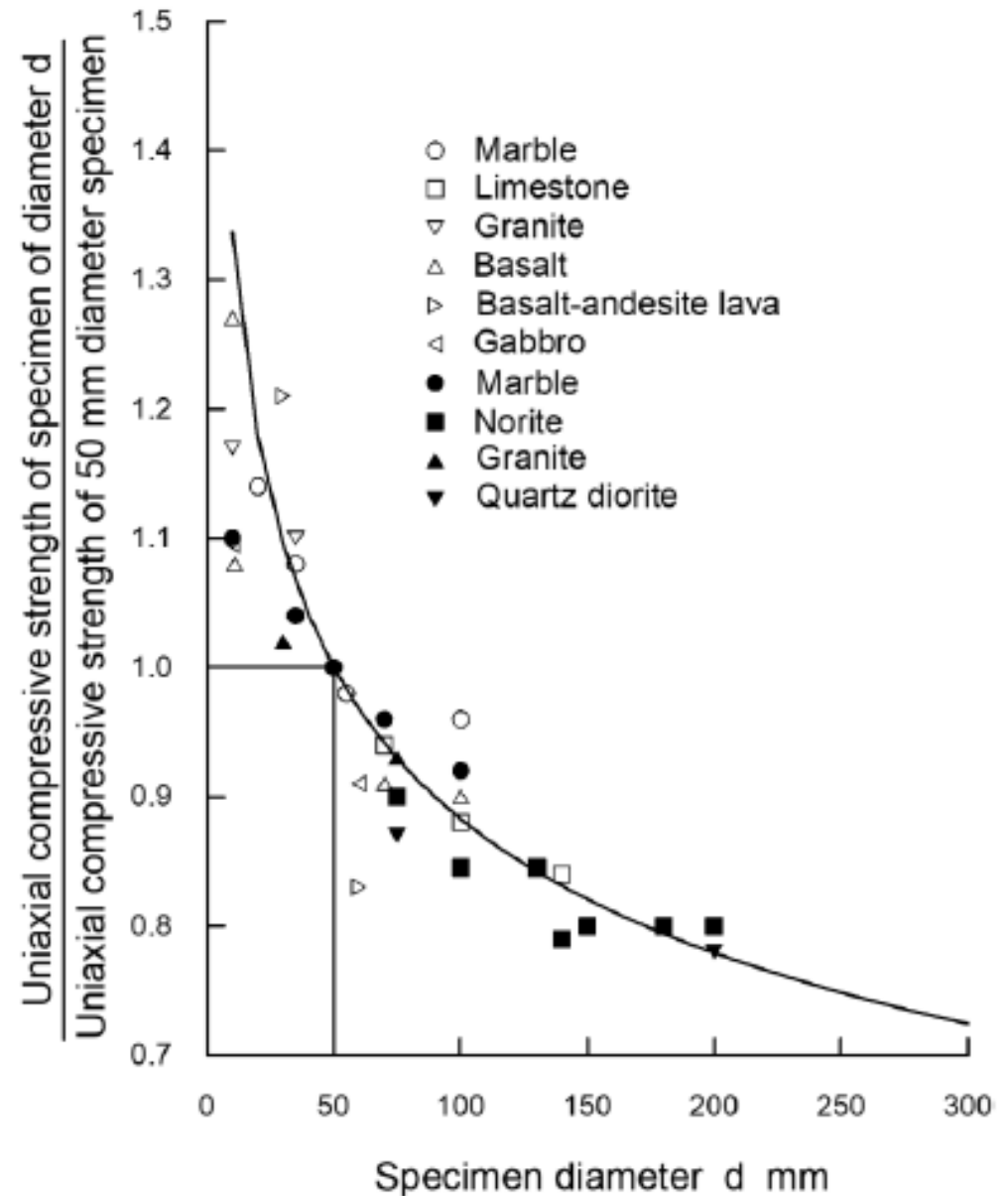
Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21±3) Breccias (19±5)	Sandstones 17±4	Siltstones 7±2 Greywackes (18±3)	Claystones 4±2 Shales (6±2) Marls (7±2)
		Carbonates	Crystalline Limestone (12±3)	Sparitic Limestones (10±2)	Micritic Limestones (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 ( $\sigma_c$ ) 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 ( $\sigma_{cd}$ ) y muestra de 50 mm de diámetro ( $\sigma_{c50}$ ) :

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



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

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

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

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

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

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

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

$\sigma_{ci}$ : determinada sobre muestras inalteradas de roca intacta.

$m_b$  depende de:

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

GSI: índice de resistencia geológica.

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

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

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

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

$\alpha = 0,5$  (valor empírico: 0,48-0,52)



# Factor de alteración (D)


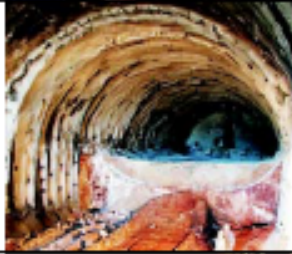

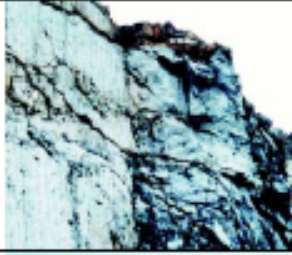

## D: Factor de alteración

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

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

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

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

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo circundante.  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

# Indice *GSI* (Geological Strength Index)

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

---

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

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

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

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

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

[https://www.researchgate.net/publication/282250802\\_Hoek-Brown\\_failure\\_criterion\\_-\\_2002\\_Edition](https://www.researchgate.net/publication/282250802_Hoek-Brown_failure_criterion_-_2002_Edition)

# 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.

CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES

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



	<b>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY)</b> MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SÍ.	<b>FB/MB</b>	<b>FB/B</b>	<b>FB/R</b>	<b>FB/M</b>	<b>FB/MM</b>
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY)</b> 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.	<b>FF/MB</b>	<b>FF/B</b>	<b>FF/R</b>	<b>FF/M</b>	<b>FF/MM</b>
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED)</b> 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.	<b>FP/MB</b>	<b>FP/B</b>	<b>FP/R</b>	<b>FP/M</b>	<b>FP/MM</b>
	<b>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED)</b> MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS	<b>D/MB</b>	<b>D/B</b>	<b>D/R</b>	<b>D/M</b>	<b>D/MM</b>

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

## ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO

EMPEORA LA CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES



DISMINUYE LA TRABAZON DE LOS BLOQUES DE ROCA



	<b>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY)</b> MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TROZOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SÍ.	<b>80</b>
	<b>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY)</b> 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.	<b>70</b>
	<b>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED)</b> 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.	<b>60</b>
	<b>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED)</b> MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO POBREMENTE TRABADO DE BLOQUES Y TROZOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS	<b>50</b>
		<b>40</b>
		<b>30</b>
		<b>20</b>
		<b>10</b>

CONDICION DE LAS DISCONTINUIDADES

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

# Indice GSI

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

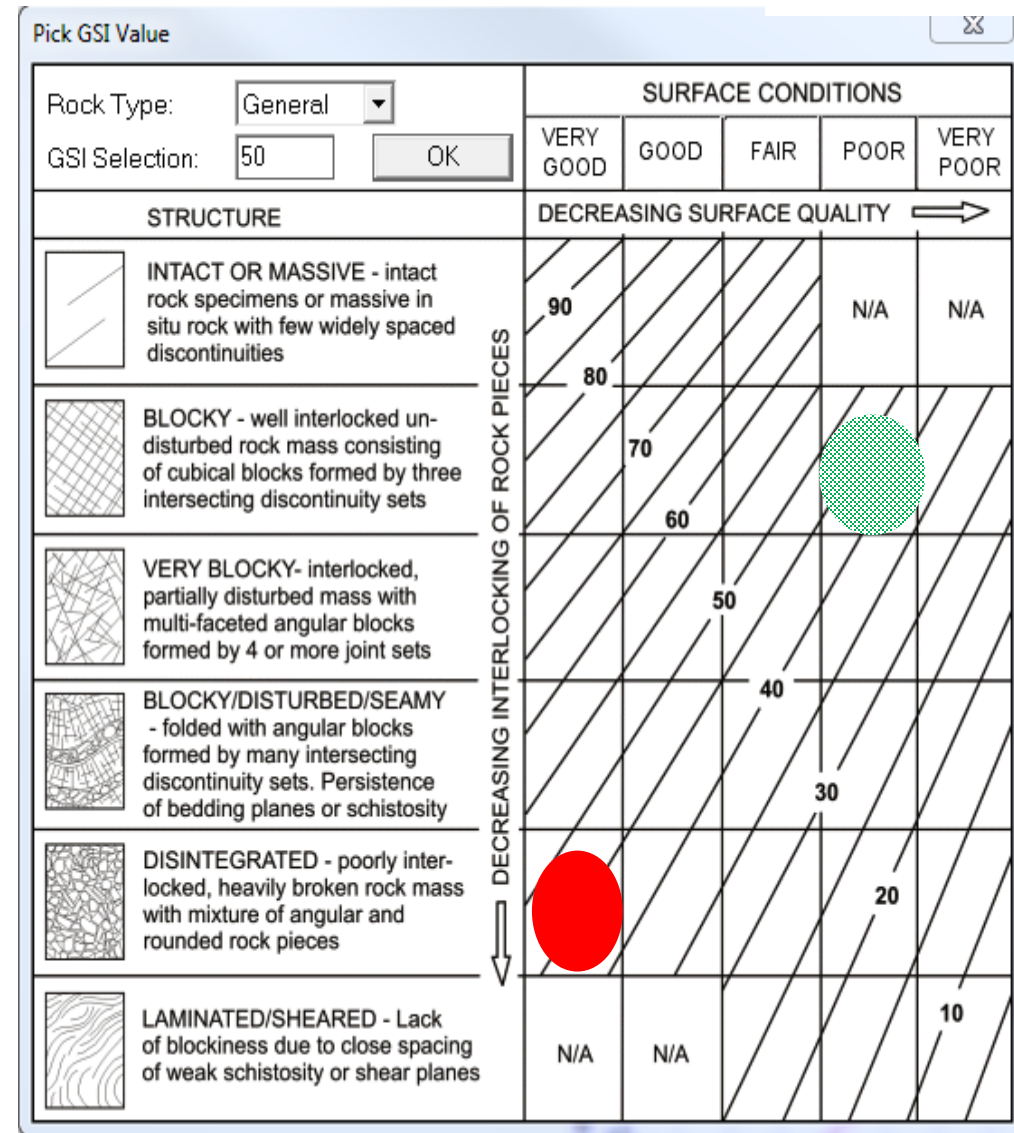
MR1 muy fracturado, desintegrado con paredes de fracturas en muy buen estado (rugosas y limpias): GSI ~ 40-50

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

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

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

Resultados estimativos.



# Roca matriz: ensayos de resistencia

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

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

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

$I_s$ : índice de carga puntual

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

$P$ : carga de rotura (MPa)

$De$ : diámetro equivalente de la muestra (mm)

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



## 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.

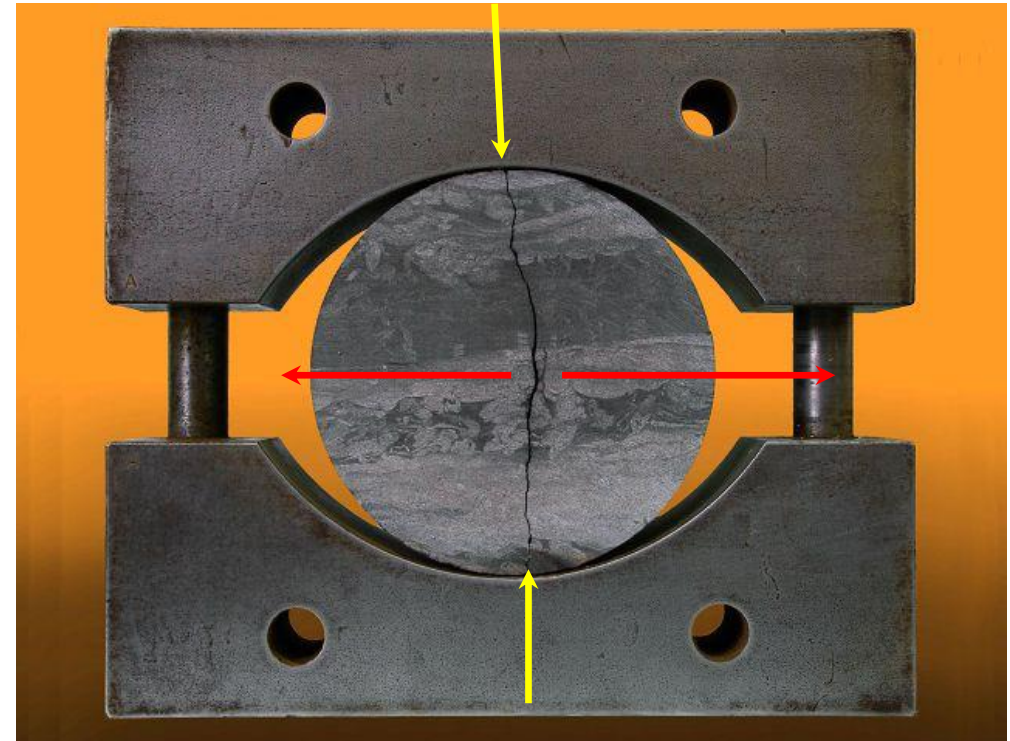
Al momento de la rotura se calcula la resistencia a la tracción:

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

$P$ : carga compresiva de rotura (MPa)

$L$ : espesor del disco

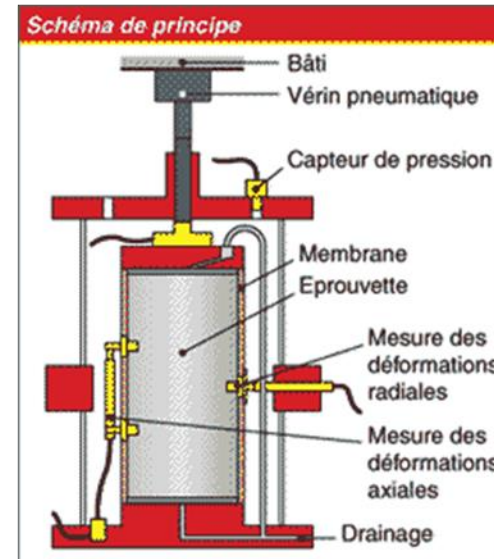
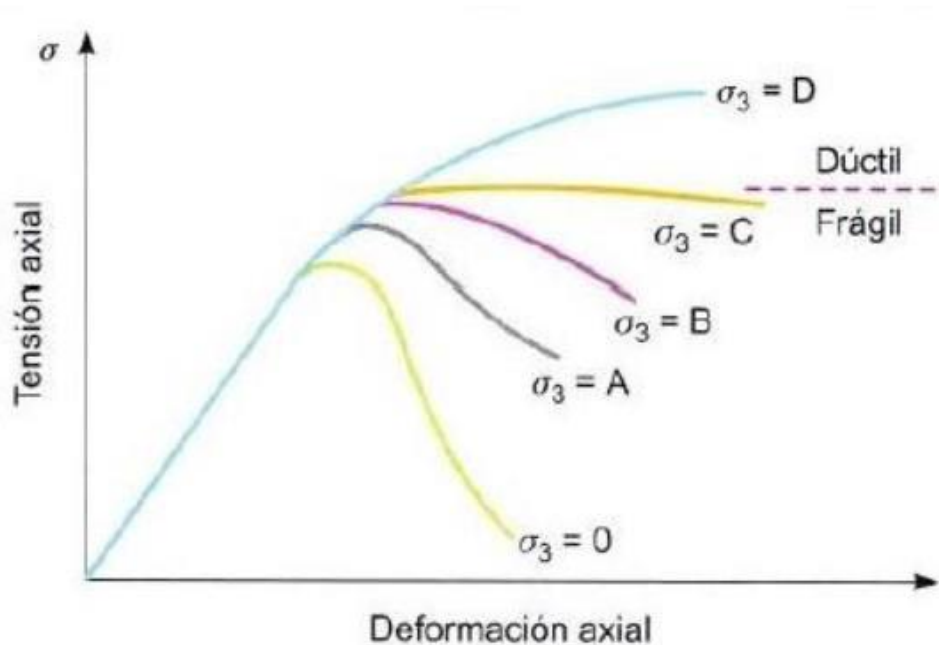
$D$ : diámetro del disco



# 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 ( $\sigma_3$ )
- A mayor  $\sigma_3$  mayor resistencia de pico.
- Transición frágil-dúctil  $\sim \sigma_1 > 3,5 \sigma_3$



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

# Resistencia del macizo rocoso

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

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

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



# Resistencia macizo rocoso

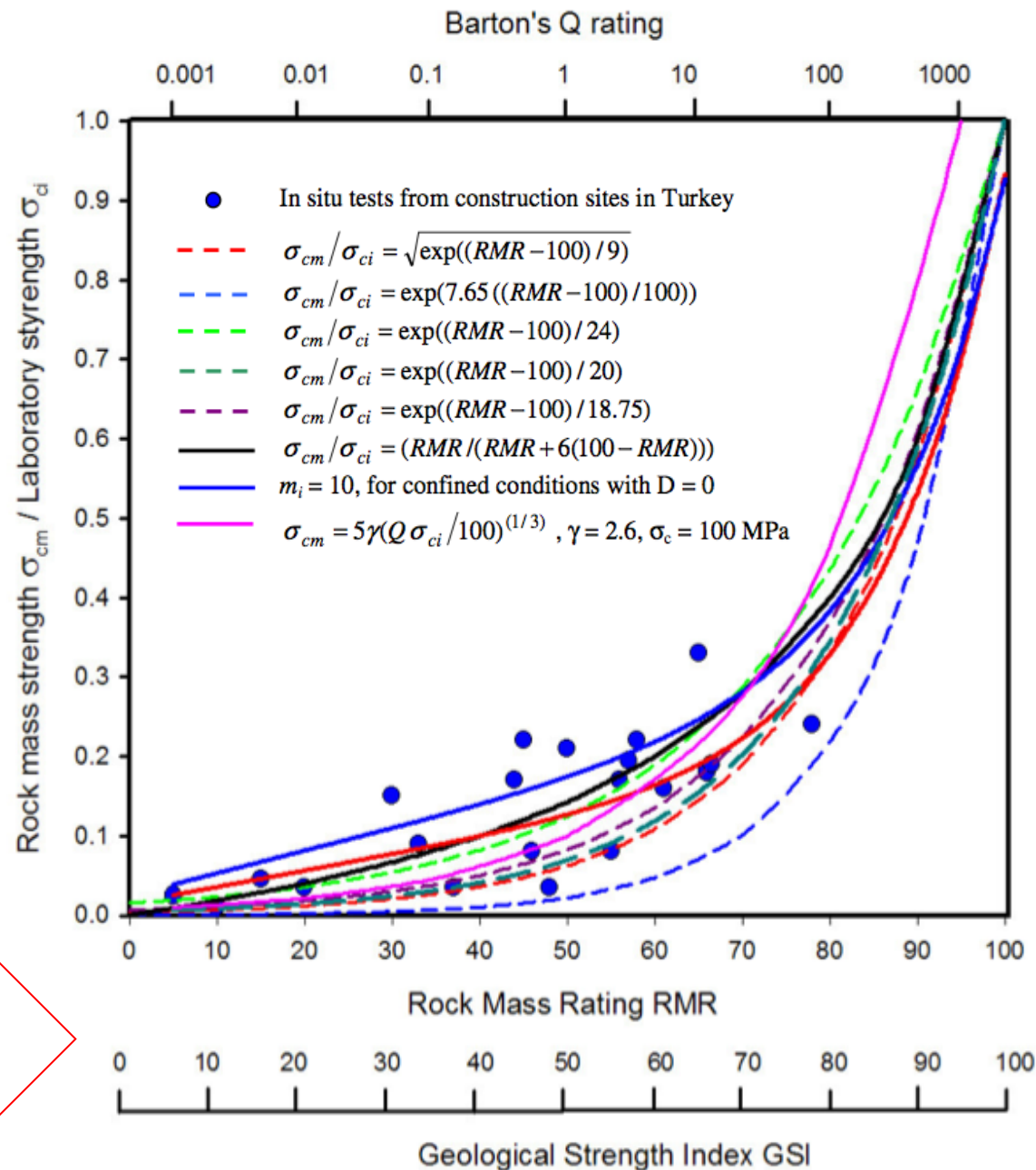
Correlaciones basadas en datos empíricos y modelos → pasar de la escala de la roca matriz (ensayos de laboratorio) a la escala del macizo rocoso.

RMR = 70%

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

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

Indices que caracterizan al macizo



# Deformación de macizos rocosos

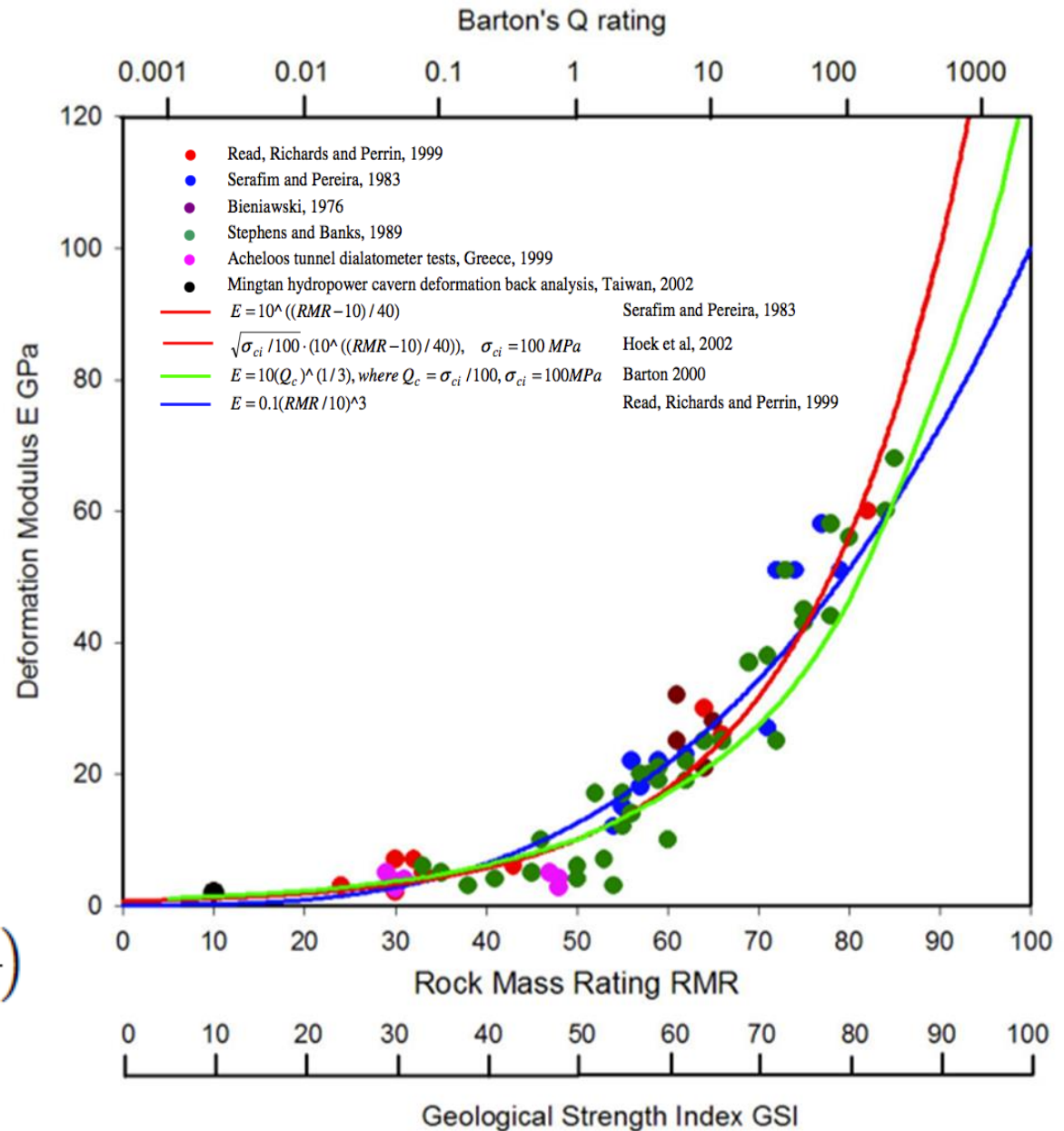
Correlaciones entre los índices de clasificación de macizos rocosos y la deformación del MR a partir de curvas:

- 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/](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.



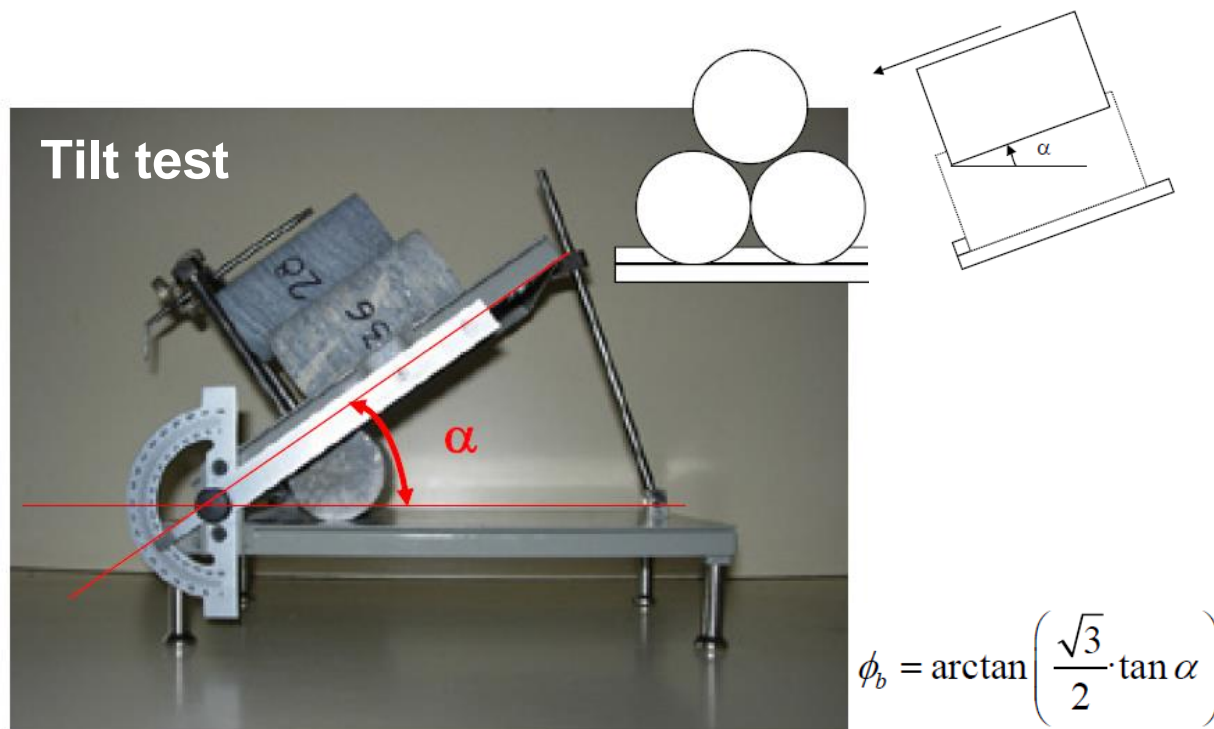
[https://www.researchgate.net/publication/322715550\\_Tema\\_3\\_-\\_Propiedades\\_mecanicas\\_de\\_las\\_discontinuidades](https://www.researchgate.net/publication/322715550_Tema_3_-_Propiedades_mecanicas_de_las_discontinuidades)

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 ( $\phi_b$ ) de la discontinuidad  $\rightarrow$  factor de corrección por rugosidad: ángulo de fricción residual ( $\phi_r$ ). El factor de rugosidad depende de la escala y se obtiene por estimaciones visuales *in situ*.



# Resistencia al corte de discontinuidades ( $\tau$ ).

## 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  $\tau_p \rightarrow$  **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

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

# Sistemas de clasificación de macizos rocosos

- Evaluar las características geomecánicas de los macizos rocosos y realizar una estimación cuantitativa de su calidad → estimación preliminar del comportamiento mecánico.
- Conocimiento del contexto geológico.
- Base empírica.
- Análisis retrospectivos.
- **ASTM D5878-19**  
Standard Guides for Using Rock-Mass Classification Systems for Engineering Purposes.  
<https://www.astm.org/d5878-19.html>

# Indice RQD (Deere, 1967, 1989)

**Parámetro de entrada para otras clasificaciones.**

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



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

R: recuperación porcentual del testigo.

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

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

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

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

Índice del grado de fracturación de un MR.



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

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

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

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

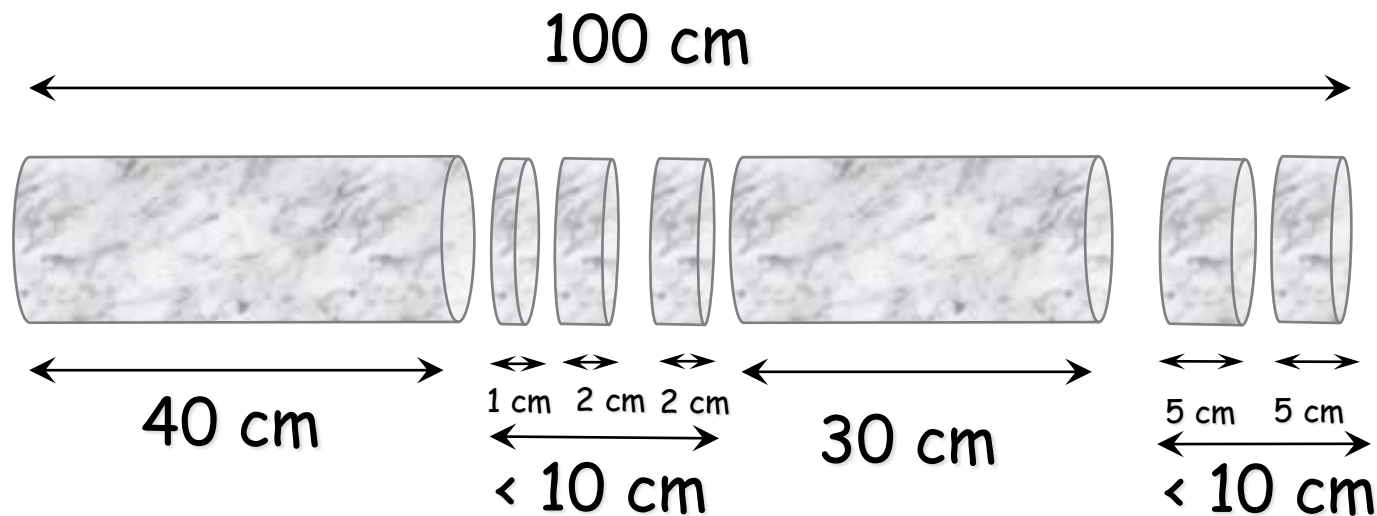
$$R = 0,85 \rightarrow R (\%) = 85\%$$

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

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

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

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



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

Roca Fresca I



Levemente Meteorizada II



Moderadamente Meteorizada III



Muy Meteorizada IV



Completamente Meteorizada V



Suelo Residual VI



[https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/GL5201/1/material\\_docente/bajar?id=391885](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/GL5201/1/material_docente/bajar?id=391885)

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

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

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

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

Fracturas naturales entre fragmentos de roca >10 cm.

Fragmentos de rocas sólidas y duras.

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

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

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

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

# Rock Tunnelling Quality Index (Indice Q)

(Barton, Lien y Lunde, 1974)

Desarrollado para el diseño de túneles en rocas competentes

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

Parámetros considerados:

*RQD* (grado de fracturación del macizo rocoso)

*J<sub>n</sub>* (cantidad de familias)

*J<sub>r</sub>* (rugosidad de paredes)

*J<sub>a</sub>* (alteración de paredes)

*J<sub>w</sub>* (presencia de agua)

Discontinuidades

*SRF* (estado tensional del macizo rocoso ↔ confinamiento)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$J_n$ : índice de familias de discontinuidades

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

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

$J_r$ : índice de rugosidad de las discontinuidades

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

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

DESCRIPCIÓN	$J_a$	$\Psi_r$
* 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.	$J_a$	$\Psi_r$
- 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.	$J_a$	$\Psi_r$
- 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 "

$J_a$ : índice de alteración de las discontinuidades

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



$J_w$ : índice de P de agua en discontinuidades.

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

DESCRIPCIÓN	$J_w$	Presión agua kg/cm <sup>2</sup>
- 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
<p>Los valores presentados con el signo * son sólo valores estimativos. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar <math>J_w</math>.</p> <p>Los problemas causados por la formación de hielo no se consideran.</p>		

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
	$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_t/\sigma_1$	
H	>200	>13	2,5
J	200-10	13-0,66	1,0
K	10-5	0,66-0,33	0,5-2,0
L	5-2,5	0,33-0,16	5-10
M	<2,5	<0,16	10-20
$\sigma_c$ y $\sigma_t$ son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca; $\sigma_1$ es la tensión principal máxima que actúa sobre la roca.			
3. Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.			SRF
N	Presión de flujo suave.		5-10
O	Presión de flujo intensa.		10-20
4. Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.			SRF
P	Presión de expansión suave.		5-10
R	Presión de expansión intensa.		10-20
- Observaciones al SRF:			
i Reducir los valores del SRF en un 25-50% si las zonas de rotura sólo influyen pero no intersectan a la excavación.			
ii En los casos en que la profundidad de la clave del túnel sea inferior a la anchura del mismo, se sugiere aumentar el SRF de 2,5 a 5 (ver H).			
iii Para campos de tensiones muy anisótropos (si se miden) cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ , reducir $\sigma_c$ y $\sigma_t$ a $0,8 \sigma_c$ y $0,8 \sigma_t$ ; cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ , reducir $\sigma_c$ y $\sigma_t$ a $0,2 \sigma_c$ y $0,6 \sigma_t$ , donde $\sigma_3$ es la tensión principal mínima que actúa sobre la roca.			

**SRF:** factor de reducción de esfuerzos

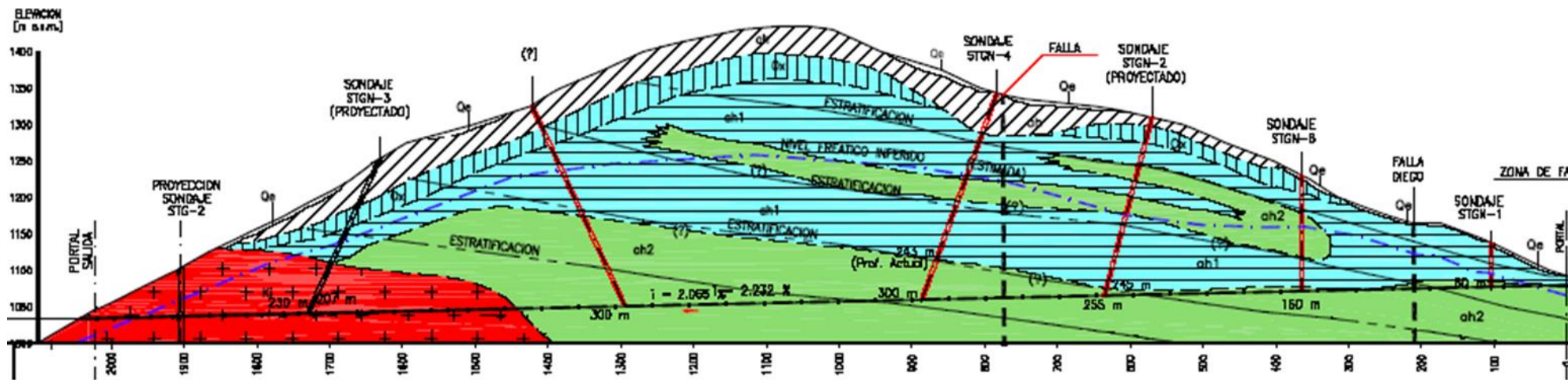
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

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

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

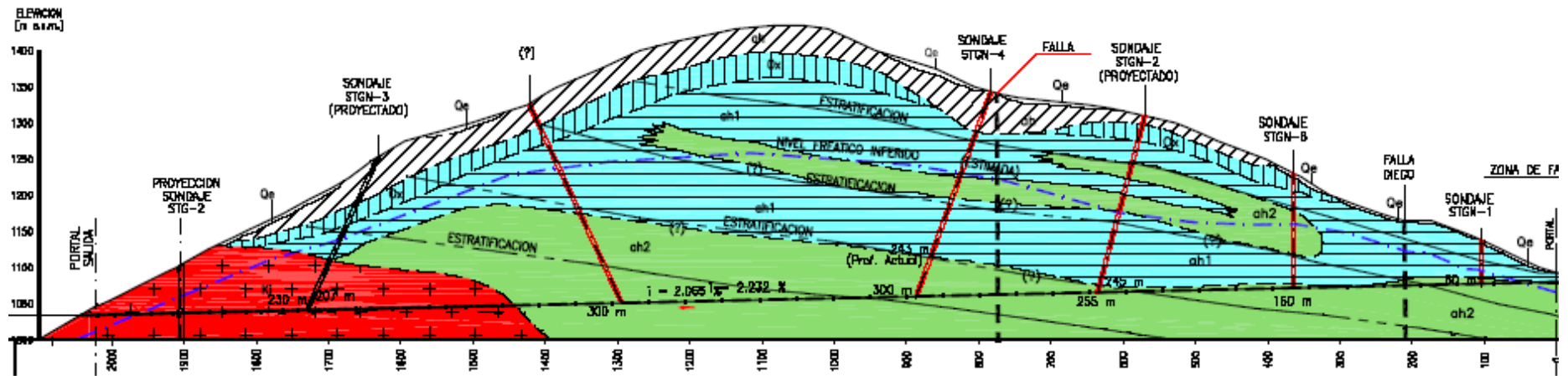
# Indice Q

- Aplicación: diseño y excavación de túneles.
- Basado en datos empíricos  $\leftrightarrow$  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.



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

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

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

# Rock Mass Rating, RMR

(Bieniawski, 1976, 1989)

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

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

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

[https://iem.ca/pdf/resources/Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications\\_%20A%20Complete%20Manual%20for%20Engineers%20and%20Geologists%20in%20Mining,%20Civil,%20and%20Petroleum%20Engineering.pdf](https://iem.ca/pdf/resources/Engineering%20Rock%20Mass%20Classifications_%20A%20Complete%20Manual%20for%20Engineers%20and%20Geologists%20in%20Mining,%20Civil,%20and%20Petroleum%20Engineering.pdf)

# RMR (Bieniawski, 1976, 1989)

**Parámetros de clasificación y valores para RMR** (Arvizu Lara & Dávila Serrano (2014), Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, (2004) Hoek & Brown (1980), en Jiménez López (2020):

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/17315/Material%20did%C3%A1ctica.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 $\sigma$	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](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](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>


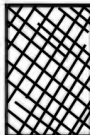




Hoek, E & Carranza-Torres, C. & Corkum, Brent & Hoek, Evert & Carranza-Torres, Carlos. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition:

[https://www.researchgate.net/publication/282250802\\_Hoek-Brown\\_failure\\_criterion\\_-\\_2002\\_Edition](https://www.researchgate.net/publication/282250802_Hoek-Brown_failure_criterion_-_2002_Edition)

# Indice GSI

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

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

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

# Particularidades de los macizos rocosos

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

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

# Bibliografía

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

- P. Marinos, E. Hoek. (2000). GSI – a geologically friendly tool for rock mass strength. Proceedings GeoEng 2000, International conference on geotechnical and geological engineering, Technomic Publishing Co., Melbourne, Australia, Lancaster, PA (2000), pp. 1422-1440.  
<https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/2000-GSI-A-Geologically-Friendly-Tool-for-Rock-Mass-Strength-Estimation.pdf>
- Hoek, E & Carranza-Torres, C. & Corkum, Brent & Hoek, Evert & Carranza-Torres, Carlos. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition:  
[https://www.researchgate.net/publication/282250802\\_Hoek-Brown\\_failure\\_criterion\\_-\\_2002\\_Edition](https://www.researchgate.net/publication/282250802_Hoek-Brown_failure_criterion_-_2002_Edition)
- E. Hoek, E.T. Brown (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 34, Issue 8, 1997, Pages 1165-1186:  
[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Brady B. H. G. & Brown E. (2006). Rock mechanics. For underground mining. 3<sup>rd</sup> Ed., Springer Dordrecht Publ.
- Barton, Nick & Choubey, Vishnu. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. 10. 1-54.  
[https://www.researchgate.net/publication/227011689\\_The\\_shear\\_strength\\_of\\_rock\\_joints\\_in\\_theory\\_and\\_practice](https://www.researchgate.net/publication/227011689_The_shear_strength_of_rock_joints_in_theory_and_practice)
- Nick Barton (2013). Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 5, Issue 4, 2013: 249-261  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775513000449>

**International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering:**

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

**Rock Mass Website, Geology Applied in Rock Construction:**

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

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

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

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

**Espacio Bieniawski. Geocontrol:**

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