

C12 Geología y Geotecnia

1º Semestre 2020



Universidad
Nacional
de Rosario

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Nacional de Rosario

Geomecánica de minerales y rocas

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Hoek, E. (2000). *Practical rock engineering*.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*.

Fraga & Polare. Presentaciones de la cátedra de Geología y Geotecnia (2018)

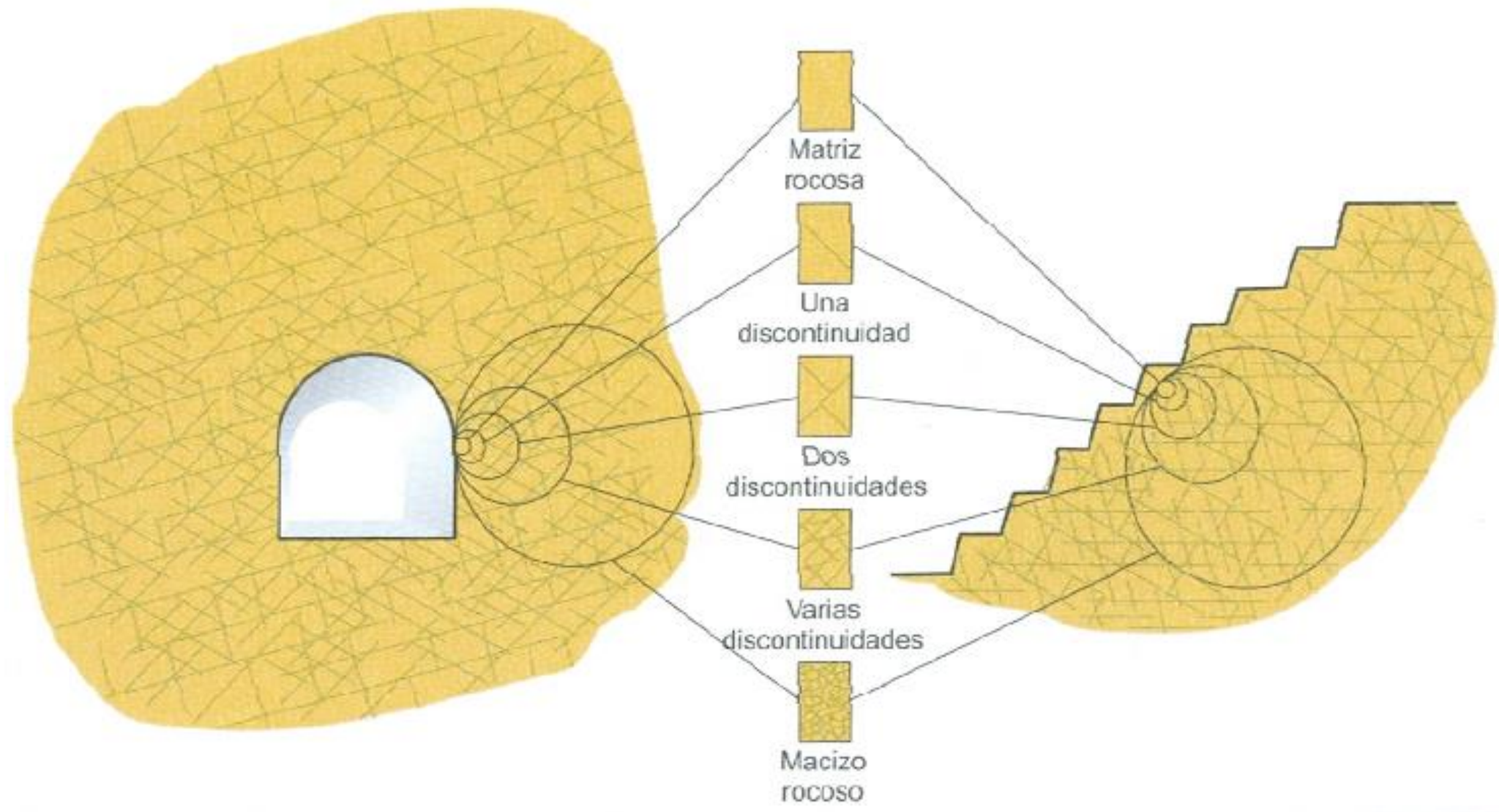
Ms. Ing. Nicolás G. Bolcatto

1º Semestre 2020

Índice

- **Roca matriz vs. macizo rocoso**
- **Caracterización de la roca matriz**
 - Clasificación y propiedades físicas
 - Resistencia a la compresión simple (σ_c)
 - Resistencia a la tracción (σ_t)
 - Resistencia a la compresión triaxial
 - Deformabilidad y velocidad de propagación de ondas sínicas
- **Caracterización del macizo rocoso**
 - Clasificaciones geomecánicas
 - Índice de calidad RQD (Rock Quality Designation)
 - Clasificación RMR (Rock Mass Rating)
 - Índice GSI (Geological Strength Index)
 - Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso

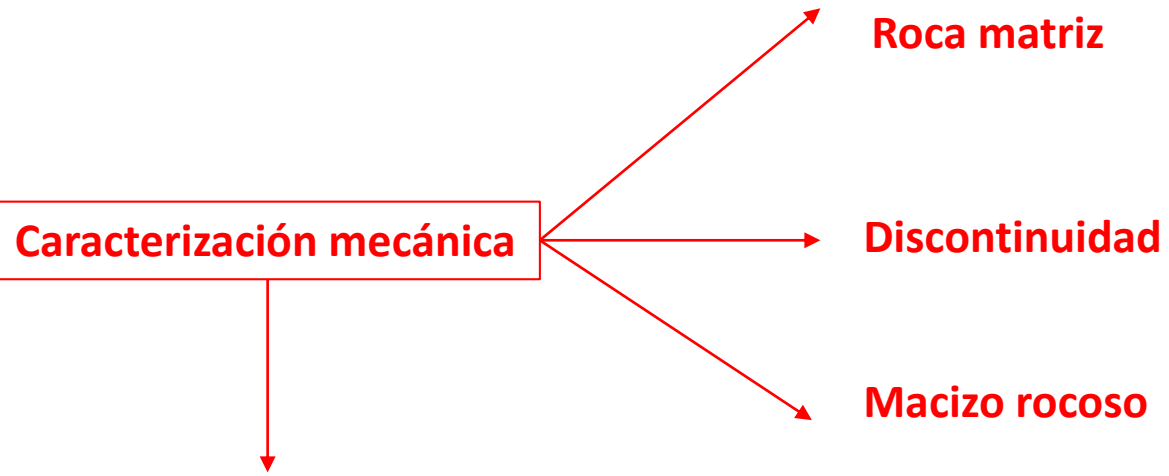
Roca matriz vs. Macizo rocoso



Roca matriz vs. Macizo rocoso

Definiciones

- **Roca matriz:** material rocoso exento de discontinuidades. Se puede entender como el bloque de roca intacta que queda ubicado entre dos o más discontinuidades.
- **Discontinuidad:** plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de roca matriz.
- **Macizo rocoso:** conjunto de los bloques de matriz rocosa y discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso.



Peso unitario

Resistencia

Rigidez o deformabilidad

Resistencia al corte entre los planos de discontinuidad

Resistencia y deformabilidad del conjunto roca matriz + discontinuidades

- Estructuras geológicas no discontinuas (ej. pliegues)
- Tensiones in situ
- Condiciones hidrogeológicas y geoambientales

Roca matriz vs. Macizo rocoso

Roca matriz (Roca intacta) → Propiedades físicas →

- Composición mineralógica
- Peso unitario
- Fábrica (arreglo de minerales)
- Porosidad
- Permeabilidad
- Alterabilidad
- Dureza

Las propiedades medidas sobre muestras de roca intacta reflejan el comportamiento de la roca matriz, NO del macizo rocoso!

Resultan de la génesis e historia geológica experimentada

Controlan las propiedades mecánicas (resistencia y deformación)

Macizo rocoso → Propiedades físicas →

- Resultan de la génesis e historia geológica experimentada +
- Discontinuidades
- Estado tensional in situ
- Hidrogeología
- Factores geoambientales

Propiedades de la roca matriz

Clasificación y propiedades físicas

| | Propiedades | Métodos de determinación |
|--|---|--|
| Propiedades de identificación y clasificación | Composición mineralógica. Fábrica y textura. Tamaño de grano. Color. | Descripción visual. Microscopía óptica y electrónica. Difracción de rayos X. |
| | Porosidad (n). | Técnicas de laboratorio. |
| | Peso específico (γ). | |
| | Contenido en humedad. | |
| | Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad, k). | Ensayo de permeabilidad. |
| | Durabilidad. Alterabilidad (índice de alterabilidad). | Ensayos de alterabilidad. |

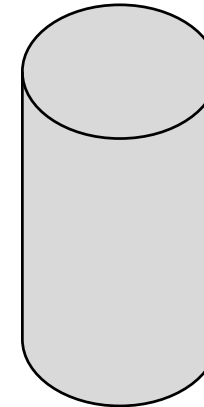
Propiedades de la roca matriz

Clasificación y propiedades físicas

Geomecánica de minerales y rocas

| Roca | Peso específico (g/cm ³) | 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 |

Peso específico



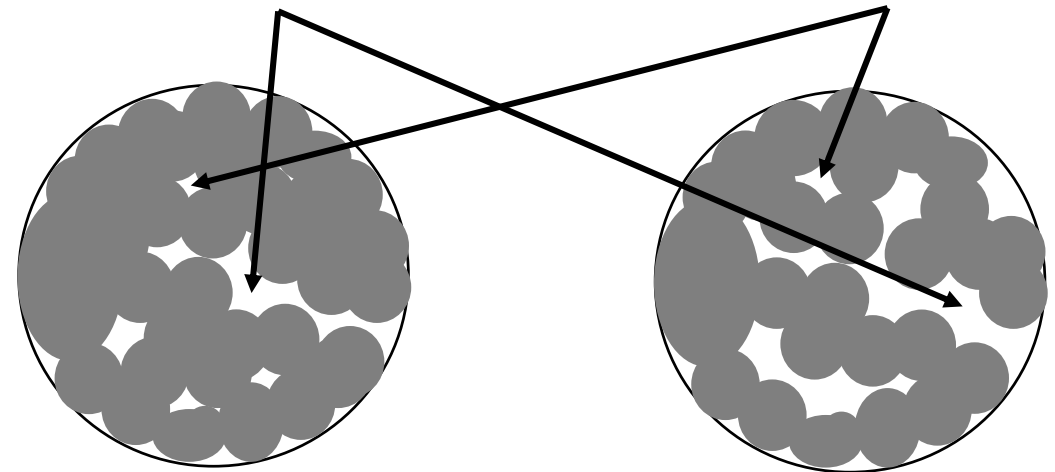
$$\gamma = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}}$$

Porosidad

$$n = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}}$$

Poros interconectados

Poros incomunicados



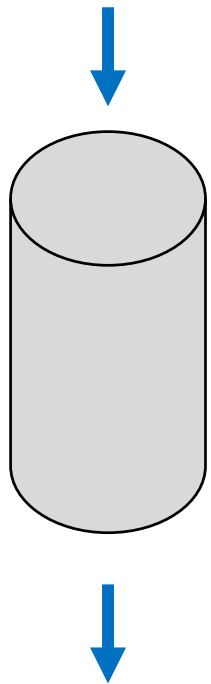
Baja porosidad

Alta porosidad

Propiedades de la roca matriz

Clasificación y propiedades físicas

Permeabilidad



$$Q = V \times A$$

Caudal (m³/s)

Área de escurrimiento (m²)

Velocidad (m/s)

- Permeabilidad primaria: debido a la porosidad de la roca matriz
- <<
- Permeabilidad secundaria: debido a la presencia de discontinuidades

La permeabilidad secundaria suele ser la que gobierna el flujo de agua en un macizo rocoso, ya que la permeabilidad primaria suele ser mucho menor

- Por esta razón es más común medir la permeabilidad “in situ” sobre el macizo rocoso y no en laboratorio sobre muestras de roca intacta

Propiedades de la roca matriz

Clasificación y propiedades físicas

Durabilidad



Resistencia que presenta la roca matriz frente a los procesos de desagregación y alteración



Equip Aimil Ltd

Slake Durability Test (Franklin & Chandra, 1972)

| Categoría de Durabilidad | % retenido tras un ciclo de 10 minutos | % retenido tras dos ciclos de 10 minutos |
|--------------------------|--|--|
| Extremadamente alta | > 99 | > 98 |
| Muy alta | 98 – 99 | 95 – 98 |
| Media – alta | 95 – 98 | 85 – 95 |
| Media | 85 – 95 | 60 – 85 |
| Baja | 60 – 85 | 30 – 60 |
| Muy baja | < 60 | < 30 |

$$I_d (\%) = \frac{W_{sec\ 0}}{W_{inicial}} \times 100$$

Propiedades de la roca matriz

Clasificación y propiedades físicas

Abrasividad



| TIPO DE ROCA | Porcentaje de % SiO ₂ |
|------------------------------|----------------------------------|
| Arenisca silicea | 98 |
| Otras areniscas | 80 — 95 |
| Arcosas | 70 — 80 |
| Granito | 70 |
| Grauwaca, granodiorita | 60 — 70 |
| Pizarra, sienita | 50 — 65 |
| Basalto, gabro | 50 |
| Arcilla | 40 |
| Caliza, dolomia | 2 — 10 |

| COEFICIENTE DE DESGASTE F (Kp/cm.) | ROZABILIDAD | |
|------------------------------------|--------------|-------------------|
| | CALIFICACION | m ³ /h |
| 0,2 — 0,3 | Muy buena | 45 — 65 |
| 0,3 — 0,4 | Buena | 30 — 45 |
| 0,4 — 0,5 | Moderada | 20 — 30 |
| 0,5 — 0,6 | Regular | 15 — 20 |
| 0,6 — 0,8 | Malá | 10 — 15 |
| 0,8 — 1,0 | Muy mala | 6 — 10 |

$$F = \frac{Q \cdot \Phi_m \cdot \tau}{100}$$

Coficiente de
abrasividad

Q = Porcentaje de cuarzo (%)

Φ_m = Diámetro del grano de cuarzo (cm)

τ = Resistencia a tracción (kg/cm²)

Propiedades de la roca matriz

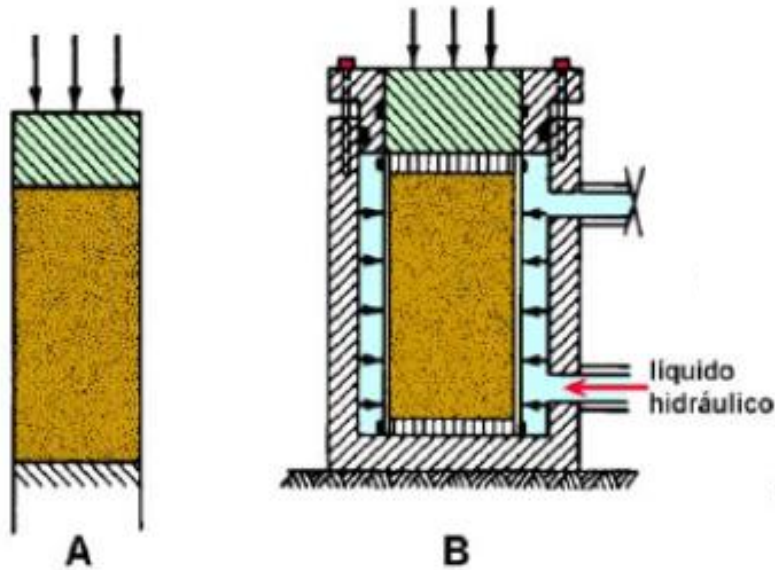
Propiedades mecánicas

| | Propiedades | Métodos de determinación |
|-----------------------|---|---|
| Propiedades mecánicas | Resistencia a compresión simple (σ_c). | Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt. |
| | Resistencia a tracción (σ). | Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta. |
| | Velocidad de ondas sísmicas (V_p , V_s). | Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio. |
| | Resistencia (parámetros c y ϕ). | Ensayo de compresión triaxial. |
| | Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos o dinámicos: E , ν). | Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de velocidad sísmica. |

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Ensayos de laboratorio

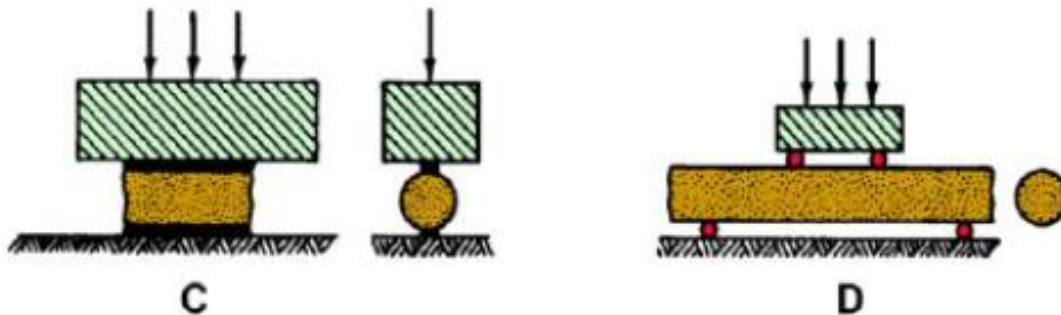


A – Ensayo de compresión uniaxial (o simple)

B – Ensayo de compresión triaxial

C – Ensayo de tracción por compresión diametral (brasileño)

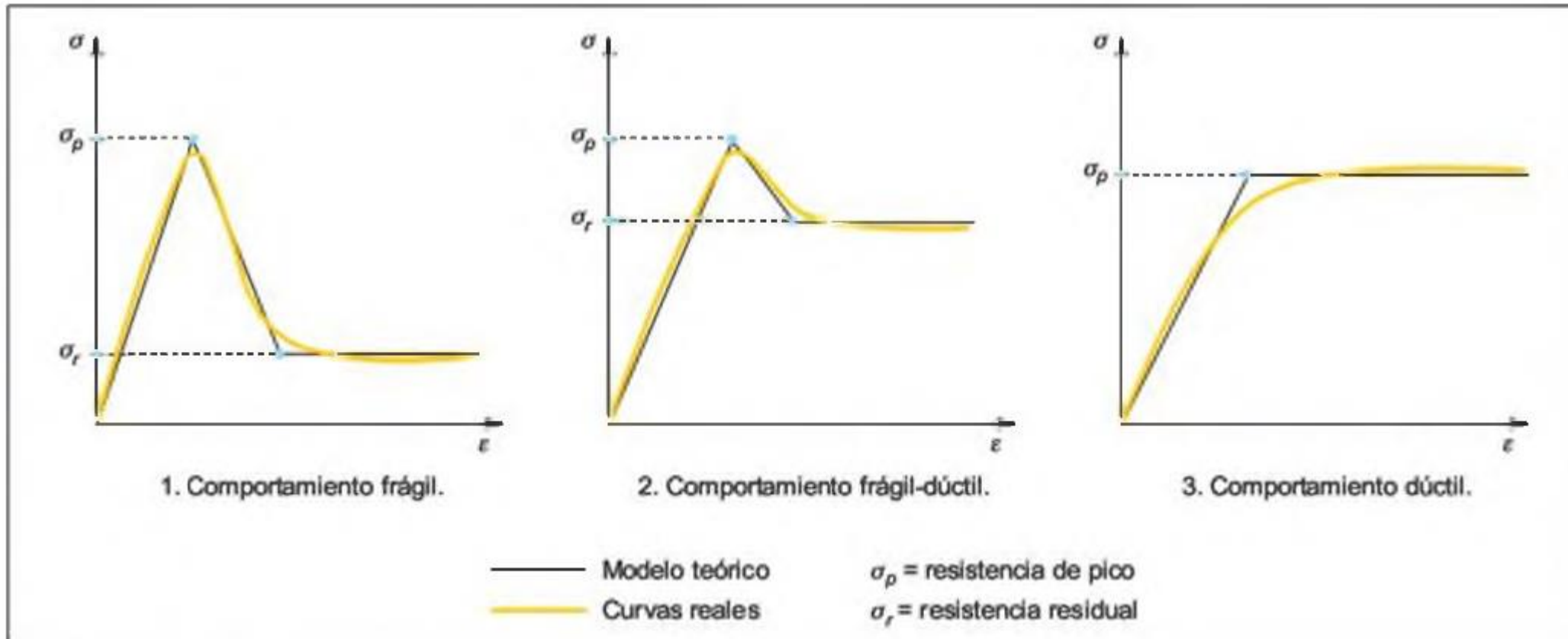
D – Ensayo de flexión



Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión simple (uniaxial)



Compresión uniaxial



$$\sigma_1 = \frac{F}{A}$$

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Resistencia la compresión simple (uniaxial)

Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple

| Resistencia a la compresión simple (MPa) | ISRM (1981) | Geological Society of London (1970) | Bienlawski (1973) | Ejemplos |
|--|---------------------|-------------------------------------|-------------------|---|
| < 1 | Suelos | | | |
| 1-5 | Muy blanda | Blanda > 1,25 | Muy baja | Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón. |
| 5-12,5 | Blanda | Moderadamente blanda | | |
| 12,5-25 | | Moderadamente dura | | |
| 25-50 | Moderadamente dura | | Baja | Esquisto, pizarra. |
| 50-100 | Dura | Dura | Media | Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa. |
| 100-200 | Muy dura | Muy dura | Alta | Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía. |
| > 200 | | Extremadamente dura | Muy alta | Cuarcita, gabro, basalto. |
| > 250 | Extremadamente dura | | | |



Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Resistencia la compresión simple (uniaxial)

| Clase | Descripción | Resistencia a compresión simple | |
|-------|----------------------|---------------------------------|--------------------|
| | | MPa | kg/cm ² |
| A | Resistencia muy alta | > 225 | > 2250 |
| B | Resistencia alta | 112 - 225 | 1120 - 2250 |
| C | Resistencia media | 56 - 112 | 560 - 1120 |
| D | Resistencia baja | 28 - 56 | 280 - 560 |
| E | Resistencia muy baja | < 28 | < 280 |

Compresión uniaxial



Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión simple (uniaxial)

| Roca sana | Resistencia a compresión simple (kp/cm ²) | | Resistencia a la tracción (kp/cm ²) |
|------------|---|------------------|---|
| | Valores medios | Rango de valores | |
| Andesita | 2.100-3.200 | 1.000-5.000 | 70 |
| Anfibolita | 2.800 | 2.100-5.300 | 230 |
| Anhidrita | 900 | 800-1.300 | 60-120 |
| Arenisca | 550-1.400 | 300-2.350 | 50-200 |
| Basalto | 800-2.000 | 600-3.500 | 50-250 |
| Caliza | 600-1.400 | 500-2.000 | 40-300 |
| Cuarcita | 2.000-3.200 | 1.000-5.000 | 100-300 |
| Diabasa | 2.400-3.500 | 1.300-3.650 | 550 |
| Diorita | 1.800-2.450 | 1.200-3.350 | 80-300 |
| Dolerita | 2.000-3.000 | 1.000-3.500 | 150-350 |
| Dolomía | 600-2.000 | 500-3.500 | 50-250 |
| Esquistos | 300-600 | 200-1.600 | 20-55 |

| Roca sana | Resistencia a compresión simple (kp/cm ²) | | Resistencia a la tracción (kp/cm ²) |
|-----------|---|------------------|---|
| | Valores medios | Rango de valores | |
| Gabro | 2.100-2.800 | 1.800-3.000 | 140-300 |
| Gneiss | 600-2.000 | 500-2.500 | 50-200 |
| Granito | 700-2.000 | 500-3.000 | 70-250 |
| Grauvaca | 1.000-1.500 | 800-2.200 | 55-150 |
| Limolita | | 350-2.500 | 27 |
| Lutita | 200-400 | 100-900 | 15-100 |
| Marga | 300-700 | 200-900 | 5-10* |
| Mármol | 1.200-2.000 | 600-2.500 | 65-200 |
| Pizarra | 400-1.500 | 300-2.000 | 70-200 |
| Sal | 120 | 50-300 | |
| Toba | | 100-460 | 10-40 |
| Yeso | 250 | 100-400 | 10-25 |

Compresión uniaxial



$$1 \text{ kp/cm}^2 = 0,1 \text{ MPa}$$

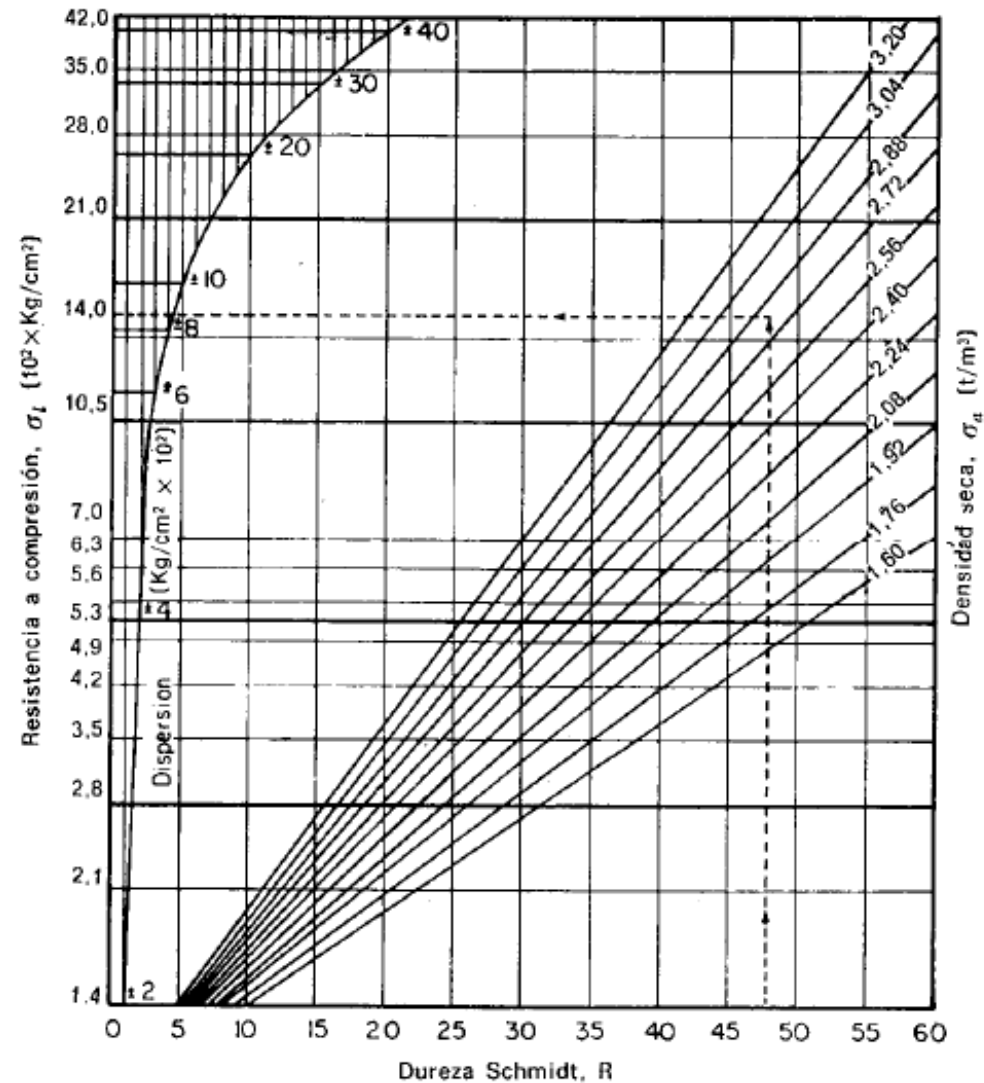
(*) A favor de superficies de laminación.
Datos seleccionados a partir de Rahn (1986), Waltham (1999), Obert y Duvall (1967), Farmer (1968).

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Resistencia la compresión simple (uniaxial)

Martillo Schmidt



Compresión uniaxial



Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión simple (uniaxial)

Martillo de geólogo

Compresión uniaxial

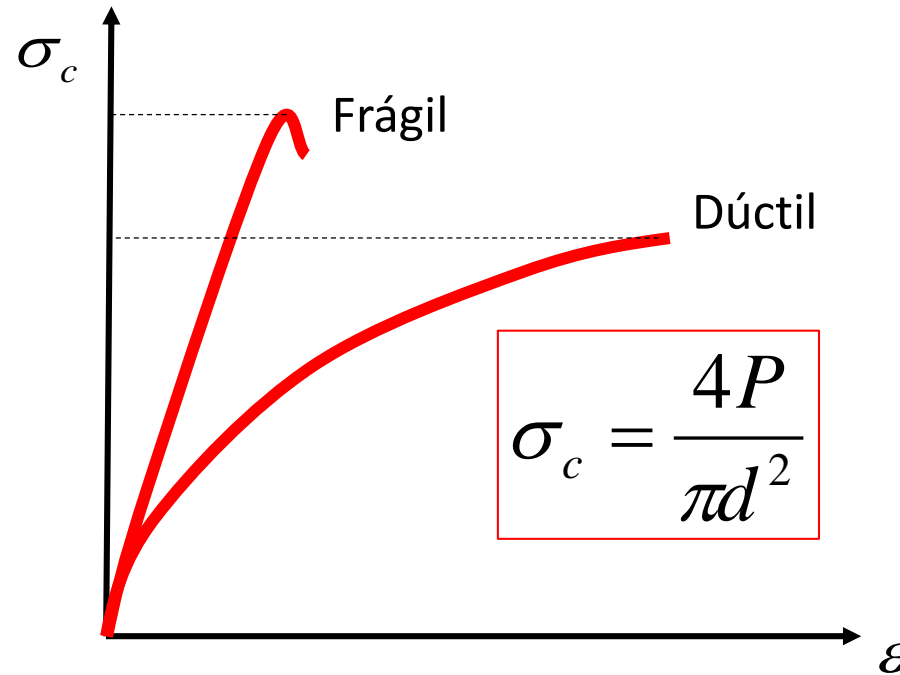
| Categoría | Clasificación | Descripción | Resistencia (MPa) |
|-----------|-----------------------|--|-------------------|
| R0 | Extremadamente blanda | Se hunde bajo la presión del pulgar | 0,25 - 1 |
| R1 | Muy blanda | Se desmorona con rasgado mediante la punta de martillo geológico. Se puede descascarar con un cuchillo | 1 - 5 |
| R2 | Blanda | Se producen marcas con la punta de martillo geológico. Se descascara con dificultad con un cuchillo | 5 - 25 |
| R3 | Medianamente dura | Se fractura con un golpe firme de martillo geológico. No se puede descascarar con un cuchillo | 25 - 50 |
| R4 | Dura | Se requiere más de un golpe firme de martillo geológico para fracturarla | 50 - 100 |
| R5 | Muy dura | Se requieren varios golpes firmes de martillo geológico para fracturarla | 100 - 250 |
| R6 | Extremadamente dura | Solo se pueden producir pequeñas indentaciones con martillo geológico | > 250 |



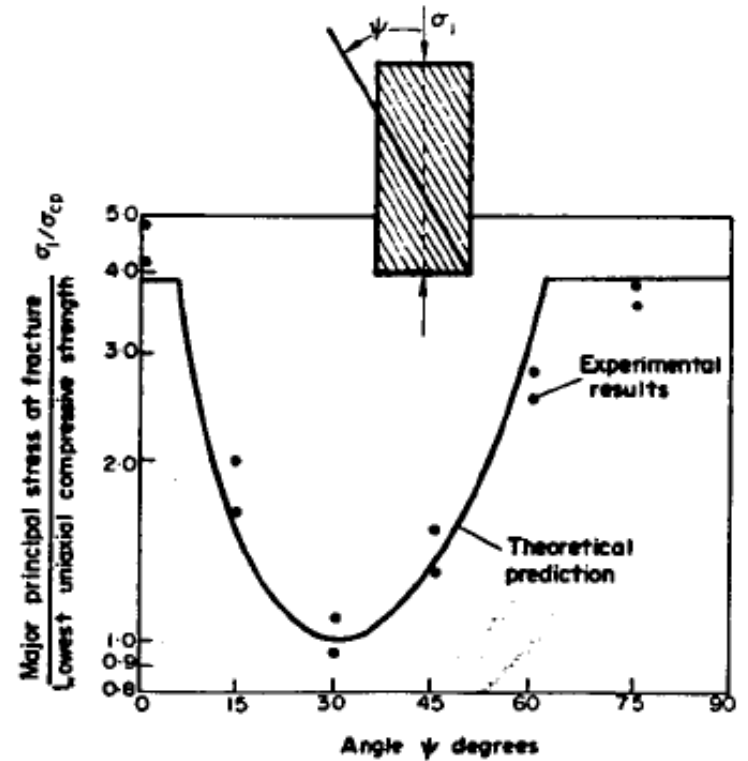
Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Ensayo de compresión uniaxial (o simple)



Se puede medir la deformación vertical mediante galgas extensométricas (strain gages)

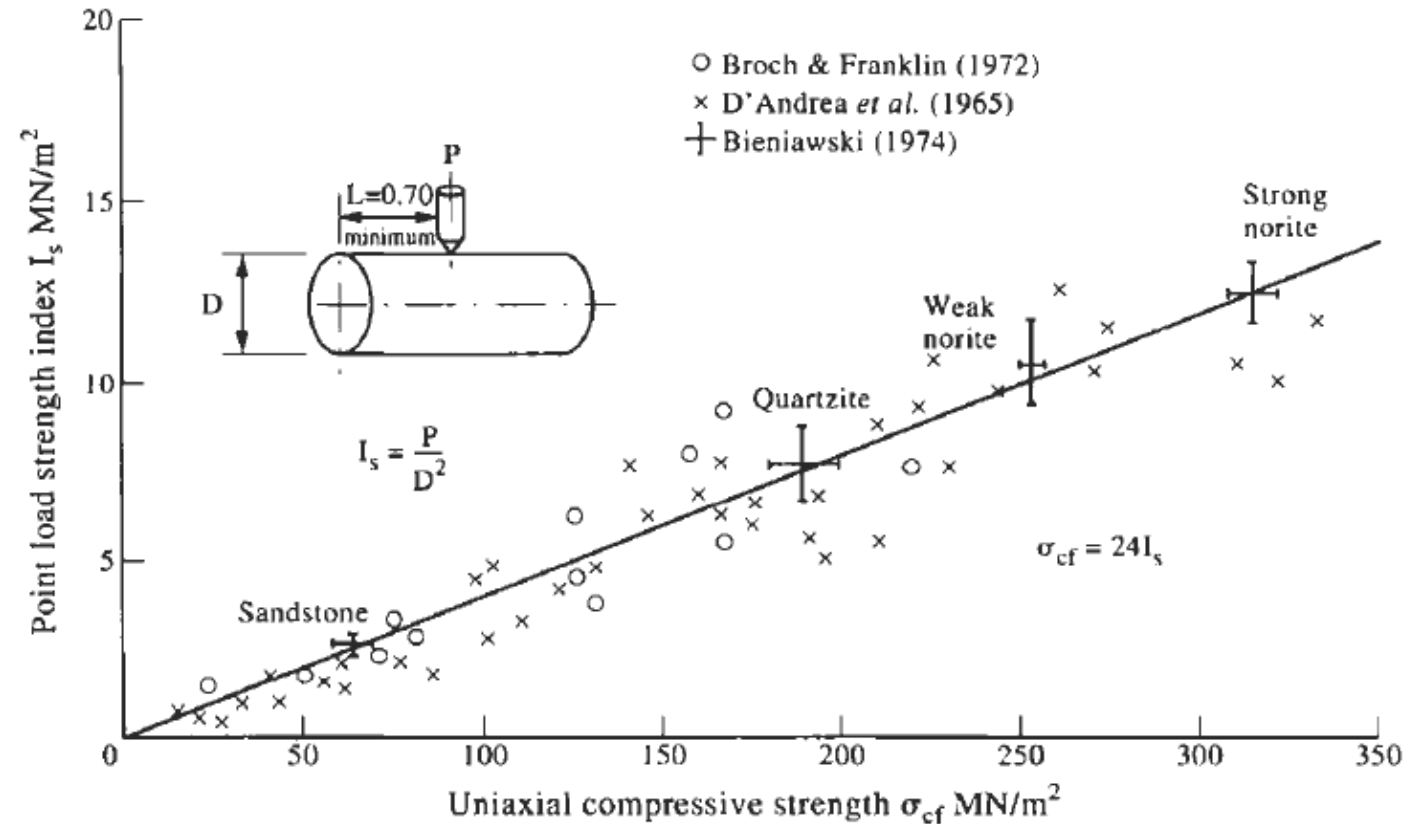
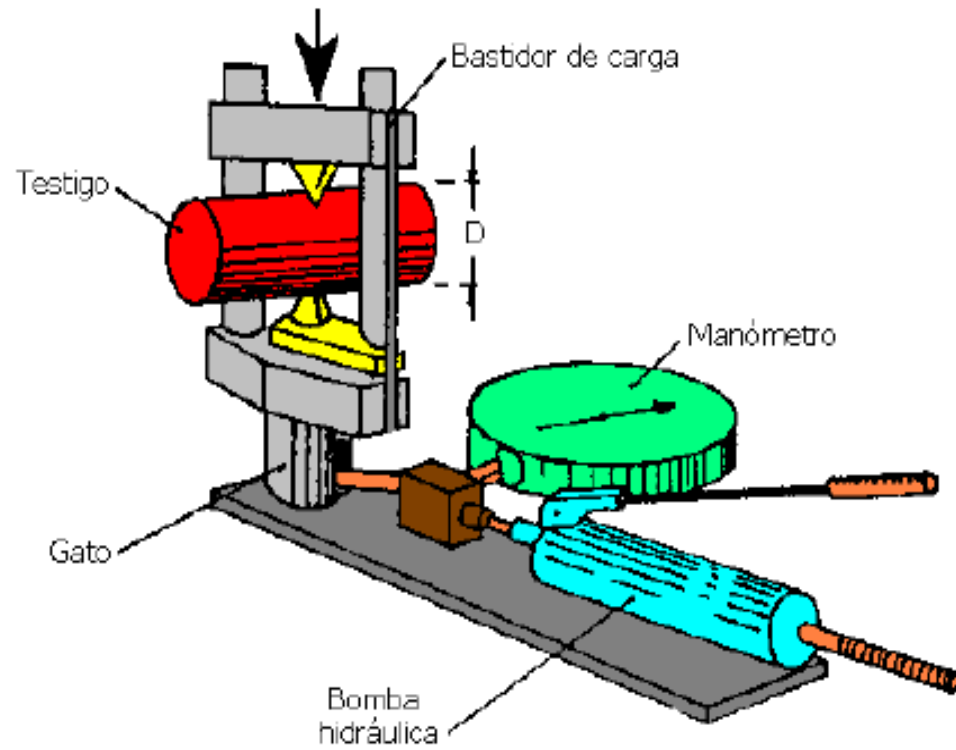


Ojo! Rocas foliadas

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Ensayo de carga puntual (Point Load Test)



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

I_s : Índice de carga puntual
 P : carga aplicada
 D : diámetro de la probeta

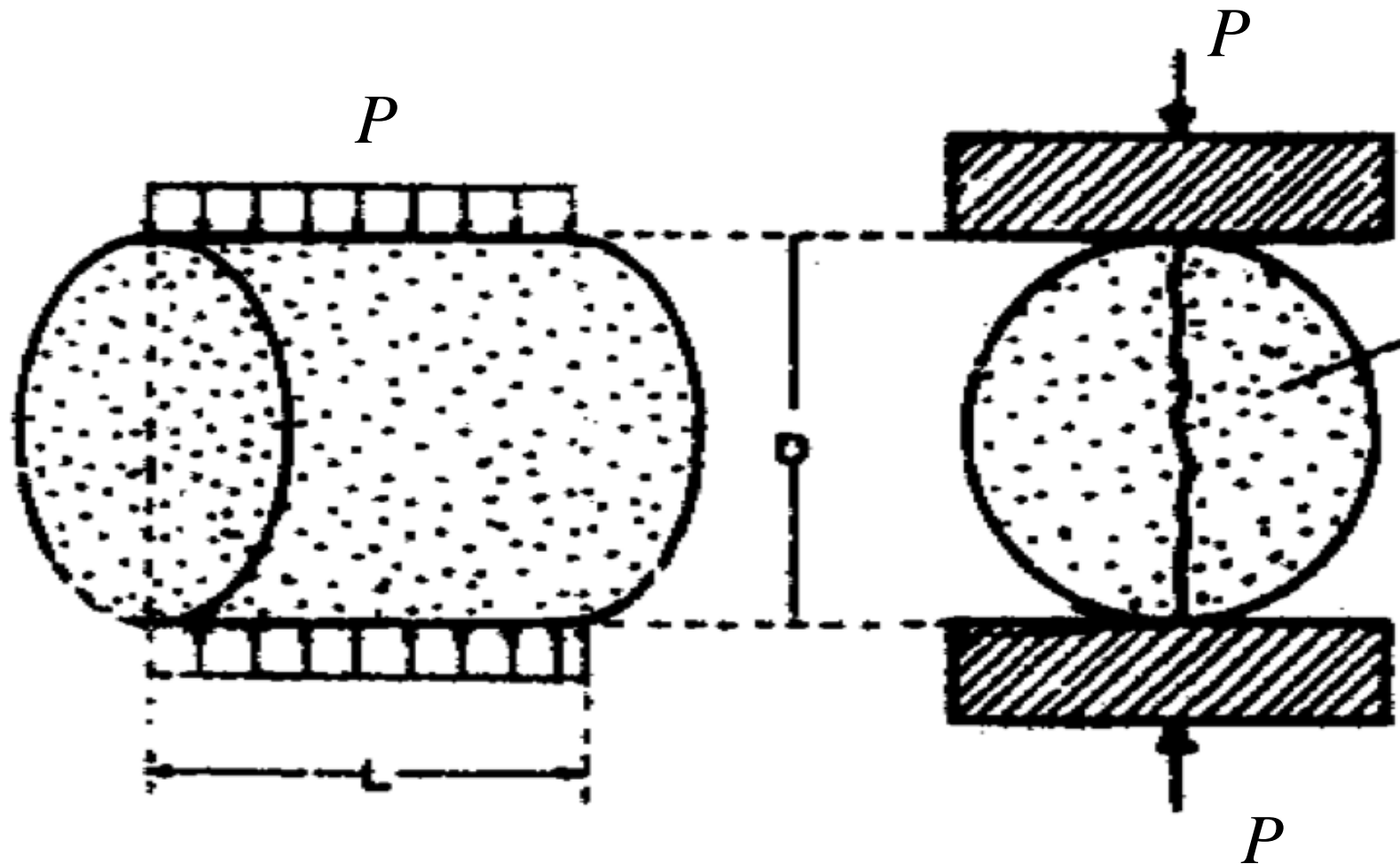
**Correlaciones
 (muchísima dispersión)**

- Broch & Franklin (1972): $\sigma_c = 24I_s$
- Brook (1993): $T_0 = 1,5I_s$

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Ensayo de tracción por compresión diametral

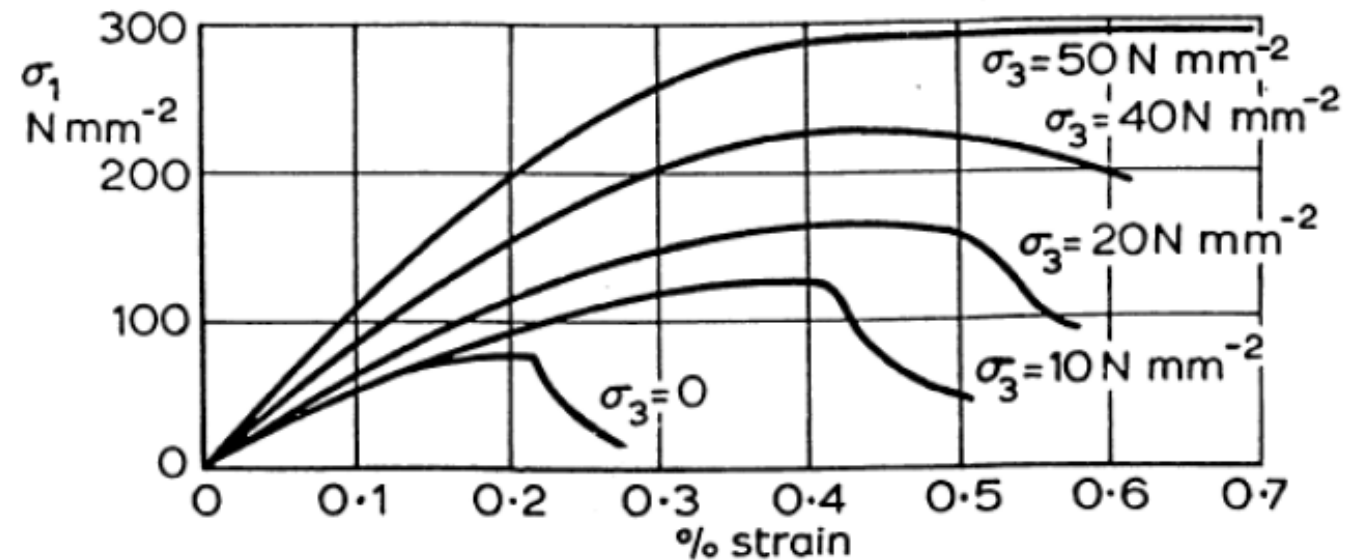
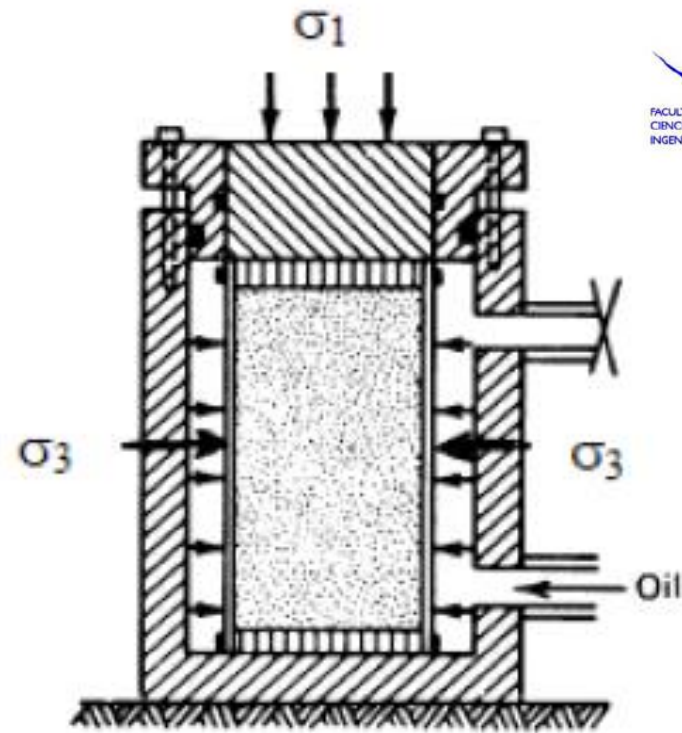
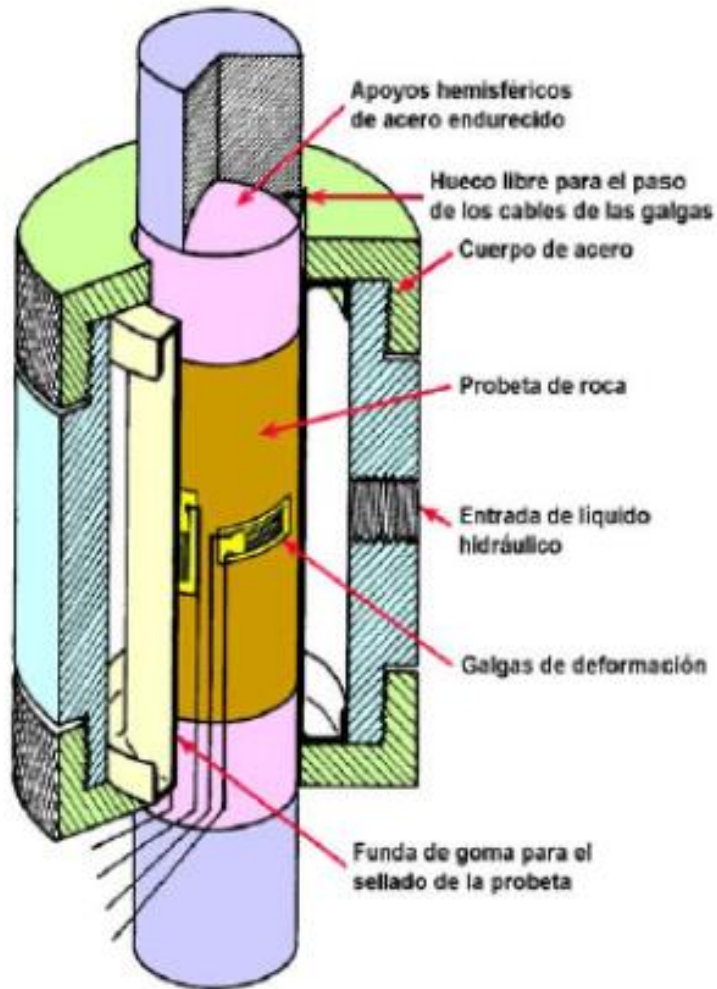


$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

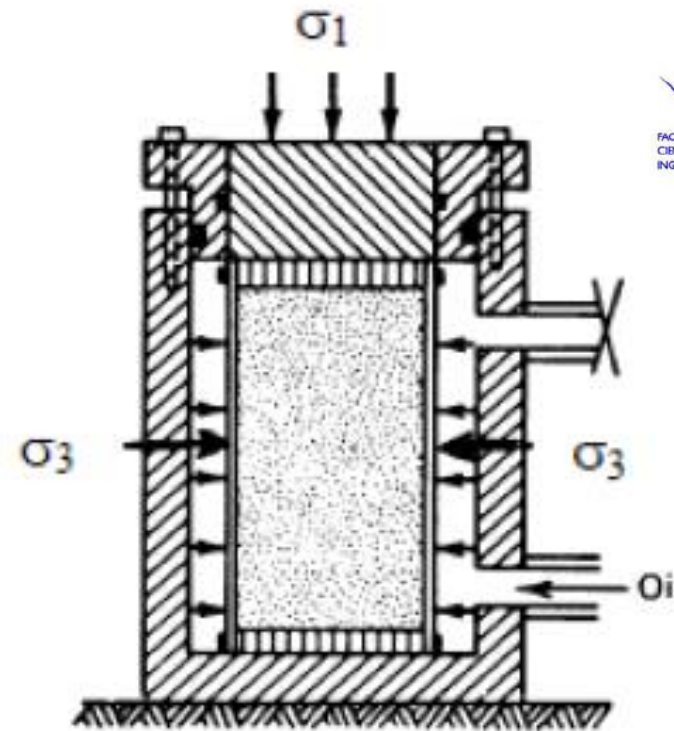
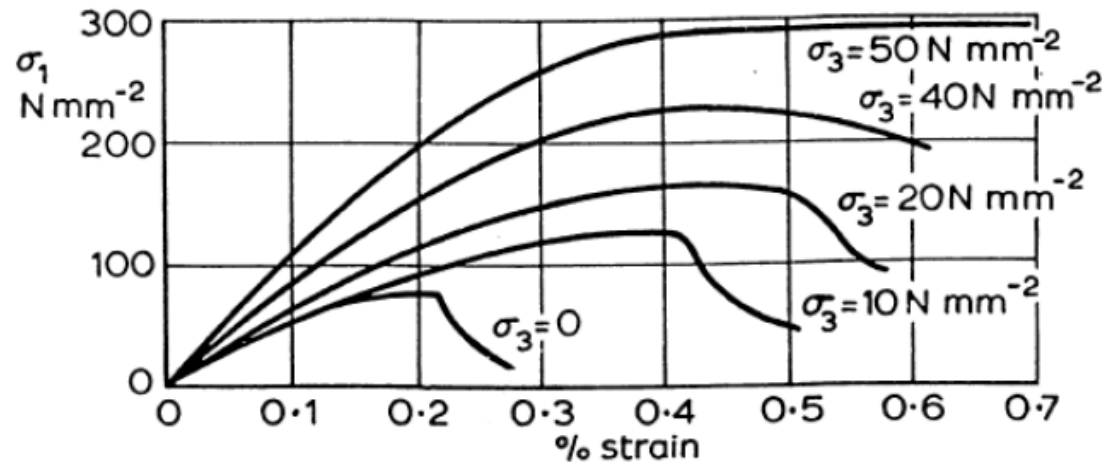
Ensayo triaxial



Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Ensayo triaxial



$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1}$$

Modelo de Hoek - Brown

(para roca intacta)

(m_i)

| | | | | | |
|-----------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| Agglomerate | 19 ± 3 | Dolomites | 9 ± 3 | Peridotite | 25 ± 5 |
| Amphibolites | 26 ± 6 | Gabbro | 27 ± 3 | Phyllites | 7 ± 3 |
| Andesite | 25 ± 5 | Gneiss | 28 ± 5 | Porphyries | 20 ± 5 |
| Anhydrite | 12 ± 2 | Granite | 32 ± 3 | Quartzites | 20 ± 3 |
| Basalt | 25 ± 5 | Granodiorite | 29 ± 3 | Rhyolite | 25 ± 5 |
| Breccia | 19 ± 5 | Greywackes | 18 ± 3 | Sandstones | 17 ± 4 |
| Breccias | 20 ± 2 | Gypsum | 10 ± 2 | Schists | 10 ± 3 |
| Chalk | 7 ± 2 | Hornfels | 19 ± 4 | Shales | 6 ± 2 |
| Claystones | 4 ± 2 | Marble | 9 ± 3 | Siltstones | 7 ± 2 |
| Conglomerates | 21 ± 3 | Marls | 7 ± 2 | Slates | 7 ± 4 |
| Crystalline Limestone | 12 ± 3 | Metasandstone | 19 ± 3 | Sparitic Limestones | 10 ± 5 |
| Dacite | 25 ± 3 | Micritic Limestones | 8 ± 3 | Tuff | 13 ± 5 |
| Diabase | 15 ± 5 | Migmatite | 29 ± 3 | | |
| Diorite | 25 ± 5 | Norite | 20 ± 5 | | |
| Dolerite | 16 ± 5 | Obsidian | 19 ± 3 | | |

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

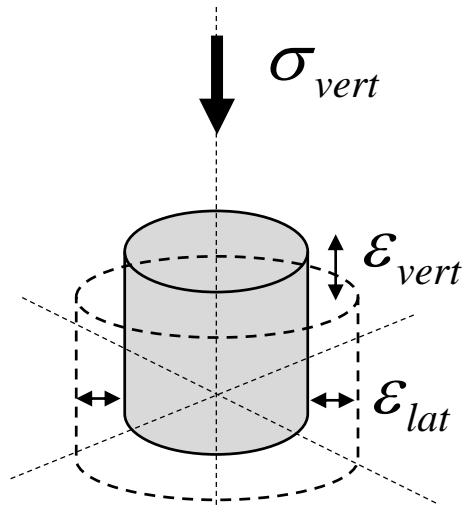
Deformabilidad

$$E = \frac{\sigma_{vert}}{\epsilon_{vert}}$$

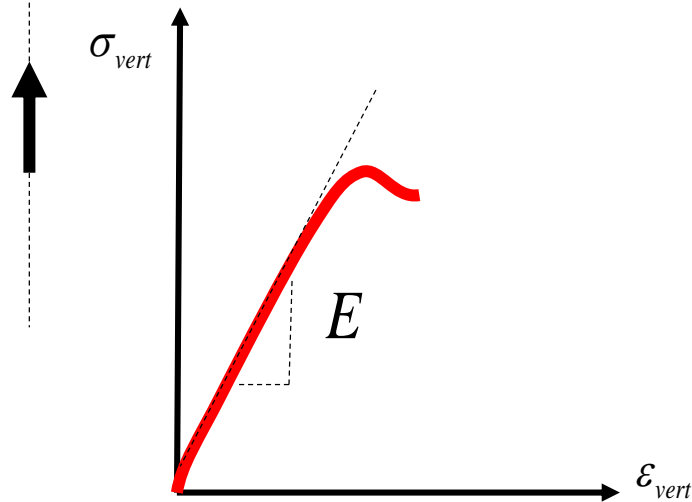
Módulo de Young

$$\nu = \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{vert}}$$

Coefficiente de poisson



Medición estática mediante galgas extensométricas



Medición dinámica mediante ondas sísmicas longitudinales y transversales

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Deformabilidad

Constantes elásticas de las rocas

| Roca Intacta | Módulo de elasticidad estático, E kg/cm ² ($\times 10^5$) | Módulo de elasticidad dinámico, E_d kg/cm ² ($\times 10^5$) | Coefficiente de Poisson, ν |
|--------------|---|---|--------------------------------|
| Andesita | 3,0-4,0 | | 0,23-0,32 |
| Anfibolita | 1,3-9,2 | 4,6-10,5 | |
| Anhidrita | 0,15-7,6 | | |
| Arenisca | 0,3-6,1 | 0,5-5,6 | 0,1-0,4 (0,24-0,31) |
| Basalto | 3,2-10 | 4,1-8,7 | 0,19-0,38 (0,25) |
| Caliza | 1,5-9,0 (2,9-6,0) | 0,8-9,9 | 0,12-0,33 (0,25-0,30) |
| Cuarcita | 2,2-10 (4,2-8,5) | | 0,08-0,24 (0,11-0,15) |
| Diabasa | 6,9-9,6 | 6,0-9,8 | 0,28 |
| Diorita | 0,2-1,7 | 2,5-4,4 | |
| Dolomía | 0,4-5,1 | 2,2-8,6 | 0,29-0,34 |
| Gabro | 1-6,5 | | 0,12-0,20 |
| Gneiss | 1,7-8,1 (5,3-5,5) | 2,5-10,5 | 0,08-0,40 (0,20-0,30) |
| Esquisto | 0,6-3,9 (2,0) | | 0,01-0,31 (0,12) |
| Granito | 1,7-7,7 | 1,0-8,4 | 0,1-0,4 (0,18-0,24) |

Constantes elásticas de las rocas

| Roca Intacta | Módulo de elasticidad estático, E kg/cm ² ($\times 10^5$) | Módulo de elasticidad dinámico, E_d kg/cm ² ($\times 10^5$) | Coefficiente de Poisson, ν |
|--------------|---|---|--------------------------------|
| Grauvaca | 4,7-6,3 | 2,3-10,7 | |
| Limolita | 5,3-7,5 | 0,7-6,5 | 0,25 |
| Lutita | 0,3-2,2 | 1,0-7,0 | 0,25-0,29 |
| Marga | 0,4-3,4 | 1,0-4,9 | |
| Mármol | 2,8-7,2 | | 0,1-0,4 (0,23) |
| Micasquistos | 0,1-2,0 | | |
| Pizarra | 0,5-3,0 | | |
| Sal | 0,5-2,0 | | 0,22 |
| Toba | 0,3-7,6 | | 0,24-0,29 |
| Yeso | 1,5-3,6 | | |

Valores máximos y mínimos. Valores medios entre paréntesis.

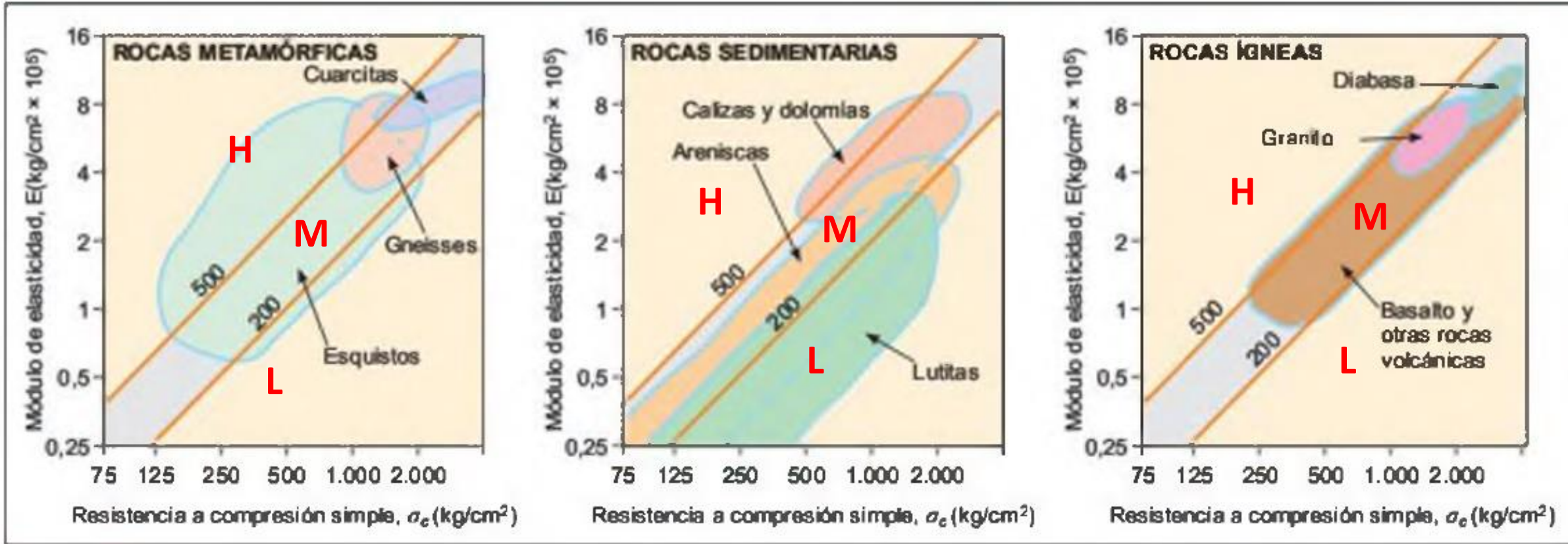
Datos seleccionados a partir de Rahn (1986), Johnson y De Graff (1988), Goodman (1989), Walther (1999), Duncan (1999).

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Deformabilidad

Geomecánica de minerales y rocas



$$\frac{E}{\sigma_c}$$

Módulo relativo

Deere & Miller (1966)

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Deformabilidad

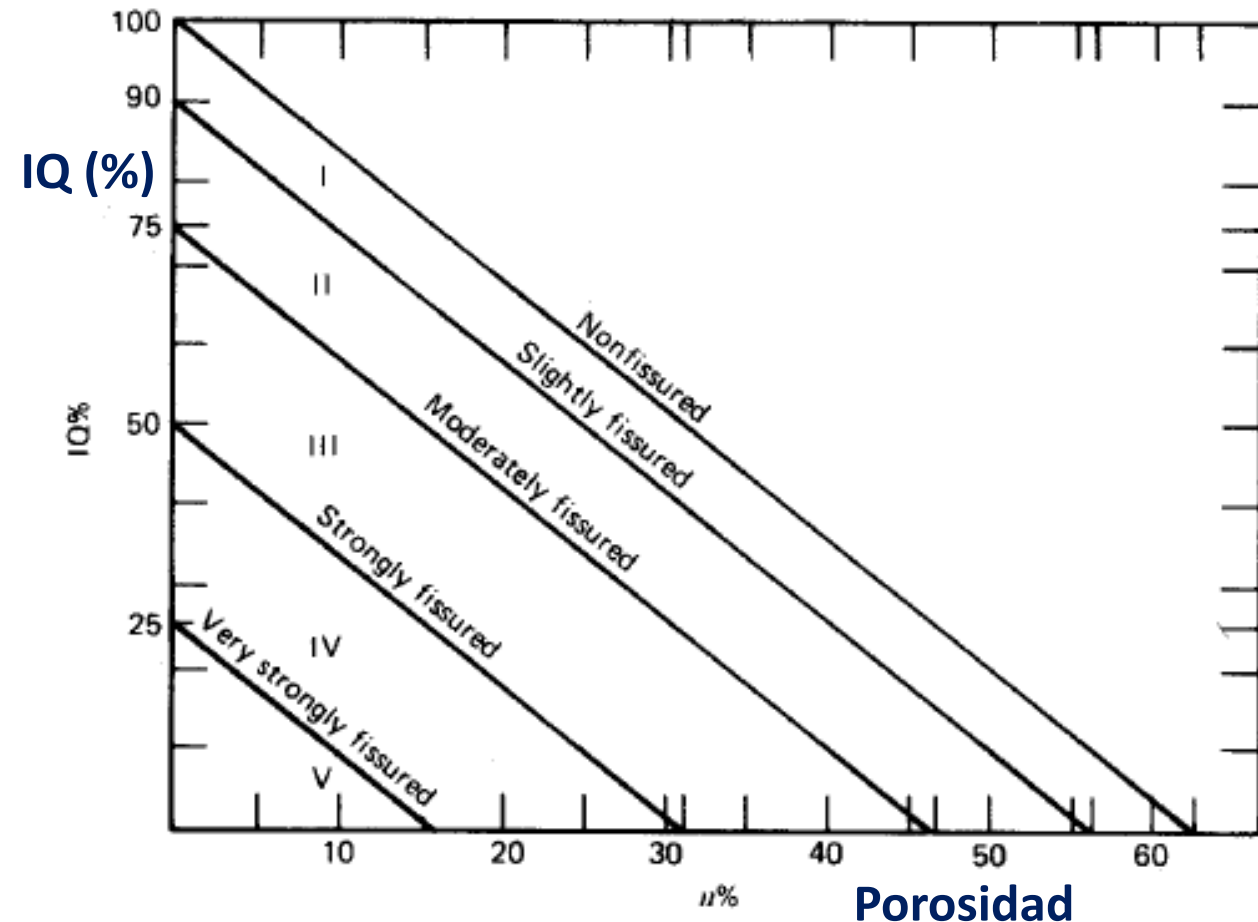
$$IQ(\%) = \frac{V_l}{V_l^*} \times 100\% \quad \text{Índice de calidad}$$

Typical Values of V_l^* for Rocks

| Rock | V_l^* m/s |
|-------------------------|-------------|
| Gabbro | 7000 |
| Basalt | 6500–7000 |
| Limestone | 6000–6500 |
| Dolomite | 6500–7000 |
| Sandstone and quartzite | 6000 |
| Granitic rocks | 5500–6000 |

From Fourmaintraux (1976)

¿La fisuración se refiere al macizo rocoso o a la roca matriz?



Propiedades de la roca matriz

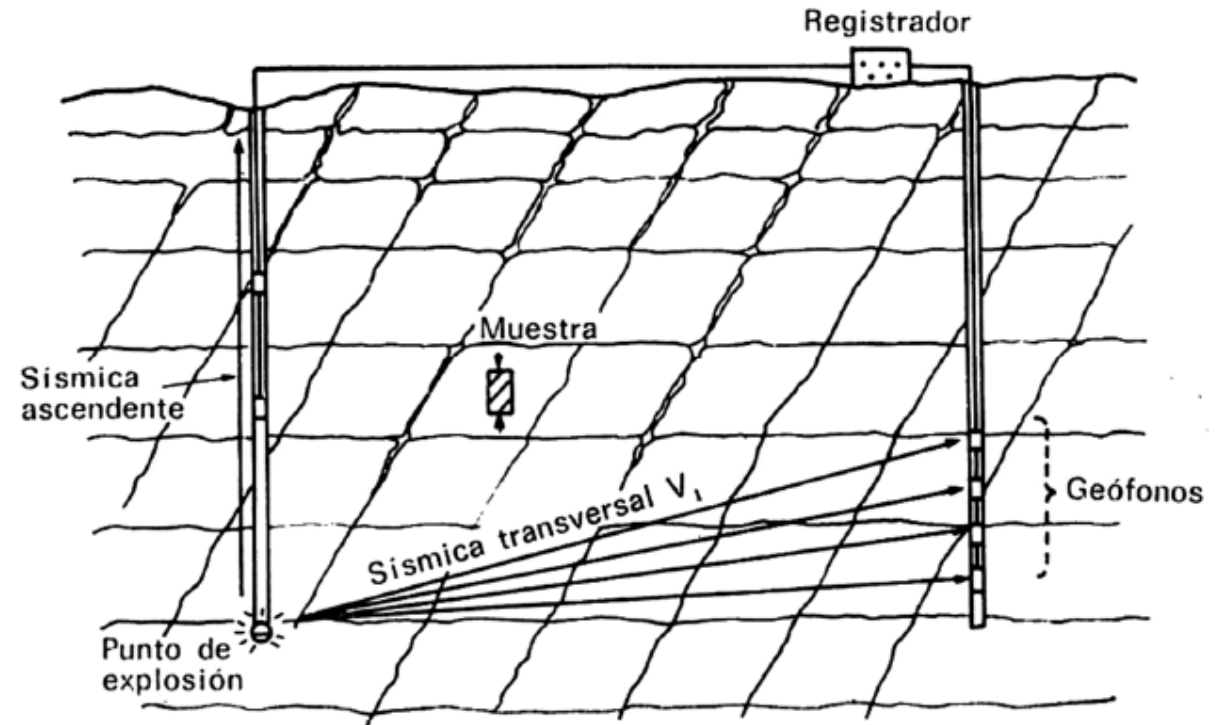
Propiedades mecánicas

Deformabilidad

¿El diaclasamiento se refiere al macizo rocoso o a la roca matriz?



En laboratorio:
Se mide la microfisuración y porosidad en la roca matriz



En campo:
Se mide el grado de fracturación o diaclasamiento del macizo rocoso

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

| Rock | UC Strength (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Elastic Modulus (GPa) | Poisson's Ratio | Strain at Failure (%) | Point Load Index $I_{p(50)}$ (MPa) |
|--------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------|
| <i>Igneous</i> | | | | | | |
| Granite | 100 – 300 | 7 – 25 | 30 – 70 | 0.17 | 0.25 | 5 – 15 |
| Dolerite | 100 – 350 | 7 – 30 | 30 – 100 | 0.10 – 0.20 | 0.30 | |
| Gabbro | 150 – 250 | 7 – 30 | 40 – 100 | 0.20 – 0.35 | 0.30 | 6 – 15 |
| Rhyolite | 80 – 160 | 5 – 10 | 10 – 50 | 0.2 – 0.4 | | |
| Andesite | 100 – 300 | 5 – 15 | 10 – 70 | 0.2 | | 10 – 15 |
| Basalt | 100 – 350 | 10 – 30 | 40 – 80 | 0.1 – 0.2 | 0.35 | 9 – 15 |
| <i>Sedimentary</i> | | | | | | |
| Conglomerate | 30 – 230 | 3 – 10 | 10 – 90 | 0.10 – 0.15 | 0.16 | |
| Sandstone | 20 – 170 | 4 – 25 | 15 – 50 | 0.14 | 0.20 | 1 – 8 |
| Shale | 5 – 100 | 2 – 10 | 5 – 30 | 0.10 | | |
| Mudstone | 10 – 100 | 5 – 30 | 5 – 70 | 0.15 | 0.15 | 0.1 – 6 |
| Dolomite | 20 – 120 | 6 – 15 | 30 – 70 | 0.15 | 0.17 | |
| Limestone | 30 – 250 | 6 – 25 | 20 – 70 | 0.30 | | 3 – 7 |
| <i>Metamorphic</i> | | | | | | |
| Gneiss | 100 – 250 | 7 – 20 | 30 – 80 | 0.24 | 0.12 | 5 – 15 |
| Schist | 70 – 150 | 4 – 10 | 5 – 60 | 0.15 – 0.25 | | 5 – 10 |
| Phyllite | 5 – 150 | 6 – 20 | 10 – 85 | 0.26 | | |
| Slate | 50 – 180 | 7 – 20 | 20 – 90 | 0.20 – 0.30 | 0.35 | 1 – 9 |
| Marble | 50 – 200 | 7 – 20 | 30 – 70 | 0.15 – 0.30 | 0.40 | 4 – 12 |
| Quartzite | 150 – 300 | 5 – 20 | 50 – 90 | 0.17 | 0.20 | 5 – 15 |

Propiedades de la roca matriz

Propiedades mecánicas

Resumen

Ensayos de laboratorio de resistencia y deformabilidad

| Ensayos | | Parámetros que se obtienen |
|----------------|---------------------|--|
| Resistencia | Compresión simple | Resistencia a la compresión simple, σ_c |
| | Compresión triaxial | Cohesión (c), ángulo de rozamiento interno de pico (ϕ_p) y ángulo de rozamiento residual (ϕ_r) |
| | Tracción directa | Resistencia a la tracción, σ_t |
| | Tracción indirecta | Resistencia a la tracción, σ_t |
| Deformabilidad | Compresión simple | Módulos de deformación estáticos, E y ν |
| | Velocidad sónica | Módulos de deformación dinámicos, E_d y ν_d |

Índice

- Roca matriz vs. macizo rocoso
- Propiedades de la roca matriz
 - Clasificación y propiedades físicas
 - Resistencia a la compresión simple (σ_c)
 - Resistencia a la tracción (σ_t)
 - Resistencia a la compresión triaxial
 - Deformabilidad y velocidad de propagación de ondas sínicas
- **Propiedades del macizo rocoso**
 - Clasificaciones geomecánicas
 - Índice de calidad RQD (Rock Quality Designation)
 - Clasificación RMR (Rock Mass Rating)
 - Índice GSI (Geological Strength Index)
 - Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso

Propiedades del macizo rocoso

Clasificaciones geomecánicas

Objeto:

- Evaluar globalmente la calidad del macizo y su resistencia / deformabilidad por medio de observaciones de campo y ensayos sencillos
- Obtener parámetros para el diseño de fundaciones apoyadas en el macizo
- Definir necesidades de sostenimiento y refuerzo del macizo (túneles y excavaciones)
- Facilitar el seguimiento de obra
- Facilitar la comunicación entre ingenieros y geólogos

Metodología:

- Se divide el macizo en sectores de comportamiento similar
- Cada sector se clasifica según el criterio o sistema de clasificación geomecánica elegido (RMR, GSI, etc.)
- La categoría de cada sector se correlaciona con parámetros y propiedades mecánicas del macizo
- Se utilizan estos parámetros para el diseño, proyecto y control de la obra civil

Propiedades del macizo rocoso

Índice de calidad RQD (Rock Quality Designation)

Deere (1967)

Longitud de
testigo
recuperado (cm)

Recuperación
modificada
(cm)

| | | |
|----|---|----|
| 25 | ← | 25 |
| 5 | | |
| 5 | | |
| 8 | | |
| 10 | ← | 10 |
| 12 | ← | 12 |
| 8 | | |
| 10 | ← | 10 |
| 15 | ← | 15 |
| 10 | | |
| 5 | | |
| 15 | ← | 15 |

128

Longitud
Total
150 cm

87

$$\text{Recuperación (\%)} = 128 \text{ cm} / 150 \text{ cm} = 85\%$$

$$\text{RQD (\%)} = 87 \text{ cm} / 150 \text{ cm} = 58\%$$



Propiedades del macizo rocoso

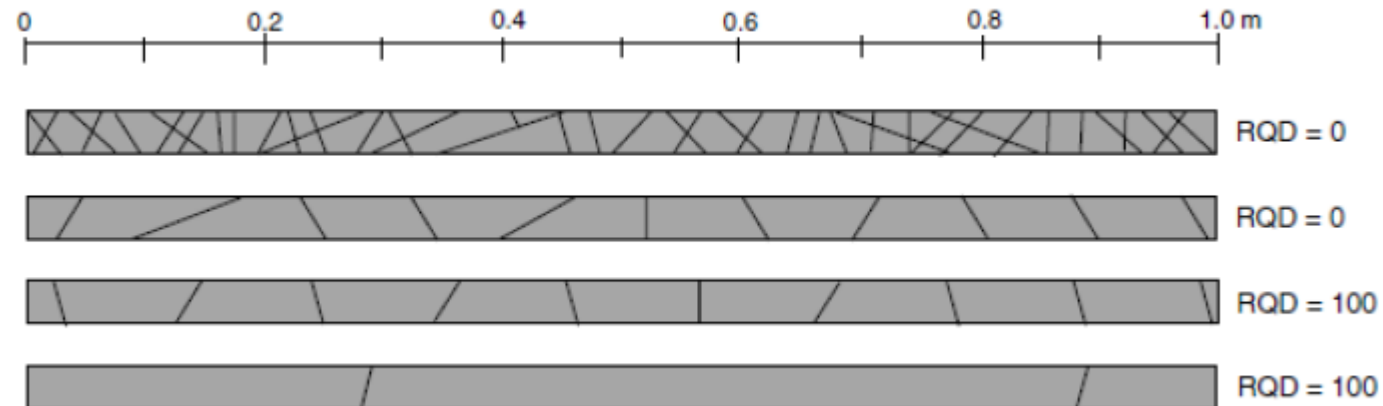
Índice de calidad RQD (Rock Quality Designation)

Deere (1967)

$$RQD = \frac{\Sigma(\text{longitud_fragmentos} \geq 10\text{cm})}{\text{longitud_total_perforada}} \times 100$$

| RQD (%) | Calidad de roca |
|----------|-----------------|
| < 25 | muy mala |
| 25 - 50 | mala |
| 50 - 75 | regular |
| 75 - 90 | buena |
| 90 - 100 | excelente |

¿Qué limitaciones puede tener el RQD?



Propiedades del macizo rocoso

Índice de calidad RQD (Rock Quality Designation)

Superficie rugosa y desgastada, opaca.
Bordes poco apareados

Diaclasa preexistente



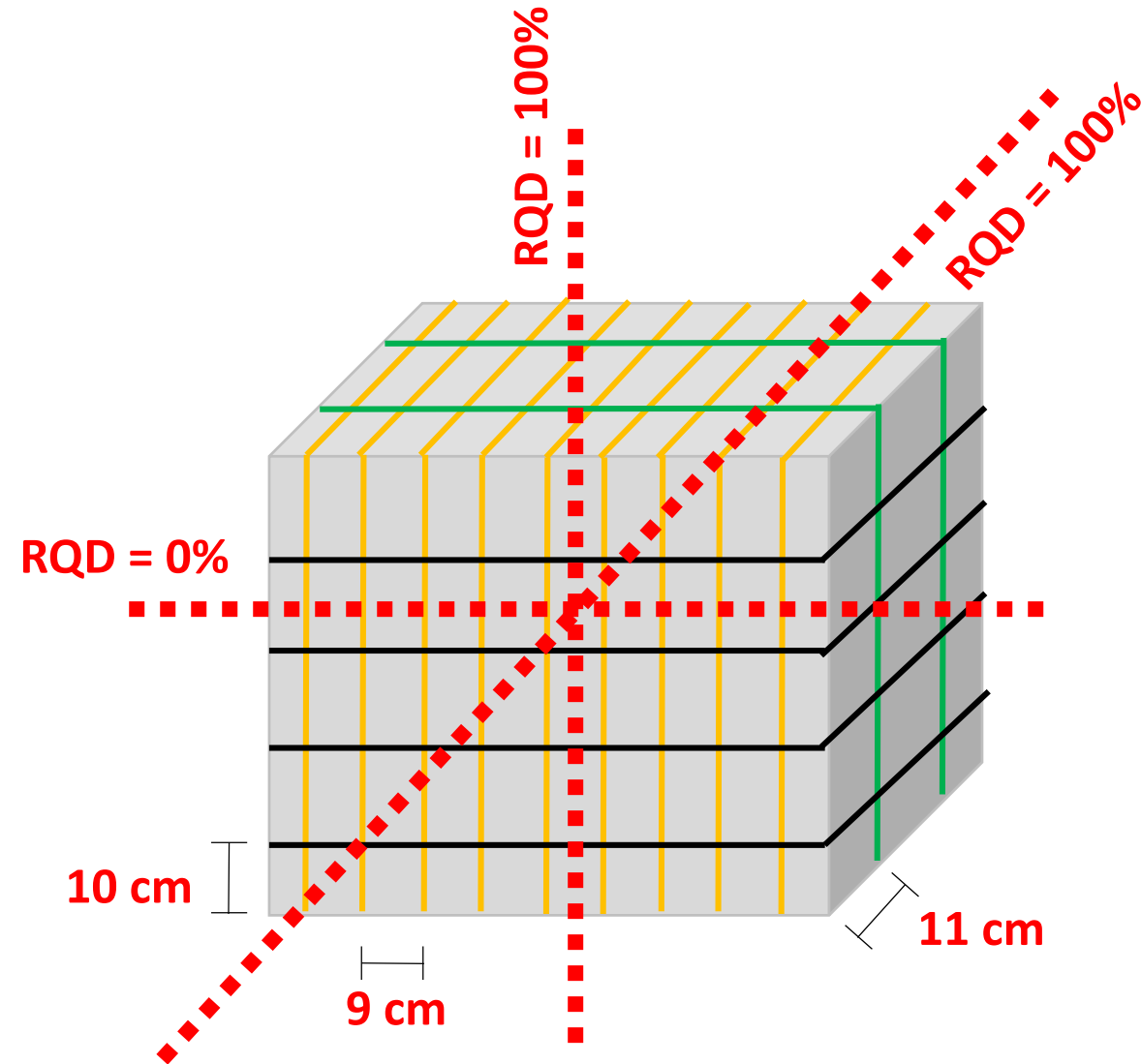
Es una diaclasa, separa testigos intactos

Superficie lisa y brillante,
bordes muy apareados

**Superficie de rotura fresca
(producida durante la extracción de testigo)**

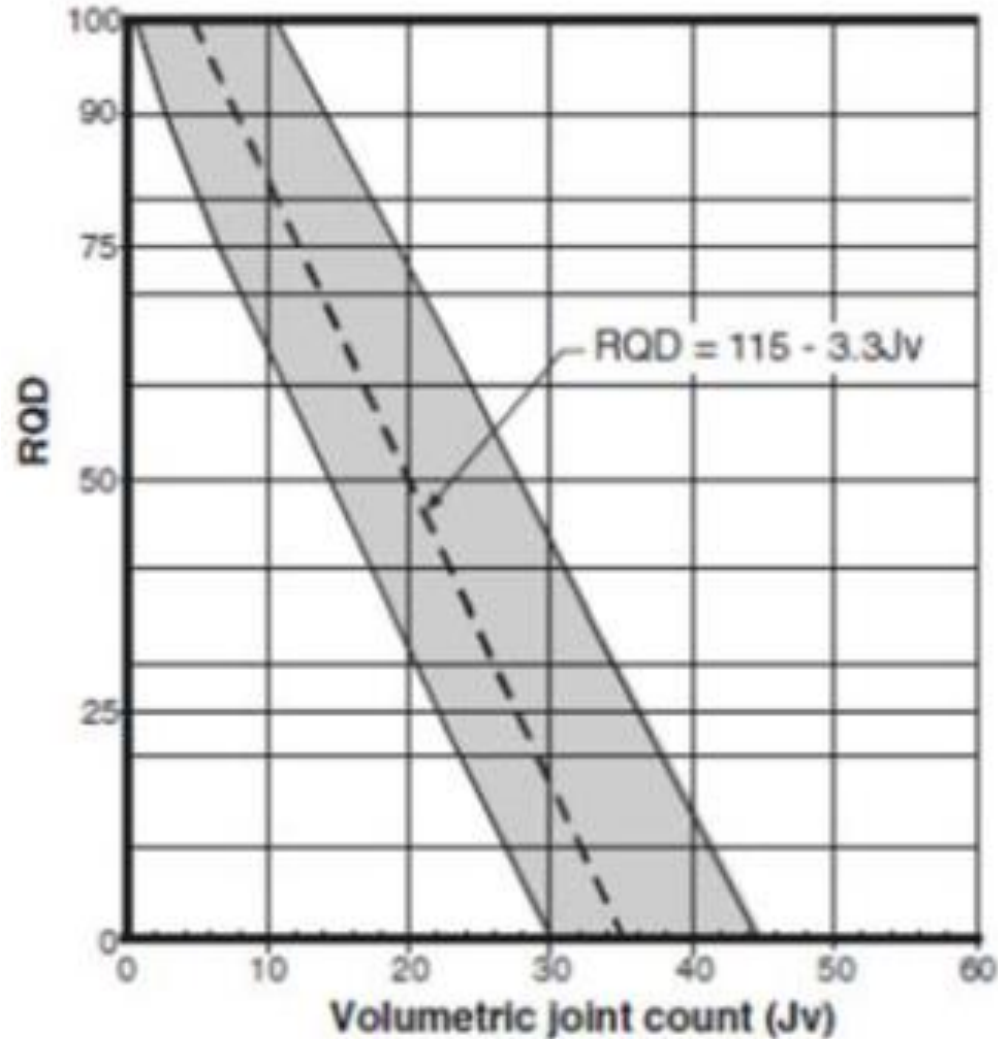


No es una diaclasa, atraviesa un testigo intacto



Propiedades del macizo rocoso

Índice de calidad RQD (Rock Quality Designation)



Correlación para levantamientos geológicos superficiales

Palmstrom (1974)

$$RQD = 115 - 3,3J_v$$

$$RQD = 0$$

Para $J_v > 35$

$$RQD = 100$$

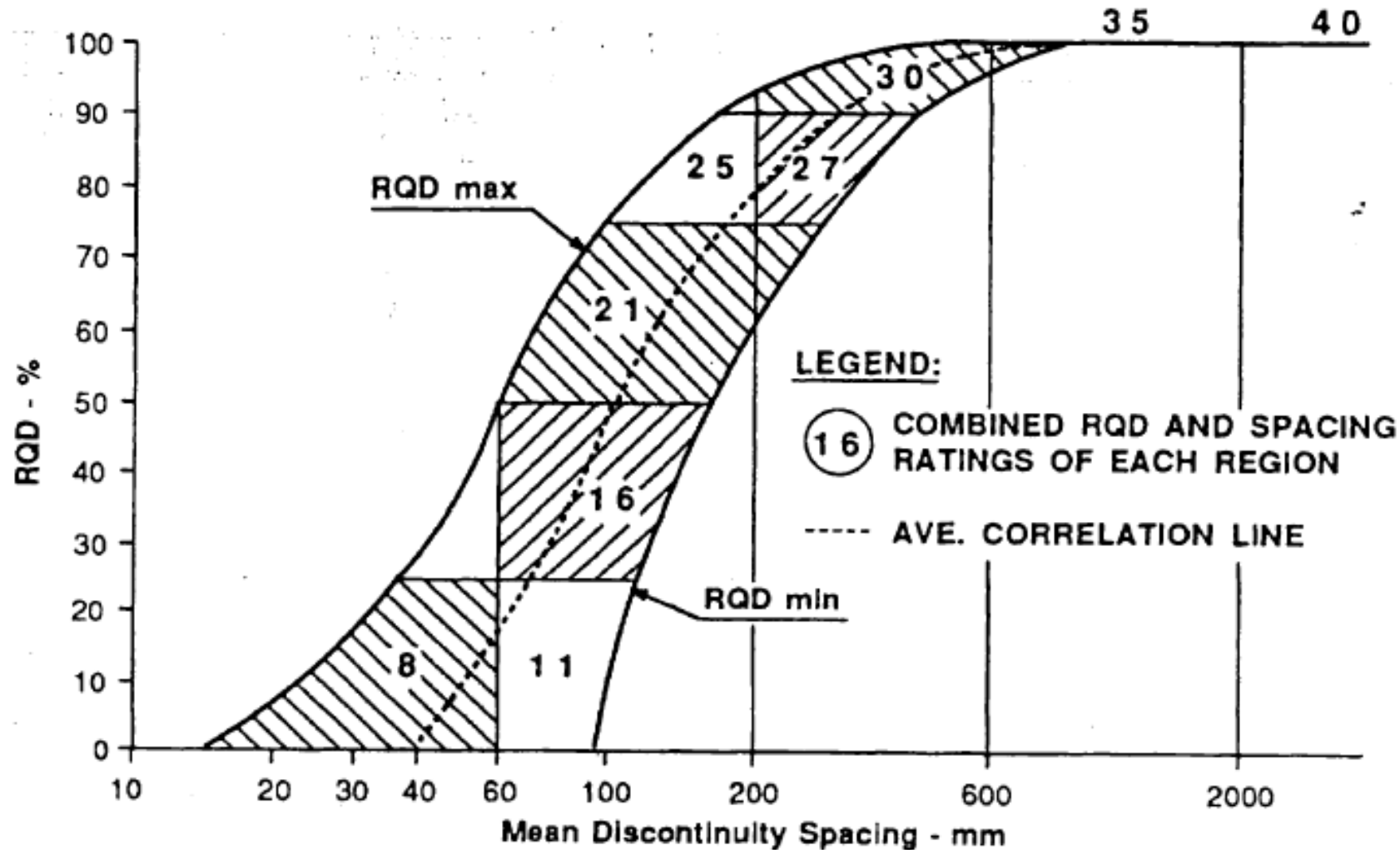
Para $J_v < 4,5$

$$J_v = \text{N}^\circ \text{ de diaclasas} / \text{m}^3$$

Propiedades del macizo rocoso

Índice de calidad RQD (Rock Quality Designation)

CHART D Chart for Correlation between RQD and Discontinuity Spacing



Bienawski (1989)

Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

- **Rock Mass Rating**
- Proporciona un índice de calidad del macizo rocoso entre 0 y 100
- Se basa en 5 aspectos o categorías:
 - 1) Resistencia a compresión de la roca matriz (máximo 15)
 - 2) Integridad del macizo, a través del RQD (máximo 20)
 - 3) Separación entre discontinuidades (máximo 30)
 - 4) Propiedades de las discontinuidades (máximo 25)
 - 5) Existencia de agua subterránea (máximo 10)

Bienawski (1989)

$$\text{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

| Clase | Descripción del macizo rocoso | RMR |
|-------|-------------------------------|--------|
| I | Roca muy buena | 81–100 |
| II | Roca buena | 61–80 |
| III | Roca aceptable | 41–60 |
| IV | Roca mala | 21–40 |
| V | Roca muy mala | 0–20 |

Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Resistencia a compresión de la roca matriz

| Resistencia a la compresión simple (MPa) | Contribución |
|--|--------------|
| >200 | 15 |
| 100–200 | 12 |
| 50–100 | 7 |
| 25–50 | 4 |
| 10–25 | 2 |
| 3–10 | 1 |
| <3 | 0 |

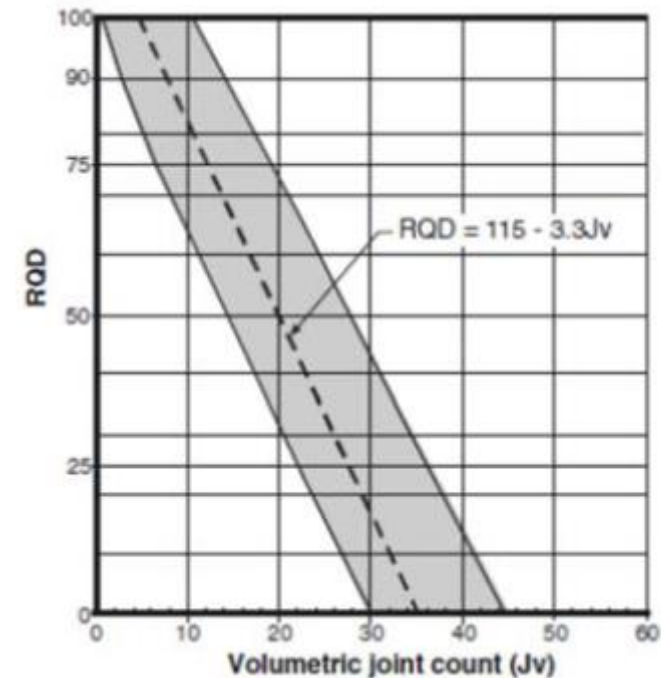
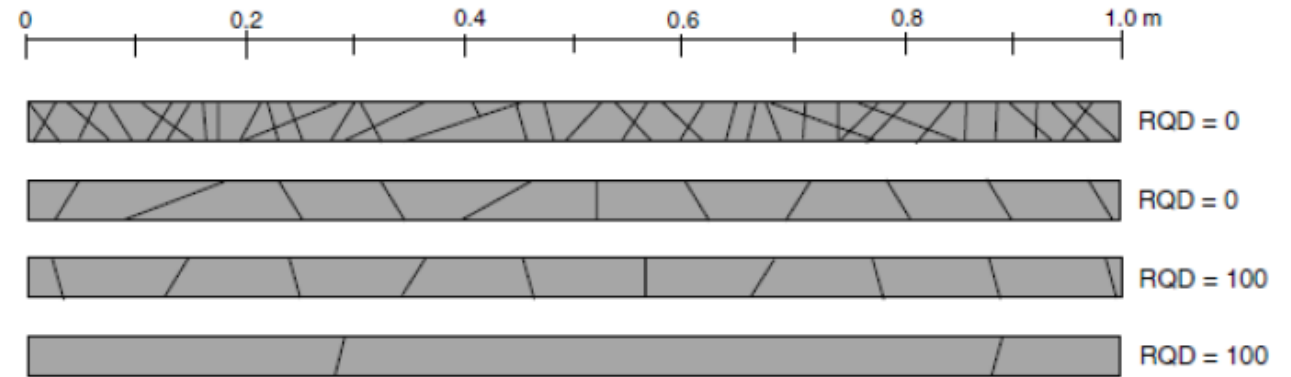


Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Integridad del macizo (RQD)

| RQD (%) | Contribución |
|---------|--------------|
| 91–100 | 20 |
| 76–90 | 17 |
| 51–75 | 13 |
| 25–50 | 8 |
| <25 | 3 |



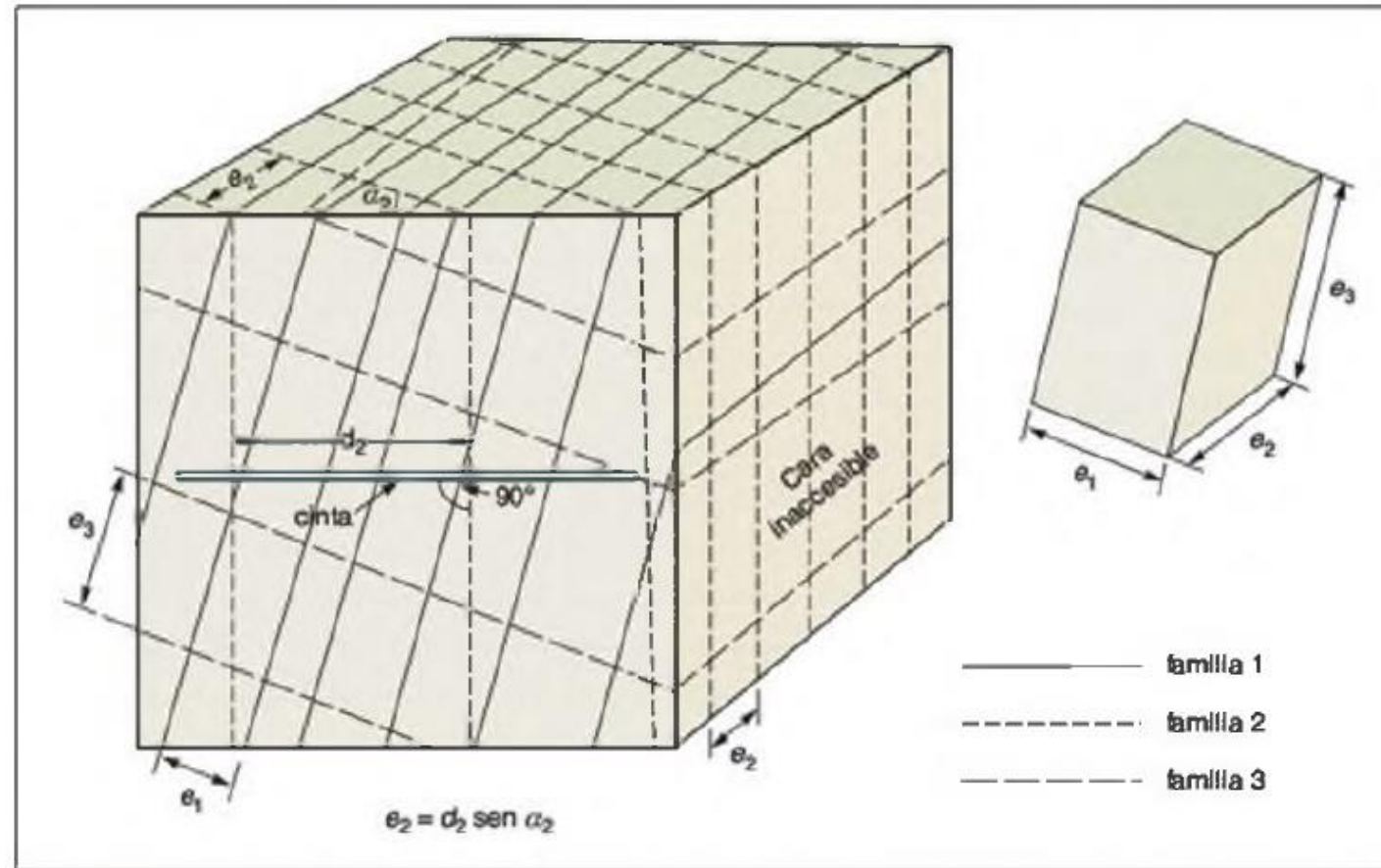
Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Separación entre discontinuidades

(Familia principal)

| Separación (m) | Contribución |
|----------------|--------------|
| >3 | 30 |
| 1-3 | 25 |
| 0.3-1 | 20 |
| 0.005-0.3 | 10 |
| <0.005 | 5 |



Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Propiedades de las discontinuidades (1/3)

| Descripción | Contribución |
|---|--------------|
| Superficies muy rugosas de extensión limitada; roca dura | 25 |
| Superficies ligeramente rugosas; apertura menor a 1 mm; roca dura | 20 |
| Superficies ligeramente rugosas; apertura menor a 1 mm; roca blanda | 12 |
| Superficies lisas, ó con relleno de 1–5 mm, ó apertura de 1–5 mm; juntas de varios metros de longitud | 6 |
| Juntas abiertas rellenas con más de 5 mm, ó apertura mayor de 5 mm; juntas de varios metros de longitud | 0 |

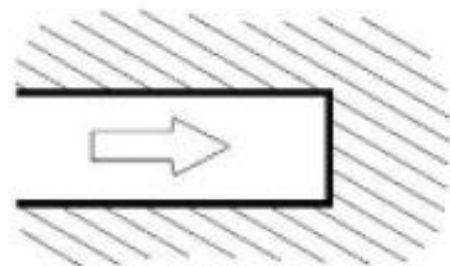


Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Propiedades de las discontinuidades (2/3)

| Apreciación de la influencia de la orientación | Contribución para túneles |
|--|---------------------------|
| Muy favorable | 0 |
| Favorable | -2 |
| Moderada | -5 |
| Desfavorable | -10 |
| Muy desfavorable | -12 |



Avance a favor



Avance en contra

Dirección de buzamiento paralela al eje del túnel

| Avance a favor | | Avance en contra | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Buzamiento 45 a 90 | Buzamiento 20 a 45 | Buzamiento 45 a 90 | Buzamiento 20 a 45 |
| Muy favorable | Favorable | Moderada | Desfavorable |

Dirección de buzamiento perpendicular al eje del túnel

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Buzamiento 45 a 90 | Buzamiento 20 a 45 |
| Muy desfavorable | Moderada |

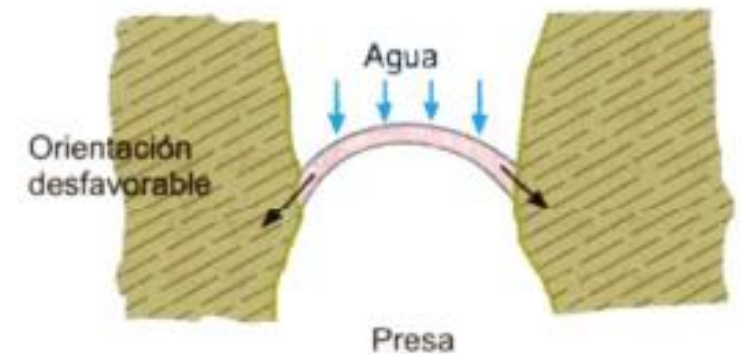
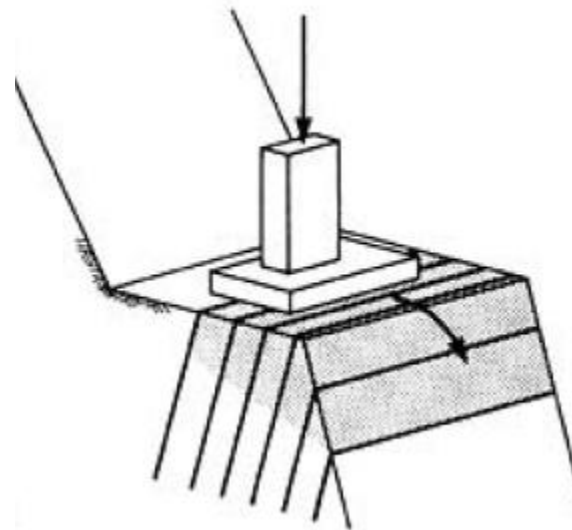
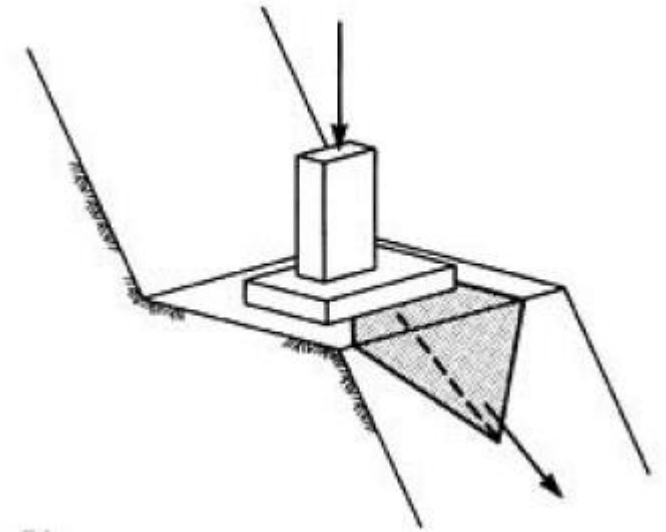
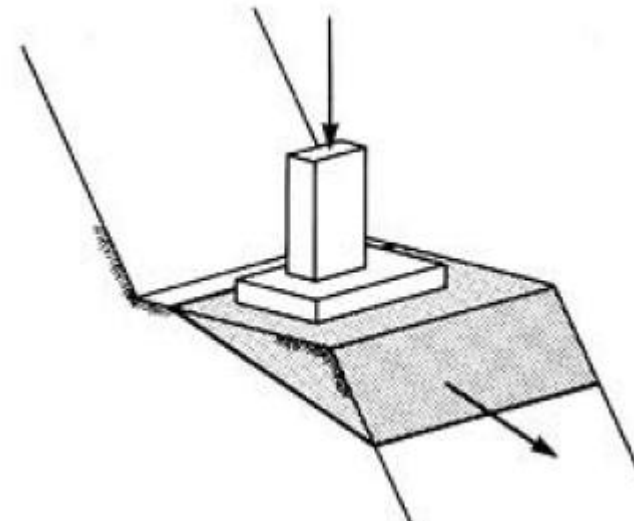
Modificado de Wickham et al (1972)

Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Propiedades de las discontinuidades (3/3)

| Apreciación de la influencia de la orientación | Contribución para cimentaciones |
|--|---------------------------------|
| Muy favorable | 0 |
| Favorable | -2 |
| Moderada | -7 |
| Desfavorable | -15 |
| Muy desfavorable | -25 |



Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Existencia de agua subterránea

| Caudal por cada 10 m de longitud de túnel (l/min) ó | Presión de agua en las juntas dividida por la tensión principal mayor ó | Condiciones Generales | Contribución |
|---|---|-----------------------------------|--------------|
| 0 | 0 | Completamente seco | 10 |
| 25 | 0.0–0.2 | Húmedo | 7 |
| 25–125 | 0.2–0.5 | Agua bajo presión moderada | 4 |
| 125 | 0.5 | Problemas severos debidos al agua | 0 |

Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Existencia de agua subterránea



Propiedades del macizo rocoso

Clasificación RMR (Rock Mass Rating)

Existencia de agua subterránea



- **Fundación del puente mediante pilotes perforados en basalto**
- **RMR = 25 a 40**
- **Régimen de agua?**







Propiedades del macizo rocoso

Clasificación GSI (Geological Strength Index)

Hoek & Brown (1994)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)

From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.

| STRUCTURE | SURFACE CONDITIONS |
|---|--|
|  <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p> | <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> |
|  <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p> | <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> |
|  <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p> | <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> |
|  <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p> | <p>POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> |
|  <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p> | <p>VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p> |
|  <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p> | |







↓ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES

↓ DECREASING SURFACE QUALITY

Propiedades del macizo rocoso

Clasificación GSI (Geological Strength Index)

Hoek & Brown (1994)

| STRUCTURE | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|--|-----|-----|----|-----|-----|
|  | INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities | 90 | | | N/A | N/A |
|  | BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets | 80 | 70 | | | |
|  | VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets | | 60 | 50 | | |
|  | BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity | | | 40 | | |
|  | DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces | | | | 30 | |
|  | LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes | | | | | 20 |
| | | | | | | 10 |
| | | N/A | N/A | | | |

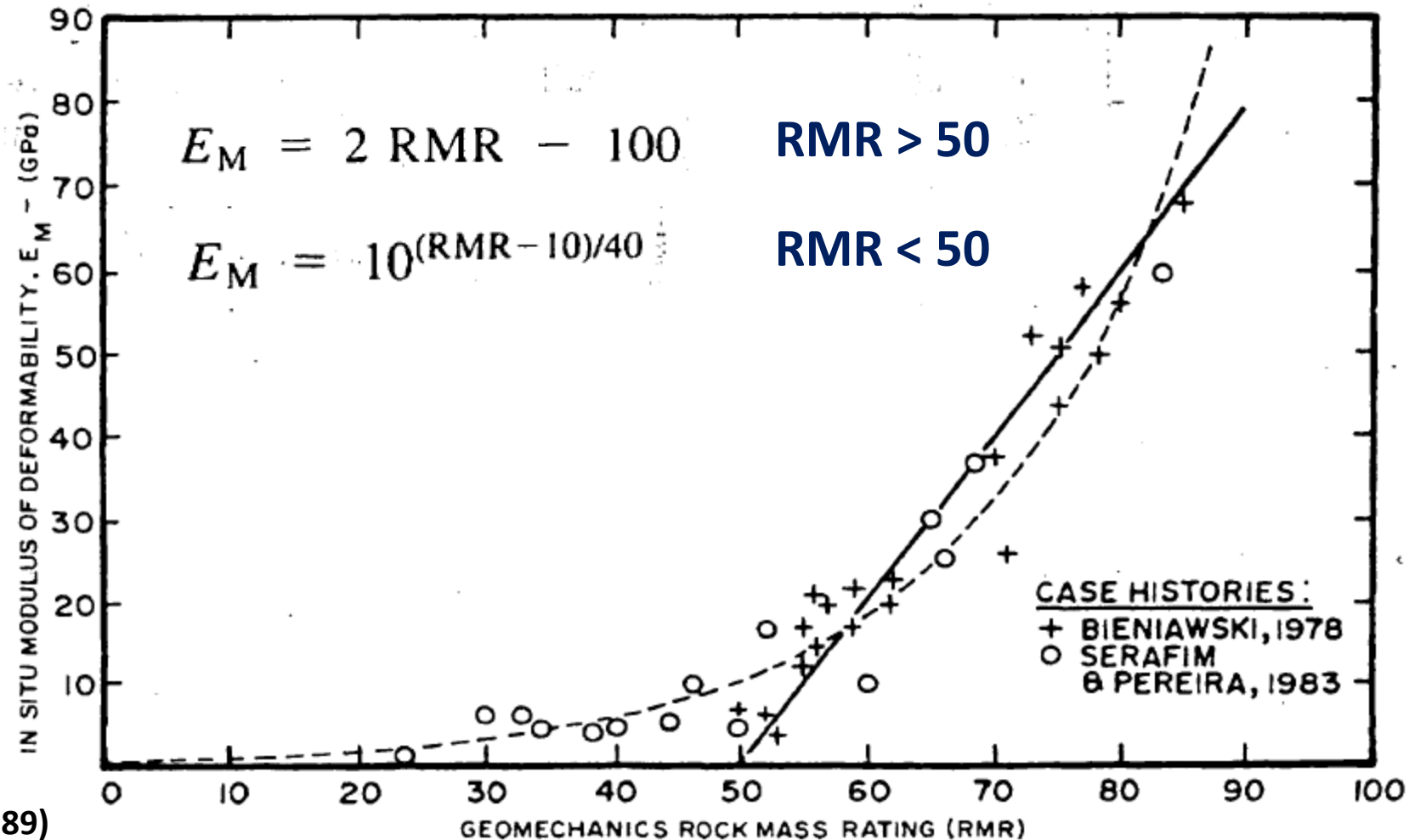
| SURFACE CONDITIONS | | |
|---------------------------------|--|---|
| DECREASING SURFACE QUALITY ↓ | VERY GOOD | 1 |
| | Very rough, fresh unweathered surfaces | |
| | GOOD | 2 |
| | Rough, slightly weathered, iron stained surfaces | |
| | FAIR | 3 |
| | Smooth, moderately weathered and altered surfaces | |
| | POOR | 4 |
| | Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments | |
| | VERY POOR | 5 |
| | Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings | |

Propiedades del macizo rocoso

Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso

Clasificaciones
geomecánicas
¿Para qué?

Módulo “elástico”
del macizo rocoso
(considerado como
medio CHI)



Bieniawski (1989)

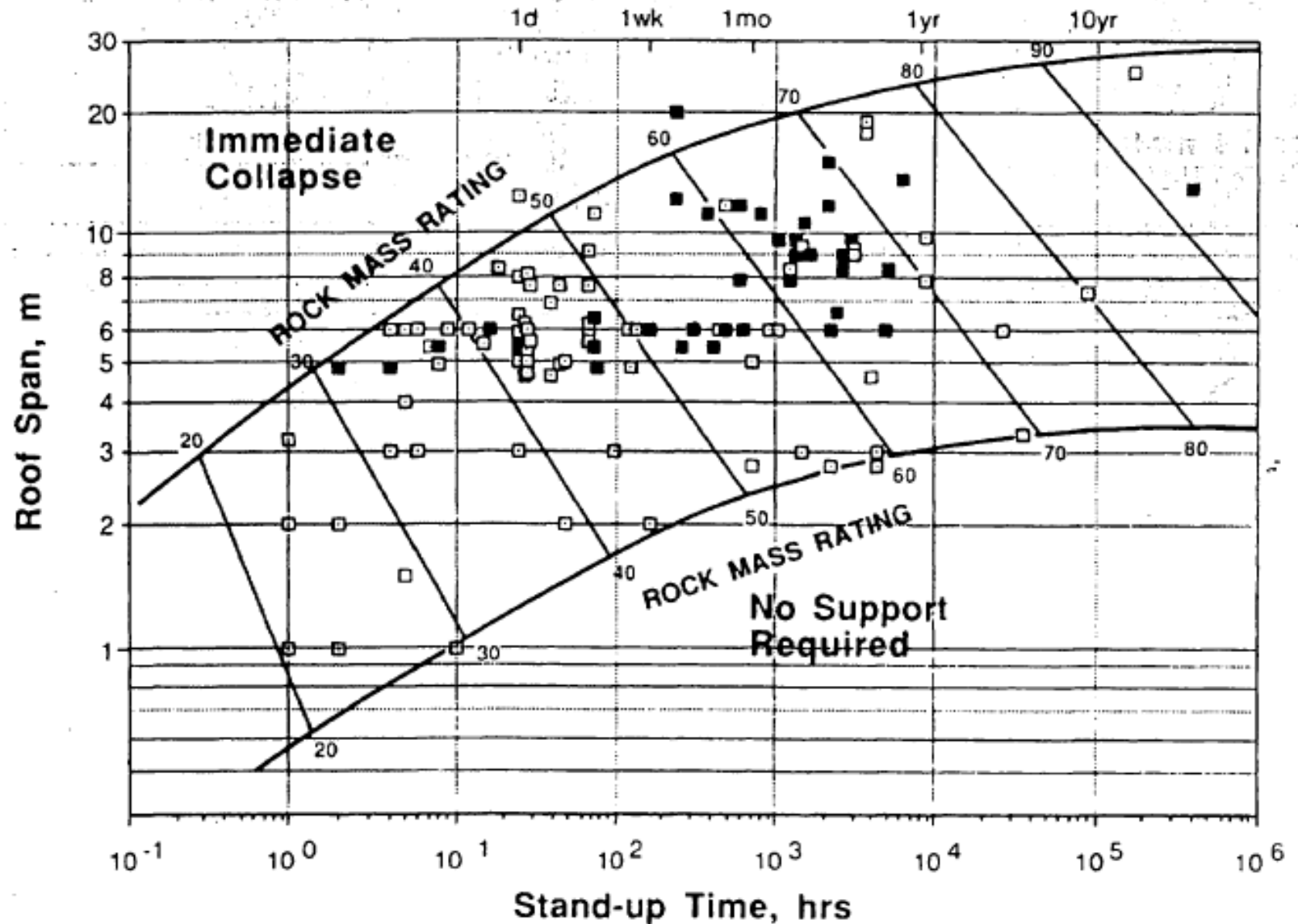
Figure 4.3 Correlation between the in-situ modulus of deformation and RMR.

Propiedades del macizo rocoso

Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso

Clasificaciones
geomecánicas
¿Para qué?

Ventana de sostenimiento
para túneles
(Métodos convencionales)



Bienawski (1989)

Propiedades del macizo rocoso

Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso

**Clasificaciones
geomecánicas
¿Para qué?**

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

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

**Criterio de rotura para
macizos rocosos
(Hoek-Brown)**



- **Diseño de cimentaciones en roca**
- **Estabilidad de laderas en roca**
- **Diseño de túneles en roca**

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

D = 0 a 1

**Caracteriza el daño producido en el macizo por el sistema constructivo
(excavación mecanizada, explosivos, etc.)**