

# Ingeniería Geológica



Prentice  
Hall

Coordinador:  
Luis I. González de Vallejo

Aspectos como la orientación preferente de minerales, la dureza o la estructura cristalina pueden determinar la reacción o respuesta mecánica de la roca frente a fuerzas externas. Muchas de las propiedades ingenieriles de las rocas dependen de la estructura de las partículas minerales y de la forma en que éstas están unidas.

Las propiedades físicas o **propiedades índice** de las rocas se determinan en laboratorio; las más importantes a nivel de influencia en el comportamiento mecánico son la porosidad, el peso específico, la permeabilidad, la alterabilidad, la resistencia y la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Algunas de estas propiedades, además de servir para su clasificación, están directamente relacionadas con las características resistentes y deformacionales de las rocas.

La **porosidad** es la relación entre el volumen ocupado por los huecos o poros en la roca,  $V_v$ , y el volumen total  $V$  (partículas sólidas + huecos):  $n(\%) = V_v/V$ . Es la propiedad que más afecta a las características resistentes y mecánicas, siendo inversamente proporcional a la resistencia y a la densidad y directamente proporcional a la deformabilidad, ya que la existencia de huecos puede dar lugar a zonas de debilidad. Los poros, en el caso de rocas cristalinas, ígneas o metamórficas, pueden ser microfisuras o grietas en la matriz rocosa. La porosidad, en general, decrece con la profundidad y con la edad de las rocas.

El valor de  $n$  puede variar entre el 0% y el 90%, con valores normales entre 15% y 30%. Las rocas sedimentarias carbonatadas bioclásticas y las rocas volcánicas pueden presentar valores muy elevados de porosidad, al igual que las rocas meteorizadas o alteradas. En el Cuadro 3.2 se incluyen datos de porosidad de algunas rocas.

La **porosidad eficaz** es la relación entre el volumen de poros interconectados y el volumen de la muestra. Puede obtenerse a partir de los pesos seco y saturado de la muestra:

$$n_e = (W_{\text{sat}} - W_{\text{seco}}) / (\gamma_w V)$$

En las rocas es frecuente que los poros no estén interconectados, por lo que la porosidad real será mayor que la eficaz. El índice de poros se define como la relación entre el volumen ocupado por los huecos,  $V_v$ , y el volumen ocupado por las partículas sólidas,  $V_{\text{sol}}$ :  $e = V_v / V_{\text{sol}}$ .

El **peso específico** o **peso unitario** de la roca depende de sus componentes, y se define como el peso por unidad de volumen. Sus unidades son las de fuerza (kilopondio, newton, tonelada-fuerza, etc.) por volumen. En general se considera el mismo valor para el peso específico,  $\gamma$ , y para la densidad,  $\rho$  ( $\rho = \text{masa/volumen}$ ), por lo que en ocasiones en la bibliografía geotécnica se emplea el término

Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas

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

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

«densidad» aunque se esté haciendo referencia al peso específico (al trabajar con el peso debe quedar claro que se trabaja con unidades de fuerza y no de masa; así  $\gamma = \rho g = 1 \text{ g}_{\text{masa}}/\text{cm}^3 \cdot 980 \text{ cm/s}^2 = 980 \text{ dinas/cm}^3 = 1 \text{ g}_{\text{fuerza}}/\text{cm}^3$  ó  $\gamma = 1.000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 9.800 \text{ N/m}^3 = 1.000 \text{ kp/m}^3$ ).

Las rocas, a diferencia de los suelos, presentan una gran variación de valores de peso específico. En el Cuadro 3.2 se incluyen los valores medios de algunas rocas.

La **permeabilidad** es la capacidad de transmitir agua de una roca. La mayoría de las rocas presentan permeabilidades bajas o muy bajas. La filtración y el flujo del agua a través de la matriz rocosa se produce a favor de los poros y fisuras, dependiendo la permeabilidad de la interconexión entre ellos y de otros factores como el grado de meteorización, la anisotropía o el estado de esfuerzos a que está sometido el material.

La permeabilidad de una roca se mide por el coeficiente de permeabilidad o de conductividad hidráulica,  $k$ , que se expresa en m/s, cm/s ó m/día:

$$k = K(\gamma_w/\mu)$$

donde  $K$  es la permeabilidad intrínseca (dependiente

**Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo**

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
S <sub>1</sub>	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,025
S <sub>2</sub>	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025-0,05
S <sub>3</sub>	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05-0,1
S <sub>4</sub>	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,1-0,25
S <sub>5</sub>	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25-0,5
S <sub>6</sub>	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,5
R <sub>0</sub>	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25-1,0
R <sub>1</sub>	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1,0-5,0
R <sub>2</sub>	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0-25
R <sub>3</sub>	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
R <sub>4</sub>	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
R <sub>5</sub>	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
R <sub>6</sub>	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

(ISRM, 1981)

La **velocidad de propagación de las ondas elásticas** al atravesar la roca depende de la densidad y de las propiedades elásticas del material, y su medida aporta información sobre algunas características como la porosidad. El ensayo para la determinación de la velocidad en laboratorio se describe en el Apartado 3.4.

La velocidad de las ondas longitudinales o de compresión,  $V_p$ , se utiliza como índice de clasificación, y su valor es indicativo de la calidad de la roca, correlacionándose linealmente con la resistencia a compresión simple  $\sigma_c$ . Para las rocas esta velocidad varía entre 1.000 y 6.000 m/s. Para rocas alteradas y meteorizadas se obtienen valores por debajo de 900 m/s. Así, mientras que un granito sano puede presentar valores hasta de 6.000 m/s, si éste se presenta alterado la velocidad se reduce proporcionalmente al grado de meteorización, hasta la mitad o un tercio, y si aparece muy descompuesto, los valores serán menores de 700-800 m/s. El Cuadro 3.8 presenta algunos valores de la velocidad de propagación de las ondas elásticas de compresión.

**Velocidad de propagación de las ondas longitudinales en rocas**

Roca sana	Velocidad de propagación de las ondas $V_p$ (m/s)
Arenisca	1.400-4.200
Basalto	4.500-6.500
Caliza	2.500-6.000
Conglomerado	2.500-5.000
Cuarcita	5.000-6.500
Diabasa	5.500-7.000
Dolerita	4.500-6.500
Dolomía	5.000-6.000
Gabro	4.500-6.500
Gneiss	3.100-5.500
Granito sano	4.500-6.000
Lutita	1.400-3.000
Marga	1.800-3.200
Mármol	3.500-6.000
Pizarra	3.500-5.000
Sal	4.500-6.000
Yeso	3.000-4.000

Valores típicos de  $c$  y  $\phi$  para roca intacta

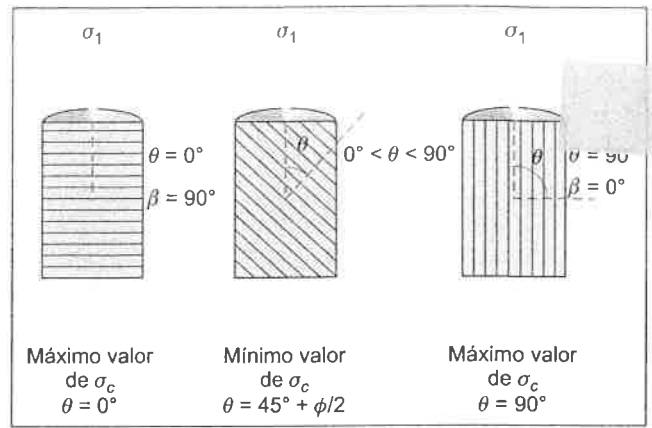
Roca	Cohesión $c$ (kp/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción básico $\phi_b$ (grados)
Andesita	280	45
Arenisca	80-350	30-50
Basalto	200-600	48-55
Caliza	50-400	35-50
Caliza margosa	10-60	30
Cuarcita	250-700	40-55
Diabasa	900-1.200	40-50
Diorita	150	50-55
Dolomía	220-600	25-35
Esquistoso	250	25-30*
	20-150*	20-30*
Gabro	300	35
Gneiss	150-400	30-40
Granito	150-500	45-58
Grauvaca	60-100	45-50
Mármol	150-350	35-45
Lutita	30-350	40-60
		15-25*
Pizarra	100-500	40-55
	< 100*	15-30*
Toba	7	—
Yeso	—	30

(\*) En superficies de laminación o esquistosidad. Datos seleccionados a partir de Walthan (1999), Rahn (1986), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpañés (1975).

### Efectos de la anisotropía y de la presión de agua en la resistencia

Cuando la roca presenta anisotropía, su resistencia compresiva para un mismo estado de esfuerzos varía según el ángulo  $\beta$  ( $\beta = 90 - \theta$ ) entre la dirección de los planos de anisotropía y la dirección de la carga aplicada, pudiendo presentar valores muy diferentes (Figura 3.45).

Al ser la dirección más favorable a la rotura la correspondiente al ángulo  $\theta = 45^\circ + \phi/2$ , la roca presentará su mínima resistencia si los planos de debilidad presentan esta orientación. De igual modo, tendrá la máxima resistencia para orientaciones según  $\theta = 90^\circ$  y  $\theta = 0^\circ$ , donde los esfuerzos tangenciales son nulos. Para valores del ángulo  $\theta$  entre estos extremos, el valor de la resistencia será variable. La Figura 3.46a) presenta la curva teórica de resistencia de la roca anisótropa, con la porción curva correspondiente a la rotura por planos de debilidad y la porción recta correspondiente a la rotura a través del material rocoso. La Figura 3.46b) representa curvas reales obtenidas en laboratorio para diferentes valores del ángulo  $\theta$ .



**Figura 3.45** La resistencia de la roca varía en función del ángulo  $\theta$  considerado. Una probeta de roca con superficies de laminación o esquistosidad presenta su mínima resistencia para planos de rotura correspondientes a los planos de debilidad, y la máxima para valores del ángulo  $\theta$  de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

Esta variabilidad en la resistencia a compresión de la matriz rocosa supone una incertidumbre para asignar un valor de  $\sigma_1$  representativo. En ocasiones es frecuente tomar el valor mínimo y adoptar así un margen de seguridad; sin embargo, en algunas aplicaciones en donde se tenga la seguridad de que no se darán roturas a favor de los planos de anisotropía, debe tomarse un valor de la resistencia adecuado a las situaciones reales de la obra.

La evaluación de la resistencia de la matriz rocosa en función de la dirección de anisotropía puede realizarse mediante:

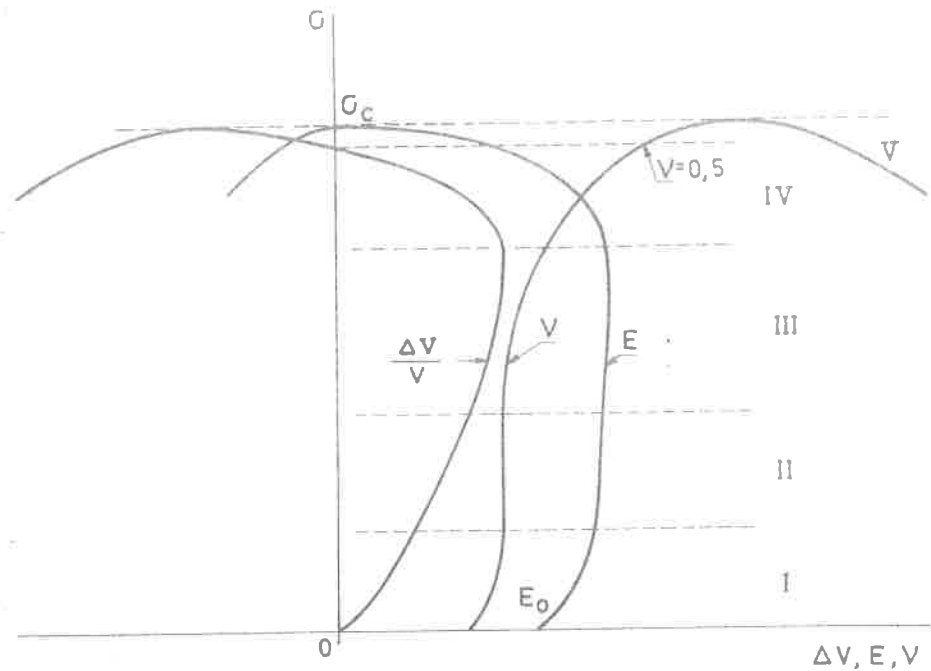
- Ensayos de laboratorio en probetas con diferentes orientaciones de los planos de debilidad.
- Aplicación de criterios de rotura empíricos, como el de Mohr-Coulomb.

Las rocas anisótropas son difíciles de ensayar por la variabilidad de su resistencia, siendo necesarios numerosos ensayos para obtener parámetros representativos de todo el rango de resistencias.

La **presión intersticial** en la matriz rocosa porosa disminuye su resistencia, al actuar esta presión en contra de la tensión normal que se opone a la rotura, cumpliéndose el principio de la tensión efectiva:

$$\sigma'_n = \sigma_n - u$$

Esto sólo afecta a rocas porosas permeables, que permiten la entrada de agua y pueden llegar a saturarse. Muchas de las rocas pueden considerarse prácticamente impermeables, aunque bajo condiciones de presencia de agua, la saturación es cuestión de tiempo.



*Manuel Rocha*

# Mecânica das Rochas



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

Fig.3.2-12

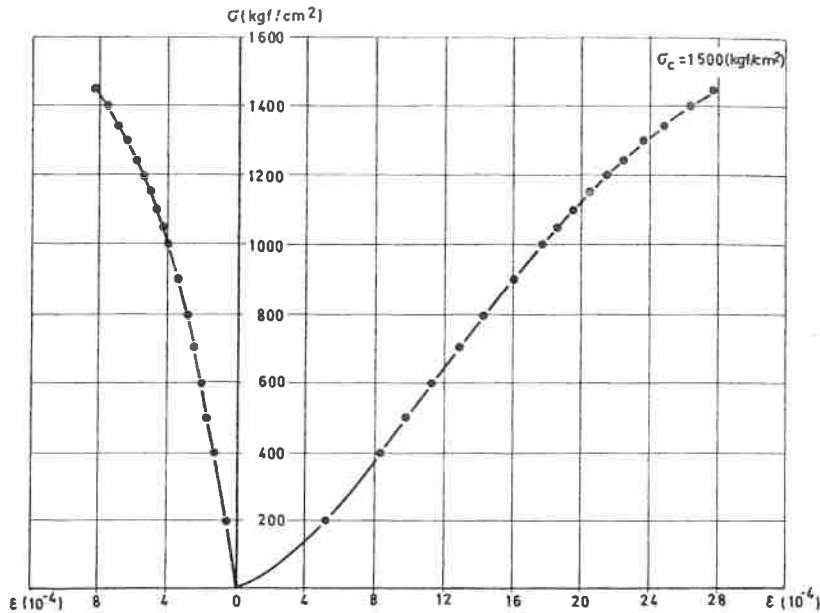


Tabela 3.2-1

Tipo de rocha	E ( $10^3 \text{ kgf/cm}^2$ )	v	$\sigma_c$ kgf/cm <sup>2</sup>
Granito são	760	0,21	1180
Granito alterado	204	0,10	350
Granito muito alterado	125	0,09	139
Granodiorito	665	0,23	1981
Basalto	1000	0,27	2155
Pórfiro	960	0,26	917
Gnaise	933	0,22	1600
Gnaise alterado	501	0,09	1150
Xisto *	1350	0,20	935
Xisto *	635	0,21	750
Xisto **	385	0,14	1140
Micaxisto *	760	0,23	495
Ardósia	773	0,14	1740
Quartzito	756	0,26	3000
Calcário	830	0,23	1130
Gesso	88	0,19	137
Cré	40	0,22	32
Grés	538	0,25	820
Conglomerado	1060	0,20	2440

\* Paralelo à xistosidade.

\*\* Normal à xistosidade.

### 3.3 Traç

Vamos ap  
submetida  
duas razão  
rochosos e  
Quanto ac  
consideraç  
que em re  
ocorrer co  
ocorra situ  
muito limi  
agrava-se  
resistência  
aos maciço  
fracturas e  
maciços ro  
pelo menc  
a contribu  
subsistem  
obras tem  
de compre  
No que diz  
compressã  
garantir a  
facilmente  
resinas sin  
ensaios m  
Para rocha  
mais com  
ensaio bra  
ensaio em  
uniformer  
principais

$\sigma_x$

$\sigma_y$

onde r de  
da geratr  
de tracção  
diâmetro

Tabela 3.3-1

Tipo de rocha	Resistência à tracção $\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Tracção simples	Ensaio brasileiro
Granito	63	140
Granito	23	83
Granodiorito	67	125
Traquito	140	122
Basalto	229	370
Gnaise	49	76
Mármore	70	89
Quartzito	49	110
Calcário	44	90
Gesso	9	12
Grés	37	38

Na zona de aplicação das forças as deformações deixam de ser elásticas, em virtude da concentração de tensões, donde resulta a ocorrência de fracturas secundárias que sugerem a existência de um efeito cunha, Fig. 3.3-3, o qual depende da maneira como se encontra distribuída a força  $P$ . Quer este efeito quer a compressão  $\sigma_y$  devem influenciar a rotura e por isso têm surgido objecções sobre a interpretação dos resultados do ensaio brasileiro.

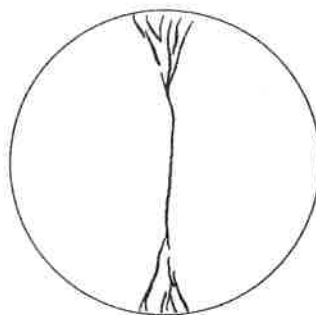


Fig.3.3-3

Pelas razões apontadas dispõe-se de reduzida informação sobre o comportamento das rochas em tracção. Na Fig. 3.3-4 apresenta-se o que se pode considerar o diagrama típico de deformação sob tracção simples (Hawkes, Mellor, 1970). As fissuras das rochas e a sua propagação determinam diagramas curvos, com a curvatura dirigida no sentido dos  $\sigma$  decrescentes, isto é, um módulo de elasticidade decrescente. É de esperar que a fissuração das rochas determine valores do módulo de elasticidade em tracção mais baixos do que em compressão.