

Máster Universitario
en Túneles
y Obras Subterráneas



ÁREA: A
MÓDULO: MECÁNICA DE ROCAS

ENSAYOS DE LABORATORIO EN ROCAS

Ponente: A. Perucho
Día: 1 de Febrero 2007
Hora: 16.00 a 17.00 h.

Diapositiva

1

Ensayos de laboratorio en rocas

1. Estudio del comportamiento geomecánico del macizo
2. Estudio de las características de la roca para su utilización en obras.

Área Perucho

Diapositiva

2

Ensayos de laboratorio en rocas

- 1 Ensayos de identificación y estado
- 2 Ensayos de clasificación
- 3 Ensayos de resistencia y deformabilidad
- 4 Ensayos de permeabilidad
- 5 Ensayos de alterabilidad

Diapositiva

3

Normativas de ensayos en rocas

Objetivo: Proporcionar una pauta para la ejecución de los ensayos, con el fin de universalizar los resultados obtenidos

Normativa utilizada en España: Normas NLI, UNE y ASIM, así como los "Métodos sugeridos" por la ISRM

NLT Normas Laborales de España

Diapositiva

4

1. Ensayos de identificación y estado

Objetivo: definir el estado en que se encuentra la roca y establecer su composición, estructura, intrusiones, orientaciones preferentes, discontinuidades, etc.

- Porosidad
- Densidad y peso específico real y aparente
- Humedad
- Absorción
- Descripción visual
- Análisis petrográfico
- Microscopio electrónico
- Difracción por rayos X

4

Diapositiva

5

2. Ensayos de clasificación

Objetivo: Cualificar el material clasificando la roca entre los estados más sanos posibles a los muy alterados o débiles

- Velocidad de ondas
- Resistencia a compresión simple
- Carga puntual
- Dureza Schmidt
- Tracción directa
- Tracción indirecta (ensayo brasileño)

5

Diapositiva

6

3. Ensayos de resistencia y deformabilidad

- Tracción directa e indirecta
- Resistencia a compresión simple con medida de deformaciones
- Módulo de deformación por métodos dinámicos
- Compresión triaxial
- Corte directo y rozamiento en diaclasas

6

Diapositiva

7

4. Ensayos de permeabilidad

- Permeabilidad radial en probeta (ensayo de Bernaix)

*Del testigo de roca
La permeabilidad del agua varía en función del tipo de junta, fisuras, etc. de la probeta de roca.*

Diapositiva

8

5. Ensayos de alterabilidad

- Hinchamiento
- Humedad-sequedad
- Calentamiento-enfriamiento
- Hielo-deshielo
- Cristalización de sales
- Desmoronamiento o inmersión
- Sequedad-humedad-desmoronamiento ("Slake durability test")
- Ensayo de Los Ángeles
- Rotura de las partículas

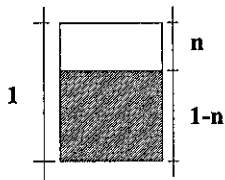
Diapositiva

9

1. Ensayos de identificación y estado

Porosidad, n

Fración de volumen ocupada por los poros, con respecto al volumen total

$$n(\%) = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \cdot 100$$


Normas: UNE 83-133-90. UNE 83-134-90
Recomendaciones ISRM

Diapositiva

10

1. Ensayos de identificación y estado

Porosidad, n

Suele obtenerse a partir del volumen total (inmersión en mercurio) y el volumen de huecos (diferencia entre peso saturado y seco)

Huecos (forma redondeada) + Fisuras (forma aplanada)

Un volumen de fisuras del orden del 2% en un granito implica una reducción de su resistencia del orden del 50% mientras que una reducción del mismo orden en un material sedimentario necesitaría de un 20% de huecos de tipo redondeado (Serrano 1995)

10

La porosidad de tipo fisura disminuye mucho + la resistencia \propto 1. tipo huecos.

Diapositiva

11

Valores típicos de la porosidad

Roca		Porosidad (%)
<i>Poco porosa</i>	Igneas intrusivas	Granito 0.5-1.5
		Diorita 0.1-0.5
		Gabro 0.1-0.2
<i>Variable</i>	Igneas extrusivas	Riolita 4-6
		Andesita 10-15
		Basalto 0.1-1
<i>Poco porosa</i>	Metamórficas	Gneis 0.5-1.5
		Mármol 0.5-2.0
		Esquisto 0.1-0.5
		Cuarcita 0.1-0.5
<i>Más porosa</i>	Sedimentarias	Pizarra 10-30
		Arenisca 5-25
		Dolomía 1-5
		Caliza 5-20

Diapositiva

12

1. Ensayos de identificación y estado

Densidad y peso específico

Densidad = Masa por unidad de volumen

Peso específico = Peso por unidad de volumen

Normas: UNE 83-133-90 UNE 83-134-90 y NLI 156-72

Recomendaciones ISRM

Gran influencia sobre otras propiedades de la roca:
 en general a mayor densidad mayor resistencia,
 menor deformabilidad y menor alterabilidad

12

Diapositiva 13

Roca	Peso específico (kN/m ³)
Plutónica	
Granito	26.0
Diorita	27.0
Sienita	25.0
Gabro	29.4
Volcánica	
Basalto	27.1
Metamórfica	
Micasquisto	27.6
Anfibolita	29.3
Mármol	27.0
Sedimentaria	
Cuarzo	27.6
Caliza	26.5
Yeso	22.5
Sal	20.6
Pizarra	22.1-25.7

Diapositiva 14

Mineral	G
Galena	7.4-7.6
Pirita	4.9-5.2
Magnetita	4.4-5.2
Barita	4.3-4.6
Olivino	3.2-3.6
Piroxeno	3.2-3.6
Anhidrita	2.9-3.0
Dolomita	2.8-3.1
Biotita	2.8-3.1
Moscovita	2.7-3.0
Calcita	2.7
Clorita o illita	2.6-3.0
Plagioclasa	2.6-2.8
Cuarzo	2.65
Calcedonia	2.6-2.64
Ortoclasa	2.5-2.6
Serpentina	2.3-2.6
Yeso	2.3-2.4
Halita	2.1-2.6

peso específico relativo de la roca

$$G = \frac{\gamma_{roca}}{\gamma_w}$$

Diapositiva 15

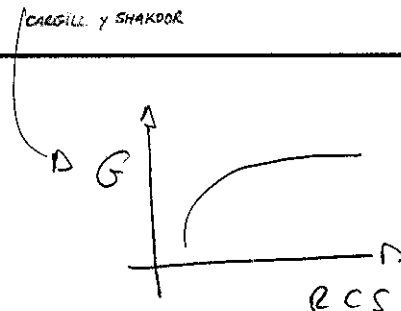
ATKINSON Y FARMER (1975)

Como se aprecia en las gráficas existe una influencia clara entre la densidad y la resistencia a compresión simple de la roca

También existe una influencia clara entre la densidad y el grado de meteorización de la roca

CALGILL Y SHAKDOR

Gravedad específica (G)
Peso específico relativo de la roca



Diapositiva
16

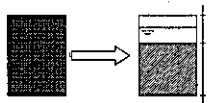
$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

1. Ensayos de identificación y estado

Humedad

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

Volumen total, V

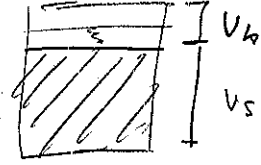


Volumen de huecos, V_h
Volumen de sólidos, V_s

$W_s \rightarrow$ peso de partículas sólidas

Normas: UNE 103-300-93 Recomendaciones ISRM

16



Diapositiva
17

1. Ensayos de identificación y estado

Absorción

Se sumerge la muestra en agua, midiéndose el agua absorbida

Relacionada con la alterabilidad

Da una idea del grado de meteorización por comparación de muestras de la misma roca

Normas: UNE 83-133-90, UNE 83-134-90

Recomendaciones ISRM

17

Diapositiva
18

1. Ensayos de identificación y estado

Descripción visual

Permite diferenciar distintos materiales y sus grados de meteorización, discontinuidades, espaciamientos, etc

Color: carta de colores de Munsell o espectrocolorímetro

18

Diapositiva
19

1. Ensayos de identificación y estado

Descripción visual

Grado de meteorización: Recomendaciones de la ISRM:

- I "Categoría I: Sana
- II "Categoría I: Débilmente meteorizada
- III "Categoría I: Moderadamente meteorizada
- IV "Categoría I: Muy meteorizada
- V "Categoría I: Completamente meteorizada

19

Diapositiva
20

1. Ensayos de identificación y estado

Análisis petrográfico

Microscopio petrográfico: Permite reconocer los distintos minerales de la roca a partir de sus propiedades ópticas

Se puede observar la textura de la roca y el tamaño predominante de grano

Normas: Recomendaciones ISRM

20

Diapositiva
21

1. Ensayos de identificación y estado

Microscopio electrónico

Permite reconocer direcciones preferentes, microfisuras en cristales, grado de meteorización, etc

21

Diapositiva
22

1. Ensayos de identificación y estado

Difracción por rayos X

Se determina la composición de la roca y la proporción de minerales de naturaleza arcillosa

Diapositiva
23

2. Ensayos de clasificación

Velocidad de ondas

Permite determinar el grado de fisuración de un testigo de roca

Se da una pulsación en un extremo del testigo y se mide el tiempo que tarda en llegar al otro extremo.


Las velocidades longitudinales y transversales dependen de las propiedades elásticas y del peso específico de la roca

Ensayos de clasificación
↓

Diapositiva
24

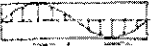
2. Ensayos de clasificación

Velocidad de ondas



onda longitudinal

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\gamma}}$$



onda transversal

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\gamma}}$$

V_L, V_T : Velocidades longitudinal y transversal respectivamente

E: Módulo de Young

G: Módulo de rigidez transversal (o corte)

ambos para deformaciones muy pequeñas (<0.001%)

En este ensayo se obtienen los valores
dilatométricos ya que son parámetros muy pequeños.
Por deformaciones pequeñas se los obtiene a un nivel.

$$E \approx \frac{Ed}{10}, \quad G \approx \frac{Gd}{100}$$

Diapositiva
25

2. Ensayos de clasificación

Velocidad de ondas

Índice de calidad de Fourmaitreaux (1976): para valorar el estado de fisuración de una roca

$$IQ = \frac{V_r}{V_i^*} \cdot 100$$

V_r : Velocidad longitudinal real en el testigo
 V_i^* : Velocidad longitudinal teórica en el testigo, si no hubiese discontinuidades

25

Diapositiva
26

2. Ensayos de clasificación

Velocidad de ondas

$$\frac{1}{V_c^*} = \sum \frac{C_i}{V_{i1}}$$

C_i : Concentración de cada uno de los minerales constitutivos de la roca
 V_{i1} : Velocidad longitudinal en cada mineral

26

Diapositiva
27

Valores de V_{i1} para minerales	
Mineral	V_{i1} (m/s)
Anfibolita	7200
Augita	7200
Calcita	6600
Cuarzo	6050
Dolomita	7500
Epidota	7450
Magnetita	7400
Moscovita	5800
Olivino	8400
Ortoclasa	5800
Pirita	8000
Plagioclasa	6250
Yeso	5200

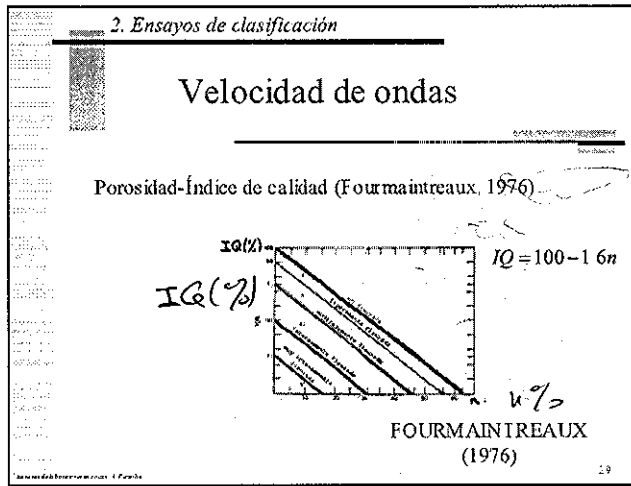
Fourmaitreaux (1976)

Diapositiva
28

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

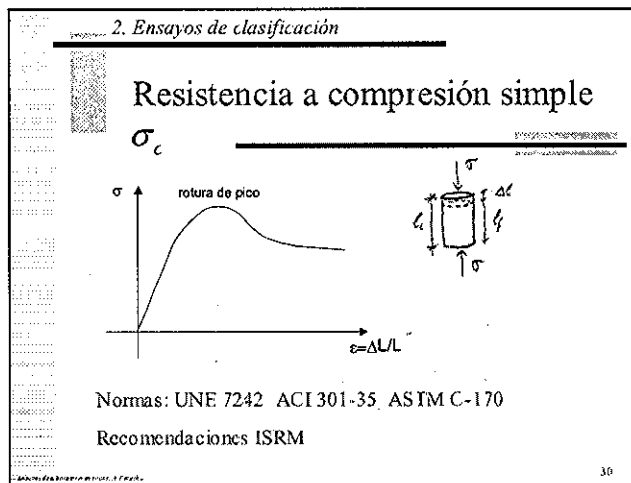
Fourmaitreaux (1976)

Diapositiva
29



huesos
poros
huesos
s/p - p - ras
+ presión

Diapositiva
30



influye mucho el tamaño de la muestra

- $A \rightarrow$ tamaño L. RCS \downarrow porque se debilita + fisuras
- Esbeltez
- Paralelismo de las bases
- Regularidad de las bases

Diapositiva

31

Valores de la matriz rocosa sana (González de Vallejo et al a partir de datos de diferentes autores)

Roca íntacta	Resistencia a compresión simple (kp/cm ²)		Resistencia a tracción (kp/cm ²)
	Valores medios	Rango de valores	
Andesita	2100-3200	1000-5000	70
Anfibolita	2800	2100-5300	230
Anhidrita	900	800-1300	60-120
Arenisca	550-1400	300-2350	50-200
Basalto	1500-2150	800-3500	50-250
Caliza	800-1400	600-2000	40-300
Cuarcita	2000-3200	1000-5000	100-300
Diabasa	2400-3500	1300-5650	350
Diorita	1800-2450	1200-3350	80-300
Dolerita	2000-3000	1000-3500	150-350
Dolomita	900-2500	650-3500	50-250
Esquistos	500-600	200-1600	20-55
Gabro	2100-2800	1800-3000	140-300
Gneiss	1600-2000	850-2500	50-200
Granito	1700-2300	1000-3000	70-250
Grauwaca	1800	800-2200	55-150
Limolita		350-2500	27
Lutita	300-700	100-1000	15-100 5-10*
Marga	700-1400	700-1900	
Mármol	1200-2000	600-2500	65-200
Pizarra	1000-1800	900-2500	70-200
Sal	120	50-300	
Toba		100-460	10-40
Yeso	250	100-400	10-25

(*) A favor de superficies de laminación

Diapositiva

32

Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple (González de Vallejo et al.)

Resistencia a compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological Society of London (1970)	Bienlawski (1973)	Ejemplos
<1		Suelos		
1-5	Muy blanda	Blanda (>1.25)		
5-12.5	Blanda	Moderadamente blanda	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón
12.5-25		Moderadamente dura	Baja	Esquistos, pizarra
25-50	Moderadamente dura	Dura	Media	Rocas metamórficas, esquistosas, mármol, granitos, gneiss, arenisca, caliza porosa
50-100	Dura	Dura	Alta	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomita
100-200	Muy dura	Muy dura	Muy alta	Cuarcita, gabro, basalto
>200	Extremadamente dura	Extremadamente dura		
>250				

Diapositiva

33

2. Ensayos de clasificación

Carga puntual

Índice $I_s(50)$

$$I_s(50) = \frac{P}{D^2}$$

Normas: NLT-252/91

Comprimión por dos puntas cónicas de roca

Radio punta 10 mm
Ángulo 60°

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

Diapositiva

34

FORMA DE DETERMINAR EL TAMAÑO DE LAS PROBETAS EN EL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL

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

ISRM (1985)

$I_s \rightarrow$ Índice de carga puntual o índice Frac Franklin.

Diapositiva

35

- Ensayo de carga puntual

Se puede realizar {
 Sobre testigos de sondas
 Sobre trozos de roca

a) Sobre testigos de sondas a carga de roca.

Índice de resistencia $I_s = \frac{P}{D^2}$

ISRM (1985):
 - $10 \text{ mm} \leq D \leq 100 \text{ mm}$
 - $h = 1.5D$
 - Espesor plano para $D = 50 \text{ mm}$
 $I_{s50} = I_s \left\{ \begin{array}{l} \times \left(\frac{50}{D}\right)^2 \\ \times \left(\frac{D}{50}\right)^2 \end{array} \right.$
 - Muestras: 15 probetas
 - Placa de ensayo: en almohada

debe ser 10 probetas por cada categoría del ensayo.

Diapositiva

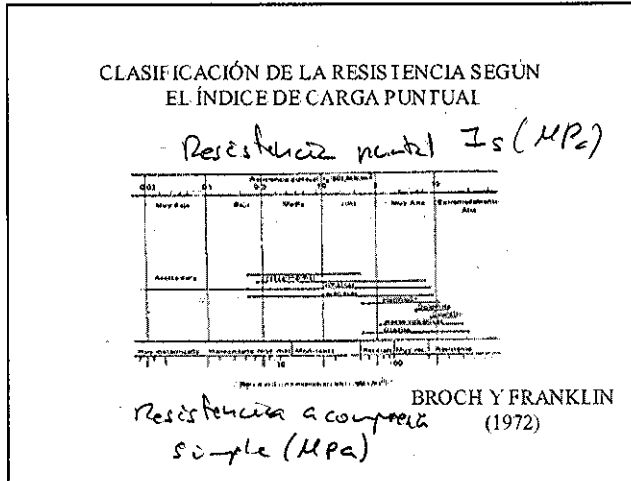
36

Índice de resistencia I_{s50}

Valores típicos de I_{s50}	
Roca	I_{s50} (MPa)
Arenisca y lutitas terciarias	0.05-1
Carbón	0.2-2
Caliza	0.25-8
Limolitas y pizarras	0.2-8
Rocas volcánicas de flujo	3-15
Dolomía	6-11

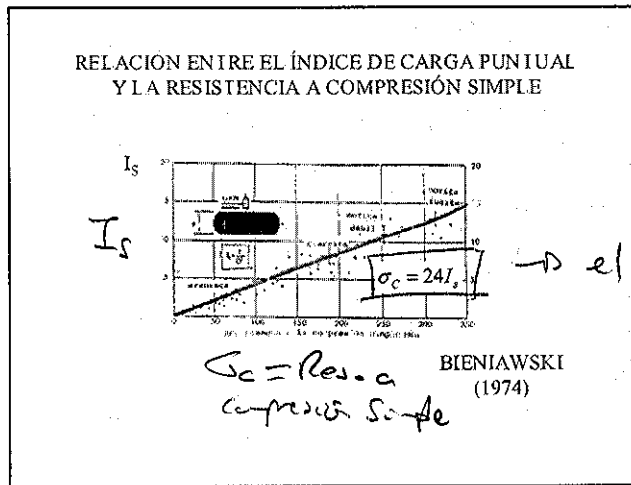
Broch y Franklin (1972)

Diapositiva
37



$MPa = MN/m^2$

Diapositiva
38



→ el 24 parece que es mucho mejor.

Diapositiva
39

2. Ensayos de clasificación

Dureza Schmidt *Esclerómetro*

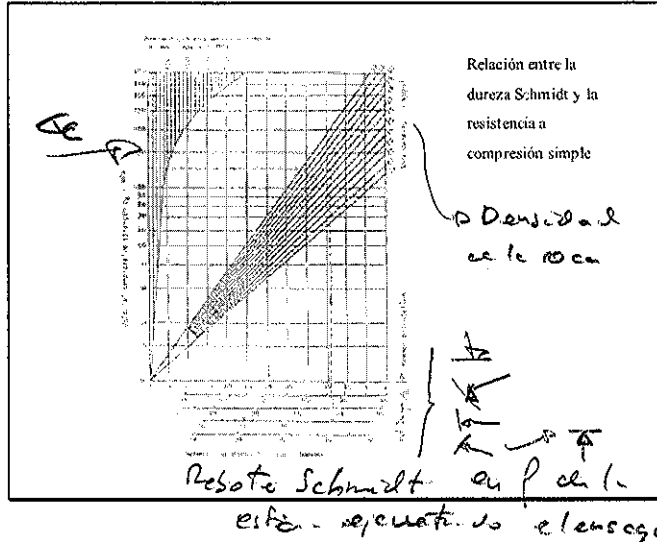
Mide la dureza superficial de la roca mediante el martillo Schmidt (o esclerómetro)

Da una idea de la resistencia a compresión simple, con la que correlaciona razonablemente bien

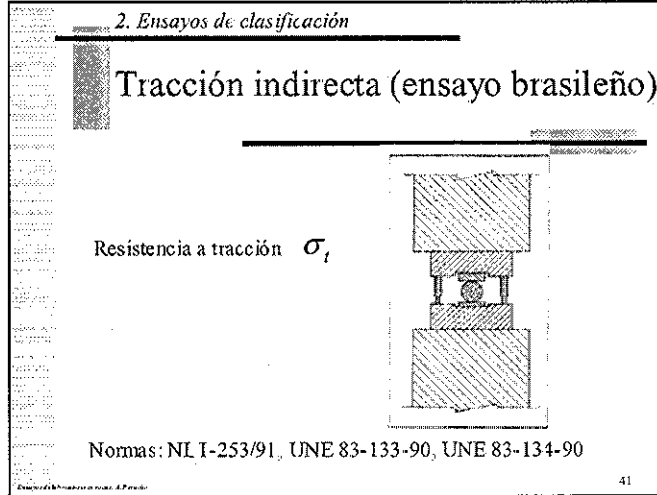
Índice de rebote

39

Diapositiva
40

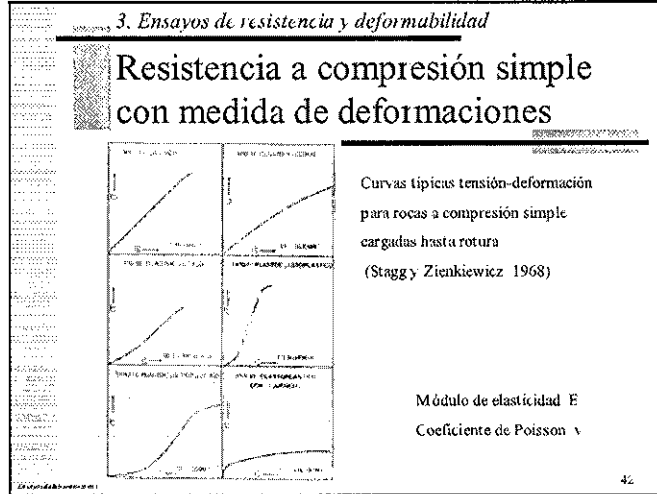


Diapositiva
41



Debido a que la roca soporta a compresión pero las generatrices laterales se generan unas fracturas a lo largo del diámetro

Diapositiva
42



Ensayos de resistencia

fractura

Diapositiva
43

3. Ensayos de resistencia y deformabilidad

Módulo de deformación por métodos dinámicos

Se obtienen a partir de la medida de la velocidad de transmisión de ondas como se indicó anteriormente

Módulo de elasticidad dinámico, E_d
Coeficiente de Poisson dinámico, ν_d

43

Diapositiva
44

3. Ensayos de resistencia y deformabilidad

Compresión triaxial

Similares a los utilizados en suelos. Se rompe la probeta de roca confinada a una presión constante

Cohesión, c
Ángulo de rozamiento interno, ϕ
(pico ϕ_p , y residual ϕ_R)

44

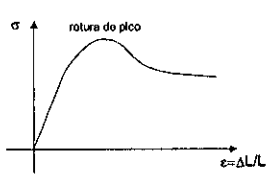
Diapositiva
45

3. Ensayos de resistencia y deformabilidad

Corte directo y rozamiento en diaclasas

Se obtiene la resistencia al corte de discontinuidades

Cohesión, c
Ángulo de rozamiento interno, ϕ
(pico, ϕ_p , y residual ϕ_R de la discontinuidad)




45

Diapositiva

46

4. Ensayos de permeabilidad

Permeabilidad radial en probeta (ensayo de Bernaix, 1974)



$$k = \frac{q}{2\pi\Delta hL} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

- Huecos tipo fisura: cambio de permeabilidad con cambios de tensión
- Huecos tipo poro: la permeabilidad no varía con los cambios de tensión

46

Hacer un cilindro hueco
 1.- Poner agua en interior y presionar hacia el agua, el anillo se somete a tracción. Se mide su permeabilidad.
 2.- Se pone el agua fuera y se presiona el agua, el anillo se somete a compresión y se mide la permeabilidad.
 Si la permeabilidad es 2 veces mayor para compresión que para tracción se abre.


Diapositiva

47

PERMEABILIDAD TÍPICA DE ROCAS

Material	Permeabilidad (cm ² /seg)	Permeabilidad (Darcy)
Granito	10 ⁻¹² a 10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹²
Basalto	10 ⁻¹² a 10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹²
Caliza	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹²	10 ⁻⁸ a 10 ⁻¹⁰
Yeso	10 ⁻⁸ a 10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸
Arcilla	10 ⁻¹⁴ a 10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹² a 10 ⁻¹⁴
Esquistos	10 ⁻¹² a 10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹²
Carbón	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹²	10 ⁻⁸ a 10 ⁻¹⁰
Sal	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹²	10 ⁻⁸ a 10 ⁻¹⁰

GOODMAN



FREEZE Y CHERRY (1979)

Diapositiva

48

5. Ensayos de alterabilidad

Hinchamiento

Se trata de medir el cambio de volumen debido al incremento de humedad de la roca

Especialmente indicado para rocas arcillosas que incrementan su volumen por adsorción de agua con un potencial de hinchamiento en función de la naturaleza de la arcilla

48

Diapositiva
49

5. Ensayos de alterabilidad

Humedad-sequedad

Ciclos de humedad-sequedad: pretenden tener en cuenta el posible debilitamiento originado en la roca por la sucesiva humectación y desecación parcial de la misma

Normas: NL I-260/99

49

Diapositiva
50

5. Ensayos de alterabilidad

Calentamiento-enfriamiento

Ciclos de calentamiento-enfriamiento: pretenden deducir el comportamiento de la roca frente a las expansiones y contracciones térmicas

50

Diapositiva
51

5. Ensayos de alterabilidad

Hielo-deshielo

Ciclos de hielo-deshielo: pretenden deducir el efecto de las heladas en rocas saturadas

Por la variación de volumen del agua al congelarse se puede producir una notable fisuración en la roca

51

Diapositiva
52

5. Ensayos de alterabilidad

Cristalización de sales

Ciclos de cristalización de sales: se ataca la roca con sales y se estudia el efecto que produce sobre la misma el crecimiento de cristales

Se trata de simular el efecto de las heladas

52

Diapositiva
53

5. Ensayos de alterabilidad

Desmoronamiento o inmersión

Una muestra de roca de unos 20 gramos se sumerge en agua destilada y se observa su comportamiento

53

Diapositiva
54

5. Ensayos de alterabilidad

Sequedad-humedad-desmoronamiento (Slake Durability Test)

Franklin y Chandra (1974)

Se trata de medir la resistencia de la roca frente a la meteorización, sometiéndola a dos ciclos sucesivos de secado y agitación en agua. Se utiliza en materiales pizarrosos y argilíticos

Índice Señudes I_D

54

Diapositiva
55

5. Ensayos de alterabilidad

Desgaste de Los Ángeles

Determina la resistencia a la fragmentación por choque, con bolas de acero, de los fragmentos rocosos que se emplean en la realización del mismo.

Coefficiente de desgaste de Los Ángeles

Normas: NL T-149/91, ASTM C 131-81, ASTM C 535-81

55

Diapositiva
56

5. Ensayos de alterabilidad

Rotura de partículas

Matsal (1975)

56

Diapositiva
57

