

ENSAYOS DE LABORATORIO EN ROCAS

II MÁSTER EN MECÁNICA DEL SUELO  
E INGENIERÍA DE CIMENTACIONES

José Estaire Gepp  
Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)



## 1. INTRODUCCION

Los ensayos de laboratorio realizados en rocas pueden tener dos objetivos diferentes: el estudio del comportamiento geomecánico del macizo rocoso o el análisis de la roca para su utilización posterior en obras de carretera, portuarias, arquitectónicas.

En la Mecánica de Rocas se trata de determinar el modelo de comportamiento geomecánico que va a tener el macizo rocoso frente a un conjunto de acciones externas. Este comportamiento depende de las características propias del macizo, en cuanto a sus discontinuidades y de las características de la roca matriz. Estos dos factores se estudian por separado inicialmente, para posteriormente realizar un análisis conjunto que permita definir un modelo de comportamiento tensodeformacional del macizo rocoso con el que abordar los problemas que se presenten.

Los ensayos que aquí se van a explicar tratan de definir las características de la roca matriz.

El otro gran objetivo de los ensayos de laboratorio realizados con rocas es la determinación de las características de éstas pensando en su posible utilización como material de construcción. A título de ejemplo se pueden mencionar, entre otros, los pedraplenes de las carreteras, las escolleras de las presas, las escolleras de las obras marítimas, los mampuestos y sillares con fin arquitectónico.

La mayoría de los ensayos que se van a explicar son comunes para ambos objetivos, aunque se mencionarán los que resulten más orientados a un objetivo que a otro.

Los ensayos que se van a explicar se han agrupado en las siguientes tipologías, teniendo en cuenta que alguno de ellos pueden ser englobados en varias de las clasificaciones:

- a.- **Ensayos de identificación:** con ellos se pretende establecer la composición de la roca, conocer su estructura, determinar la presencia de intrusiones, orientaciones preferentes y existencia de discontinuidades.
- b.- **Ensayos de estado:** el objetivo de estos ensayos es conocer el estado en que se encuentra la roca en relación con su densidad, porosidad y humedad.
- c.- **Ensayos de clasificación:** con este tipo de ensayos se pretende establecer una clasificación del material de acuerdo con diversos criterios semiempíricos diferenciando entre los estados más sanos posibles a los muy alterados o débiles.
- d.- **Ensayos de resistencia y deformabilidad,** con los que se pretende determinar diferentes parámetros resistivos y deformacionales.
- e.- **Ensayos de permeabilidad**
- f.- **Ensayos de alterabilidad frente a los agentes físicos y químicos.**

## 2. ENSAYOS DE IDENTIFICACION

Con este grupo de ensayos de identificación se pretende, entre otras cosas, establecer la composición de la roca, conocer su estructura, determinar la presencia de intrusiones, orientaciones preferentes y existencia de discontinuidades.

### 2.1. Descripción petrográfica

El nombre petrológico que identifica el material y su descripción deben acompañar siempre a todo estudio de materiales rocosos. Numerosas organizaciones mundiales, entre otras ASTM (American Society for Testing and Materials), BS (British Standard), ISRM (International Society of Rock Mechanics) han establecido recomendaciones concretas para efectuar un adecuado examen petrográfico de las rocas.

En relación con las características propiamente petrológicas de la roca, pueden emplearse para su determinación, con carácter orientativo y de una manera progresiva, las siguientes técnicas:

- a) Reconocimiento y descripción "de visu" de los testigos o fragmentos de roca, lo cual permite diferenciar los distintos materiales y, complementariamente, sus grados de meteorización, las discontinuidades que presentan y, en el caso de los testigos, su espaciamiento.
- b) Análisis mediante lupa binocular de 20 a 30 aumentos, con lo cual es posible tener una primera idea de los componentes minerales de la roca, su posible estructura y su distribución espacial.
- c) Observación mediante microscopio petrográfico que, con el mismo propósito que la lupa binocular, posee un mayor poder

de resolución. También permite reconocer los distintos minerales que componen la roca a partir de sus propiedades ópticas.

Con cualquiera de las tres técnicas anteriores es posible, además, determinar la textura que presenta la roca y el tamaño de grano predominante en la misma.

- d) Utilización de técnicas de difracción de rayos X, con las cuales se analiza de forma muy adecuada la composición de la roca y la proporción de minerales de naturaleza arcillosa.

## **2.2. Color**

El color es la propiedad física que define la apariencia estética de la roca y su posible grado de alteración. Suele medirse bien por la carta de colores de Munsell o mediante el espectrocolorímetro.

## **2.3. Grado de meteorización**

Generalmente es preciso conocer el grado de meteorización que presenta la roca, siendo frecuente emplear para su determinación, las siguientes recomendaciones establecidas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1978):

### **- Categoría I: Sana**

No hay signos visibles de meteorización. Si acaso una débil decoloración en las principales superficies de discontinuidad.

### **- Categoría II: Débilmente meteorizada**

La decoloración indica una meteorización de la roca matriz y de las discontinuidades. Todo el medio rocoso puede estar

decolorado y ser algo más débil externamente que en su condición sana.

- **Categoría III: Moderadamente meteorizada**

Menos de la mitad del material está descompuesto y/o desintegrado hasta la condición de suelo. Aparece roca sana o decolorada, ya sea de forma continua o en zonas aisladas.

- **Categoría IV: Muy Meteorizada**

Más de la mitad del material está descompuesto y/o desintegrado hasta la condición de suelo. Aparece roca sana de modo discontinuo.

- **Categoría V: Completamente meteorizada**

Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada aunque la estructura original está en su mayoría intacta.

#### 2.4. Presencia de arcillas, sulfatos y sales

La presencia en la roca de determinados componentes químicos puede dar lugar a una elevada alteración de la misma. Por ello, será preciso determinar previamente estos componentes para poder aventurar su comportamiento futuro.

En este sentido, resultará de gran utilidad determinar:

- a.- El contenido de arcillas del grupo de las esmectitas, análisis que se realiza normalmente mediante el ensayo conocido como "Absorción de Azul de Metileno" (Norma UNE 83-130-90) o mediante difracción de Rayos X.
- b.- El contenido de Sulfatos y Sulfuros totales, para lo que se puede usar la Norma UNE 83-120-88.
- c.- La presencia de Sales Solubles y Sales Hidrables, y en caso afirmativo, cuantificar su porcentaje con las indicaciones de las Normas UNE 83-124-90 y NLT 119 y 120/72.

La identificación realizada de acuerdo a los criterios anteriores suministrará un conjunto de datos de índole cualita-

tivo acerca de los caracteres generales de la roca, pudiendo predecir, en una primera aproximación, su comportamiento futuro. Sin embargo, esta primera identificación será insuficiente para el proyectista en relación con las posibilidades reales de utilización del material.



### 3. ENSAYOS DE ESTADO

El objetivo de estos ensayos es conocer el estado en que se encuentra la roca en relación con su densidad, porosidad y humedad.

#### 3.1. Densidad y peso específico de las partículas

El término densidad se refiere a la masa por unidad de volumen, mientras que el concepto conocido como peso específico de las partículas es el peso por unidad de volumen, pero teniendo en cuenta únicamente los granos o cristales de roca y despreciando los huecos.

Se pueden emplear para su determinación en laboratorio las siguientes normas de ensayo: UNE 83-133-90 y 83-134-90 y NLT 156/72.

En cualquiera de las normas anteriores, las densidades se obtienen con carácter general a partir de expresiones en las que intervienen fundamentalmente el peso seco de la muestra, su peso hidrostático y el peso de la muestra saturada de agua.

A modo de resumen, en las Tablas I y II se recogen, respectivamente, los valores de las densidades aparentes medias de diferentes tipos de rocas y los pesos específicos medios de los minerales más corrientes. Es preciso recordar que los valores que figuran en la primera de ellas son valores medios, de tal forma que en la práctica pueden existir variaciones importantes como consecuencia de factores no tenidos en cuenta a la hora de elaborar la misma.

TABLA I

VALORES MEDIOS DE LA DENSIDAD DE ALGUNAS ROCAS  
(TURCHANINOV ET AL., 1979)

ROCA	DENSIDAD (t/m <sup>3</sup> )	LÍMITE DE VARIACIÓN
<b>ROCAS ÍGNEAS</b>		
Obsidiana	2.37	2.32 - 2.47
Granito	2.66	2.52 - 2.81
Sienita	2.75	2.60 - 2.95
Diorita	2.85	2.71 - 2.99
Basalto	2.90	2.74 - 3.21
Diabasa	2.95	2.73 - 3.12
Gabro	2.99	2.85 - 3.12
<b>ROCAS SEDIMENTARIAS</b>		
Argilita	2.46	2.35 - 2.64
Loess	2.64	
Arenisca	2.65	2.59 - 2.72
Caliza	2.73	2.68 - 2.84
<b>ROCAS METAMÓRFICAS</b>		
Pizarra	2.30	2.21 - 2.57
Mármol	2.78	2.69 - 2.87
Gneis	2.78	2.69 - 2.87

La densidad generalmente tiene una marcada influencia sobre otras propiedades de la roca como pueden ser la porosidad, la absorción de agua, el grado de alteración y fundamentalmente sobre la resistencia.

No hay que olvidar que con carácter general se puede afirmar que a mayor densidad de la roca, mayor resistencia, menor deformabilidad y menor alteración de los fragmentos de la misma frente al ataque de los agentes físicos o químicos.

TABLA II

VALORES MEDIOS DEL PESO ESPECÍFICO  
DE ALGUNOS MINERALES COMUNES  
(WINCHELL, 1942)

MINERAL	$G_s$ (t/m <sup>3</sup> )
Halita	2.1 - 2.6
Yeso	2.3 - 2.4
Serpentina	2.3 - 2.6
Ortoclasa	2.5 - 2.6
Calcedonia	2.6 - 2.64
Cuarzo	2.65
Plagioclasa	2.6 - 2.8
Clorita	2.6 - 3.0
Calcita	2.7
Moscovita	2.7 - 3.0
Biotita	2.8 - 3.1
Dolomita	2.8 - 3.1
Olivino	3.2 - 3.6
Magnetita	4.4 - 5.2
Pirita	4.9 - 5.2
Galena	7.4 - 7.6

### 3.2. Porosidad

La porosidad es la relación entre el volumen de huecos, entendido normalmente como la suma de huecos y fisuras, y el volumen total de la muestra de roca.

Los huecos como tal suelen ser aproximadamente de forma esférica o redondeada, mientras que las fisuras suelen ser sensiblemente planas.

Para tener una idea de la influencia que huecos y fisuras tienen en el comportamiento mecánico de las rocas, sirva el siguiente ejemplo (Serrano, 1995). 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, por ejemplo, necesitaría de un 20% de huecos de tipo redondeado.

La porosidad de una roca puede determinarse mediante las siguientes formas:

- A partir de la densidad.
- A partir del agua absorbida tras saturar la roca con agua.
- Saturando la roca con mercurio introducido a presión.
- Midiendo el volumen de sólidos y de aire utilizando la ley de Boyle.

Normalmente la porosidad de las rocas se obtiene en laboratorio a partir del volumen total de la muestra (por inmersión en mercurio, por ejemplo) y del volumen de huecos, determinándose este último como diferencia entre el peso saturado y seco de la muestra ensayada.

Este método sólo resulta aplicable a los poros que se encuentran muy próximos a la superficie de la muestra, quedando sin contabilizar los que quedan en el interior (no interconectados con los otros). En este último caso, no es posible conseguir la saturación total de la muestra por lo que se suele emplear para su determinación el peso específico aparente de la roca,  $\gamma$ , y el peso específico de las partículas,  $G_s$ , mediante la siguiente expresión:

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

Como normas de ensayo específicas para su obtención en laboratorio pueden emplearse las siguientes: UNE 83-133-90 y UNE 83-134-90.

En la Tabla III se han recogido valores de la porosidad de un conjunto de rocas muy comunes, poco o nada meteorizadas. A partir de la tabla puede comprobarse que, en general, las rocas ígneas intrusivas y metamórficas tienen una porosidad muy baja, siendo muy superior en las rocas de origen sedimentario. Situación muy similar a la anterior ocurre con las rocas de origen volcánico (ígneas extrusivas).

En el caso de las rocas ígneas sanas, la porosidad es normalmente inferior al 2%, mientras que si se encuentran alteradas, puede llegar a ser superior al 20%. Este hecho permite afirmar que la porosidad puede servir como índice de calidad de las rocas.

Además, para el mismo tipo de roca, la porosidad disminuye con la edad y con la profundidad a la que se encuentra. En cualquier caso, la resistencia, la deformabilidad y la alterabilidad están relacionadas de manera directa con la porosidad.

TABLA III

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

TIPO DE ROCA	POROSIDAD (%)
<b>Rocas Ígneas Intrusivas</b>	
Granito	0.5 - 1.5
Dolerita	0.1 - 0.5
Gabro	0.1 - 0.2
<b>Rocas Ígneas Extrusivas</b>	
Riolita	4 - 6
Andesita	10 - 15
Basalto	0.1 - 1
<b>Rocas Metamórficas</b>	
Gneis	0.5 - 1.5
Marmol	0.5 - 2.0
Esquisto	0.1 - 0.5
Pizarra	10 - 30
Cuarcita	0.1 - 0.5
<b>Rocas Sedimentarias</b>	
Arenisca	5 - 25
Caliza	5 - 20
Dolomía	1 - 5

### 3.3. Absorción de agua

El ensayo consiste en sumergir las muestras en un recipiente con agua, en las condiciones establecidas en cada uno de los distintos tipos de ensayo que existen normalizados. Es un ensayo que se emplea muy a menudo para determinar la alterabilidad potencial de las rocas.

Se pueden diferenciar los siguientes tipos:

- Absorción de agua por inmersión libre o forzada.
- Absorción de agua por higroscopicidad.
- Absorción de agua por capilaridad.

Los ensayos anteriores pueden realizarse a través de las siguientes normas específicas: UNE 83-133-90 y 83-134-90.

La cantidad de agua absorbida por un fragmento de roca influye directamente en su resistencia. Así, una importante absorción puede llegar a producir una reducción drástica de la resistencia a la compresión simple o en la carga puntual.

En el caso de rocas para escollera, entendida aquí como un conjunto de fragmentos individuales, el agua absorbida aumenta la deformabilidad ya que el agua tiende a debilitar los contactos entre partículas y disminuye la resistencia al corte al reducir el rozamiento entre los fragmentos.

La influencia en este último caso, es más importante en rocas que presentan minerales con una red cristalina bidimensional (mica, serpentina, clorita, etc.), en las cuales el agua actúa como si de un lubricante se tratara. Lo contrario ocurre en rocas que presentan minerales con red cristalina tridimensional, que son las más frecuentemente empleadas como escollera.

En el campo de las presas de materiales sueltos, la Comisión Internacional de Grandes Presas en un informe sobre materiales rocosos susceptibles de ser empleados en presas de escollera establece que las rocas ígneas intrusivas (granito, sienita, diorita, gabro, etc.) presentan unas absorciones de agua, en general, inferiores al 1%. Por el contrario, las rocas sedimentarias (fundamentalmente areniscas con cementos silíceos o ferruginosos), presentan unos valores superiores al anterior, pudiendo llegar a tener absorciones de agua hasta del 20%.

Por su relación con la alterabilidad, cuando la absorción de agua de una roca sea inferior al 0.5%, en general, no será preciso acometer ensayos específicos para determinar su alterabilidad. Si la absorción oscila entre el 0.5 y el 2%, será preciso efectuar algún ensayo adicional. Si la absorción es superior al 2%, el material rocoso será considerado como marginal, a menos que los resultados de los ensayos de durabilidad apunten en sentido contrario.

En cualquier caso, la absorción de agua es el parámetro que con mayor frecuencia se emplea en las clasificaciones de rocas y escolleras para la estimación de sus propiedades mecánicas y para determinar el grado potencial de alterabilidad por ataque químico o físico, que se desarrolla en el Apartado 8.

A modo de ejemplo, en la Tabla IV se incluyen los valores de absorción de agua típicos de algunas rocas.

**TABLA IV**  
**VALORES DE LA ABSORCIÓN DE ALGUNAS ROCAS**  
**(ELABORACIÓN PROPIA)**

TIPO DE ROCA	ABSORCIÓN DE AGUA (%)
<b>Rocas Ígneas</b>	
Andesita - Traquita	1.4 - 8.0
Granito	0.2 - 1.9
Gabro	0.2 - 5.7
Basalto	0.4 - 5.4
<b>Rocas Sedimentarias</b>	
Calizas - Dolomías	0.2 - 7.5
Arenisca	0.3 - 31.0
<b>Rocas Metamórficas</b>	
Pizarra	1.8 - 3.0
Gneiss	0.4 - 0.7



#### 4. ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN

Con este tipo de ensayos se pretende establecer una clasificación del material de acuerdo con diversos criterios semiempíricos diferenciando entre los estados más sanos posibles a los muy alterados o débiles.

##### 4.1. Velocidad sónica

La velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas es un parámetro de fácil obtención en laboratorio, a partir del cual es posible determinar el grado de fisuración existente en un testigo o fragmento de roca.

Para ello, se da una pulsación en un extremo del testigo con un cristal piezoeléctrico y se recibe el impulso en el otro extremo con un segundo cristal. El tiempo transcurrido entre emisión y recepción se mide mediante la diferencia de fase de la onda emitida y recibida en un osciloscopio.

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

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

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

donde  $V_L$  y  $V_T$  son las velocidades longitudinal y transversal respectivamente;  $E$  es el módulo de deformación de la roca o módulo de Young, y  $G$  es el módulo de rigidez transversal para deformaciones muy pequeñas, normalmente inferiores a 0.001%. no son ingenieriles.

Las discontinuidades modifican las características de las ondas a su paso a través de la roca de lo cual se puede extraer numerosa información. Así, por ejemplo, la velocidad de las ondas longitudinales se reduce mucho por la presencia de fisuras en la roca.

#### 4.2. Índice de calidad

El método de Fourmaitreaux (1976) se basa en el estudio de la onda emitida y recibida en el ensayo explicado en el Apartado anterior para evaluar el estado de fisuración de la roca.

Fourmaitreaux define un índice de calidad de la roca, IQ, a través de la siguiente expresión:

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

donde  $V_L$  es la velocidad de transmisión de las ondas longitudinales en el testigo o muestra de roca y  $V_L^*$  es la velocidad teórica de las ondas longitudinales si no existiesen las discontinuidades. Esta última suele obtenerse conociendo la composición mineralógica de la roca a través de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{V_L^*} = \sum \frac{C_i}{V_{L_i}}$$

en donde  $C_i$  son las concentraciones de cada uno de los minerales constitutivos de la roca y  $V_{L_i}$  las velocidades de transmisión de las ondas en cada uno de ellos.

A título ilustrativo, la Tabla V recoge algunos valores de la velocidad de las ondas en diferentes minerales. De la misma manera, en la Tabla VI se encuentran incluidos los valores representativos obtenidos en algunas rocas típicas.

A partir del índice IQ obtenido de la manera anteriormente expuesto y de la porosidad total de la roca, entendida ésta como suma de poros y fisuras, es posible efectuar una primera clasificación de la roca de acuerdo con los criterios que se encuentran incluidos en la figura 1 (Fourmaitreaux, 1976).

**TABLA V**  
**VALORES MEDIOS DE LA VELOCIDAD**  
**SÓNICA DE ALGUNOS MINERALES COMUNES**  
**(FOURMAINTREAU, 1976)**

MINERAL	$V_L$ (m/sg)
Cuarzo	6050
Olivino	8400
Augita	7200
Anfibolita	7200
Moscovita	5800
Ortoclasa	5800
Plagioclasa	6250
Calcita	6600
Dolomita	7500
Magnetita	7400
Yeso	5200
Epidota	7450
Pirita	8000

TABLA VI

VALORES TÍPICOS DE LA VELOCIDAD  
SÓNICA DE ALGUNAS ROCAS COMUNES  
(FOURMAINTREAU, 1976)

ROCA	$V_L$ (m/sg)
Gabro	7000
Basalto	6500 - 7000
Caliza	6000 - 6500
Dolomía	6500 - 7000
Arenisca	6000
Cuarcita	6000
Granito	5500 - 6000

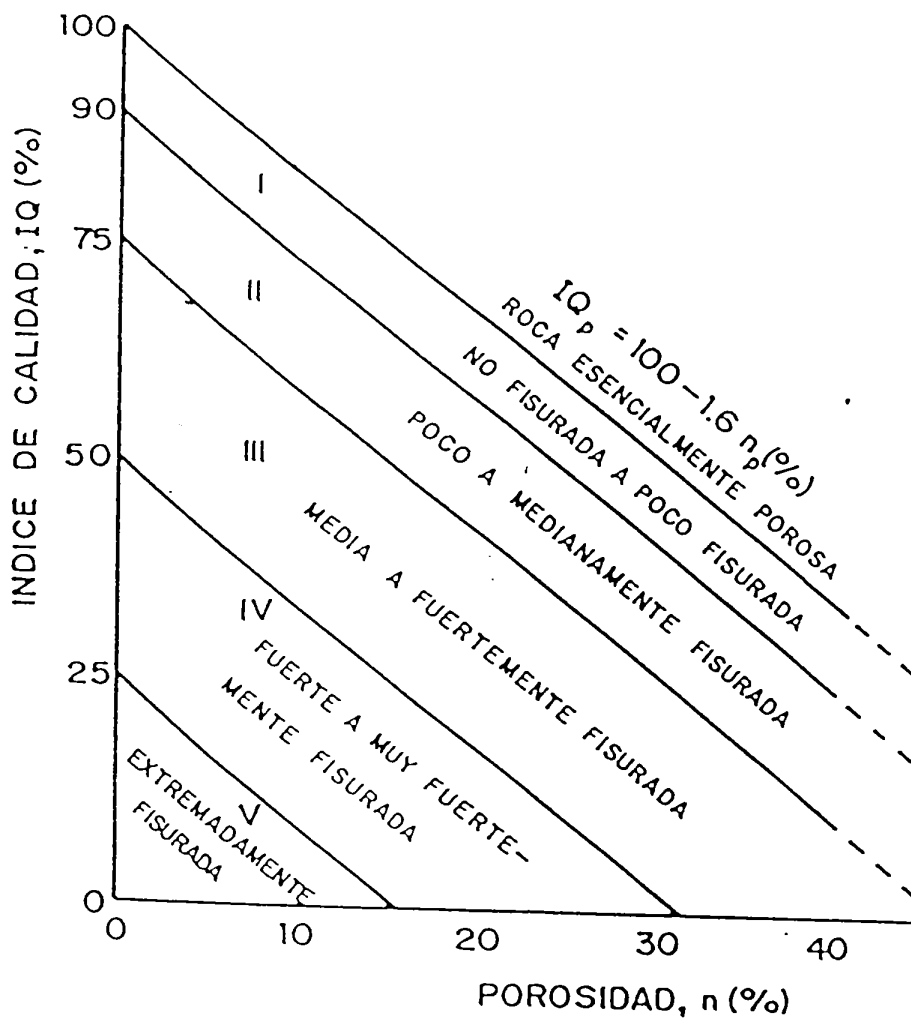


Fig. — 1 Descripción de la densidad de fisuración de una muestra de roca con ayuda del índice de calidad y de la porosidad total. (FOURMAINTREAU, 1976).

## 5. ENSAYOS DE RESISTENCIA Y DEFORMABILIDAD

Con este tipo de ensayos se pretende determinar diferentes parámetros resistivos y deformacionales y las relaciones entre ambos.

### 5.1. Resistencia a la compresión simple

La resistencia de la roca se puede valorar a partir del ensayo de resistencia a la compresión simple (UNE 7242, ACI 301-35, ASTM C-170). Este ensayo, aunque parezca sencillo, es en realidad un ensayo relativamente complicado, ya que exige una meticulosa preparación de las probetas y una cuidada ejecución del ensayo. Su interpretación teórica rigurosa también es compleja, a pesar de ser un ensayo que aplica tensiones principales, siendo una de ellas nula.

Además el tamaño de la probeta, la velocidad del ensayo, la "calidad" de las superficies de contacto con la carga y el contenido de agua del testigo o fragmento de roca a ensayar tienen una gran influencia en el resultado obtenido. Así por ejemplo, en rocas saturadas, suelen ser relativamente frecuentes reducciones de la resistencia hasta del 50%.

A su vez, las variaciones estadísticas de sus resultados, aún siendo materiales de origen similar y homogéneo, son muy elevadas.

Son precisamente todas estas limitaciones las que lo dificultan, al menos relativamente, como ensayo de identificación de la roca. A pesar de lo anterior, existen algunas clasificaciones que emplean como parámetro principal la resistencia a la compresión simple. Puede servir de ejemplo la clasificación de Deere y Miller (1966) que figura en la Tabla VII.

Durante la realización del ensayo suele ser norma habitual medir la deformabilidad vertical de la probeta, obteniéndose unas curvas tensión-deformación que permiten tener una primera idea del comportamiento de la roca matriz: elástico, elasto-plástico, etc (figura 2).

**TABLA VII**  
**CLASIFICACIÓN DE ROCAS EN BASE A**  
**SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE**  
**(DEERE Y MILLER, 1966)**

RESISTENCIA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (Mpa)
Muy Baja	< 28
Baja	28 - 55
Media	55 - 112
Alta	112 - 225
Muy Alta	> 225

En la Tabla VIII figuran los valores de la resistencia a la compresión simple más representativos de los diferentes tipos de rocas.

**TABLA VIII**  
**VALORES MEDIOS DE LA RESISTENCIA A LA**  
**COMPRESIÓN SIMPLE DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ROCAS**  
**(ICOLD, 1993)**

TIPO DE ROCA	TIPO DE CEMENTO	$q_a$ (MPa)
Intrusivas		< 250
Efusivas		< 200
Sedimentarias	Silíceo	100 - 200
	Ferruginoso	50 - 120
	Calcáreo	60 - 70
Metamórficas		El valor de la resistencia a la compresión simple depende mucho del grado de metamorfismo y composición de la roca

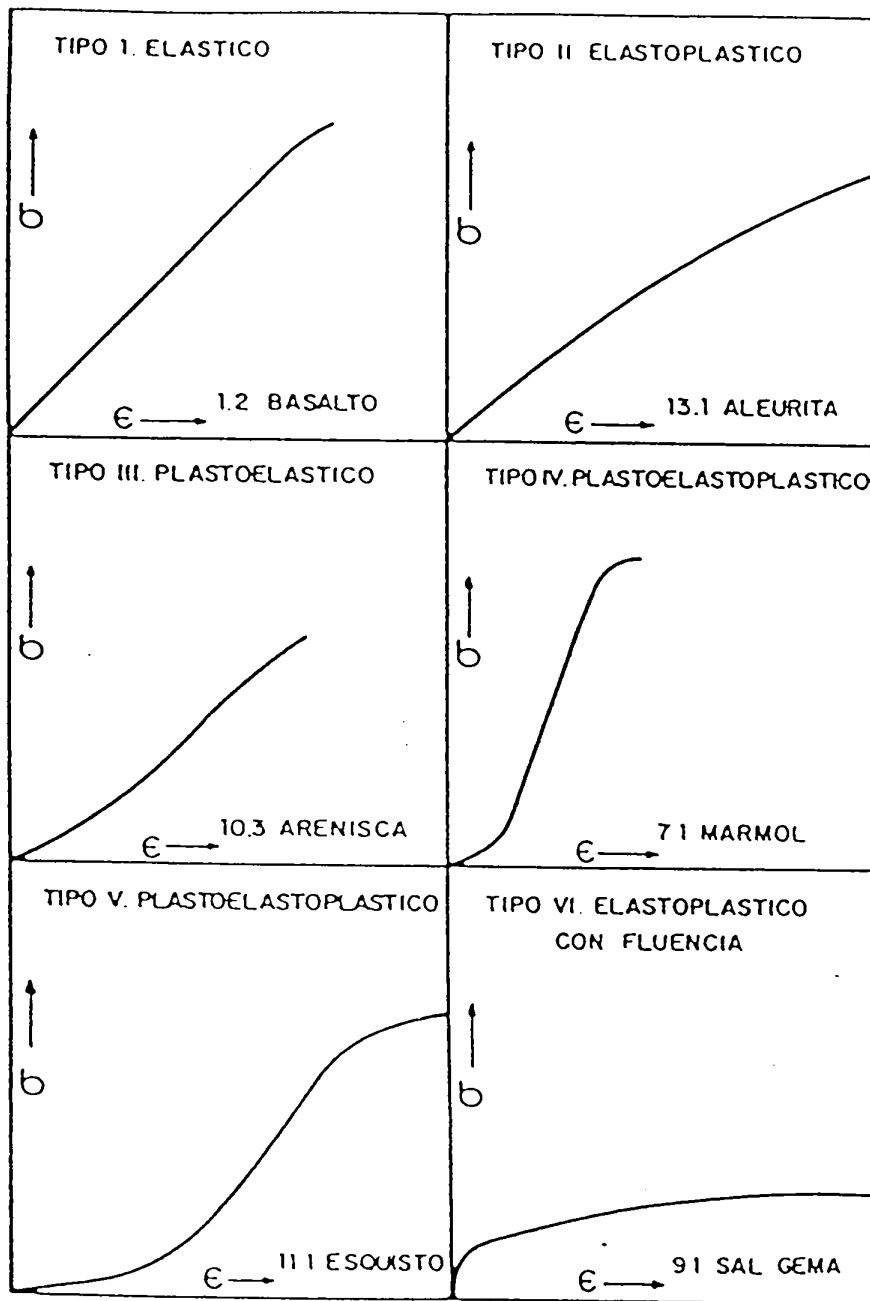


Fig. 2 Curvas típicas tensión—deformación para rocas a compresión simple cargadas hasta rotura. (STAGG & ZIEKIEWICZ, 1968).



## 5.2. Ensayo de carga puntual

Con la intención de superar algunos de los inconvenientes que presenta el ensayo de resistencia a la compresión simple, y como posible complemento al mismo, Broch y Franklin (1972) propusieron el ensayo de resistencia que hoy en día se denomina de carga puntual (Point Load Test). Aunque normalmente se emplea sobre testigos de roca, es posible efectuarlo también sobre fragmentos irregulares, aunque en este caso la dispersión de los resultados suele ser más elevada, debido a que la rotura es a tracción y de tipo frágil.

El ensayo como tal consiste en la compresión de un fragmento o un testigo de roca entre dos puntas cónicas, produciéndose la rotura cuando aparecen grietas aproximadamente paralelas al eje de aplicación de la carga.

A partir del ensayo se obtiene un índice,  $I_s$ , definido a través de la siguiente expresión:

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

siendo  $P$  la carga de rotura y  $D$  la distancia entre las puntas cónicas. Normalmente se utiliza un índice  $I_s$  normalizado, correspondiente a un distancia  $D$  de 50 mm.

Este ensayo, por su facilidad de realización, permite llevarlo a cabo en el campo y puede ser utilizado con profusión para obtener un amplio espectro de la calidad de la roca. Sin embargo, y a pesar de lo anterior, no debe ser empleado con rocas blandas ( $I_s < 0.1$  MPa) o con rocas claramente anisotrópicas, como las pizarras y ciertos tipos de esquistos. En este último caso debe tenerse en cuenta la orientación bajo la que se aplica la carga.

Con los resultados de este ensayo se obtiene una buena correlación entre el índice  $I_s$  y la resistencia a la compresión simple de la roca matriz ( $q_a$ ) correlación que suele tener la siguiente forma:  $q_a = kI_s$ , tal como se ve en la figura 3, donde el coeficiente  $k$  varía entre 17.5, para un valor  $D$  de 20 mm, y 24.5, para 60 mm. Con carácter general, para el valor de referencia de  $D$  de 50 mm, el coeficiente suele valer, según numerosos autores, alrededor de 23 (Oteo, 1977; Romana, 1995). Este último autor, sin embargo, establece una posible clasificación del coeficiente en base a los criterios que figuran en la Tabla IX. En la figura 4 se encuentra representada la relación dada por Broch y Franklin (1972) para clasificar la roca a partir de los resultados del ensayo de carga puntual.

TABLA IX

VALORES MEDIOS DE LA RELACIÓN  
 $q_a/I_s$  PARA ALGUNAS ROCAS  
 (ROMANA, 1995)

$q_a/I_s$	TIPO DE ROCA
6 - 10	Rocas de elevada porosidad y/o poco cementadas y/o de baja resistencia (cretas, calizas cuaternarias, conglomerados calcáreos, etc)
12 - 18	Esquistos, Grauvacas
18 - 24	Rocas calcáreas bien cementadas y/o de media - alta resistencia

En la Tabla X se encuentran incluidos algunos valores del índice  $I_s$  que presentan algunos tipos comunes de roca.

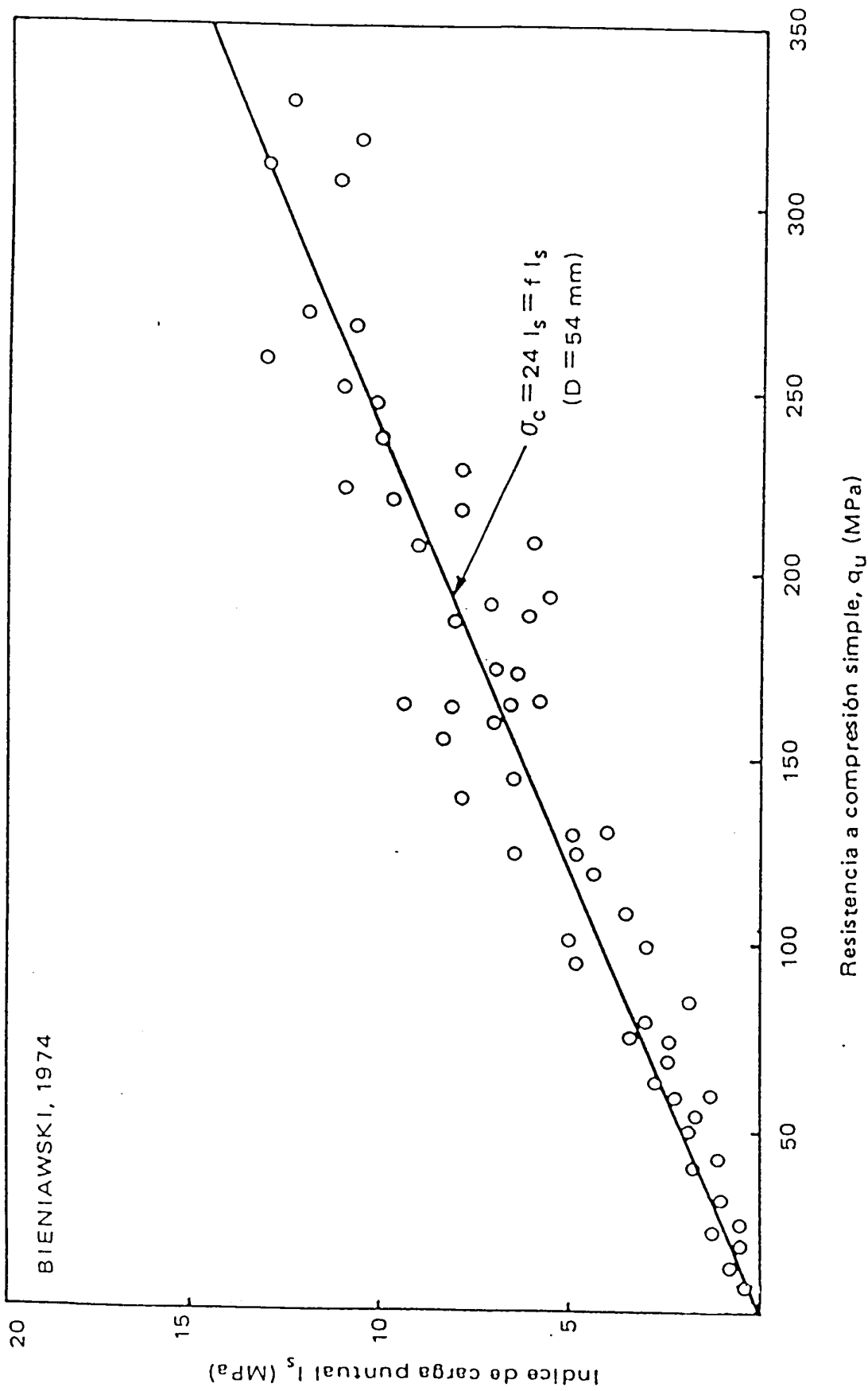
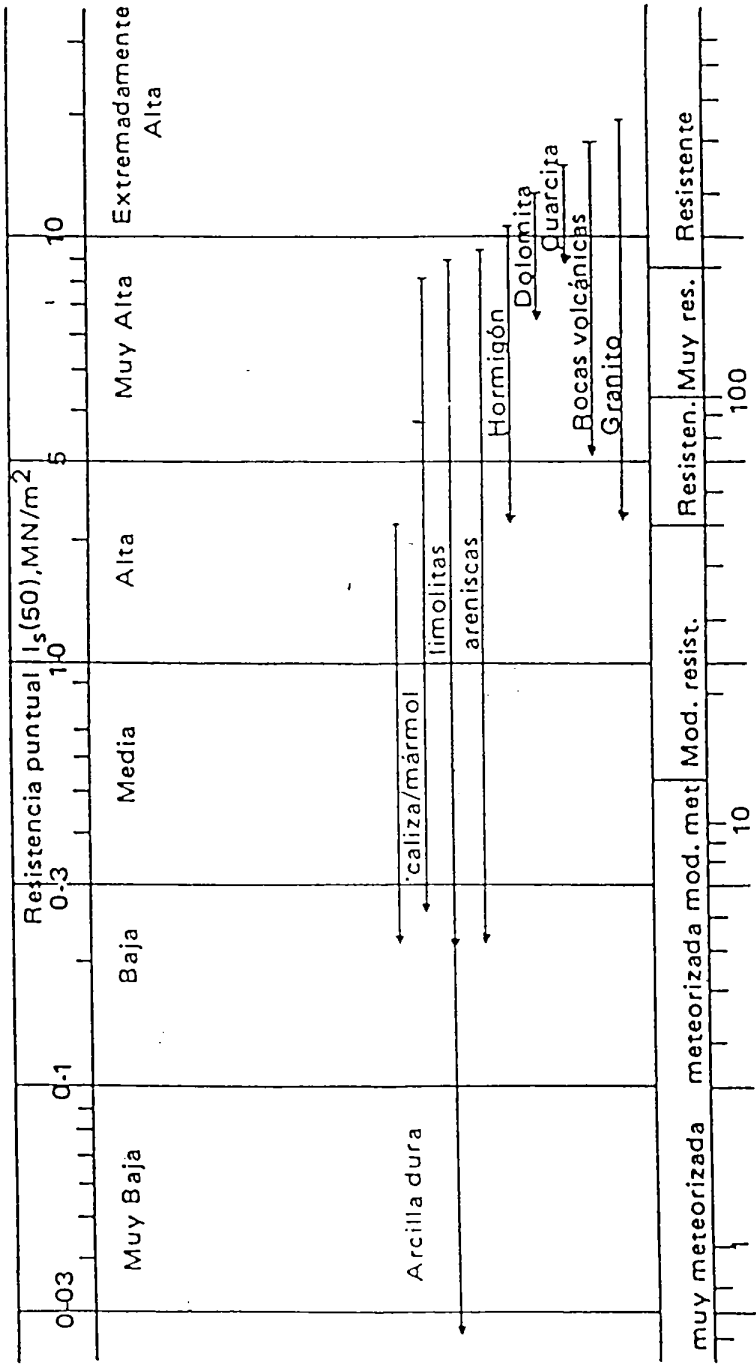


Fig. 3 Relación entre el ensayo de carga puntual y el de compresión simple ( $1 \text{ MPa} = 10,2 \text{ Kp/cm}^2$ ).



Resistencia a compresión simple  $(MN/m^2)$

Fig. 4 Clasificación de la roca a partir del ensayo de carga puntual (BROCH Y FRANKLIN, 1972).

TABLA X

VALORES MEDIOS DEL ÍNDICE  $I_s$   
DE ALGUNAS ROCAS COMUNES  
(ELABORACIÓN PROPIA)

ROCA	$I_s$ (Mpa)
<b>Rocas Igneas</b>	
Granito	10 - 12
Andesita	15
Basalto	17
<b>Rocas Sedimentarias</b>	
Arenisca	1 - 4.5
Grauvaca	7 - 10
Caliza	2 - 4.5
Creta	0.5
<b>Rocas Metamórficas</b>	
Pizarra	4 - 8
Esquisto	6 - 7.5
Gneiss	13

### 5.3. Ensayo de tracción indirecta o Brasileño

Otro ensayo que con frecuencia se utiliza en Mecánica de Rocas es el denominado de tracción indirecta o Brasileño, el cual fue concebido y desarrollado inicialmente para obtener la resistencia a la tracción del hormigón.

El ensayo como tal consiste en someter a una probeta cilíndrica a un esfuerzo de compresión a lo largo de dos generatrices opuestas. El estado de tensiones producido origina la rotura de la probeta en el plano de carga. En estas condiciones, la resistencia a tracción ( $\sigma_t$ ) obtenida se determina mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_t = \frac{2 P}{\pi D H}$$

donde P es la carga total de rotura aplicada, D es el diámetro de la probeta y H su altura.

El resultado depende esencialmente de la resistencia de la red cristalina de los minerales constituyentes de la roca y de los defectos internos que presente ésta, por lo que el ensayo puede utilizarse adecuadamente para clasificar la resistencia de la roca, más que como representativo de su resistencia a tracción. Así por ejemplo, Fourmaitreaux (1976), recomienda clasificar la roca de acuerdo a los criterios que figuran en la Tabla XI.

**TABLA XI**  
**CLASIFICACIÓN DE ROCAS EN BASE A LOS**  
**RESULTADOS DEL ENSAYO BRASILEÑO**  
**(FOURMAINTREAUX, 1976)**

RESISTENCIA	$\sigma_t$ (Mpa)
Muy Alta	> 30
Alta	10 - 30
Media	5 - 10
Débil	2 - 5
Muy Débil	0 - 2

#### 5.4. Determinación de la dureza superficial

Se puede determinar también la resistencia a la compresión simple a partir de la dureza superficial de la roca mediante el martillo Schmidt de rebote (también conocido normalmente como esclerómetro).

El ensayo fue desarrollado inicialmente para tener a priori una idea del valor de la resistencia a la compresión

simple de probetas de hormigón.

El procedimiento de ejecución es análogo al utilizado en el caso de hormigones y metales. Se puede efectuar tanto en campo como en laboratorio y se ha comprobado que los resultados del ensayo correlacionan aceptablemente bien con la resistencia a la compresión simple. Se ha comprobado, que la orientación bajo la cual se efectúa el golpeo mediante el martillo influye en los resultados, tal como se ve en la figura 5, por lo que se debe tener en cuenta esta circunstancia a la hora de analizarlos. En cualquier caso, debe tenerse siempre presente que la dispersión de los mismos suele ser elevada.

Se trata de un ensayo de uso muy habitual, por su sencilla y rápida ejecución, lo que permite disponer de un elevado número de valores y, por tanto, de un buen espectro de la calidad de la roca, aunque siempre es preciso recordar que se trata de un ensayo de tipo superficial.

En la Tabla XII se encuentran los valores medios de la dureza Schmidt, medidos en un conjunto de rocas típicas sanas, que han sido recogidos de la bibliografía consultada.

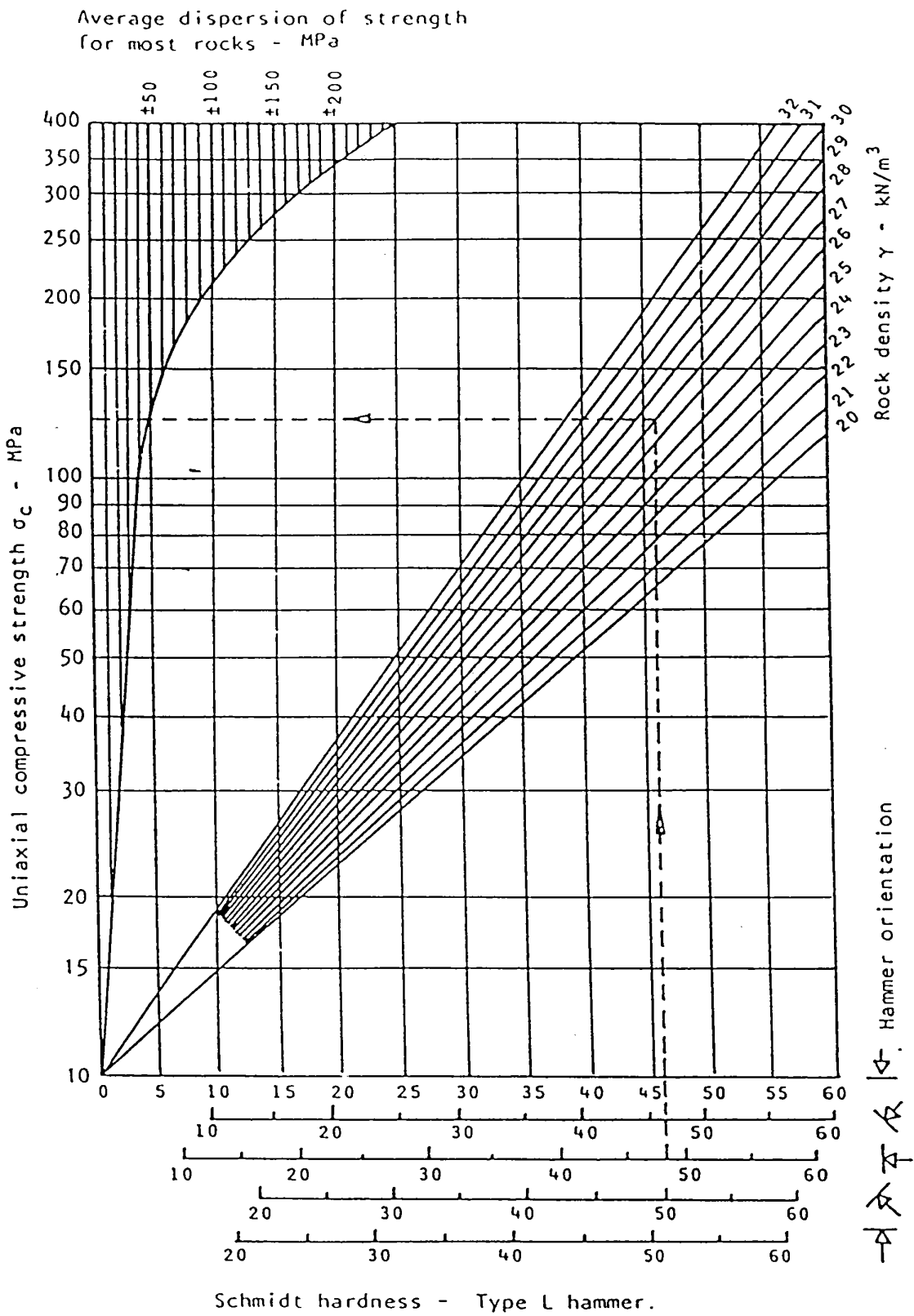


Fig. 5 Relación entre la dureza Schmidt y la resistencia a la compresión simple



TABLA XII

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

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

5.5. Ensayos triaxiales

Los ensayos triaxiales son similares a los utilizados en el estudio de suelos. Se trata de alcanzar el estado de rotura de probetas cilíndricas de roca aplicando una tensión lateral ( $\sigma_3$ ) constante y aumentando la tensión vertical ( $\sigma_1$ ). Durante este proceso se miden las deformaciones de la probeta para obtener la relación tenso-deformacional correspondiente.

En general este tipo de ensayos solo tiene interés en trabajos a gran profundidad, como pueden ser las labores mineras.

## **5.6. Ensayos de corte directo**

En estos ensayos se pretende determinar la cohesión y el rozamiento interno a lo largo de una superficie cuasi-plana, bien sea del testigo de roca o de una discontinuidad, que es lo más habitual e interesante.

El testigo de roca se sujeta a la caja de ensayo mediante un mortero de cemento, dejando en la parte central de la caja, que es donde se aplica el esfuerzo tangencial, la discontinuidad, con el fin de que la rotura se produzca a lo largo de ella.

En estos ensayos se determina normalmente tanto la resistencia al corte de pico como la residual, efectuando un ciclo de carga y descarga en cada muestra o llevando el desplazamiento entre cajas hasta magnitudes adecuadas.

Este ensayo es de gran aplicación práctica pues establece las características resistentes de las discontinuidades con relleno o sin él, lo que representa un dato muy importante en la estabilidad de taludes, por ejemplo.

## **5.7. Ensayos de rotura de fragmentos**

Aunque no considerada habitualmente como una propiedad que marca la calidad de la roca, su inclusión en este capítulo es importante porque mediante su determinación se establece la posibilidad de utilización como escolleras de ciertas rocas de carácter evolutivo. Puede ser el caso de rocas friables o de naturaleza arcillosa, por ejemplo.

Es un ensayo complementario que se puede efectuar con posterioridad a ensayos de corte o de compactación, por lo que las limitaciones de tamaños que presentan estos condicionan la

representatividad de los resultados obtenidos.

No existe ninguna normativa de laboratorio concreta para la determinación de este parámetro.

Marsal (1975) valora el porcentaje de roturas de partículas de acuerdo a un índice que denomina B (breakage). Refleja la diferencia existente entre las granulometrías del material antes y después de efectuar ensayos de resistencia al corte (figura 6), triaxiales o de corte directo. La suma de las diferencias positivas de los porcentajes que pasan por los diversos tamices es el índice buscado. Da idea de algunas de las transformaciones producidas en el esqueleto sólido.

Lee (1969) indica que un método sencillo de determinar este índice consiste en obtener la relación de diámetros por los que pasa el 15 % del material antes y después de efectuar los ensayos de resistencia al corte. Otros autores valoran el porcentaje de roturas a partir de la relación entre el diámetro medio de la granulometría antes y después de llevar a cabo los ensayos.

Similar a la determinación anterior, el LCPC francés obtiene este parámetro mediante la norma P 94-066, según la cual el índice B se obtiene como la relación entre el  $D_{10}$  de la granulometría antes y después de efectuar con ella un ensayo proctor normal. Al índice B le denominan en este caso coeficiente de fragmentación, CF.

El LCPC también define un coeficiente de degradabilidad, CD, muy útil cuando se trata de emplear como escollera fragmentos procedentes de rocas de tipo arcilloso (margas, pizarras, ciertos esquistos, etc), que se obtiene de manera análoga a la anterior como relación entre los  $D_{10}$  de la granulometría original, y después de someterla a una serie de ciclos convencionales de humedad-sequedad.

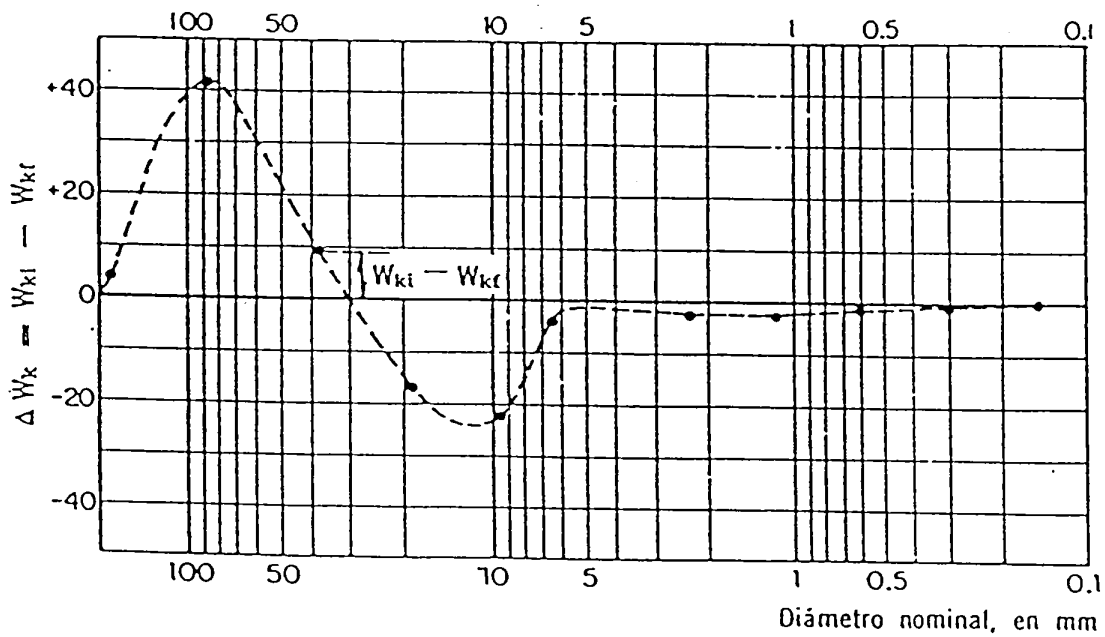
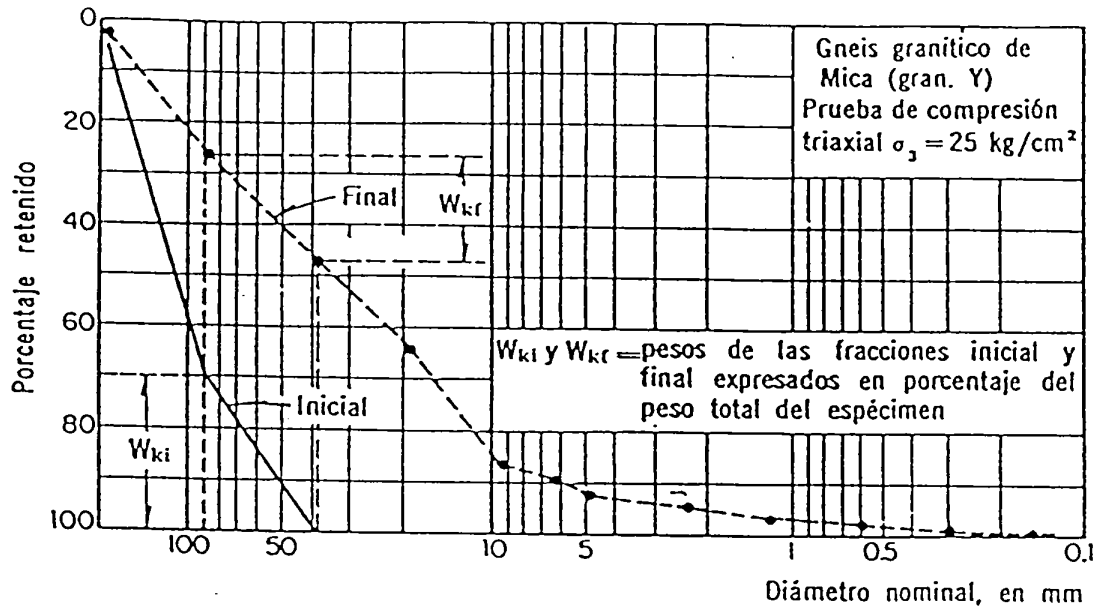


Fig. 6 Variación de la distribución granulométrica producida por la rotura de granos (Marsal 1969)

En cualquier caso, la rotura de los fragmentos de roca que constituyen una escollera, bajo cualquier acción a que se vea sometida, es debida a la intensidad de las fuerzas que tienen lugar en los contactos. Mientras la intensidad supere a la resistencia a la compresión simple de la roca matriz, continua el proceso de degradación dando lugar a un aumento de la deformabilidad debido a la reacomodación de las partículas en estructuras más densas, y a una disminución de la resistencia al corte.

Por ello, se considera que la rotura de las partículas individuales, y por lo tanto la variación de la curva granulométrica inicial de una escollera, es uno de los factores que controlan tanto la resistencia al corte como su compresibilidad y en definitiva su comportamiento en obra.

## 6. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

La permeabilidad del testigo o muestra de roca aporta información sobre la posible interconexión entre los poros y microfisuras existentes en la misma.

Al igual que ocurre con la porosidad, la permeabilidad total es la suma de la que tiene lugar a través de la roca matriz y la que se produce entre huecos y fisuras.

Una manera de comprobar si la permeabilidad predominante es la que tiene lugar a través de las fisuras, y no a través de los huecos interconectados, consiste en someter a la roca a cambios de tensión, por ejemplo pasando de tensiones de compresión a tensiones de extensión. Actuando de la forma anterior, se producen cambios de permeabilidad si el porcentaje de huecos de tipo fisura es elevado, mientras que apenas existe cambio de la permeabilidad si los huecos son de tipo poro. Un ensayo desarrollado para comprobar esta idea consiste en taladrar un testigo de roca con un diámetro menor que el que presenta, y someter al anillo de roca resultante a un flujo de agua desde el exterior al interior y viceversa (Véase la figura 7 a este respecto). La permeabilidad (K) que se obtiene en ambos casos vendría dada por la siguiente fórmula:

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

donde q es el caudal de agua introducido y  $\Delta h$  es la pérdida de carga total.

En la Tabla XIII se han recogido algunos de los valores típicos de la permeabilidad que presentan ciertos tipos de roca muy comunes. Como se aprecia en la misma, por lo general la permeabilidad registrada "in situ" es superior a la que se

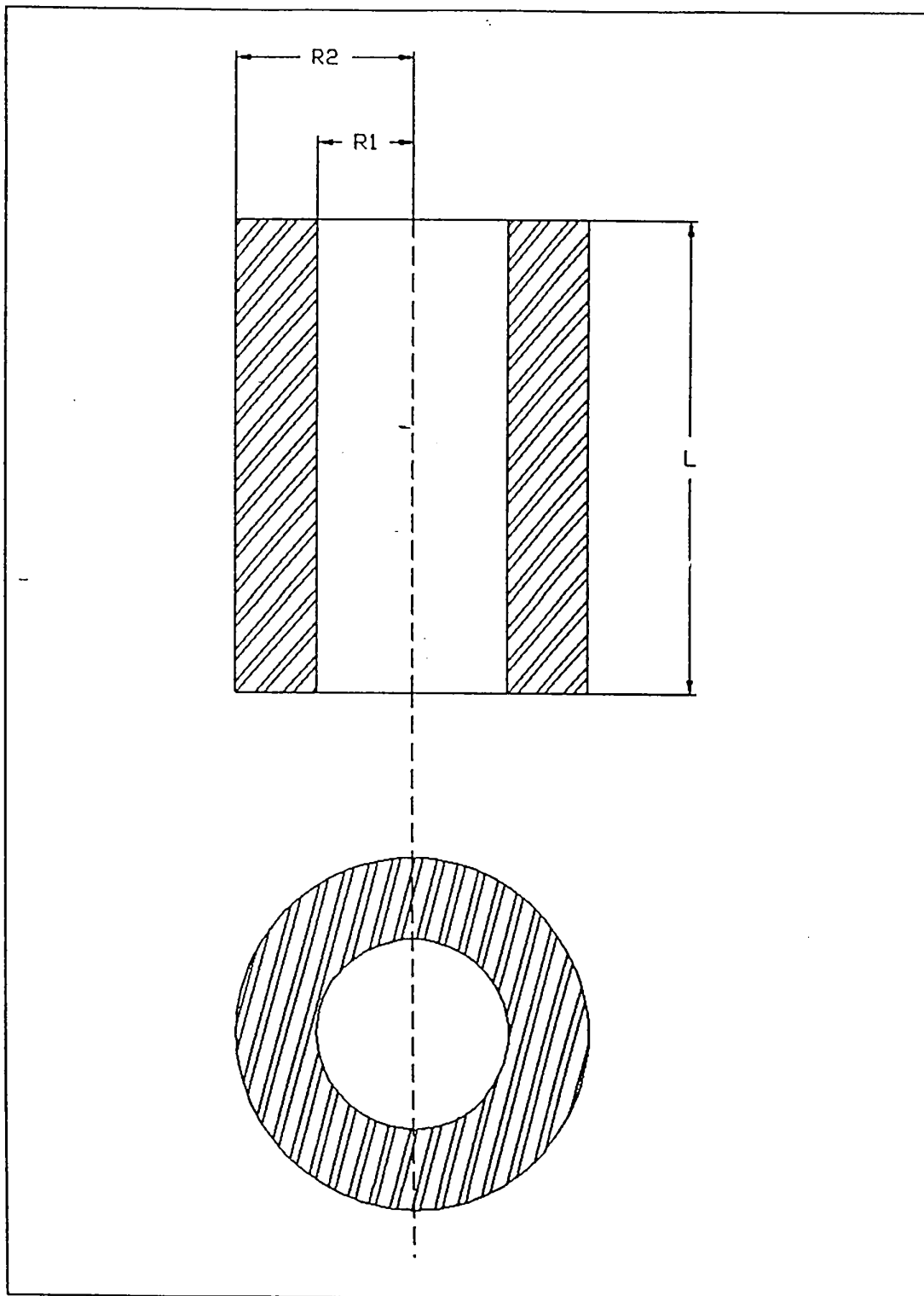


Fig. 7 Ensayo de permeabilidad en un testigo de roca

obtiene en laboratorio. Esta diferencia puede achacarse a que los ensayos de campo realmente miden la permeabilidad del macizo rocoso, el cual se encontrará normalmente surcado, en mayor o menor medida, por diaclasas o fracturas y, por lo tanto, la permeabilidad medida será superior.

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

ROCA	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (cm/sg)	
	LABORATORIO	CAMPO
Arenisca	$3 \cdot 10^{-3}$ a $8 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-3}$ a $3 \cdot 10^{-8}$
Grauvaca	$3 \cdot 10^{-8}$	
Pizarra	$10^{-8}$ a $5 \cdot 10^{-13}$	$10^{-8}$ a $10^{-11}$
Caliza y Dolomía	$10^{-5}$ a $10^{-13}$	$10^{-3}$ a $10^{-7}$
Basalto	$10^{-12}$	$10^{-2}$ a $10^{-7}$
Granito	$10^{-7}$ a $10^{-11}$	$10^{-4}$ a $10^{-9}$
Esquisto	$10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Esquisto fisurado	$10^{-4}$ a $3 \cdot 10^{-4}$	



## 7. ENSAYOS DE ALTERABILIDAD

Las alteraciones que tienen lugar en las rocas pueden ser de tres tipos: físicas, químicas y biológicas. En este apartado se exponen los métodos que existen en laboratorio para abordar el problema de la alterabilidad.

La idea que subyace tras estos ensayos es reproducir en laboratorio y de forma acelerada los procesos de alteración que inducen en la roca los agentes externos de la zona en donde la roca va a quedar depositada. Estos procesos dependen de la superficie específica sobre la que actúan los agentes externos y el grado de accesibilidad de estos agentes al interior del material, de la cual depende grandemente la velocidad a la que se produce la alteración.

La accesibilidad de los agentes externos es función de la permeabilidad y porosidad de la roca. La primera facilita el acceso y la segunda facilita su acción en un volumen mayor. Además hay que tener en cuenta que a medida que aumenta la alteración se produce un aumento progresivo de la porosidad de la roca.

Desde un punto de vista práctico, esta facilidad de acceso de los agentes externos a las rocas se suele calificar mediante la absorción, cuya medida es fácil y común en la práctica de las obras públicas, y se ha descrito anteriormente.

Otra característica de los materiales pétreos que influye notablemente en la alterabilidad de las rocas es su composición mineralógica, pues está directamente relacionada con los procesos de alteración en los que se producen transformaciones de tipo químico.

En este sentido, los minerales más alterables son el olivino dentro de los silicatos ferromagnesianos y las plagiocla-

sas cálcicas dentro de los silicatos de aluminio, sodio, calcio y potasio. Por el contrario, cuarzo, mica y feldespato potásico son los minerales más estables.

Se trata, por lo tanto, de establecer criterios sobre el comportamiento de la roca frente a acciones de tipo atmosférico, térmico, presencia de fluidos en circulación, cambios de volumen, así como alteraciones debidas a variaciones en el estado de tensiones a que se va a ver sometida la roca y que dan lugar, fundamentalmente, a la aparición de fisuras y a la modificación de la granulometría original.

En la práctica hay que considerar cuales son los mecanismos de alteración esperados. A continuación se establece cuál es el ensayo de laboratorio que mejor reproduce el fenómeno. Se llevan a cabo los ensayos y se comparan los resultados obtenidos con criterios semiempíricos.

Los principales tipos de ensayos de laboratorio concernientes a la alterabilidad de la roca son los que se enumeran en los apartados siguientes. La mayoría de ellos carece de normativa española específica para su realización en laboratorio, empleándose en su lugar procedimientos basados en las recomendaciones de la ASTM o BS, suficientemente sancionados por la práctica. Se especifican aquellos casos en los que exista una normativa española concreta para su realización.

#### **7.1. Ensayo de hinchamiento**

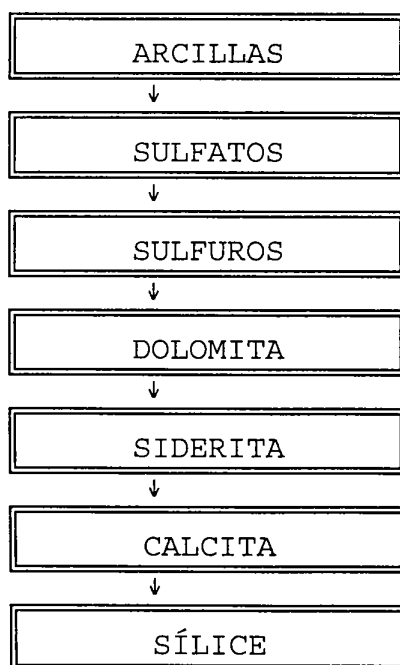
Se trata de un ensayo que permite medir el cambio de volumen de una muestra o probeta debido a la humectación gradual de la roca. En general, sólo se mide el hinchamiento en dirección vertical, aunque también podría medirse el que se produce en tres direcciones perpendiculares.

En general, los resultados de este ensayo muestran que el hinchamiento o el incremento de volumen tiene una magnitud baja en rocas intrusivas sanas, pudiendo alcanzar valores elevados en el caso de rocas sedimentarias y metamórficas.

De lo anterior parece deducirse que el ensayo está especialmente indicado para ser efectuado sobre rocas arcillosas, las cuales tienen una capacidad elevada para aumentar el volumen por adsorción de agua, con un potencial de hinchamiento variable, en función de la naturaleza de la arcilla.

A modo de resumen, en la Tabla XIV se muestra una escala de estabilidad creciente frente a los cambios de volumen, de los minerales más comunes que conforman las rocas sedimentarias.

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



## 7.2. Ensayo de desgaste de Los Ángeles

El ensayo trata de determinar la resistencia a la fragmentación por choque de los trozos rocosos que se emplean en la realización del mismo. Estos trozos se introducen en el interior de un tambor giratorio junto con una serie de bolas de acero.

El resultado que se obtiene del ensayo es la diferencia entre el peso inicial y final de los fragmentos, expresada en tanto por ciento de su peso original.

Las normas que rigen la realización del ensayo son la UNE 83-116-90 y la NLT 149/72.

El principal inconveniente de este ensayo es que los resultados varían mucho según sea la granulometría y forma de los fragmentos utilizados en el mismo. Si los fragmentos son redondeados, su tamaño es grande y existen pocos finos se dificulta aún más la realización del ensayo.

En lo que se refiere a la forma, se obtienen desgastes mayores si se utilizan fragmentos de formas lajosas, y menores si se emplean fragmentos de forma aproximadamente redondeada. En un término medio se encuentran los fragmentos de forma cúbica.

Precisamente por las limitaciones del ensayo, no es frecuente encontrar en la bibliografía geotécnica consultada valores típicos y rangos de valores razonables de este coeficiente.

En la Tabla XV se encuentran recogidos algunos valores del coeficiente de desgaste de Los Ángeles de ciertos tipos de roca. Los valores que figuran en la misma deben tomarse con precaución, ya que en todos los casos se desconoce la granulometría que fue empleada en los ensayos y las condiciones bajo las cuales

se desarrollaron los mismos.

**TABLA XV**  
**COEFICIENTES DE DESGASTE DE LOS ÁNGELES**  
**DE ALGUNOS TIPOS DE ROCA**  
**(ELABORACIÓN PROPIA)**

TIPO DE ROCA	DESGASTE LOS ÁNGELES (%)
Cuarcita	19 - 22
Diabasa	12 - 22
Granito Rosa de grano medio	27
Arenisca carbonífera	18
Caliza	22 - 30

Con carácter general, en los pedraplenes carreteros se establece el límite en un 50%. Ahora bien, dependiendo de la localización del material en la estructura a construir, es posible especificar valores inferiores al anterior. En el dominio de las presas de materiales sueltos, donde es muy frecuente colocar los materiales en la sección tipo en función de sus características mecánicas, es frecuente fijar unos valores máximos variables entre 35 y 40%, dependiendo de su situación en la obra.

Otro ensayo muy similar al de desgaste de Los Ángeles y que se encuentra referenciado en la bibliografía consultada, es el denominado ensayo "Deval". En este ensayo, la degradación de los materiales se produce por el choque entre los propios fragmentos de roca introducidos en el tambor, sin ayuda de las bolas de acero. El ensayo puede efectuarse tanto en seco como con muestra saturada. Al igual que en el ensayo de Los Ángeles, el resultado de éste se expresa a través del porcentaje de muestra eliminada durante la realización del mismo.

La realidad muestra que la reproductibilidad de la alteración producida en la roca es mucho peor que en el ensayo

de Los Ángeles, motivo por el cual no suele emplearse demasiado en la práctica, al menos en España.

### **7.3. Ensayos de Humedad-Sequedad**

Las rocas como material de construcción para las obras públicas y para la edificación, en climas áridos y continentales como los españoles, están sometidas a procesos de humectación y desecación que, en función de sus componentes o del estado en que se encuentren, pueden provocar alteraciones.

Los mecanismos por los que se producen estas alteraciones son variados. El más importante es el que tiene lugar en las rocas arcillosas, a veces en la primera humectación y otras veces después de varios ciclos.

El ensayo trata de cuantificar el debilitamiento originado en la red cristalina de los minerales de la roca por la presencia y desaparición parcial del agua, tras un determinado número de ciclos, normalmente 25. El resultado del ensayo se mide a través de la pérdida de peso seco experimentada por las muestras durante la realización del mismo.

### **7.4. Ensayos de Calentamiento-Enfriamiento**

El ensayo consiste en someter a la roca a un choque térmico similar al que puede tener lugar en la naturaleza, a fin de prever las acciones originadas por las expansiones y contracciones que tienen lugar.

El fenómeno suele tener mayor importancia en la parte más superficial de los fragmentos de roca, transmitiéndose, sucesivamente a su interior.

La baja conductividad térmica de la roca provoca un gradiente de temperatura hacia el interior de la misma, generando tensiones debido a la tendencia a dilatarse que sufre la superficie frente a la estabilidad que debe mostrar el núcleo. Esto produce fisuras paralelas a la superficie y la fragmentación del material en capas.

Una de las características fundamentales que intervienen en la alteración producida por los ciclos de calentamiento-enfriamiento es la composición mineralógica de la roca, de tal manera que las rocas formadas por un sólo mineral son menos alterables que las rocas formadas por varios, consecuencia del diferente coeficiente de dilatación de cada uno de ellos.

Al igual que el ensayo anterior, el resultado se expresa como pérdida de peso seco durante la realización del ensayo.

#### **7.5. Ensayos de Hielo-Deshielo**

El ensayo trata de reproducir el efecto que tienen las heladas en las rocas saturadas que, al provocar un importante cambio de volumen en el agua, puede originar fracturaciones importantes en las mismas.

El resultado del ensayo se obtiene como en los anteriores, a partir de la pérdida de peso seco.

La acción del hielo sobre las rocas en la Península Ibérica se ha comprobado que es débil o insignificante, a excepción de la zona de los Pirineos, en la que se podría considerar como moderada.

## 7.6. Ensayo de Cristalización de Sales

La meteorabilidad de las rocas frente al efecto de la cristalización de sales se presenta generalmente cuando existe una sal en solución o una sal soluble formando parte de la roca y un gradiente de temperatura que produzca la evaporación.

En este tipo de ensayo se estudia el efecto que tiene, sobre la muestra de roca, el crecimiento de cristales de sales existentes en la misma o aquellos con que se ataca a ésta última.

La cristalización de sales de soluciones provenientes del exterior o de la propia roca puede reproducirse en laboratorio saturando la muestra a ensayar con una solución salina y provocando la cristalización por evaporación lenta del agua.

Como en los ensayos actúa conjuntamente el efecto de humectación-deseccación, es preciso realizar ensayos paralelos, simplemente con agua, para identificar a qué causa corresponden los efectos que se observan.

El resultado del ensayo se determina, como en todos los anteriores, a través de la pérdida en peso de los materiales ensayados, o bien determinando la variación de la resistencia a la compresión simple o el coeficiente de desgaste de Los Ángeles, según el tipo de muestra utilizada, testigo de roca o granulometría, respectivamente.

Son pocos los experimentos que se tiene constancia de que se hayan llevado a cabo para conocer el efecto de la cristalización de sales en poros y fisuras. Uno de los pocos existentes en la bibliografía trata de unos ensayos efectuados sobre rocas graníticas (Tricart, 1960), habiéndose demostrado que tras 12 ciclos de inmersión salina y desecación, la pérdida en peso por disgregación no superó nunca el 2%.



Desde un punto de vista práctico, y por la difusión que tiene el ensayo en los laboratorios, se recomienda determinar la sensibilidad de los materiales pétreos frente a la cristalización de sales, utilizando el ensayo denominado de "Ataque de sulfatos" que se describe a continuación.

### **7.7. Ensayo de Ataque de Sulfatos**

Este ensayo junto con el anterior da diferentes resultados dependiendo de la naturaleza del medio de cristalización y del número de ciclos que se realicen. También tienen efectos significativos la forma, la porosidad y la permeabilidad de los fragmentos.

A pesar de lo anterior, estos ensayos tienen la ventaja de que pueden utilizarse para medir el porcentaje de fragmentos friables que hay dentro de un conjunto, más que para estimar el comportamiento general del mismo.

El ensayo consiste en sumergir unos fragmentos de ciertas dimensiones en una solución de sulfato sódico o magnésico durante un tiempo predeterminado y posteriormente secarlos en estufa a 100°. Normalmente se especifica efectuar un mínimo de 5 ciclos.

El ensayo se encuentra normalizado en las normas UNE 7136 y NLT 158/72.

El efecto producido se determina a través de la pérdida de peso seco con respecto al inicial, en el caso de granulometrías, o a través de la variación en la resistencia a la compresión simple, en el caso de testigos de roca.

Los resultados del ensayo, como ya se indicaba al principio de este apartado, dependen del tamaño y forma de los

fragmentos elegidos para la realización del mismo, incrementándose las pérdidas para los fragmentos de forma angular.

En la bibliografía consultada se ha encontrado que los valores máximos recomendados de la pérdida en peso establecidos para áridos gruesos al ser sometidos a cinco ciclos de tratamiento son del 12%, si el ensayo se realiza con sulfato sódico, o del 18%, si se ejecuta con sulfato magnésico.

### 7.8. Ensayo de Inmersión

Con este ensayo se persigue determinar cual es el comportamiento de las rocas frente a la acción del agua.

Existen diferentes procedimientos para cuantificar el incremento de fisuración producido por el debilitamiento de las rocas al aumentar su grado de saturación. Uno de ellos, quizá el más extendido, consiste en analizar la rapidez con la que tiene lugar el desmoronamiento de un fragmento de roca, una vez que se ha introducido en agua destilada.

El principal problema que presenta la realización de este ensayo es la saturación de la muestra para conseguir la mayor intensidad en la actuación del agua. Las rocas de baja porosidad y absorción requieren inundarlas en un recipiente donde previamente se haya hecho el vacío mientras que existen otras rocas, por ejemplo las sedimentarias, a las que bastan pocos minutos para conseguir su total saturación.

A partir del ensayo se obtiene un índice,  $I_j$ , que en algunos casos es posible correlacionar con el índice de durabilidad que se determina del ensayo de Humedad-Sequedad-Desmoronamiento (Slake Durability Test),  $I_D$  (Véase Apdo siguiente).

Aunque el ensayo fue inicialmente desarrollado para

pizarras -mostrándose en la Tabla XVI los valores que adoptaba el índice  $I_j$  para las mismas, en función del desmoronamiento observado-, hoy en día se emplea el ensayo para la caracterización de las rocas arcillosas. Siempre hay que tener en cuenta las limitaciones que presenta y los errores a que puede conducir la utilización de los criterios contenidos en la tabla.

**TABLA XVI**

**CRITERIOS DE ALTERACIÓN DE PIZARRAS EN BASE  
A LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE INMERSIÓN  
(LUTTON, 1977)**

$I_j$	Comportamiento
1	El fragmento de degrada totalmente
2	Se rompe rápidamente en muchos granos
3	Se rompe lentamente en muchos granos
4	Se rompe rápidamente y desarrolla varias fracturas
5	Se rompe lentamente y desarrolla pocas fracturas
6	No hay cambio en el fragmento

### 7.9. Ensayo de Humedad-Sequedad-Desmoronamiento

Es un tipo de ensayo muy similar al de humedad-sequedad, pero en el que además se tiene en cuenta el desmoronamiento sufrido por la muestra a medida que transcurre el ensayo. Se utiliza fundamentalmente para comprobar el comportamiento de rocas de origen arcilloso o limoso que a lo largo del tiempo pueden sufrir importantes transformaciones.

Fue desarrollado inicialmente por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (1972), y continuado por Franklin y Chandra (1974). En España su realización viene regida por la Norma NLT: 251/91.

El ensayo trata de medir la resistencia de la roca frente a la meteorización y desintegración como resultado de realizar con el material dos ciclos de secado y agitación en un baño de agua. Para ello, la muestra se coloca en el interior de un tambor parcialmente sumergido en agua que gira alrededor de su eje.

El índice  $I_D$ , que se obtiene del ensayo, es la relación en tanto por ciento entre el peso seco de los fragmentos después de los dos ciclos y el que presentaban antes del ensayo.

El principal inconveniente del ensayo es que el resultado obtenido está muy influenciado por el número de ciclos llevados a cabo durante su realización.

Al igual que el ensayo anterior, su realización está especialmente indicada para rocas de naturaleza arcillosa, pudiéndose correlacionar los resultados de este ensayo con los de aquel, de acuerdo a los criterios que figuran en la Tabla XVII.

**TABLA XVII**  
**RELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES  $I_j$  E  $I_D$**   
**(LUTTON, 1977)**

$I_j$	$I_D$
1	0 - 10
2	10 - 25
3	25 - 50
4	50 - 80
5	80 - 90
6	90 - 100

#### 7.10. Ensayos que sirven para determinar la alterabilidad de las rocas debida a la acción de los agentes químicos

Todos los ensayos que se han tratado en los apartados anteriores tratan de determinar la alteración que tiene lugar en las rocas a través de transformaciones de tipo físico. Sin embargo también existen en la práctica alteraciones consideradas estrictamente de tipo químico, que tienen su origen, fundamentalmente, en la circulación de aguas a través de los distintas fisuras existentes en el macizo rocoso.

Así, pueden producirse procesos de hidratación, que es el mecanismo de alteración debido al aumento de volumen experimentado por determinados minerales al incorporar moléculas de agua a su composición. El caso más claro es el de la anhidrita ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ), que en presencia de agua se transforma en yeso, aumentando su volumen a prácticamente el doble que el inicial. En laboratorio, para determinar la alteración que provoca la presencia de sales hidratables, se necesita identificar y obtener la cantidad de sal presente para deducir cual será el futuro comportamiento de la roca.

También pueden producirse procesos de hidrólisis, esto es, disolución de ciertos minerales. Puede ser el caso de las rocas yesíferas en las que el agua tiende a disolver el yeso, y el de las rocas sedimentarias, en las que suele ser frecuente encontrar sales solubles. También se puede considerar como tal la alteración de los carbonatos, que en presencia de agua se transforman en bicarbonatos. En laboratorio, la meteorabilidad de los materiales pétreos de rocas carbonatadas debe interpretarse teniendo en cuenta la cantidad de sales solubles en la roca y la composición del agua que la atraviesa.

Otro proceso frecuente es el denominado de intercambio iónico. Por ejemplo, la alteración de los minerales silicatados transformándose en arcillas, que, a veces, posteriormente se

alteran y convierten en otros tipos de arcilla. Los ensayos que tratan de determinar la alteración de rocas en las que se puede producir tal fenómeno consisten en someter a las muestras a gradientes térmicos e inmersión en agua un número determinado de veces, tras lo cual se analiza la variación sufrida por sus componentes.

Por último, cabe citar los procesos de oxidación-reducción. El ejemplo más claro dentro de la ingeniería civil es el que tiene lugar en los sulfuros (piritas). Suelen aparecer en las rocas sedimentarias, generando normalmente colores oscuros (caso de las pizarras y ciertas calizas negras y grises). Los sulfuros tienden a oxidarse formando sulfatos que desprenden ácido sulfúrico en una reacción muy lenta. Existe normalizado el ensayo de determinación de los compuestos de azufre (Norma UNE 83/130-88), a partir de cuyos resultados es posible establecer de manera cualitativa el futuro comportamiento de la roca.

## **ANEJO III**

### **ENSAYOS DE LABORATORIO**





# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS
  2. 1. Mineralogía y composición
  2. 2. Granulometría
  2. 3. Plasticidad
  2. 4. Densidad y humedad
  2. 5. Compactabilidad
  2. 6. Permeabilidad y comportamiento frente al agua
  2. 7. Dispersabilidad
  2. 8. Resistencia al corte
  2. 9. Deformabilidad
  - 2.10. Ensayos dinámicos
  - 2.11. Otros ensayos
3. CARACTERIZACIÓN DE ROCAS
  - 3.1. Introducción
  - 3.2. Identificación y características elementales
  - 3.3. Resistencia
  - 3.4. Alterabilidad física
  - 3.5. Alterabilidad química
  - 3.6. Otros ensayos
4. RELACIÓN DE NORMATIVA ESPAÑOLA UNE DE ENSAYOS DE LABORATORIO CON LOS ÁRIDOS PARA HORMIGONES
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Anejo es efectuar una descripción de las diferentes posibilidades que existen para ensayar en laboratorio los materiales constitutivos de una presa y de su cimiento. Se describen equipos que están disponibles en España, en empresas privadas o en instituciones oficiales como el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (M<sup>o</sup> Fomento) o como las Universidades.

No pretende ser exhaustivo pero se han descrito los más habituales. No obstante, para cada situación especial podrían definirse otros tipos de ensayos que informen apropiadamente del comportamiento del material frente al problema en estudio.

Se ha efectuado una distinción, atendiendo a las técnicas de ensayo, entre suelos y rocas. En cada caso se realiza una identificación de los ensayos posibles, si bien la frontera entre un tipo de material y otro no siempre está clara.

Se ha prestado una mayor atención a aquellos ensayos que definen propiedades más específicas de los materiales que van a constituir cuerpos de presas o su cimiento, así como a las singularidades de cada ensayo más interesante para este tipo de obras. No se han introducido los ensayos que serían propios de geotextiles.

Se ha elaborado una Tabla en donde para cada ensayo se especifican algunos datos y algunas de las distintas normativas vigentes en los países de nuestro entorno. Sirven de referencia y contraste en la ejecución de los distintos procedimientos. Cuando no existe normativa, debe ser el peticionario el que defina las condiciones del ensayo en función del objetivo que pretenda cubrir.

Dependiendo del tipo de ensayo y del objeto del estudio, las muestras pueden, (o deben) ser, inalteradas o remoldeadas. En el segundo caso, es necesario especificar la densidad y humedad con las que se desea efectuar el ensayo. Para el estudio del cimiento, en ocasiones, (resistencia, deformabilidad, ...) se necesitarán muestras inalteradas.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS

Las muestras que se ensayan no tienen por qué ser necesariamente inalteradas, salvo para la determinación de la densidad y la humedad. Sí deben ser representativas del material a estudiar.

## 2.1. Mineralogía y composición

Los distintos minerales que constituyen un suelo se pueden identificar cualitativa y en algunos casos cuantitativamente por medio de las técnicas de difracción de rayos X, del análisis térmico diferencial, o de la Inspección visual en el microscopio electrónico.

Los ensayos químicos más usuales tienen como objeto conocer los porcentajes de carbonatos, sulfatos y materia orgánica presentes en la muestra del suelo.

Los resultados relativos al porcentaje de carbonatos pueden presentarse en términos de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  o  $\text{CO}_2$  por lo que este detalle debe reflejarse claramente.

## 2.2. Granulometría

Con los ensayos granulométricos se pretende identificar la distribución de tamaños de las partículas que constituyen un suelo. Básicamente hay dos métodos, dependiendo del tamaño de las mismas: análisis mediante tamizado previa agitación mecánica y análisis por sedimentación utilizando un hidrómetro o una pipeta. La distinción, (en la que no coinciden las distintas Normativas), se efectúa a partir del tamaño considerado como separador de los finos ( $80\mu$  en la Normativa NLT (104.91/2) y en la actual (1995) redacción de la Norma Europea,  $75\mu$  en la ASTM (D 422-90) y  $63\mu$  la normativa inglesa (BS 1377 Part 2, 9.2.2.1).

Si se considera necesario se deben eliminar partículas orgánicas o agregados de carbonatos, con anterioridad a la realización de los ensayos, que pueden falsear los resultados obtenidos.

También se dispone de técnicas para identificar con precisión el contenido de las partículas finas mediante el análisis de difracción de rayos laser. Posibilita conocer con precisión la distribución de partículas finas desde  $2\text{ mm}$  hasta unos  $2\mu$ .

Para el caso de partículas gruesas, las formas de las partículas se suelen calificar, utilizando una lupa o un microscopio, atendiendo al criterio de Krumbein y Slóss, (1955), que tipifican dos aspectos: "formas" y "redondeamiento". Este último término se refiere al de su superficie. En general este tipo de calificaciones no están normalizadas, si bien la NLT 354/74 y BS 812-67 proporcionan un índice de lajas y agujas de los áridos para hormigones, que puede servir de referencia.

### 2.3. Plasticidad

Estos ensayos identifican la plasticidad de la fracción fina de los suelos. Existe normativa para valorar el límite plástico, el límite líquido y el límite de retracción.

Como alternativa a la cuchara de Casagrande, para valorar el límite líquido en suelos de baja plasticidad, existe también el procedimiento de caída de cono, que se encuentra especificado en sus tamaños y pesos. En esos casos este ensayo puede ser más consistente.

### 2.4. Densidad y humedad

El ensayo más habitual es el de densidad "seca". Indica la relación de masa "seca" por unidad de volumen. No obstante dado que los estados del suelo son varios, en la medida en que las tres fases (sólida, líquida y gaseosa) se encuentren mezcladas en diferentes proporciones.

El ensayo de densidad permite estimar el grado de compacidad del suelo y es un parámetro fundamental en el comportamiento geotécnico de los materiales.

El contenido de humedad es el peso del agua dividido por el peso del suelo. Como el ensayo se efectúa introduciendo el material en una estufa, se debe tener en cuenta la posibilidad de que alguno de sus componentes se pueda volatizar. Por ejemplo, si se espera la presencia de yeso se suele secar a una temperatura máxima en la estufa de 60°C.

El peso específico de las partículas sólidas es el cociente entre el peso de las partes dividido por su volumen. Sirve de referencia para calcular índices de hueco y porosidades. Si los valores obtenidos son anómalos, superiores a 2,8 o inferiores a 2,5 se debe investigar la causa de esta singularidad.

Hay dos procedimientos para obtener la densidad máxima en suelos granulares. Uno en base a compactar al material con una energía tal que, sin modificar su granulometría, se alcance el mínimo índice de huecos posibles. Otro procedimiento consiste en vibrar la muestra del suelo granular hasta conseguir la densidad máxima posible. Para ello se suelen especificar la frecuencia de vibración, su amplitud y el tiempo de actuación de la misma. Si se utiliza el procedimiento de apisonado es conveniente conocer la granulometría que se produce después del ensayo. El segundo procedimiento no está normalizado en España si bien existe norma ASTM. Se considera que es más adecuado, más limpio, no modifica la granulometría del material y se pueden alcanzar valores ligeramente más elevados.

La densidad mínima de suelos granulares pretende conseguir la estructura del esqueleto sólido del suelo más "abierto" posible. Para ello se deposita el material suavemente en un molde cuyo volumen es conocido sin ninguna compactación.

Este ensayo está normalizado hasta un determinado tamaño, (las norma UNE permiten hasta 5 mm), por lo que para tamaños más gruesos se deben extrapolar los criterios.

## 2.5. Ensayos de compactabilidad

Los más habituales son el Proctor Normal y el Proctor Modificado.

En el primer caso la energía por unidad de volumen es de 5,7 Kp cm/cm<sup>3</sup>; en el segundo es de 24,6 Kp cm/m<sup>3</sup>.

Se obtiene la relación entre la densidad y la humedad del suelo para una energía de compactación determinada definida por el peso de la maza, la altura de caída y el número de golpes por cada unidad de suelo.

Está generalmente aceptado que la energía de compactación que se alcanza en obra con la maquinaria pesada moderna está más próxima a la energía del proctor modificado que a la energía del proctor normal. Si la muestra tiene gruesos es más conveniente efectuar el Proctor Modificado.

Existen otros ensayos de compactación, en los que se desea reproducir mejor las condiciones de "amasado" propios de obra, frente al "impacto" que producen los ensayos tipo Proctor, para lo cual se puede utilizar el ensayo Harvard (Jiménez Salas y Justo, 1975).

R2

El ensayo MCV es adecuado para suelos muy heterogéneos, pues simplifica las operaciones de control y permite contrastar los resultados con la humedad de compactación.

## 2.6. Permeabilidad y comportamiento frente al agua

Para su determinación, en función de los órdenes de magnitud de la permeabilidad esperada, se pueden utilizar el permeámetro, la célula triaxial o el edómetro. En los primeros casos para un gradiente determinado se calcula el coeficiente de permeabilidad en base a las teorías lineales de Darcy.

Por ello se debe garantizar un régimen de flujo sin turbulencias. En el edómetro se mide indirectamente. Se suele utilizar en el caso de materiales muy impermeables.

No existe normativa específica para reproducir en laboratorio el fenómeno del colapso, entendiendo como tal a los asientos que se producen en los suelos, normalmente granulares, por efecto de la humectación. Se suele ensayar en el equipo edométrico pero también se pueden hacer ensayos para cuantificar este fenómeno en los equipos triaxiales. Se suele iniciar el ensayo con el material semisaturado, en las condiciones de densidad y de humedad de interés y en un momento determinado dentro del proceso de carga, se efectúa la saturación y se miden las deformaciones que se producen al ser inundada la muestra de agua. En el método del doble edómetro se comparan los resultados obtenidos con el material saturado, respecto del mismo material ensayado "semisaturado". Para conocer este fenómeno, se deben especificar las condiciones en las que se desea realizar el ensayo.

Los ensayos más habituales para estudiar el aumento de volumen de los suelos plásticos son el hinchamiento libre y la presión crítica de hinchamiento. En el primer caso a la pastilla de suelo se la deja hinchar sin presión alguna o con una presión muy reducida, determinándose el porcentaje de hinchamiento que sufre. En el segundo caso, por contra, se somete a la pastilla de suelo a una presión tal que no se la permita deformabilidad alguna. Para una determinada tensión o trayectoria de tensiones, también se puede conocer la deformabilidad del suelo al ser inundado.

El hinchamiento también se puede determinar en el ensayo CBR, pero este procedimiento se considera más propio de tecnología de carreteras que de obras hidráulicas.

Todos los ensayos de determinación del potencial de succión en función de la humedad de la muestra son también ensayos indicativos del comportamiento de los suelos arcillosos en estado de semisaturación.

También es posible conocer la permeabilidad en medios no saturados. Incluso puede ser de interés, en particular, determinar el coeficiente de difusión.

23

El ensayo de falta de cohesión, o ensayo Vaughan, (1976), consiste en formar una muestra en un cubo, en las condiciones de compactación próximas a las de obra, y depositarla en una bandeja, de escasa profundidad, que se inunda posteriormente. Si la muestra se desmorona hasta su ángulo de reposo el suelo no es cohesivo. El resultado es ilustrativo. También se pueden utilizar los resultados de los ensayos del triaxial o de corte directo para confirmar la inexistencia de cohesión.

De la misma manera almacenando las muestras, con una ligera humedad, se puede estudiar, de manera aproximada, la influencia del tiempo en la producción de contactos entre granos, debidos por ejemplo a la cementación de sus enlaces.

También se pueden realizar ensayos específicos de materiales para filtros basándose en reproducir a escala reducida, el fenómeno real de filtración del agua a través del material impermeable colocado en contacto con el propio material de filtro. Para las presiones de la obra y con el agua del embalse se pueden pronosticar la eficacia del diseño. Los detalles y su interpretación se pueden encontrar en (Bravo, 1993).

R.4

## 2.7. Dispersabilidad

La dispersabilidad se puede producir, en principio, en cualquier tipo de suelos arcillosos por lo que se deben ensayar frente a este fenómeno los materiales finos. Algunos de estos ensayos es conveniente que se efectúen con agua de características químicas similares a las que van a tener en el embalse salvo que las normas o las condiciones de la obra así lo especifiquen.

R.5

El ensayo más definitivo es el de "tubificación", también conocido como ensayo de la aguja (Sherard et al. 1976; Acciardi, 1984).

R.6

No obstante, es conveniente efectuar adicionalmente algunos de los otros tipos de ensayos que existen, entre los que cabe mencionar:

- el "doble densímetro", en donde se contrastan los tamaños de la muestra con y sin agitación mecánica o química,
- los ensayos que buscan conocer la presencia de sodio intercambiable, junto a otros datos de tipo químico, o
- el ensayo de la "bolita" ("crumb-test") que estudia el efecto del agua en una muestra de suelo de forma cúbica.

De la cuidadosa ejecución de estos ensayos, así como de su correcta interpretación se puede disponer de una acertada idea acerca de la potencialidad dispersiva del suelo arcilloso, (ICOLD, 1990).

R.7

Incluso puede ser conveniente que la delimitación de la potencialidad dispersiva del material se haga por contraste con los ensayos conjuntos "núcleo-filtro", o con los diferentes indicios deducibles de cada tipo de ensayo, valorando cada uno según la confianza en él depositada, (Bravo, 1993).

R.4



## 2.8. Resistencia al corte

Todos estos ensayos se pueden hacer con las muestras de material en estado de saturación o simplemente con la humedad natural. Si al solicitar el ensayo al laboratorio no se especifica nada se supone que se realizan con el material saturado. En particular para el estudio del cuerpo de presas se ensayan muestras "remoldeadas" y para el estudio del cimiento muestras "inalteradas".

Cuando se ensayan materiales que contienen gruesos, el problema que surge es el de extrapolar los resultados obtenidos al material de obra. Normalmente su granulometría no se corresponde exactamente con el material introducido en las muestras, por lo que es conveniente utilizar equipos de las mayores dimensiones posibles.

En España hay células triaxiales que permiten ensayar probetas que varían en su diámetro desde 1,5" hasta 9". Este último equipo está disponible en el Laboratorio de Geotecnia (CEDEX) del Ministerio de Fomento. Hay también triaxiales que permiten especificar la trayectoria de tensiones que se desee.

En todos estos ensayos se pueden medir también los parámetros deformacionales que se corresponderán con las condiciones del ensayo por lo que estos ensayos también se deben entender y definir para conocer este comportamiento.

Los ensayos triaxiales que se efectúan de manera más sistemática son del tipo CU, es decir, ensayos con consolidación previa, rotura sin drenaje y medida de la evolución de las presiones intersticiales. Permiten deducir los parámetros resistentes en totales y en efectivas.

Los ensayos con consolidación previa y rotura con drenaje, tipo CD, permiten estimar la resistencia a largo plazo y deducir los parámetros correspondientes.

Los triaxiales normalmente conocidos como rápidos, tipo UU, se realizan en suelos cohesivos y de sus resultados se deducen los parámetros a corto plazo. No se consolida previamente la muestra y se rompe sin permitir que drenen las presiones intersticiales que se generen.

El ensayo de compresión simple, (uniaxial), es el ensayo de resistencia más sencillo y económico. Si bien en este ensayo se utiliza otro aparato más simple que las células triaxiales, que no permiten la saturación de la muestra.

Los equipos de ensayo de "corte directo" utilizan muestras que varían desde 6 x 6 cm, ó 5 cm de diámetro, hasta el ensayo de corte de grandes dimensiones del Laboratorio de Geotecnia de 1 x 1 x

1 m<sup>3</sup>, pasando por 10 x 10, (ó 8 cm de diámetro), y 30 x 30 cm, respectivamente. Los ensayos que se pueden realizar son, de manera similar a los triaxiales, con consolidación previa o sin ella, si bien no se suelen medir presiones intersticiales.

El ensayo de corte simple también puede completar la información respecto a la resistencia al corte de los materiales.

También hay otros ensayos, similares a los de campo, que se pueden hacer en el laboratorio, (moli-  
nete, penetrómetro bolsillo, etc) y sirven para tener un índice de su resistencia a corto plazo.

## 2.9. Deformabilidad

A partir de la información que suministran los ensayos de resistencia se puede conocer el comportamiento deformacional del material.

Específicamente diseñados con este objetivo están los ensayos edométricos, que sirven para medir los procesos de consolidación, en una dimensión, de los suelos cohesivos.

## 2.10. Ensayos dinámicos

Permiten conocer las reacciones del suelo a sollicitaciones sísmicas. Es necesario especificar las condiciones de estos ensayos, (amplitudes, frecuencias, etc), pues no hay normativas. Se describen a continuación equipos disponibles actualmente en España.

En el ensayo de columna resonante se determinan las características de deformación y el coeficiente de amortiguamiento del suelo ensayado, de acuerdo con el modelo lineal equivalente, para distintos niveles de deformación, todos ellos muy reducidos, del orden de  $10^{-5}$ , en donde el comportamiento del suelo es todavía elástico.

También se pueden determinar en probeta, en las condiciones fijadas, las velocidades de transmisión de las ondas de compresión y de corte. Aunque en teoría son ensayos sencillos, en la práctica son difíciles de interpretar.

El ensayo triaxial cíclico añade, para un estado tensional determinado de la probeta, solicitaciones de tipo dinámico. Normalmente las solicitaciones son de tipo sinusoidal. La frecuencia de estas solicitaciones no suele afectar al resultado que se obtiene. En algunas ocasiones, si el equipo que se dispone lo permite, se puede someter a la probeta con las solicitaciones de carácter aleatorio esperables o registradas con un determinado terremoto.

Con estos equipos se pueden obtener no sólo los módulos de elasticidad y amortiguamiento típicos, sino también las deformaciones permanentes que se vayan produciendo en función del número de ciclos y de la amplitud máxima de cada ciclo. Esta información permite conocer el comportamiento en la fatiga del material. También permiten conocer la pérdida total de resistencia (licuación).

El ensayo de corte simple cíclico somete a la probeta a una deformación tangencial constante en toda su altura. Para una determinada presión de confinamiento se le superpone una tensión tangencial de carácter cíclico, normalmente de tipo sinusoidal. Con este tipo de equipos se pueden hacer ensayos en seco, a volumen constante, (isocóricos), que posibilitan el estudio de los fenómenos de licuación.

Con todos estos ensayos se puede cubrir un amplio rango de niveles de deformación.

### **2.11. Otros ensayos**

Existe una amplia gama de posibilidades para conocer parámetros físicos o mecánicos, no estrictamente geotécnicos pero representativos del comportamiento de un suelo, cuya definición y descripción de sus utilidades excede del alcance de este Apéndice. Algunos de ellos (pH, resistividad, friabilidad, aplastamiento, etc), se indican en la Tabla que acompaña a este texto.

## **3. CARACTERIZACIÓN DE LA ROCA**

### **3.1. Introducción**

Se describen los ensayos de laboratorio que se pueden utilizar para determinar el comportamiento de los fragmentos individuales de la roca, frente a las acciones a que se van a ver sometidos, y cua-

les de todos ellos se deben llevar a cabo para determinar la calidad y aptitud de un material para ser empleado como árido para hormigones o como escollera, o que se encuentre en el cemento.

Las muestras que se reciban en el laboratorio pueden tener indistintamente un doble origen; del sondeo o pueden ser extraídas de un bloque. En el primer caso, se deben tener en cuenta la orientación de las mismas para aquellos fenómenos que puedan estar condicionados por la dirección de sus discontinuidades.

### 3.2. Identificación y características elementales

Para la determinación de los tamaños de partículas granulares son aplicables los criterios definidos para suelos. Se suelen realizar en obra dadas las grandes cantidades de material que pueden verse implicadas. La forma de las partículas se puede conocer utilizando la metodología propia de la tecnología del hormigón en donde se suelen identificar unos índices de lajosidad y de agujas.

- a) **La petrografía** de la roca persigue la obtención de sus propiedades intrínsecas. Numerosas organizaciones mundiales, ASTM (American Society for Testing and Materials), BS (British Standard), ISRM (International Society of Rock Mechanics), etc, han establecido recomendaciones concretas para efectuar un adecuado examen petrográfico de las rocas.

Para su determinación con carácter orientativo pueden emplearse, de una manera progresiva, las siguientes técnicas:

- 1.- Reconocimiento y descripción de visu de los testigos o fragmentos de roca con lo cual es posible obtener una primera idea de su estructura y su distribución.
  - 2.- Análisis mediante lupa binocular.
  - 3.- Observación mediante microscopio petrográfico que, permite reconocer los distintos minerales que componen la roca a partir de sus propiedades ópticas.
- b) Con cualquiera de las técnicas anteriores es posible, además, determinar **la textura** que presenta la roca y el tamaño de grano predominante en la misma.
- c) Utilización de técnicas de difracción de rayos X, con las cuales se analiza de forma muy adecuada **la composición** de la roca y la proporción de **minerales** de naturaleza arcillosa.

- d) Además, y como complemento, es preciso conocer el **grado de meteorización** que puede presentar la roca, siendo frecuente emplear, para su determinación, las recomendaciones establecidas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1978).
- e) La **composición química**, permite la determinación de elementos e incluso posibilita aproximarse a su composición mineralógica, en porcentajes. La presencia en la roca de determinados componentes químicos puede dar lugar a una elevada alteración de la misma. En este sentido, puede ser de utilidad determinar, por ejemplo:
- Si en la roca existen arcillas del grupo de las esmectitas, o
  - el contenido de Sulfatos y Sulfuros totales, o
  - la presencia de Sales Solubles y Sales Hidratables,
- f) La **dureza superficial**, para lo cual se suele utilizar la conocida escala de Mohs que varía de 1 a 10.
- g) La **densidad aparente**, es el cociente entre la masa y el volumen (aparente) impermeable del fragmento o la probeta. Esta definición, por lo tanto, lleva implícita que ciertos materiales son, en principio, impermeables en su totalidad, salvo una pequeña corteza superficial a la que es más fácilmente accesible el agua. La **densidad real** es el cociente entre la masa del fragmento y el volumen de sólido ( $V_s$ ) más el volumen de huecos inaccesible ( $V_{hi}$ ). La **densidad absoluta**, o peso específico de las partículas sólidas es el cociente entre la masa y el volumen ocupado por los sólidos.
- h) La obtención de la **humedad** se obtiene secando el material en estufa hasta peso constante.
- i) La **porosidad** es la relación entre el volumen de huecos (normalmente suma de huecos y fisuras) y el volumen total de la muestra de roca. Los huecos como tal suelen considerarse que son aproximadamente de forma esférica o redondeada, mientras que las fisuras suelen ser sensiblemente planas. Las porosidades pueden medirse, entre otros procedimientos, de las siguientes formas:
- A partir de la densidades seca y saturada;
  - a partir del agua absorbida tras saturar la roca con agua a presión;
  - mediante inyección de gas helio a presión y
  - saturando la roca con mercurio introducido a presión, (porosimetría de mercurio).

Normalmente la porosidad de las rocas se obtiene en laboratorio a partir del volumen total de la muestra (por inmersión en mercurio, por ejemplo) y del volumen de huecos, determinándose este último como diferencia entre el peso saturado y seco de la muestra ensayada. Es aplicable a los poros superficiales de la muestra.

- j) Para conocer la "**absorción de agua**" se sumergen las muestras en un recipiente en las condiciones establecidas en cada uno de los distintos tipos de ensayo que existen normalizados. El resultado de este tipo de ensayo se emplea muy a menudo para determinar la alterabilidad potencial de las rocas. La absorción puede ser por inmersión libre o forzada (bajo presión), por hidroscopticidad (a presión y humedad atmosférica) y por capilaridad (sin inmersión de la muestra).
- k) La **velocidad de propagación** de Impulsos sirve para tener un índice de la calidad de la roca. Con sus resultados es posible determinar indirectamente el grado de fisuración existente en un testigo. Para ello, se da una pulsación en un extremo del testigo con un cristal piezoeléctrico y se recibe el impulso en el otro extremo con un segundo cristal. El tiempo transcurrido entre emisión y recepción permite conocer la velocidad de transmisión de las ondas que en función del tipo de onda generada se puede corresponder con la de compresión o la de corte. Se pueden deducir módulos de elasticidad y coeficiente de Poisson, para niveles de deformación muy bajos.
- l) Al igual que ocurría con la porosidad, la **permeabilidad** total es la suma de la que tiene lugar a través de la roca matriz y la que se produce entre huecos y fisuras. Puede ser fuertemente dependiente del estado tensional. Requiere un estudio específico con ensayos especialmente definidos. Se puede determinar en laboratorio normalmente en el equipo triaxial. En rocas sanas se utilizan gradientes elevados e incluso, en ocasiones, gases.

### 3.3. Resistencia

Existen varias posibilidades que responden a distintos tipos (conceptos) de "resistencias".

- a) El ensayos de **resistencia a compresión simple**. Aunque aparezca como un ensayo sencillo, en realidad es un ensayo relativamente complejo, ya que exige una meticulosa preparación de las probetas, una cuidada ejecución del ensayo y una correcta interpretación de los resultados obtenidos.

El tamaño de la probeta, la velocidad del ensayo, la "calidad" de las superficies de contacto con la carga y el contenido de agua del testigo o fragmento de roca a ensayar y la propia rigidez del equipo tienen influencia en el resultado obtenido.

Durante la realización del ensayo suele ser norma habitual medir la deformabilidad vertical de la probeta, (mediante bandas extensométricas), obteniéndose unas curvas tensión-deformación que permiten tener una primera idea del comportamiento de la roca matriz: elástico, elasto-plástico, etc.

- b) El **ensayo de carga puntual** es también conocido como ensayo Franklin o PLT (Point Load Test). Aunque normalmente se emplea sobre testigos de roca, es posible efectuarlo sobre fragmentos irregulares. La dispersión de los resultados puede ser elevada.

Se obtiene un índice  $I_s$  normalizado, ( $I_s = P/D^2$ ; siendo P la carga de rotura y D la distancia entre las puntas cónicas) correspondiente a una distancia D de 50 mm, pero tanto si la distancia no es esta, como si la forma es irregular, se puede corregir el resultado para tener en cuenta esta influencia.

Este ensayo, por su facilidad de realización permite llevarlo a cabo en el campo y puede ser utilizado con profusión para obtener un amplio espectro de la calidad de la roca. Sin embargo, y a pesar de lo anterior, se debe emplear con precaución en rocas blandas ( $I_s < 0.1$  MPa) y con rocas claramente anisotrópicas, como las pizarras y ciertos tipos de esquistos. En este último caso debe tenerse en cuenta la orientación bajo la que se aplica la carga.

Con los resultados de este ensayo se puede deducir el valor de la resistencia a la compresión simple de la roca matriz,  $q_a$ , por medio de una correlación que tiene la siguiente forma:  $q_a = KI_s$ . Con carácter general, para el valor de referencia de D de 50 mm, el coeficiente suele estar comprendido, según numerosos estudios, entre 5 y 25. Todavía no existe una explicación de estos valores, pero a grandes rasgos se puede afirmar que cuanto más resistente es la roca mayor es el índice K.

Similar en cierta medida al ensayo anterior, Marsal y Resendiz (1975) desarrollaron un ensayo para analizar la solidez de los fragmentos de roca empleados como escolleras. Estos autores junto con los resultados de la absorción de agua, la granulometría y el ensayo de desgaste de Los Ángeles, establecen una clasificación de las escolleras.

- c) El ensayo **Brasileño** permite obtener una valoración indirecta de la resistencia a la tracción. Somete a una probeta cilíndrica a un esfuerzo de compresión a lo largo de dos generatrices opuestas.
- d) El ensayo a **flexotracción** somete a una probeta prismática a flexotracción apoyada en sus dos extremos y cargada, normalmente en dos puntos distintos.

Estos ensayos fueron pensados para hormigones.

- e) Una medida indirecta se puede obtener mediante el **esclerómetro**. Este ensayo, fue desarrollado inicialmente para tener a priori una idea del valor de la resistencia a la compresión simple de probetas de hormigón. Se obtiene un equivalente a la dureza superficial de la roca mediante el martillo Schmidt de rebote (también conocido normalmente como esclerómetro) de muy sencilla ejecución.

Se puede efectuar tanto en campo como en laboratorio. La orientación bajo la cual se efectúa el golpeo mediante el martillo influye en los resultados, por lo que se debe tener en cuenta esta circunstancia a la hora de analizarlos. La dispersión de los mismos suele ser elevada. Por lo que además de efectuar series de golpeos, se eliminan los valores extremos, para deducir un valor representativo.

Se puede disponer de un elevado número de valores y por tanto un buen espectro de la calidad de la roca, aunque siempre es preciso recordar que se trata de un ensayo de tipo superficial. Para deducir con garantía un valor de la Resistencia a Compresión Simple es necesario un tarado previo del equipo.

- f) Los ensayos de **compresión triaxial** en muestras de roca son más propios de estudios especiales pero también se efectúan en análisis de cimentaciones que puedan considerarse problemáticos. Requieren equipos especiales y definir el proceso de rotura.
- g) Los ensayos de **tracción directa** permiten conocer y extrapolar el comportamiento de la matriz rocosa (intacta) en zonas próximas al origen de tensiones.
- h) Otro índice para obtener la calidad de una roca, y por extrapolación un índice de su resistencia, consiste en determinar los **cambios granulométricos** acontecidos con los fragmentos de roca para las sollicitaciones que van a sufrir en obra, antes y después de ensayar al corte la escollera.



### 3.4. Alterabilidad física

En laboratorio, se pretende reproducir los procesos de alteración que inducen en la roca los agentes externos de la zona en donde la roca va a quedar depositada, acelerándolos.

La respuesta de la roca está condicionada fundamentalmente por su porosidad y su capacidad de absorción.

La gran mayoría de los ensayos de laboratorio concernientes a la alterabilidad de la roca carecen de normativa específica para su realización en laboratorio, por lo que para su ejecución se deben especificar algunos detalles. Para su elección se deben tener en cuenta factores tales como el clima del lugar de la obra, la representatividad de los agentes agresivos del ensayo respecto a su posibilidad en la vida de la obra, experiencia y conocimientos del ensayo, etc. El resultado de estos ensayos se suele expresar como pérdida de peso seco durante la realización del ensayo, para un determinado número de ciclos, a especificar por el usuario. En muchos de estos ensayos, en España no se dispone de una experiencia amplia en cuanto a los valores a asignar o exigir. A continuación se describen someramente algunas de las posibilidades de ensayo.

- a) El ensayo de desgaste **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. En realidad es un índice de fragilidad o de resistencia al impacto. Se utiliza como índice de resistencia a la abrasión, en los áridos en tecnología de carreteras. Los resultados varían mucho con la granulometría utilizada.
- b) Los ensayos **Deval** y **Micro Deval** son similares al de desgaste de Los Ángeles. La diferencia entre un tipo y otro de ensayo es función de la granulometría que se ensaya. En estos ensayos, la degradación de los materiales se produce por el choque entre los propios fragmentos de roca introducidos en el tambor. El ensayo puede efectuarse tanto en seco como con la muestra saturada.
- c) Los ensayos de **"Humedad-Sequedad"** tratan de cuantificar el debilitamiento originado en la red cristalina de los minerales de la roca por la humectación y desecación artificial del agua, tras un determinado número de ciclos, normalmente 25.
- d) Al igual que el ensayo anterior los ensayos de **"calentamiento-enfriamiento"** consisten en someter a la roca a un choque térmico similar al que puede tener lugar en la naturaleza. Se trata de prever las acciones originadas por las expansiones y contracciones.

- e) El ensayo "Hielo-Deshielo" trata de reproducir mediante ciclos el efecto que tienen las heladas en las rocas saturadas. Al provocar un importante cambio de volumen en el agua, origina fracturaciones importantes en los fragmentos de roca que se ensaya.

Consiste en sumergir unos fragmentos de ciertas dimensiones en una solución de sulfato sódico o magnésico durante un tiempo predeterminado y posteriormente secarlos en estufa a 100°. Normalmente se especifica efectuar un mínimo de cinco ciclos.

- f) Los resultados de los ensayos de **ataque con Sulfatos** (Magnésico o Sódico) dependen de la naturaleza del medio de cristalización y del tamaño y forma de los fragmentos elegidos para la realización del mismo, por lo que dado que la normativa está fundamentalmente elaborada para áridos para hormigones, se pueden especificar otros tamaños a ensayar más representativos del material en obra.
- g) El ensayo de **Inmersión** persigue determinar cual es el comportamiento de los fragmentos de las rocas frente a la acción del agua. Existen diferentes procedimientos para cuantificar el incremento de fisuración producido por el debilitamiento de las rocas al aumentar su grado de saturación. Uno de ellos, en rocas margosas por ejemplo, consiste en analizar la rapidez (el tiempo) con la que tiene lugar el desmoronamiento, si es que se produce, de un fragmento de roca, una vez que se ha introducido en agua destilada. Otro procedimiento, consiste en determinar la Resistencia a Compresión Simple de los fragmentos secos y saturados. Sus resultados pueden ser indicativos de su comportamiento a largo plazo.
- h) El ensayo de **Humedad-Sequedad-Desmoronamiento** (Sehudes) es muy similar al de "humedad-sequedad", pero en el que además se tiene en cuenta el desmoronamiento sufrido por la muestra en el interior de un tambor giratorio a medida que transcurre el ensayo. Es el ensayo que más se utiliza en materiales pizarrosos y argilíticos.

### 3.5. Alterabilidad química

En la práctica también existen alteraciones consideradas estrictamente como de tipo químico, que tienen su origen, fundamentalmente, en la circulación de aguas a través de las distintas fisuras existentes en el macizo rocoso. En laboratorio se podrían reproducir algunos de estos procesos químicos como pueden ser:

- a) La **hidratación**, (alteración) debido al aumento de volumen experimentado por determinados minerales al incorporar moléculas de agua a su composición. El caso más claro es el de la anhidrita ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ) que en presencia de agua se transforma en yeso.
- b) La **hidrólisis**, esto es, (disolución de ciertos minerales). Puede ser el caso de las rocas yesíferas, en las que el agua tiende a disolver el yeso, y de otras rocas sedimentarias, en las que suele ser frecuente encontrar sales solubles.
- c) El **intercambio iónico** (alteración de algunos minerales singulares silicatados transformándose en arcillas).
- d) Los procesos de **oxidación-reducción**. (Por ejemplo el caso singular que tiene lugar en los sulfuros (piritas), que se oxidan transformándose en sulfatos desprendiendo ácido sulfúrico en una reacción muy lenta.

Todos estos procesos son temas singulares y costosos de conocer. No son fáciles de estudiar si bien dada la dificultad de analizarlos en laboratorio se aconseja, en su caso, efectuar los estudios in situ.

### 3.6. Otros ensayos

Existe una amplia gama de posibilidades particulares, individualizadas para cada caso, que pretenden reproducir los efectos que se van a dar en obra. Dentro de este grupo de ensayos se podrían incluir, entre otros, los siguientes: Carga correspondiente al 10% de finos (que consiste en aplicar sobre una granulometría gruesa una carga que consiga una fragmentación del material en la que el porcentaje de finos oscile entre el 7.5% y el 12.5% del peso inicial), dilatación térmica, conductividad eléctrica, pH, índice de impacto (que consiste en aplicar a una granulometría gruesa un número de golpes mediante la caída de un pistón con objeto de determinar el porcentaje de finos que se produce), etc.

En la práctica estos ensayos son menos útiles, su interpretación es difícil, y por lo tanto se realizan con menor frecuencia que los que en los apartados anteriores se han tratado, por lo que no se ha considerado conveniente su descripción detallada en este texto.