

ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS

Study of physical properties of the rocks

David Benavente, Ana M. Bernabéu y Juan C. Cañaveras (*)

RESUMEN

El objetivo de este taller es mostrar a los alumnos mediante experiencias de laboratorio sencillas y de bajo coste algunas metodologías de estudio de las propiedades físicas de las rocas como material de construcción.

Las propiedades físicas de las rocas determinan su uso y comportamiento tanto como materiales de construcción como soportes de obra civil. La determinación de las propiedades físicas complementan el estudio mineralógico y textural (petrográfico) de los materiales pétreos y naturales.

Las propiedades petrofísicas más importantes que se abordan en este taller son el sistema poroso (porosidad); transporte de fluidos (permeabilidad, capilaridad); propiedades mecánicas (estáticas y dinámicas); la durabilidad de las rocas frente a las sales, hielo, ataque ácido, etc.

ABSTRACT

The aim of this workshop is to show to the students, using simple and low cost laboratory experiences, some tests of characterization of the physical properties of the rocks which are commonly used as construction and building material.

The physical properties of the rocks determine their use and behaviour as much as construction materials as substrate of civil work. The determination of physical properties supplements the mineralogical and textural (petrographic) study of stone materials.

The more relevant petrophysical properties that are approached in this workshop include the porous system (porosity); transport of fluids (permeability, capillarity); mechanical properties (both static and dynamic); the durability of the rocks under the action of salts, ice, acid attack, etc.

Palabras clave: petrofísica, durabilidad, porosidad, ensayos de laboratorio

Keywords: petrophysics, durability, porosity, laboratory tests

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista físico, las rocas presentan diferentes propiedades, que se expresan normalmente por medio de parámetros que cuantifican determinados aspectos o comportamientos. Dichas propiedades físicas derivan de las características puramente petrográficas; de los minerales que las forman, de su tamaño y morfología; del volumen de poros, de su forma y de la naturaleza de los fluidos que rellenan estos poros. Estos caracteres petrográficos son muy variables en función del tipo de roca y de su petrogénesis, y a menudo, la relación entre rasgos petrográficos y parámetros petrofísicos no siempre es fácil de determinar.

En gran medida, la importancia de las propiedades físicas de las rocas y de su estudio radica en las aplicaciones de las mismas. Las rocas, y por extensión los suelos, son los materiales sobre los que se realizan obras de ingeniería civil (edificios, túneles, presas, carreteras,... etc.) y constituyen el soporte en el encuentran los diferentes recursos (agua, gas, pe-

tróleo,... etc.). Las variaciones de las propiedades físicas de las rocas, como, por ejemplo: densidad, magnetización, velocidad de ondas elásticas y resistividad eléctrica, permiten la identificación de la geología del subsuelo, mediante métodos de exploración geofísica. En este sentido, podemos definir la Petrofísica como una disciplina científica que caracteriza y modeliza el comportamiento físico de las rocas, encuadrándola dentro de las Ciencias Geológicas.

Los materiales naturales de carácter mineral utilizados en construcción son variados, incluyendo tanto la roca natural (piedra de construcción) y la roca ornamental, como áridos, cementos, cales, materiales cerámicos, etc. Las piedras naturales son aquellas que constituyen elementos estructurales o unidades constructivas (adoquines, bordillos, sillares, pavimentos), tras una elaboración sencilla de corte y/o labrado. Básicamente el único requisito que presentan estos materiales es que ofrezcan resistencia mecánica a los esfuerzos que deban soportar en una obra. Las piedras naturales de construcción (piedras de cantería) abarcan un amplio espectro ti-

(*) Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante. Laboratorio de Petrología Aplicada. Unidad Asociada del CSIC-UA. Ap. 99. 03080 Alicante.



pológico de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas ornamentales presentan una tipología más específica e implican una manufactura más refinada, generalmente mediante pulido. En su uso como roca ornamental, se pueden distinguir tres tipos fundamentales de materiales pétreos cuya definición comercial es muy genérica: granitos, mármoles y pizarras. La denominación científica o petrológica de cada uno de estos tipos de roca no siempre coincide con denominaciones “comerciales” ampliamente extendidas y admitidas incluso a nivel internacional.

Según la MIA (Masonry Institute of America), un *granito comercial* es una roca con textura granuda o gneílica visible que admite pulido. Bajo esta definición se incluirían como granitos comerciales, las sienitas, gabros, anortositas y otras rocas plutónicas y, rocas metamórficas como los gneises. Se incluyen dentro de la categoría de *mármoles comerciales*, según se establece en la clasificación de la MIA, las calizas cristalinas, calizas microcristalinas compactas, serpentinas y travertinos, que son capaces de adquirir pulido por técnicas mecánicas.

Para la determinación de las propiedades físicas de las rocas es habitual la realización de ensayos basados en procedimientos que se encuentran normalizados, de modo que los datos que se obtengan sean comparables. El uso de los materiales pétreos como materiales de construcción se encuentra pues regulado por unas especificaciones referidas a una serie de normativas que permiten responder a los límites que marcan dichas especificaciones. El objeto de la normativa es doble, por un lado constituye un criterio básico de prospección de nuevos yacimientos, y por otro, es el criterio que permite al prescriptor el uso en las mejores condiciones. Entre los métodos y normas específicas más empleadas en el campo de los materiales pétreos, cabe citar las de la Internacional Society for Rock Mechanics (ISRM) y otras normas más específicas como las ASTM (americanas), EN (europeas), DIN (alemanas), BS (británicas) y UNE (españolas).

Además del estudio de las características propias de una roca, es habitual la realización de ensayos para evaluar su comportamiento una vez puesto en obra y sometido a unas condiciones externas determinadas. Estos se conocen con el nombre de ensayos de durabilidad. Básicamente se trata de someter a los materiales objeto de estudio a unas determinadas condiciones (temperatura, humedad relativa, contacto con disoluciones salinas; atmósfera con gases: SO₂) para evaluar el efecto que sobre ellas se produce (Esbert et al. 1997).

La durabilidad se puede definir como la capacidad de un material para resistir la alteración manteniendo sus cualidades estéticas y propiedades mecánicas con el paso del tiempo (Bell, 1993). Los factores que fundamentalmente influyen en la durabilidad de una determinada roca son las características propias del material pétreo (composición mineral, textura, porosidad, propiedades mecánicas, etc.) y las condiciones a las que se encuentra expuesto dicho material (humedad, temperatura, presencia de contaminantes, acción de aerosoles marinos, ascenso de disoluciones por capilaridad, etc.).

PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS

Sistema poroso y densidad

El sistema poroso se puede definir petrofísicamente por la porosidad, así como por el tamaño y forma de los poros. Debido a la importancia que presenta la porosidad en muchos procesos, en este trabajo se va a profundizar en la obtención de este parámetro.

La *porosidad* de un material pétreo es un parámetro de conjunto que se define como la relación entre el volumen total de poros y el volumen total de la probeta o roca.

La porosidad de la roca se puede clasificar dependiendo del grado de interconexión con el exterior. Se define la *porosidad abierta* de la roca como el volumen de poros que presentan un cierto grado de interconexión con el exterior, y por lo tanto, está estrechamente relacionada con su durabilidad. Por el contrario, la *porosidad cerrada* es aquel volumen de poros de una roca que no presenta ningún tipo de comunicación con el exterior. La suma de la porosidad conectada y la no conectada se denomina *porosidad total de la roca*, la cual es un parámetro de conjunto muy importante que controla sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, la porosidad no conectada no se puede obtener de forma directa, sino por diferencia de la porosidad total y la conectada.

Existen técnicas basadas en el desplazamiento de fluidos (porosimetría de mercurio, inmersión, capilaridad, etc.) en las que éstos sólo pueden acceder a unos determinados poros (abiertos). Por ello se define la *porosidad (abierta) accesible* como la relación entre el volumen accesible y el volumen de la roca o probeta. La fracción de porosidad abierta a la que no accede el fluido se denomina *porosidad (abierta) no accesible*. Debido a que la porosidad accesible depende de la accesibilidad del fluido, es necesario especificar el fluido y/o técnica utilizada. En esencia el volumen de poros abiertos accesibles excluye el volumen de poros no conectados, los poros no accesibles y el volumen del sólido.

El sistema poroso se puede caracterizar con diferentes técnicas, entre las que se pueden resaltar: porosimetría de mercurio, tratamiento de imágenes, adsorción de gases, ensayos de inmersión en agua, capilaridad y picnometría de He. En la figura 1 se muestra la metodología para el cálculo de la porosidad abierta accesible con el método de inmersión. De las tres primeras se puede obtener la porosidad y la distribución de tamaños de poros y su forma, mientras que de las tres últimas sólo la porosidad. Estas técnicas son complementarias entre sí, debido a que cada una de ellas tiene un límite de aplicabilidad.

La densidad es un parámetro físico básico en la caracterización de las rocas, y que depende fuertemente de su composición mineralógica y porosidad. Existen diferentes tipos de densidad en función de la fracción de porosidad que se considere. La *densidad real* excluye la porosidad, y se define como el cociente entre la masa de la roca en seco y el volu-



men de la fracción de sólido. Por el contrario, la *densidad de conjunto o bulk* incluye la porosidad total (conectada y no conectada), y se define como el cociente entre la masa de la roca en seco y el volumen de la probeta (Figura 1).

Por último, la *densidad aparente* depende de la porosidad a la que no pueden acceder los fluidos en cada técnica de caracterización (porosimetría de mercurio, inmersión en agua, capilaridad, etc). En esencia, el volumen aparente excluye los poros donde el fluido puede llegar (porosidad accesible), y sólo tiene en cuenta la fracción de poros cerrados, no accesibles y el volumen del sólido.

La densidad de conjunto se puede medir con el picnómetro de helio. El helio es un gas que tiene un tamaño muy pequeño y una gran capacidad de penetración en la gran mayoría de los poros de la roca. Por ello, este gas permite evaluar de forma precisa el volumen total del sólido (excluyendo la porosidad) y, por lo tanto, la densidad real de la roca. Una alternativa al picnómetro de helio, para obtener la densidad real, es el *picnómetro de agua*. Esta técnica, de fácil aplicación, se basa en triturar la roca hasta que desaparezca cualquier tipo de porosidad, obteniendo así la fracción de sólido. La precisión de la densidad con este método depende de la efectividad en el triturado de la roca.

El uso de la balanza hidrostática para la determinación de la densidad es muy interesante cuando la geometría de la probeta no es regular y cuando el tamaño de los poros es muy grande. Sin embargo, los resultados pueden variar en función de la porosidad no accesible y la porosidad cerrada que contenga la roca.

Transporte de fluidos: permeabilidad y capilaridad

La permeabilidad mide la facilidad con la que los fluidos fluyen a través de las rocas. La permeabilidad de las rocas depende básicamente de la porosidad conectada o efectiva y del tamaño del poro. En general, rocas con mucha porosidad y poros de gran tamaño presentan una alta permeabilidad. Por ejemplo, las areniscas y las gravas presentan una alta permeabilidad. La permeabilidad puede variar considerablemente en función sus características petrográficas como por ejemplo, la presencia de fracturas. Las fracturas contribuyen poco a la porosidad de las rocas, pero sin embargo pueden llegar a modificar considerablemente su permeabilidad.

Para medir la permeabilidad, k , de las rocas, éstas se han de saturar completamente con el fluido (ej. agua); se aplica un gradiente de potencial (una presión, Δp , o una diferencia de altura, Δh); y se mide el caudal o flujo, Q . A partir de estos datos, la permeabilidad se calcula aplicando la ecuación de Darcy:

donde L es la longitud del material, A_{prob} es la sección transversal del material permeable (probeta) y μ es la viscosidad (dinámica del fluido, 10^{-3} N·s/m² para el agua a 20 °C). Sin embargo, la medida en laboratorio de la permeabilidad no es sencilla si se compara con la medida de la capilaridad.

El transporte de agua por *capilaridad*, o *imbibición capilar*, es uno de los mecanismos más importantes de movimiento del agua en la mayoría de las rocas porosas y, por lo tanto, está estrechamente relacionado con su durabilidad. Son muchos los ejemplos cotidianos en los que se produce el movimiento de líquidos por capilaridad: la ascensión del café a

ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN 1: DENSIDAD DE CONJUNTO Y POROSIDAD ACCESIBLE CON EL MÉTODO DE INMERSIÓN EN AGUA

A. Material necesario:

- Probetas de roca, agua (destilada), estufa, balanza, metro.

B. Procedimiento experimental:

1. Densidad de conjunto:

- Limpiar y secar en la estufa las probetas.
- Medir sus dimensiones y calcular el volumen de la probeta, V_{prob} (cm³).
- Medir el peso en seco, M_0 (g).
- Cálculo de la densidad de conjunto, ρ_r (g/cm³).

$$\rho_r = \frac{M_0}{V_{\text{prob}}}$$

2. Porosidad accesible abierta con el método de inmersión.

- Limpiar y secar en estufa las probetas.
- Medir sus dimensiones y calcular el volumen de la probeta, V_{prob} (cm³).
- Medir peso en seco, M_0 (g).
- Introducir las probetas en inmersión durante 48 horas.
- Medir el peso saturado en agua, M (g).
- Cálculo de la porosidad abierta con el método de inmersión, P_{AI} (%):

$$P_{AI} = \frac{(M - M_0) / \rho_{H_2O}}{V_{\text{prob}}}, \text{ donde } \rho_{H_2O} \text{ es la densidad del agua (1 g/cm}^3\text{)}.$$

Fig. 1. Obtención de la densidad de conjunto y la porosidad accesible con el método de inmersión en agua.



través de un terrón de azúcar, o la del agua en contacto con un tubo capilar, etc.

La caracterización de este movimiento se puede realizar midiendo la variación de la altura del frente capilar o la masa de la roca (caudal) con el tiempo. Dicho movimiento depende, como en la permeabilidad, del sistema poroso de las rocas, y en particular, de la porosidad (abierta) y del tamaño de los poros. Así, la altura del frente capilar será mayor para rocas con alta porosidad y tamaño de poro pequeño. Por otro lado, el caudal a través de la roca es mayor para el caso de materiales con mucha porosidad y un tamaño de poro grande.

La absorción de agua de la roca por capilaridad se cuantifica con el *coeficiente de absorción capilar*, C. La medida de este coeficiente es sencilla, como se ilustra en la figura 2. Para ello se mide en una balanza la masa de agua absorbida, $M(t)$, en función del tiempo. Con estos datos, el coeficiente de absorción capilar se obtiene a partir de la ecuación:

donde S es el área de la probeta. Por lo tanto, los resultados se representan como el agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo, i.e., $M(t)/S$ vs. (Fig. 2). De esta representación se pueden observar claramente las dos etapas que se producen en la cinética de imbibición capilar. En la primera etapa se produce la entrada del agua al sistema poroso de la roca por capilaridad hasta que la roca se satura de agua (segunda parte de la curva). La primera etapa tiene, en general, un comportamiento lineal y se utiliza para cuantificar la cinética capilar mediante el *coeficiente de absorción capilar*, C. Además, si la probeta se satura completamente (en la segunda etapa), se puede obtener el valor de la porosidad (abierta accesible) (Figura 2).

El coeficiente de *absorción capilar*, C, también se utiliza para medir indirectamente la permeabilidad de las rocas debido que la permeabilidad es proporcional a la raíz cuadrada de dicho coeficiente.

Propiedades mecánicas

La caracterización de las propiedades mecánicas se puede abordar desde el punto de vista estático y dinámico. Desde el punto de vista estático, la resistencia de las rocas se puede cuantificar por la medida de su resistencia a la rotura mediante ensayos de compresión y de tracción. Debido a los problemas experimentales que plantean los ensayos de tracción, es frecuente medir ésta resistencia a tracción de forma indirecta mediante los ensayos de flexión y brisado. Para realizar estos ensayos se necesitan prensas que sean capaces de someter a las rocas a tensiones elevadas, del orden de los MPa (o Kg/cm²).

Desde el punto de vista dinámico se pueden obtener las propiedades elásticas a partir de las velocidades de las ondas longitudinales y transversales mediante ensayos de resonancia. La medida de las velocidades de las ondas ultrasónicas se realiza con transductores especiales, los cuales están polarizados para emitir y recibir la onda transversal y la longitudinal. Además es necesario un equipo que genere y reciba los pulsos a los transductores en función

del tiempo. El ensayo de resonancia se basa en variar la frecuencia de vibración sobre la roca hasta que se encuentra su frecuencia de resonancia fundamental. A partir de ésta se obtiene las constantes elásticas (dinámicas) del material.

ENSAYO DE CAPILARIDAD AL AGUA

A. Material requerido:

- Probetas de roca, agua, recipiente, estufa, balanza, metro.

B. Procedimiento experimental:

- Limpiar y secar en la estufa las probetas.
- Medir las dimensiones de la probeta y calcular la superficie de contacto con el agua, $S(m^2)$, y el volumen de probeta, $V_{prob}(cm^3)$.
- Medir el peso en seco, $M_0(g)$.
- Colocar la probeta en interior del recipiente. La roca se tiene que apoyar sobre unos soportes muy finos para que el agua ascienda por la parte inferior de la probeta. El agua debe cubrir la probeta unos pocos milímetros. El recipiente se tapa para evitar la evaporación del agua.
- Medir de la masa de la probeta con agua, $M_P(g)$, a los 0, 3, 6, 12, 20, 30, 60 min. y 2, 5, 8, 24 y 48 horas. Esta medida se tiene que hacer de forma rápida y devolver lo antes posible la probeta al recipiente.
- Cálculo del agua absorbida, $M(g) = M_P - M_0$.
- Representación: $M(g)/S(m^2)$ vs $\sqrt{t}(s^{0.5})$.
- Cálculo del coeficiente de coeficiente de absorción capilar, C ($g/(m^2 \cdot s^{0.5})$), a partir de la pendiente de la recta:

$$\frac{M(t)}{S} = C \sqrt{t}$$

- Si la probeta está saturada completamente ($M_S(g)$), se puede calcular la porosidad accesible al agua con el método de capilaridad, $P_{AC}(\%)$:

$$P_{AC}(\%) = \frac{M_S / \rho_{H_2O}}{S} \cdot 100, \text{ donde } \rho_{H_2O} \text{ es la densidad del agua (1 g/cm}^3\text{).}$$

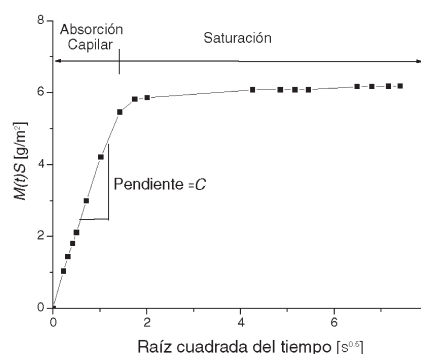


Fig. 2. Procedimiento de obtención del coeficiente de absorción capilar y porosidad abierta accesible.



Las propiedades mecánicas son parámetros petrofísicos de las rocas que condicionan la susceptibilidad de las mismas a su meteorización mecánica. Por ejemplo, está demostrado que cuanto mayor sea la resistencia a compresión o la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, mayor será la durabilidad de la roca.

La resistencia mecánica también se puede medir en el campo con el martillo de Schmidt (o esclerómetro) y el ensayo de carga puntual (o Franklin). También está muy extendida la utilización de los ultrasonidos en campo.

Otras propiedades petrofísicas

En los apartados anteriores se han presentado las propiedades petrofísicas más básicas e importantes de las rocas. Sin embargo, existen otras propiedades que, en función de la utilización de las rocas, pueden llegar a ser muy importantes. Entre ellas se pueden destacar las *propiedades térmicas*, las cuales son importantes en minería, energía geotérmica, almacenamiento de residuos nucleares, alteración de la roca por ciclos de dilatación-contracción, etc; las *propiedades eléctricas*, que son fundamentales en el campo de la prospección geofísica de depósitos metálicos, localización de petróleo y de acuíferos y posible contaminación por intrusión marina, etc; y las *propiedades magnéticas*, que son importantes para detectar yacimientos de hierro, entre otros.

Otras propiedades importantes de las rocas, en particular en rocas ornamentales, son las *estéticas*, entre las que se incluyen color y brillo. El color es una propiedad óptica que está definida por la interacción entre la luz visible y los cromóforos de los minerales que constituyen la roca. El brillo depende básicamente de la rugosidad superficial de la roca.

ENSAYOS DE DURABILIDAD

Los *ensayos de durabilidad*, tal y como se ha comentado anteriormente, tratan de reproducir de forma acelerada la alteración que sufriría un material colocado en obra y expuesto a condiciones ambientales extremas. Para la realización de los ensayos más adecuados en cada caso, es de gran importancia tener en cuenta la ubicación del material, tanto las condiciones ambientales que va a soportar, (temperatura, humedad ambiental, proximidad al mar, presencia de agua), como los aspectos relacionados con su colocación (Esbert et al. 1997).

Entre estos ensayos de durabilidad se pueden destacar: i) Ensayo de heladicidad (ciclos de hielo-deshielo). ii) Ensayo de precipitación de sales en el interior de la roca (ensayo de cristalización de sales). iii) Ensayo de humedad-sequedad. iv) Otros ensayos: atmósferas simuladas; efecto de luz UV, concentración de gases, etc.

Ensayo de heladicidad:

El objetivo de este ensayo es reproducir el efecto que sobre una roca produce la variación cíclica de

cristalización de hielo en el interior de una roca que se encuentra saturada en agua (Figura 3). Éste sería uno de los procesos de deterioro que puede sufrir un material expuesto a unas condiciones ambientales contrastadas (por ejemplo por la variación cíclica día/noche). Al igual que sucede en el caso de los ensayos de caracterización es habitual la realización de ensayos basados en procedimientos normativos. Estos procedimientos definen las condiciones del ensayo: temperatura y número de ciclos a ensayar.

La evaluación de este ensayo se puede llevar a cabo, tanto con la inspección visual de las probetas ensayadas, (pérdida de material, fisuraciones,...), como con la determinación de la pérdida de peso, o con la determinación de una propiedad hídrica y/o mecánica, con el fin de estudiar su posible variación por efecto de los ciclos de hielo-deshielo.

Ensayos de cristalización de sales

Cuando una disolución rica en sales entra en el interior del sistema poroso en un material, por ejemplo por capilaridad, partir de la misma pueden precipitar fases minerales salinas cuya cristalización genera una determinada presión. La variación cíclica de disolución/precipitación de estas sales, debidas a la variación de las condiciones de temperatura y humedad relativa, constituye uno de los procesos de deterioro más importantes en los materiales pétreos. La alteración sufrida por el material, implica tanto alteración estética (aparición de eflorescencias), como disminución de propiedades mecánicas (pérdida de cohesión de material, pérdida de masa).

Los ensayos más habituales consisten en la saturación de las muestras a ensayar en una disolución salina (habitualmente Na_2SO_4), y posterior secado. Tras un periodo de enfriamiento se completa el ciclo con la nueva inmersión de las probetas en la disolución (Figura 4).

Existen otras metodologías que reproducen de manera más real el deterioro sufrido por un material pétreo una vez colocado en obra, que se basan en el efecto que ejercen variaciones climáticas, similares a la que se pueden producir por efecto día-noche, en los movimientos de las disoluciones por capilaridad (Benavente et al., 2001).

Los criterios más utilizados para evaluar estos ensayos consisten básicamente en la inspección visual de las probetas ensayadas y la determinación de la pérdida de peso.

Ensayo de humedad-sequedad.

Este ensayo tiene como objeto conocer el efecto de los procesos relacionados con la saturación de agua y el secado de los materiales pétreos procurando simular la alternancia de los días secos y lluviosos. Las alteraciones producidas en el material se atribuyen fundamentalmente al efecto de la presión capilar, la acción disolvente del agua, hinchamiento de materiales arcillosos, etc.

El procedimiento experimental consiste básicamente en ciclos alternos de inmersión en agua y se-



ENSAYO DE DURABILIDAD 1: ENSAYO DE HELADICIDAD

A. Material necesario:

- Probetas de material pétreo; estufa; balanza; congelador

B. Procedimiento experimental

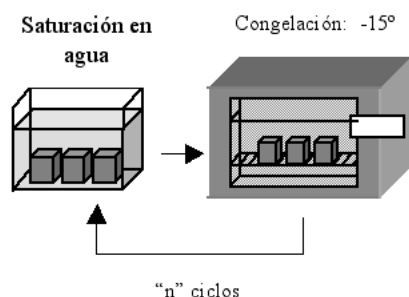
- Limpiar y secar las probetas en la estufa
- Obtener el peso seco inicial: $M_0(g)$
- Introducir en un recipiente con agua a 25 °C, para saturar las probetas.
- Una vez saturadas introducir en un congelador a -15 °C y mantener a esta temperatura durante 18 h.
- Sumergir nuevamente en agua a 25 °C y mantener 6 h. (De esta forma se completa el ciclo de hielo/deshielo).
- Tras 25 ciclos, después de la etapa de “descongelación”, secar nuevamente las probetas en la estufa para obtener el peso seco final: $M_f(g)$
- Evaluación del ensayo; determinación de la pérdida de peso (%):

$$\text{pérdida de peso (\%)} = \frac{M_0 - M_f}{M_f} \cdot 100$$

- Realizar una inspección visual de las muestras para evaluar el efecto del ensayo sobre las mismas.

(Resulta conveniente antes de iniciar el ensayo realizar una fotografía de las probetas a con el fin de comparar su aspecto con el de las mismas a la finalización del ensayo).

Esquema del ensayo de heladicidad



Obtención de datos

Referencia	P_s inicial (g)	P_s final (g)	(%) pérdida de peso	Notas (*)
1				
2				
3				
4				

(*) Como observaciones tras la realización del ensayo se puede incluir la valoración visual de cada una de las muestras ensayadas.

Se debe realizar el ensayo al menos con 4 probetas con el fin de que los datos obtenidos sean representativos del material objeto de estudio.

Fig. 3. Descripción del procedimiento para llevar a cabo un ensayo de durabilidad de ciclos de hielo/deshielo.

cado a temperatura controlada. Cada ciclo de 24 horas incluye una etapa en la que las probetas se sumergen totalmente en agua y otra etapa posterior en la que se introducen en una estufa para su secado (60-100 °C). A continuación las probetas se dejan enfriar antes de la nueva inmersión en agua para completar el ciclo y evitar choques térmicos

El número de ciclos a realizar suele ser elevado (entre 20 y 30), ya que la agresividad del ensayo no es muy alta, aunque para materiales con un contenido en minerales arcillosos superiores al 10 % un menor número de ciclos es suficiente para evaluar su comportamiento. Al finalizar los ciclos se evalúa la alteración sufrida por el material, pérdida de masa, variación de propiedad hídrica, etc.

En algunos casos puede interesar no incluir la etapa de enfriamiento, ya que de este modo se reproducen mejor las condiciones de lluvia (saturación de agua del material), secado (evaporación de esa agua) y calentamiento de la superficie del material cuando la temperatura exterior es elevada. De esta forma se

evalúa conjuntamente el efecto de la humedad-sequedad con el choque térmico sufrido por el material en esas condiciones.

Otros ensayos: atmósferas simuladas.

El objetivo de estos ensayos es evaluar el efecto que producen la exposición a luz solar, concentración de gases, presencia de aerosoles marinos, etc. Normalmente estos ensayos se realizan en cámaras climáticas diseñadas para este fin, donde además de la variación cíclica de la temperatura y la humedad se tiene la entrada de un determinado gas (como SO₂), para la simulación de una atmósfera contaminada o la exposición de las muestras a la luz UV, o bien la generación de un aerosol marino en el interior.

Para la evaluación de este tipo de ensayos al igual que en los casos anteriores se estudia las alteraciones sufridas por el material, pérdida de peso, o la variación de una propiedad característica del material ensayado.



ENSAYO DE DURABILIDAD 2: ENSAYO DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

A. Material necesario:

- Probetas de roca; estufa; balanza; Na₂SO₄

B. Procedimiento experimental

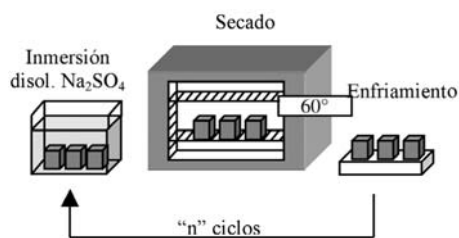
- Limpiar y secar las probetas en la estufa
- Pesarse en la balanza para obtener el peso seco inicial: $M_o(g)$
- Preparar la disolución de Na₂SO₄ al 14 % en peso.
- Introducir las probetas en un recipiente con la disolución para saturarlas.
- Secar en la estufa a 60 °C y mantener a esta temperatura durante 16 h.
- Sacar las muestras de la estufa y dejar enfriar durante aprox. 2 h antes de introducir las nuevamente en la disolución. (Esta etapa se incluye para evitar el efecto del choque térmico).
- Introducir nuevamente las probetas en la disolución y mantener 6 h. (De esta forma se completa el ciclo)
- Tras 15 ciclos, lavar cuidadosamente las probetas con agua, para eliminar todo el exceso de disolución en las mismas.
- Secar las probetas y obtener el peso seco final: $M_f(g)$
- Evaluación del ensayo: determinación de la pérdida de peso (%):

$$\text{pérdida de peso (\%)} = \frac{M_o - M_f}{M_f} \cdot 100$$

- Realizar la inspección visual de las muestras para evaluar el efecto del ensayo sobre las mismas.

(Resulta conveniente antes de iniciar el ensayo realizar una fotografía de las probetas a con el fin de comparar su aspecto con el de las mismas a la finalización del ensayo).

Esquema del ensayo de cristalización de sales



Obtención de datos

Referencia	$P_{s\text{ inicial}}$ (g)	$P_{s\text{ final}}$ (g)	(%) pérdida de peso	Notas (*)
1				
2				
3				
4				

(*) En el informe se puede incluir la valoración visual de las muestras ensayadas; alteración del aspecto externo, aparición de eflorescencias, fisuras, descamaciones, etc.

Se recomienda realizar el ensayo sobre un mínimo de 4 probetas con el fin de que los datos obtenidos sean representativos del material

En la fotografía se muestra un ejemplo del efecto producido por el ensayo de cristalización de sales sobre una roca. (Escala gráfica 1 cm)

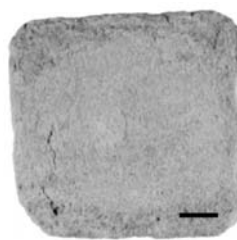


Fig. 4. Descripción del procedimiento para llevar a cabo un ensayo de durabilidad de cristalización de sales.

BILBIOGRAFÍA

Bell, F.G. (1993). Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Environmental Geology* 21, 87-200.

Benavente, D.; García del Cura, M.A.; Bernabéu, A. y Ordóñez, S. (2001). Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology* 59, 313-325.

Esbert, R. M.; Ordaz, J.; Alonso, F. J. y Montoto, M. (1997). Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales cerámicos pétreos y cerámicos. *Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona*, 139 pp. ■

