

PROPIEDADES FÍSICAS: DENSIDAD Y POROSIDAD

1. Densidad

La densidad es una propiedad elemental y fundamental de los materiales, relacionada con la naturaleza de sus constituyentes y la existencia de espacios vacíos entre ellos. La densidad (ρ) se define como la masa (M) por unidad de volumen (V), y se expresa en kg/m^3 :

$$\rho = M / V$$

Conocida la masa y el volumen de una muestra rocosa se determina de forma inmediata su densidad. En los materiales porosos tanto la masa como el volumen admiten ciertas matizaciones y, en consecuencia, se pueden establecer distintos tipos de densidad. Fundamentalmente se distingue dos: “densidad de los granos minerales” y “densidad de la roca seca”. También se consideran otros tipos de densidad, obtenidos a partir de distintos ensayos, como la “densidad de la roca húmeda” (para un determinado contenido en humedad) y la “densidad corregida” o “densidad del esqueleto” (cuando el volumen de roca no incluye los poros abiertos pero incluye los cerrados).

La **densidad de los granos minerales** (ρ_s), conocida también como *densidad real* (UNE-EN), *densidad de la fracción sólida* o *densidad verdadera* (“true density”, IUPAC), se define como la masa de material seco (M_s) por unidad de volumen de la parte sólida de la roca (V_s), es decir, el volumen después de ser excluidos sus espacios vacíos:

$$\rho_s = M_s / V_s$$

Su valor puede calcularse de forma teórica a partir de la densidad de los minerales constituyentes, siempre que se conozca con precisión la composición cuantitativa de la roca y la densidad de cada componente. Experimentalmente puede obtenerse mediante el método clásico del picnómetro (UNE-EN); en este caso su correcta determinación requiere una buena pulverización y ausencia de humedad en la muestra, y que la temperatura se mantenga constante a lo largo del ensayo. Otra técnica utilizada es el picnómetro de helio, ya que dicho gas –inerte y de número atómico muy bajo– se difunde por todo el espacio vacío, permitiendo obtener el volumen del sólido. Dicho volumen se determina a partir del descenso relativo de presión que experimenta el gas contenido en una célula, en la que eventualmente se introduce la muestra.

Determinación teórica

Dado el porcentaje de cada uno de los minerales que forman la roca (c_i) y su correspondiente densidad (ρ_i), la densidad de los granos minerales (ρ_s) se obtiene como:

$$\rho_s = \sum (c_i \times \rho_i) / 100$$

- Densidad de los principales minerales formadores de rocas (en g/cm^3):
 - cuarzo 2,65; ópalo. 2,00; ortosa 2,56 a 2,58, plagioclasa 2,63 a 2,76
 - moscovita 2,83; biotita 3,0; goethita: 4,30; limonita: 3,80
 - arcillas: illita 2,75 a 2,85, caolinita 2,60, montmorillonita 2,50
 - calcita 2,71; dolomita 2,86; ankerita: 3,00; yeso 2,32; anhidrita: 2,96

Método del picnómetro

Dada la masa de una muestra de roca pulverizada y seca (M_o), la masa del picnómetro lleno de agua destilada (P_o) y la masa del picnómetro con la muestra dentro y lleno de agua destilada (P_m), así como la densidad del agua destilada (ρ_{agua}) a la temperatura del ensayo, la densidad de los granos minerales (ρ_s) se obtiene a partir de la expresión:

$$\rho_s = (M_o \times \rho_{\text{agua}}) / (P_o + M_o - P_m)$$

La **densidad de la roca seca** (ρ_d), conocida también como *densidad aparente* (UNE-EN), *densidad de la roca en bloque* (“bulk density”, IUPAC) o *peso del volumen*, se define como la masa del material seco (M_s) por unidad de volumen total de roca (V_t), es decir, el volumen incluyendo su parte sólida (V_s) y todos sus espacios vacíos (V_v):

$$\rho_d = M_s / V_t$$

La obtención de la masa de la muestra no presenta problema –únicamente es necesario que esté seca–, por lo que los distintos métodos se diferencian en el procedimiento seguido para determinar el volumen. Un método relativamente sencillo –que puede aplicarse a materiales coherentes como las rocas utilizadas en la construcción– consiste en preparar muestras con formas geométricas (prismas, cilindros), y a partir de la medida precisa de sus dimensiones (con un calibre) se calcula el volumen. También es muy adecuado para este tipo de materiales el método de la pesada hidrostática, basado en el principio de Arquímedes (ISRM, RILEM, ASTM); para que el resultado del ensayo sea correcto debe garantizarse una buena saturación de las muestras. Otro método que puede aplicarse a rocas sin grandes poros, es por desplazamiento de mercurio, en este caso se introduce la muestra en una probeta con mercurio y su ascenso de nivel mide el volumen; como el mercurio es un líquido que no moja, no penetra en los poros y el volumen determinado es el total; se trata de un método más rápido y menos preciso.

Método de la pesada hidrostática

Permite obtener diferentes propiedades físicas a partir de la masa de una muestra de roca obtenida en diferentes condiciones: seca (M_o), saturada en agua (M_s) y sumergida en agua o hidrostática (M_h); entonces se tiene:

- Densidad de la roca seca: $\rho_d = [M_o / (M_s - M_h)] \times \rho_{\text{agua}}$
- Porosidad abierta (al agua): $n_o = [(M_s - M_o) / (M_s - M_h)] \times 100$
- Contenido en agua en saturación: $w_s = [(M_s - M_o) / M_o] \times 100$

Normalmente los distintos minerales que forman las rocas –en particular las rocas industriales– muestran diferencias de densidad pequeñas, en consecuencia la “densidad de los granos minerales” es parecida entre ellas, y la “densidad de la roca seca” depende fundamentalmente de la porosidad que posean (ver tabla). Los valores de las otras densidades previamente indicadas están comprendidos entre esos dos, siendo el valor máximo la “densidad de los granos minerales” y el mínimo la “densidad de la roca seca”. Esta última densidad es el que presenta mayor interés en el campo de los materiales de construcción.

2. Porosidad

En este caso se considera únicamente la porosidad (n) como una propiedad física, es decir como un parámetro numérico. Se define como el volumen ocupando los espacios vacíos (V_v) o volumen poroso (V_p , IUPAC) por unidad de volumen total de roca (V_t), y se expresa en porcentaje:

$$n = (V_v / V_t) \times 100$$

Igual que la densidad, la porosidad admiten ciertas matizaciones y se establecen distintos tipos, siendo los principales: la “porosidad total” y la “porosidad abierta”. De acuerdo con las características de los espacios vacíos contemplados, pueden considerarse otros tipos de porosidad: “cerrada”, “accesible” a un determinado fluido, “comunicada” o “efectiva” para un determinado comportamiento.

La porosidad **total** (n) se define como el volumen total de vacíos por unidad de volumen total de roca. En este caso deben contabilizarse todos los espacios vacíos presentes: abiertos y cerrados, accesibles y no accesibles. Su valor no puede obtenerse de forma experimental, ya que incluye entre los espacios vacíos los no comunicados con el exterior (poros no accesibles). Su determinación se realiza de forma indirecta a partir del valor de ambas densidades.

Determinación teórica

Conocida la densidad de los granos minerales (ρ_s) y la densidad de la roca seca (ρ_d), la porosidad total (n) se calcula a partir de la expresión:

$$n = ((\rho_s - \rho_d) / \rho_s) \times 100$$

La **porosidad abierta** (n_o) se conoce también como *porosidad accesible o comunicada*, y se define de la misma forma como el volumen de poros abiertos (V_a) o comunicados entre sí y con el exterior (accesibles al agua normalmente) por unidad de volumen total de roca (V_t):

$$n_o = (V_a / V_t) \times 100$$

Esta porosidad se determina normalmente mediante técnicas experimentales, basadas en introducir un fluido en los poros y cuantificar su volumen. El procedimiento más común es el método de la pesada hidrostática ya mencionado, en dicho ensayo se saturan los poros con agua –normalmente al vacío– de acuerdo con las especificaciones de la norma seguida y se obtiene la porosidad abierta “accesible al agua”. Otro método utilizado es por inyección de mercurio, en este caso se introduce mercurio a presión en los poros y a partir del volumen inyectado se determina la porosidad abierta “accesible al mercurio”. En la mayoría de las rocas los valores obtenidos en ambos ensayos son parecidos, siendo ligeramente mayor la porosidad accesible al agua, ya que el mercurio no llega a introducirse en los poros muy pequeños ($< 0,003 \mu\text{m}$), y dicho ensayo tampoco considera los poros con accesos muy grandes ($> 100 \mu\text{m}$).

La porosidad total es, por definición, el máximo valor de porosidad que presenta un material. En el caso ideal de que todos sus poros estén conectados con el exterior de la muestra, la porosidad total y la porosidad abierta coinciden. En la mayoría de las rocas la diferencia entre ambos valores es normalmente pequeña, dicha diferencia mide el

nivel de comunicación del sistema poroso. Esta porosidad presenta gran interés en la caracterización de las rocas como materiales de construcción, ya que está relacionada con su capacidad de absorber de agua y su comportamiento frente al deterioro.

La porosidad abierta es el parámetro más significativo de los materiales, y en particular de las rocas industriales, ya que condiciona su capacidad para almacenar fluidos, influyendo en sus restantes propiedades físicas, así como en su actividad química y, en última instancia, en su durabilidad y calidad. Las diferencias de porosidad entre las distintas rocas es muy notable, así las cristalinas se caracterizan por sus bajos valores (alrededor el 1 %), mientras que las detríticas presentan valores mucho más altos (alrededor del 15 %).

Normas

- IUPAC (1994). Recommendations for the characterization of porous solids. Pure & Appl. Chem. 66 (8), 1739-1758.
- UNE-EN 1936 (2007). Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total, 13 páginas.
- ISRM (1979). Suggested methods for determining: water content, porosity, density, absorption and related properties. Swelling and slake-durability index properties. Int. J. Roch Mech. and Min. Sci. 16 (2), 37-60
- RILEM (1980). Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. Matériaux et Constructions, 13 (75), 216-220.
- ASTM C-97 (1983). Standard Test Methods for Absorption and Bulk specific Gravity of Natural Building Stone, 2 páginas.