

INTRO.LA ESTÁTICA DE FLUIDOS

La estática de fluidos estudia el equilibrio de gases y líquidos. A partir de los conceptos de densidad y de presión se obtiene la ecuación fundamental de la hidrostática, de la cual el principio de Pascal y el de Arquímedes pueden considerarse consecuencias. El hecho de que los gases, a diferencia de los líquidos, puedan comprimirse hace que el estudio de ambos tipos de fluidos tengan algunas características diferentes. En la atmósfera se dan los fenómenos de presión y de empuje que pueden ser estudiados de acuerdo con los principios de la estática de gases.

Se entiende por *fluido* un estado de la materia en el que la forma de los cuerpos no es constante, sino que se adapta a la del recipiente que los contiene. La materia fluida puede ser trasvasada de un recipiente a otro, es decir, tiene la capacidad de fluir. Los líquidos y los gases corresponden a dos tipos diferentes de fluidos. Los primeros tienen un volumen constante que no puede mortificarse apreciablemente por compresión. Se dice por ello que son *fluidos incompresibles*. Los segundos no tienen un volumen propio, sino que ocupan el del recipiente que los contiene; son *fluidos compresibles* porque, a diferencia de los líquidos, sí pueden ser comprimidos.

El estudio de los fluidos en equilibrio constituye el objeto de la *estática de fluidos*, una parte de la física que comprende la *hidrostática* o estudio de los líquidos en equilibrio, y la *aerostática* o estudio de los gases en equilibrio y en particular del aire.

INTRO.LA DENSIDAD DE LOS CUERPOS

Densidad

Los cuerpos difieren por lo general en su masa y en su volumen. Estos dos atributos físicos varían de un cuerpo a otro, de modo que si consideramos cuerpos de la misma naturaleza, cuanto mayor es el volumen, mayor es la masa del cuerpo considerado. No obstante, existe algo característico del tipo de materia que compone al cuerpo en cuestión y que explica el porqué dos cuerpos de sustancias diferentes que ocupan el mismo volumen no tienen la misma masa o viceversa.

Aun cuando para cualquier sustancia la masa y el volumen son directamente proporcionales, la relación de proporcionalidad es diferente para cada sustancia. Es precisamente la constante de proporcionalidad de esa relación la que se conoce por *densidad* y se representa por la letra griega ρ

$$m = \rho \cdot V$$

es decir:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Despejando ρ de la anterior ecuación resulta:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(5.1)

ecuación que facilita la definición de ρ y también su significado físico.

La densidad ρ de una sustancia es la masa que corresponde a un volumen unidad de dicha sustancia. Su unidad

en el SI es el cociente entre la unidad de masa y la del volumen, es decir kg/m³ o kg · m⁻³.

A diferencia de la masa o el volumen, que dependen de cada objeto, su cociente depende solamente del tipo de material de que está constituido y no de la forma ni del tamaño de aquél. Se dice por ello que la densidad es una propiedad o atributo característico de cada sustancia. En los sólidos la densidad es aproximadamente constante, pero en los líquidos, y particularmente en los gases, varía con las condiciones de medida. Así en el caso de los líquidos se suele especificar la temperatura a la que se refiere el valor dado para la densidad y en el caso de los gases se ha de indicar, junto con dicho valor, la presión.

Densidad y peso específico

La densidad está relacionada con el grado de acumulación de materia (un cuerpo compacto es, por lo general, más denso que otro más disperso), pero también lo está con el peso. Así, un cuerpo pequeño que es mucho más pesado que otro más grande es también mucho más denso. Esto es debido a la relación $P = m \cdot g$ existente entre masa y peso. No obstante, para referirse al peso por unidad de volumen la física ha introducido el concepto de *peso específico* p_e que se define como el cociente entre el peso P de un cuerpo y su volumen:

$$p_e = \frac{P}{V}$$

El peso específico representa la fuerza con que la Tierra atrae a un volumen unidad de la misma sustancia considerada.

La relación entre peso específico y densidad es la misma que la existente entre peso y masa. En efecto:

$$p_e = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g \quad (5.2)$$

siendo g la aceleración de la gravedad.

La unidad del peso específico en el SI es el N/m³ o N · m⁻³.

Densidad relativa

La *densidad relativa* de una sustancia es el cociente entre su densidad y la de otra sustancia diferente que se toma como referencia o patrón:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_p} \quad (5.3)$$

Para sustancias líquidas se suele tomar como sustancia patrón el agua cuya densidad a 4 °C es igual a 1 000 kg/m³. Para gases la sustancia de referencia la constituye con frecuencia el aire que a 0 °C de temperatura y 1 atm de presión tiene una densidad de 1,293 kg/m³. Como toda magnitud relativa, que se obtiene como cociente entre dos magnitudes iguales, la densidad relativa carece de unidades físicas.

EL FUNDAMENTO DEL DENSÍMETRO

La determinación de densidades de líquidos tiene importancia no sólo en la física, sino también en el mundo del comercio y de la industria. Por el hecho de ser la densidad una propiedad característica –cada sustancia tiene una densidad diferente– su valor puede emplearse para efectuar una primera comprobación del grado de

pureza de una sustancia líquida.

El densímetro es un sencillo aparato que se basa en el principio de Arquímedes. Es, en esencia, un flotador de vidrio con un lastre de mercurio en su parte inferior

–que le hace sumergirse parcialmente en el líquido– y un extremo graduado directamente en unidades en densidad. El nivel del líquido marca sobre la escala el valor de su densidad.

En el equilibrio, el peso P del densímetro será igual al empuje E :

$$P = E$$

Si se admite, para simplificar el razonamiento, que su forma es la de un cilindro, E será igual, de acuerdo con el principio de Arquímedes, al peso del volumen V del líquido desalojado, es decir:

$$E = V \rho g = S h \rho g$$

donde h es la altura sumergida y S la superficie de la base del cilindro.

Dado que el peso del densímetro es igual a su masa m por la gravedad g , igualándolo al empuje resulta:

$$m g = S h \rho g$$

es decir:

$$\rho = \frac{m}{S} \cdot \frac{1}{h}$$

donde m y S son constantes, luego es inversamente proporcional a la altura sumergida. Midiendo alturas sumergidas pueden, por tanto, determinarse densidades.

La determinación de la pureza de la leche de vaca es una de las aplicaciones industriales del densímetro.

LA PRESIÓN

El concepto de presión

Cuando se ejerce una fuerza sobre un cuerpo deformable, los efectos que provoca dependen no sólo de su intensidad, sino también de cómo esté repartida sobre la superficie del cuerpo. Así, un golpe de martillo sobre un clavo bien afilado hace que penetre más en la pared de lo que lo haría otro clavo sin punta que recibiera el mismo impacto. Un individuo situado de puntillas sobre una capa de nieve blanda se hunde, en tanto que otro de igual peso que calce raquetas, al repartir la fuerza sobre una mayor superficie, puede caminar sin dificultad.

El cociente entre la intensidad F de la fuerza aplicada perpendicularmente sobre una superficie dada y el área S de dicha superficie se denomina *presión*:

$$p = \frac{F}{S}$$

(5.4)

La presión representa la intensidad de la fuerza que se ejerce sobre cada unidad de área de la superficie considerada. Cuanto mayor sea la fuerza que actúa sobre una superficie dada, mayor será la presión, y cuanto

menor sea la superficie para una fuerza dada, mayor será entonces la presión resultante.

La presión en los fluidos

El concepto de presión es muy general y por ello puede emplearse siempre que exista una fuerza actuando sobre una superficie. Sin embargo, su empleo resulta especialmente útil cuando el cuerpo o sistema sobre el que se ejercen las fuerzas es deformable. Los fluidos no tienen forma propia y constituyen el principal ejemplo de aquellos casos en los que es más adecuado utilizar el concepto de presión que el de fuerza.

Cuando un fluido está contenido en un recipiente, ejerce una fuerza sobre sus paredes y, por tanto, puede hablarse también de presión. Si el fluido está en equilibrio las fuerzas sobre las paredes son perpendiculares a cada porción de superficie del recipiente, ya que de no serlo existirían componentes paralelas que provocarían el desplazamiento de la masa de fluido en contra de la hipótesis de equilibrio. La orientación de la superficie determina la dirección de la fuerza de presión, por lo que el cociente de ambas, que es precisamente la presión, resulta independiente de la dirección; se trata entonces de una magnitud escalar.

Unidades de presión

En el SI la *unidad de presión* es el *pascal*, se representa por Pa y se define como la presión correspondiente a una fuerza de un newton de intensidad actuando perpendicularmente sobre una superficie plana de un metro cuadrado. 1 Pa equivale, por tanto, a 1 N/m².

Existen, no obstante, otras unidades de presión que sin corresponder a ningún sistema de unidades en particular han sido consagradas por el uso y se siguen usando en la actualidad junto con el pascal. Entre ellas se encuentran la *atmósfera* y el *bar*.

La atmósfera (atm) se define como la presión que a 0 °C ejercería el peso de una columna de mercurio de 76 cm de altura y 1 cm² de sección sobre su base.

Es posible calcular su equivalencia en N/m² sabiendo que la densidad del mercurio es igual a 13,6 · 10³ kg/m³ y recurriendo a las siguientes relaciones entre magnitudes:

$$\text{Peso (N)} = \text{masa (kg)} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Masa} = \text{volumen} \cdot \text{densidad}$$

$$\text{Presión} = \frac{\text{fuerza}}{\text{superficie}}$$

Como el volumen del cilindro que forma la columna es igual a la superficie de la base por la altura, se tendrá:

$$\begin{aligned} \text{Presión} = 1 \text{ atm} &= \frac{\text{masa} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2}{\text{superficie}} = \\ &= \frac{\text{superficie} \cdot 0,76 \text{ m} \cdot 13,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2}{\text{superficie}} \end{aligned}$$

$$\text{es decir: } 1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa.}$$

El bar es realmente un múltiple del pascal y equivale a 10⁵ N/m². En meteorología se emplea con frecuencia el *milibar* (mb) o milésima parte del bar · 1 mb = 10² Pa.

$$1 \text{ atm} = 1.013 \text{ mb}$$

LA HIDROSTÁTICA

La ecuación fundamental de la hidrostática

Todos los líquidos pesan, por ello cuando están contenidos en un recipiente las capas superiores oprimen a las inferiores, generándose una presión debida al peso. La presión en un punto determinado del líquido deberá depender entonces de la altura de la columna de líquido que tenga por encima suyo.

Considérese un punto cualquiera del líquido que diste una altura h de la superficie libre de dicho líquido. La fuerza del peso debido a una columna cilíndrica de líquido de base S situada sobre él puede expresarse en la forma

$$F_{\text{peso}} = mg = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot g \cdot h \cdot S$$

siendo V el volumen de la columna y ρ la densidad del líquido. Luego la presión debida al peso vendrá dada por:

$$p_{\text{peso}} = \frac{F}{S} = \frac{\rho \cdot h \cdot g \cdot S}{S} = \rho \cdot g \cdot h$$

La presión en un punto

La definición de la presión como cociente entre la fuerza y la superficie se refiere a una fuerza constante que actúa perpendicularmente sobre una superficie plana. En los líquidos en equilibrio las fuerzas asociadas a la presión son en cada punto perpendiculares a la superficie del recipiente, de ahí que la presión sea considerada como una magnitud escalar cociente de dos magnitudes vectoriales de igual dirección: la fuerza y el vector superficie. Dicho vector tiene por módulo el área y por dirección la perpendicular a la superficie.

Cuando la fuerza no es constante, sino que varía de un punto a otro de la superficie S considerada, tiene sentido hablar de la presión en un punto dado. Para definirla se considera un elemento de superficie DS que rodea al punto; si dicho elemento reduce enormemente su extensión, la fuerza DF que actúa sobre él puede considerarse constante. En tal caso la presión en el punto considerado se definirá en la forma matemática

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}$$

esta expresión, que es la derivada de F respecto de S , proporciona el valor de la presión en un punto y puede calcularse si se conoce la ecuación matemática que indica cómo varía la fuerza con la posición.

Si la fuerza es variable y F representa la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre la superficie S la fórmula

$$p = \frac{F}{S}$$

define, en este caso, la presión media.

Si sobre la superficie libre se ejerciera una presión exterior adicional p_0 , como la atmosférica por ejemplo, la presión total p en el punto de altura h sería:

$$p = p_0 + p_{\text{peso}} = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$$

(5.5)

Esta ecuación puede generalizarse al caso de que se trate de calcular la diferencia de presiones Δp entre dos puntos cualesquiera del interior del líquido situados a diferentes alturas, resultando:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

es decir:

$$p_2 - p_1 = \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

(5.6)

que constituye la llamada *ecuación fundamental de la hidrostática*.

Esta ecuación indica que para un líquido dado y para una presión exterior constante la presión en el interior depende únicamente de la altura. Por tanto, todos los puntos del líquido que se encuentren al mismo nivel soportan igual presión. Ello implica que ni la forma de un recipiente ni la cantidad de líquido que contiene influyen en la presión que se ejerce sobre su fondo, tan sólo la altura de líquido. Esto es lo que se conoce como *paradoja hidrostática*, cuya explicación se deduce a modo de consecuencia de la ecuación fundamental.

El principio de Pascal y sus aplicaciones

La presión aplicada en un punto de un líquido contenido en un recipiente se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del mismo.

Este enunciado, obtenido a partir de observaciones y experimentos por el físico y matemático francés Blas Pascal (1623–1662), se conoce como principio de Pascal.

El principio de Pascal puede ser interpretado como una consecuencia de la ecuación fundamental de la hidrostática y del carácter incompresible de los líquidos. En esta clase de fluidos la densidad es constante, de modo que de acuerdo con la ecuación $p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$ si se aumenta la presión en la superficie libre, por ejemplo, la presión en el fondo ha de aumentar en la misma medida, ya que $\rho \cdot g \cdot h$ no varía al no hacerlo h .

La *prensa hidráulica* constituye la aplicación fundamental del principio de Pascal y también un dispositivo que permite entender mejor su significado. Consiste, en esencia, en dos cilindros de diferente sección comunicados entre sí, y cuyo interior está completamente lleno de un líquido que puede ser agua o aceite. Dos émbolos de secciones diferentes se ajustan, respectivamente, en cada uno de los dos cilindros, de modo que estén en contacto con el líquido. Cuando sobre el émbolo de menor sección S_1 se ejerce una fuerza F_1 la presión p_1 que se origina en el líquido en contacto con él se transmite íntegramente y de forma instantánea a todo el resto del líquido; por tanto, será igual a la presión p_2 que ejerce el líquido sobre el émbolo de mayor sección S_2 , es decir:

$$p_1 = p_2$$

con lo que:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

y por tanto:

$$F_2 = \frac{S_2}{S_1} \cdot F_1$$

Si la sección S_2 es veinte veces mayor que la S_1 , la fuerza F_1 aplicada sobre el émbolo pequeño se ve multiplicada por veinte en el émbolo grande.

La prensa hidráulica es una máquina simple semejante a la palanca de Arquímedes, que permite amplificar la intensidad de las fuerzas y constituye el fundamento de elevadores, prensas, frenos y muchos otros dispositivos hidráulicos de maquinaria industrial.

El principio de los vasos comunicantes

Si se tienen dos recipientes comunicados y se vierte un líquido en uno de ellos en éste se distribuirá entre ambos de tal modo que, independientemente de sus capacidades, el nivel de líquido en uno y otro recipiente sea el mismo. Éste es el llamado principio de los vasos comunicantes, que es una consecuencia de la ecuación fundamental de la hidrostática.

Si se toman dos puntos A y B situados en el mismo nivel, sus presiones hidrostáticas han de ser las mismas, es decir:

$$p_A = p_0 + \rho g h_A$$

$$p_B = p_0 + \rho g h_B$$

luego si $p_A = p_B$ necesariamente las alturas h_A y h_B de las respectivas superficies libres han de ser idénticas $h_A = h_B$.

Si se emplean dos líquidos de diferentes densidades y no miscibles, entonces las alturas serán inversamente proporcionales a las respectivas densidades. En efecto, si $p_A = p_B$, se tendrá:

$$\rho_A \cdot g \cdot h_A = \rho_B \cdot g \cdot h_B$$

$$\frac{h_A}{h_B} = \frac{\rho_B}{\rho_A}$$

(5.7)

Esta ecuación permite, a partir de la medida de las alturas, la determinación experimental de la densidad relativa de un líquido respecto de otro y constituye, por tanto, un modo de medir densidades de líquidos no miscibles si la de uno de ellos es conocida.

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA HIDROSTÁTICA

Un submarinista se sumerge en el mar hasta alcanzar una profundidad de 100 m. Determinar la presión a la que está sometido y calcular en cuántas veces supera a la que experimentaría en el exterior, sabiendo que la densidad del agua del mar es de $1\,025 \text{ kg/m}^3$.

De acuerdo con la ecuación fundamental de la hidrostática:

$$p = p_0 + \rho g h$$

Considerando que la presión p_0 en el exterior es de una atmósfera ($1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), al sustituir los datos en la anterior ecuación resulta:

$$p = 1,013 \cdot 10^5 + 1025 \cdot 9,8 \cdot 100 = 11,058 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

El número de veces que p es superior a la presión exterior p_0 se obtiene hallando el cociente entre ambas:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{11,058 \cdot 10^5}{1,053 \cdot 10^5} = 10,5 \text{ veces}$$

APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE PASCAL

El elevador hidráulico de un garaje funciona mediante una prensa hidráulica conectada a una toma de agua de la red urbana que llega a la máquina con una presión de $5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Si el radio del émbolo es de 20 cm y el rendimiento es de un 90 %, determinar cuál es el valor en toneladas de la carga que como máximo puede levantar el elevador.

De acuerdo con el principio de Pascal:

$$p_1 = p_2$$

que para una prensa hidráulica se transforma en:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

En este caso el dato que correspondería al émbolo pequeño de la prensa se facilita en forma de presión, de modo que combinando las ecuaciones anteriores se tiene:

$$p_1 = \frac{F_2}{S_2}$$

ó

$$F_2 = p_1 \cdot S_2$$

$$\text{Dado que } S_2 = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 0,2^2 = 0,126 \text{ m}^2$$

$$F_2 = 5 \cdot 10^5 \cdot 0,126 = 6,3 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Como el rendimiento es del 90 % el valor efectivo de la carga máxima expresado en newtons será:

$$F_{\max} = 0,9 \cdot 6,3 \cdot 10^4 = 5,67 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Una tonelada métrica equivale al peso de un cuerpo de 1 000 kg de masa, es decir:

$$1 \text{ t} = 1000 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 9,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

luego:

$$F_{\max}(\text{t}) = \frac{5,67 \cdot 10^4}{9,8 \cdot 10^3} \cong 5,8 \text{ t}$$

EQUILIBRIO DE SÓLIDOS EN EL ...

Empuje hidrostático: principio de Arquímedes

Los cuerpos sólidos sumergidos en un líquido experimentan un *empuje* hacia arriba. Este fenómeno, que es el fundamento de la flotación de los barcos, era conocido desde la más remota antigüedad, pero fue el griego Arquímedes (287–212 a. de C.) quien indicó cuál es la magnitud de dicho empuje. De acuerdo con el principio que lleva su nombre, todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un líquido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del volumen de líquido desalojado.

Aun cuando para llegar a esta conclusión Arquímedes se apoyó en la medida y experimentación, su famoso principio puede ser obtenido como una consecuencia de la ecuación fundamental de la hidrostática. Considérese un cuerpo en forma de paralelepípedo, las longitudes de cuyas aristas valen a , b y c metros, siendo c la correspondiente a la arista vertical. Dado que las fuerzas laterales se compensan mutuamente, sólo se considerarán las fuerzas sobre las caras horizontales.

La fuerza F_1 sobre la cara superior estará dirigida hacia abajo y de acuerdo con la ecuación fundamental de la hidrostática (ec. 5.5) su magnitud se podrá escribir como

$$F_1 = p_1 \cdot S_1 = (p_0 + \rho g h_1) S_1$$

siendo S_1 la superficie de la cara superior y h_1 su altura respecto de la superficie libre del líquido.

La fuerza F_2 sobre la cara inferior estará dirigida hacia arriba y, como en el caso anterior, su magnitud vendrá dada por:

$$F_2 = p_2 \cdot S_2 = (p_0 + \rho g h_2) S_2$$

La resultante de ambas representará la fuerza de empuje hidrostático E .

$$E = F_2 - F_1 = (p_0 + \rho g h_1) S_1 - (p_0 + \rho g h_2) S_2$$

pero, dado que $S_1 = S_2 = S$ y $h_2 = h_1 + c$, resulta:

$$E = \rho g c S = \rho g V = m g$$

(5.8)

que es precisamente el valor del empuje predicho por Arquímedes en su principio, ya que $V = c \cdot S$ es el volumen del cuerpo, ρ la densidad del líquido, $m = \rho \cdot V$ la masa del líquido desalojado y finalmente $m \cdot g$ es el peso de un volumen de líquido igual al del cuerpo sumergido.

Equilibrio de los cuerpos sumergidos

De acuerdo con el principio de Arquímedes, para que un cuerpo sumergido en un líquido esté en equilibrio, la fuerza de empuje E y el peso P han de ser iguales en magnitudes y, además, han de aplicarse en el mismo punto. En tal caso la fuerza resultante R es cero y también lo es el momento M , con lo cual se dan las dos condiciones de equilibrio. La condición $E = P$ equivale de hecho a que las densidades del cuerpo y del líquido sean iguales. En tal caso el *equilibrio* del cuerpo sumergido *es indiferente*.

Si el cuerpo no es homogéneo, el centro de gravedad no coincide con el centro geométrico, que es el punto en donde puede considerarse aplicada la fuerza de empuje. Ello significa que las fuerzas E y P forman un par que hará girar el cuerpo hasta que ambas estén alineadas.

Equilibrio de los cuerpos flotantes

Si un cuerpo sumergido sale a flote es porque el empuje predomina sobre el peso ($E > P$). En el equilibrio ambas fuerzas aplicadas sobre puntos diferentes estarán alineadas; tal es el caso de las embarcaciones en aguas tranquilas, por ejemplo. Si por efecto de una fuerza lateral, como la producida por un golpe de mar, el eje vertical del navío se inclinara hacia un lado, aparecerá un par de fuerzas que harán oscilar el barco de un lado a otro. Cuanto mayor sea el momento M del par, mayor será la estabilidad del navío, es decir, la capacidad para recuperar la verticalidad. Ello se consigue diseñando convenientemente el casco y repartiendo la carga de modo que rebaje la posición del centro de gravedad, con lo que se consigue aumentar el brazo del par.

LA ESTÁTICA DE LOS GASES

La aerostática frente a la hidrostática

Desde un punto de vista mecánico, la diferencia fundamental entre líquidos y gases consiste en que estos últimos pueden ser comprimidos. Su volumen, por tanto, no es constante y consiguientemente tampoco lo es su densidad. Teniendo en cuenta el papel fundamental de esta magnitud física en la estática de fluidos, se comprende que el equilibrio de los gases haya de considerarse separadamente del de los líquidos.

Así, la ecuación fundamental de la hidrostática no puede ser aplicada a la aerostática. El principio de Pascal, en el caso de los gases, no permite la construcción de prensas hidráulicas. El principio de Arquímedes conserva su validez para los gases y es el responsable del empuje aerostático, fundamento de la elevación de los globos y aeróstatos. Sin embargo, y debido a la menor densidad de los gases, en iguales condiciones de volumen del cuerpo sumergido, el empuje aerostático es considerablemente menor que el hidrostático.

La compresibilidad de los gases. Ley de Boyle.

El volumen del gas contenido en un recipiente se reduce si se aumenta la presión. Esta propiedad que presentan los gases de poder ser comprimidos se conoce como *compresibilidad* y fue estudiada por el físico inglés *Robert Boyle* (1627–1691).

Si se dispone de un cilindro con un émbolo móvil que puede modificar el volumen de aquél y se introduce un gas en su interior, el volumen ocupado por el gas variará con la presión del émbolo de tal modo que su producto se mantiene constante si la temperatura es constante durante el experimento. Es decir:

$$p \cdot V = \text{cte} \\ (5.9)$$

Ello significa que a *temperatura constante* la presión y el volumen de un gas son magnitudes inversamente proporcionales

$$p = \frac{\text{cte}}{V}$$

y por tanto la representación gráfica de p frente a V corresponde a una hipérbola equilátera.

Este resultado se conoce como *ley de Boyle* y describe de forma aproximada el comportamiento de un gas en un amplio rango de presiones y volúmenes. No obstante, a temperaturas elevadas o a presiones elevadas, para las cuales el gas se aproxima bastante al estado líquido, la ley de Boyle deja de cumplirse con una precisión razonable.

La presión atmosférica

Del mismo modo que existe una presión hidrostática en los líquidos asociada al peso de unas capas de líquido sobre otras, las grandes masas gaseosas pueden dar lugar a presiones considerables debidas a su propio peso. Tal es el caso de la atmósfera. La presión del aire sobre los objetos contenidos en su seno se denomina *presión atmosférica*.

La ley de variación de la presión atmosférica con la altura es mucho más complicada que la descrita por la ecuación fundamental de la hidrostática $p = p_0 + \rho g h$. Al tratarse de un fluido compresible, la densidad no es constante, sino que varía con la presión; pero además, para variaciones importantes de la altura el valor de g tampoco se mantiene constante. Esta dependencia mutua de las variables que aparecen en la anterior ecuación hace que el cálculo preciso de la presión atmosférica en un punto determinado sea una tarea compleja que proporciona tan sólo resultados aproximados.

La primera comprobación experimental de la existencia de una presión asociada al aire fue efectuada por Evangelista Torricelli (1608–1647). El *experimento de Torricelli* consistió en llenar de mercurio un tubo de vidrio de más de un metro de largo, cerrarlo provisionalmente e invertirlo sumergiéndolo en una gran cubeta con mercurio. Cuando abrió el extremo del tubo sumergido observó que éste sólo se vaciaba en parte, quedando en su interior una columna de mercurio de unos setenta y seis centímetros.

Este resultado fue interpretado como una prueba de que la presión del peso del aire actuando sobre la superficie libre del mercurio de la cubeta era capaz de soportar el peso de la columna. En el espacio restante del tubo se había producido el primer vacío de la historia de la física que se conoce como *vacío de Torricelli*. La presión correspondiente a una columna de mercurio de 760 mm de altura define, precisamente, la *atmósfera* (atm) como unidad de presión.

Además de con la altura, la presión atmosférica varía con la temperatura y con la humedad y, en general, con el estado del tiempo, por lo que constituye una magnitud decisiva en el análisis y en la predicción meteorológicos. Las primeras variaciones de la presión atmosférica de un día a otro fueron observadas por el propio Torricelli con su dispositivo, que fue precursor de los actuales barómetros.

Manómetros y barómetros

Un manómetro es un aparato que sirve para medir la presión de los gases contenidos en recipientes cerrados. Existen, básicamente, dos tipos de manómetros: los de líquidos y los metálicos.

Los manómetros de líquidos emplean, por lo general, mercurio que llena un tubo en forma de J. El tubo puede estar o abierto por ambas ramas o abierto por una sola. En ambos casos la presión se mide conectando al recipiente que contiene el gas el tubo por su rama inferior y abierta y determinando el desnivel h de la columna de mercurio entre ambas ramas. Si el manómetro es de tubo abierto entonces es necesario tomar en cuenta la presión atmosférica p_0 en la ecuación $p = p_0 \pm \rho g h$. Si es de tubo cerrado, la presión vendrá dada directamente por $p = \rho g h$. Los manómetros de este segundo tipo permiten, por sus características, la medida de presiones elevadas.

En los manómetros metálicos la presión del gas da lugar a deformaciones en una cavidad o tubo metálico. Estas deformaciones se transmiten a través de un sistema mecánico a una aguja que marca directamente la presión del gas sobre una escala graduada.

El *barómetro* es el aparato con el que se mide la presión atmosférica. Como en el caso de los manómetros, los hay también de mercurio y metálicos. Los primeros se basan en el dispositivo utilizado por Torricelli en sus experimentos. El llamado *barómetro de fortín* es, de hecho, una reproducción mejorada del aparato de Torricelli. Su cubeta posee un fondo compuesto de un material flexible, por lo que puede ser alterado mediante un tornillo auxiliar con el fin de conseguir ajustar el nivel del mercurio de la cubeta al cero de la escala graduada cada vez que se efectúa una medida. Los *barómetros de sifón* son simples manómetros de

tubo cerrado en los cuales la rama corta del tubo en J hace las veces de cubeta y la rama larga de tubo de Torricelli.

Los *barómetros metálicos o aneroides* constan de una caja metálica de paredes relativamente elásticas, en cuyo interior se ha efectuado el vacío. Un resorte metálico hace que las paredes de la caja estén separadas. En su ausencia dichas paredes tenderían a aproximarse por efecto de la presión exterior. Por igual procedimiento variaciones en la presión atmosférica producen cambios en la forma de la caja que se transmiten al resorte y éste los indica, a través de un mecanismo de amplificación, sobre una escala graduada en unidades de presión. Los barómetros metálicos pueden mortificarse de forma que sus resultados queden registrados en un papel. De este modo se puede disponer de información sobre cómo varía la presión atmosférica con el tiempo.

APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Un globo de goma tiene 8 g de masa cuando está vacío. Para conseguir que se eleve se infla con gas ciudad. Sabiendo que la densidad del aire es de 1,29 kg/m³ y la del gas ciudad 0,53 kg/m³ determinar el volumen que, como mínimo, ha de alcanzar el globo para que comience a elevarse.

Para que el globo inicie el ascenso, la fuerza del empuje ha de ser superior a la del peso:

$$E > P$$

En virtud del principio de Arquímedes:

$$E = V \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot g$$

ya que en este caso el fluido desalojado es el aire.

Por otra parte, el peso P será la suma del peso del globo más el peso del gas ciudad que corresponde al volumen V , es decir:

$$P = 8 \cdot 10^{-3} \cdot g + V \cdot \rho_{\text{gas}} \cdot g$$

Por tanto:

$$V \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot g > 8 \cdot 10^{-3} \cdot g + V \cdot \rho_{\text{gas}} \cdot g$$

es decir:

$$V(\rho_{\text{aire}} - \rho_{\text{gas}}) > 8 \cdot 10^{-3}$$

$$V > \frac{8 \cdot 10^{-3}}{(\rho_{\text{aire}} - \rho_{\text{gas}})} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{(1,29 - 0,53) \text{ kg/m}^3} =$$

$$= 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

El volumen mínimo será, por tanto, de 10,5 litros.