

Capítulo 1

Propiedades de los fluidos y definiciones

Contenido

1.1	Introducción.....	3
1.2	Sólidos, líquidos y gases.....	3
1.3	El medio continuo.....	4
1.4	Densidad, volumen específico, peso específico y gravedad específica.....	5
1.5	Viscosidad.....	7
	1.5.1 Fluidos newtonianos.....	8
	1.5.2 Fluidos no newtonianos.....	9
1.6	Fluidos compresibles e incompresibles.....	10
1.7	Compresibilidad de los líquidos.....	11
1.8	Ecuaciones de estado para gases.....	12
1.9	Compresibilidad de los gases.....	14
1.10	Tensión superficial y capilaridad.....	14
1.11	Presión de vapor.....	18
1.12	Bibliografía.....	19

1.1 Introducción

Cualquier característica de un sistema se conoce como **propiedad**. Algunas propiedades conocidas son la presión P , la temperatura T , el volumen V y la masa m . La lista se puede extender hasta incluir unas menos conocidas como viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica e , inclusive, la velocidad y la elevación.

Se considera que las propiedades son *intensivas* o *extensivas*. Las **propiedades intensivas** son independientes de la masa de un sistema, como la temperatura, la presión y la densidad. Las **propiedades extensivas** son aquellas cuyos valores dependen del tamaño, o extensión, del sistema. La masa total, el volumen total V , y la cantidad total de movimiento son ejemplos de propiedades extensivas.

En general, se usan letras mayúsculas para denotar las propiedades extensivas (la masa m es una excepción importante) y minúsculas para las propiedades intensivas (las excepciones obvias son la presión P y la temperatura T).

Las propiedades extensivas por unidad de masa se llaman **propiedades específicas**. Algunos ejemplos de propiedades específicas son el volumen específico ($v = V/m$) y la energía total específica ($e = E/m$).

El estado de un sistema se describe por sus propiedades. Pero, con base en la experiencia, se conoce que no es necesario especificar todas las propiedades para identificar un estado. Después que se especifican los valores de una cantidad suficiente de propiedades, el resto de éstas toman ciertos valores. Es decir, la especificación de un número de propiedades es suficiente para identificar un estado. El número de propiedades necesario para identificar el estado de un sistema se expresa por medio del **postulado del estado**: *El estado de un sistema compresible simple queda por completo especificado por dos propiedades intensivas independientes.*

Dos propiedades son independientes si se pueden hacer variar una de ellas mientras que la otra permanece constante. No todas las propiedades son independientes y algunas se definen en términos de otras, como se explica en la Sección 1.4.

1.2 Sólidos, líquidos y gases

La materia puede existir en tres formas físicas o fases diferentes: **sólida, líquida y gaseosa**. Algunas veces se añade una cuarta fase llamada **plasma**. Un plasma es un gas con una porción significativa de sus moléculas o átomos cargada eléctricamente; sin embargo, mucho del comportamiento de un plasma es como el de un gas.

Desde el punto de vista de la Mecánica de Fluidos, la materia sólo puede presentarse en dos estados: **sólido y fluido**, quedando dentro de este último los líquidos y los

Capítulo 1

gases. La diferencia entre los sólidos y los fluidos radica en la reacción de ambos a un esfuerzo tangencial o cortante. Un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática, un fluido no. Cualquier esfuerzo cortante aplicado a un fluido, por muy pequeño que sea, provocará el movimiento del fluido. Éste se mueve y se deforma continuamente mientras se siga aplicando el esfuerzo.

Diferencia entre un gas y un líquido.

Como se mencionó anteriormente, un fluido puede ser gas o líquido. Las moléculas de un gas están mucho más alejadas que en un líquido, de aquí que el gas es muy compresible y cuando se elimina toda presión externa, éste tiende a expandirse indefinidamente. Un gas está por lo tanto en equilibrio solamente cuando está completamente encerrado. Un líquido es relativamente incompresible y si se elimina toda la presión, excepto su propia presión de vapor, la cohesión entre las moléculas lo mantiene unido, de manera que un líquido no se expande indefinidamente. Por lo tanto, un líquido puede tener una superficie libre.

Un vapor es un gas cuya temperatura y presión son tales que éste se encuentra muy cerca de su fase líquida. Un gas se puede definir como un vapor altamente sobrecalentado; esto es, su estado está bastante alejado de su fase líquida.

1.3 El medio continuo

Todas las sustancias se componen de un número extremadamente grande de partículas discretas denominadas moléculas. En una sustancia pura como el agua, todas las moléculas son idénticas; otras sustancias, como el aire, son mezclas de diferentes tipos de moléculas. Las moléculas interactúan entre sí a través de colisiones y fuerzas intermoleculares. La fase de una muestra de materia –sólido, líquido o gas– es una consecuencia del espaciamiento y fuerzas intermoleculares. Las moléculas de un sólido se encuentran relativamente cerca (el espaciamiento es del orden de un diámetro molecular) y ejercen fuerzas intermoleculares grandes; las moléculas de un gas están muy alejadas (el espaciamiento es de un orden de magnitud mayor que el diámetro molecular) y ejercen fuerzas intermoleculares relativamente débiles. Como éstas son débiles, un gas cambia fácilmente tanto de forma como de volumen. Como las fuerzas intermoleculares en un sólido son más fuertes, esto causa que mantengan tanto su volumen como su forma. En un líquido, las fuerzas intermoleculares son lo suficientemente fuertes para conservar el volumen pero no la forma.

En principio podría ser posible describir una muestra de fluido en términos de la dinámica de sus moléculas individuales; esto en la práctica es imposible, en virtud de la gran cantidad de moléculas que lo componen. Para la mayoría de los casos de interés práctico, es posible ignorar la naturaleza molecular de la materia y suponerla homogénea y continua; es decir, un **medio continuo**. El modelo del medio continuo supone que la estructura molecular es tan pequeña en relación con las dimensiones consideradas en problemas de interés práctico, que se puede ignorar.

Cuando se emplea el modelo del continuo, un fluido se describe en función de sus *propiedades*, las cuales representan características promedio de su estructura molecular. Por ejemplo, se emplea la masa por unidad de volumen o *densidad* en lugar del número de moléculas y la masa molecular. Si la materia fuera realmente un continuo, las propiedades serían funciones continuas del tiempo y el espacio. La velocidad de un fluido en movimiento se define como la velocidad del centro de masa del conjunto de moléculas cercanas a un determinado punto. Como las propiedades de los fluidos y la velocidad son funciones continuas, se puede emplear el cálculo para analizar un continuo en vez de aplicar matemáticas discretas a cada molécula.

Para que el modelo del continuo sea válido, la muestra más pequeña de materia de interés práctico debe contener un número elevado de moléculas, de tal manera que se puedan calcular promedios que tengan significado. Para tener cierta idea de las distancias que intervienen en el nivel molecular, considérese un recipiente lleno con oxígeno a las condiciones atmosféricas. El diámetro de la molécula de oxígeno es aproximadamente de 3×10^{-10} m y su masa es de $5,3 \times 10^{-26}$ kg. Asimismo, la *trayectoria libre media* de la molécula de oxígeno a la presión de 1 atm y a 20°C es $6,3 \times 10^{-8}$ m. Es decir, una molécula de oxígeno recorre, en promedio, una distancia de $6,3 \times 10^{-8}$ m (alrededor de 200 veces su diámetro) antes de chocar contra otra.

También, se tiene alrededor de $2,5 \times 10^{16}$ moléculas de oxígeno en el diminuto volumen de 1 mm^3 a la presión de 1 atm y a 20°C. El modelo del medio continuo es aplicable en tanto la longitud característica del sistema (como su diámetro) sea mucho mayor que la trayectoria libre media de las moléculas. A vacíos muy altos o a elevaciones muy grandes, la trayectoria libre media puede volverse grande (por ejemplo, es de alrededor de 0,1 m para el aire atmosférico a una elevación de 100 km). Para estos casos, debe aplicarse la **teoría del flujo de gas rarificado** y se debe considerar el impacto de las moléculas por separado. En este curso se limitará la consideración a las sustancias que se pueden modelar como un medio continuo.

1.4 Densidad, volumen específico, peso específico y gravedad específica

La **densidad** (ρ) de un fluido es su masa por unidad de volumen. La densidad tiene un valor en cada punto dentro de un continuo y puede variar de un punto a otro. Supóngase que se escoge un volumen arbitrario ΔV en un fluido. Sea Δm la masa del fluido contenida en dicho volumen. La densidad promedio ($\bar{\rho}$) es

$$\bar{\rho} \equiv \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

Esta densidad promedio podría depender del tamaño y localización del volumen elegido.

Capítulo 1

Considérese, por ejemplo, un vaso de agua lleno hasta la mitad. Si el volumen elegido coincide exactamente con el volumen de agua en la mitad inferior del vaso, se obtendría un valor de aproximadamente 1000 kg/m^3 ($62,4 \text{ lbm/pe}^3$) para la densidad promedio; sin embargo, si el volumen elegido hubiera sido todo el vaso, la densidad promedio habría sido tan sólo la mitad, ya que la mitad superior del vaso no contiene agua. Una definición exacta de densidad debe implicar un límite. La inclinación natural sería tomar el límite de $\bar{\rho}$ a medida que ΔV tiende a cero; si se hace así, ΔV se hará tan pequeño que la estructura molecular del fluido se volvería aparente y la densidad variaría como se ilustra en la Figura 1.1. La irregularidad que se observa con valores muy pequeños de ΔV se debe a la estructura molecular. A medida que ΔV se hace más grande, la densidad varía de forma continua, ya que se incluye un gran número de moléculas en ΔV . El volumen más pequeño (δV) para el cual la variación de la densidad es uniforme es el límite de la hipótesis del medio continuo. Entonces la densidad de un fluido se puede definir como

$$\rho \equiv \lim_{\Delta V \rightarrow \delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

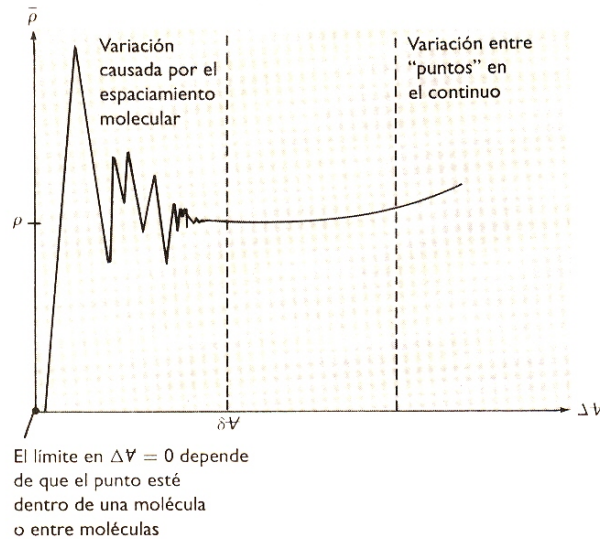


Figura 1.1 Dependencia de la densidad (promedio) respecto al volumen de muestra para volúmenes pequeños.

El volumen pequeño (δV) representa el tamaño de un “punto” típico en el medio continuo. Para fluidos a presiones y temperaturas cercanas a las atmosféricas, (δV) es del orden de 10^{-9} mm^3 . Todas las propiedades de los fluidos se interpretan como representación promedio de la estructura molecular del fluido en este pequeño volumen.

Propiedades de los fluidos y definiciones

La densidad de los fluidos varía ampliamente entre ellos. En condiciones atmosféricas, la densidad del aire es de aproximadamente $1,22 \text{ kg/m}^3$ ($0,076 \text{ lbm/pie}^3$), la del agua es aproximadamente $1\,000 \text{ kg/m}^3$ ($62,4 \text{ lbm/pie}^3$) y la del mercurio es de $13\,500 \text{ kg/m}^3$ (846 lbm/pie^3). Para un fluido concreto la densidad varía con la temperatura y la presión. Esta variación es bastante fuerte para los gases pero relativamente débil en los líquidos. Si la variación de la densidad se pudiera despreciar, se diría que el fluido es *incompresible*.

Otras propiedades de los fluidos están directamente relacionadas con la densidad. El **volumen específico** (v) es el volumen ocupado por una unidad de masa del fluido. Éste se aplica comúnmente en gases y se expresa generalmente en m^3/kg (pie^3/slug). El volumen específico es el recíproco de la densidad, esto es

$$v \equiv \frac{1}{\rho} \quad (1.3)$$

El **peso específico** (γ) es el peso del fluido por unidad de volumen, esto es

$$\gamma \equiv \rho g \quad (1.4)$$

Donde g es la aceleración local debida a la fuerza de gravedad.

La **gravedad específica** (s), o **densidad relativa**, de un fluido es la relación de su densidad con la de un fluido de referencia. La ecuación que la define es

$$s \equiv \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (1.5)$$

Para los líquidos, el fluido de referencia es el agua pura a 4°C y $101,33 \text{ Pa}$, $\rho_{ref} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ($62,4 \text{ lbm/pie}^3$ o $1,94 \text{ slug/pie}^3$). La gravedad específica de un gas es la relación de su densidad con la del hidrógeno o la del aire a alguna presión y temperatura especificadas, pero no hay un acuerdo general sobre estos estándares y éstos deberán establecerse para cualquier caso dado.

Ya que la densidad de un fluido varía con la temperatura, las gravedades específicas deberán determinarse y especificarse a temperaturas particulares.

1.5 Viscosidad

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a una deformación angular o esfuerzo cortante. Las fuerzas de fricción en el flujo de un fluido resultan de la cohesión y el intercambio de cantidad de movimiento entre las moléculas en el fluido.

Capítulo 1

Cuando la temperatura se incrementa, la viscosidad de todos los líquidos disminuye, mientras que la de los gases aumenta. Esto se debe a que la fuerza de cohesión, la cual disminuye con la temperatura, predomina en los líquidos, mientras que el factor dominante en los gases es el intercambio de moléculas entre las capas de velocidades diferentes. Así una molécula moviéndose rápidamente hacia una capa que se mueve más lentamente, provoca que la velocidad de esta última se incremente. Y una molécula que se mueve lentamente entrando a una capa moviéndose más rápidamente, provoca que ésta disminuya su velocidad. Este intercambio molecular causa un esfuerzo cortante o produce una fuerza de fricción entre capas adyacentes. El incremento de la actividad molecular a temperaturas altas causa que la viscosidad de los gases se incremente con la temperatura.

1.5.1 Fluidos newtonianos

Cuando un fluido es sometido a un esfuerzo cortante, comienza a moverse con una velocidad de deformación inversamente proporcional a una propiedad llamada coeficiente de viscosidad (μ). En la Figura 1.2 se muestra una partícula de fluido sometida a un esfuerzo cortante (τ) en un plano. El ángulo $\delta\theta$ de la deformación aumentará continuamente con el tiempo mientras siga actuando el esfuerzo τ , moviéndose la superficie superior con una velocidad δu mayor que la de la inferior. Los fluidos comunes como el agua, el aceite y el aire, presentan una variación lineal entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación resultante; esto es,

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad (1.6)$$

De la geometría de la Figura 1.2a, se tiene que

$$\tan \delta\theta = \frac{\delta u \delta t}{\delta y} \quad (1.7)$$

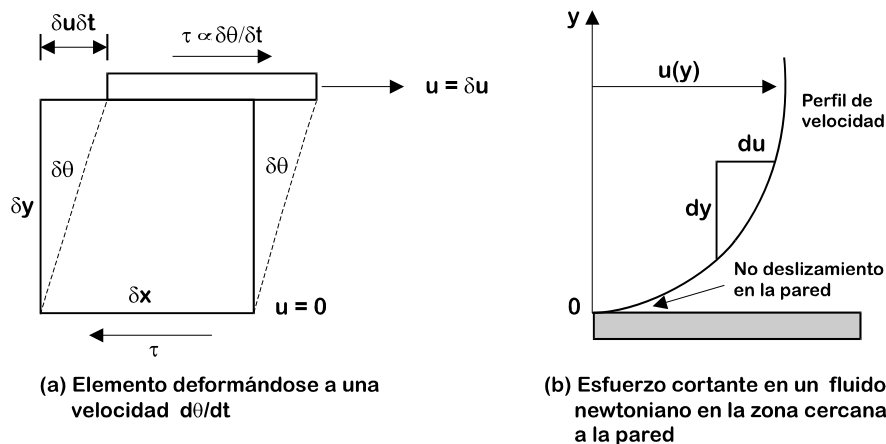


Figura 1.2 Deformación continua en el fluido debida a un esfuerzo cortante.

Propiedades de los fluidos y definiciones

En el caso límite de variaciones infinitesimales, queda una relación entre la velocidad de deformación y el gradiente de la velocidad,

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1.8)$$

Comparando la Ec.(1.8) con la Ec.(1.6), se encuentra que el esfuerzo aplicado también es proporcional al gradiente de la velocidad para fluidos comunes. La constante de proporcionalidad es la **viscosidad absoluta** (o **dinámica**) μ ,

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.9)$$

Los fluidos que obedecen a la Ec.(1.9) se denominan **fluidos newtonianos**. En el SI, la viscosidad μ tiene unidades de kg/m.s (slug/pie.s en el sistema inglés).

Como se verá más adelante, el parámetro primario que determina el comportamiento, viscoso o no, de los fluidos newtonianos es el número adimensional de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (1.10)$$

donde u y L representan la velocidad y longitud características del flujo. Como ρ y μ entran como cociente en este parámetro, dicho cociente tiene significado propio y se denomina **viscosidad cinemática**,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.11)$$

La viscosidad cinemática ν , tiene unidades de metros al cuadrado por segundo (m^2/s) o pies al cuadrado por segundo (pie^2/s).

1.5.2 Fluidos no newtonianos

Los fluidos que no siguen la ley lineal de la Ec.(1.9) se denominan **no newtonianos**. La Figura 1.3a compara cuatro ejemplos de estos fluidos con uno newtoniano. Un **fluido dilatante** es aquel en que la resistencia a la deformación aumenta al aumentar el esfuerzo cortante. Por el contrario, un **fluido pseudoplástico** es el que disminuye su resistencia al aumentar el esfuerzo. Si este efecto es muy importante, como el caso marcado en la figura con línea discontinua, el fluido se denomina **plástico**. El caso límite de sustancia plástica es aquel que requiere un esfuerzo finito (límite de fluencia) antes de que fluya. La idealización del **fluido plástico de Bingham** se muestra en la figura; pero el comportamiento en la fluencia puede ser también no lineal.

Capítulo 1

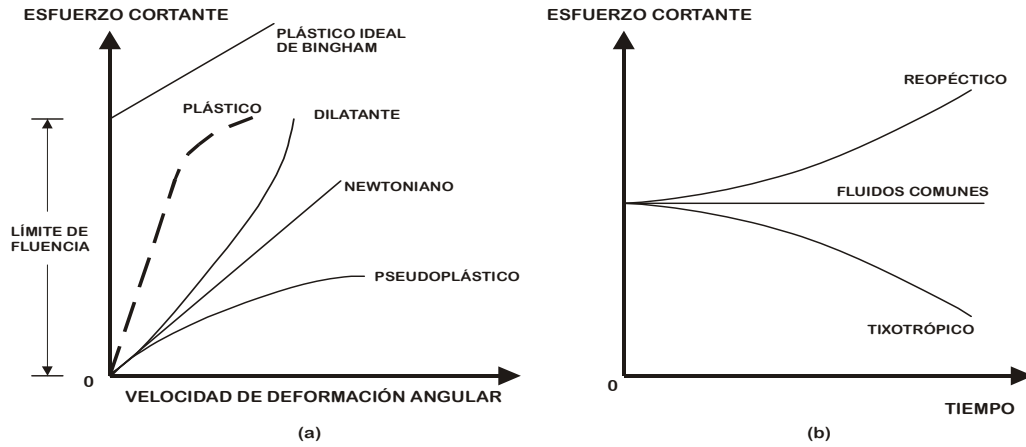


Figura 1.3 Comportamiento reológico de diversos materiales (a) Esfuerzo en función de la velocidad de deformación; (b) Efecto del tiempo sobre los esfuerzos aplicados.

Una complicación adicional al comportamiento no newtoniano es el efecto transitorio que se muestra en la Figura 1.3b. Algunos fluidos precisan un aumento gradual en el esfuerzo cortante para mantener constante la velocidad de deformación; a éstos se les denomina **reopécticos**. El caso opuesto es el de un fluido que requiere esfuerzos decrecientes; es el denominado **tixotrópico**.

1.6 Fluidos compresibles e incompresibles

Considerando varios tipos de fluidos bajo condiciones estáticas, se encuentra que ciertos fluidos sufren cambios muy pequeños en la densidad a pesar de la existencia de grandes presiones. Estos fluidos están invariablemente en estado líquido. Bajo tales circunstancias, al fluido se le denomina **incompresible**, y se supone durante los cálculos que la densidad es constante. Cuando la densidad no se puede considerar constante bajo condiciones estáticas, como en un gas, al fluido se le denomina **compresible**.

Estas clasificaciones de compresibilidad están reservadas para estática. En dinámica de fluidos, la cuestión de cuándo la densidad se puede tratar como constante involucra más que sólo la naturaleza del fluido. Realmente, esto depende principalmente de un parámetro del flujo (el número de Mach). Entonces se habla de **flujos compresibles e incompresibles**, en vez de fluidos compresibles o incompresibles. Siempre que las variaciones de densidad en un problema sean de poca importancia, gases y líquidos se analizan de la misma manera.

1.7 Compresibilidad de los líquidos

En general un líquido se puede considerar como incompresible, pero en situaciones en que se tengan cambios de presión bruscos o muy grandes, su compresibilidad es importante. La compresibilidad de los líquidos también es importante cuando se tienen cambios de temperatura.

Considérese una partícula de fluido de volumen V . Si la partícula está sujeta a un cambio de presión dP , se produce un cambio de volumen (dV) y el **módulo de elasticidad (o compresibilidad) volumétrica** es

$$K = -V \left(\frac{dP}{dV} \right)_T \quad (1.12a)$$

El signo negativo es necesario, ya que un incremento en la presión provoca una disminución en el volumen. Como la masa de la partícula del fluido está fija, K también se puede expresar en función del volumen específico o de la densidad:

$$K = -v \left(\frac{dP}{dv} \right)_T = \rho \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_T \quad (1.12b)$$

donde el subíndice T indica que la compresión del líquido se realiza a temperatura constante (*compresión isotérmica*).

El módulo de compresibilidad también se puede expresar de manera aproximada en términos de cambios finitos como

$$K \cong -\frac{\Delta P}{\Delta V/V} \cong \frac{\Delta P}{\Delta \rho/\rho} \quad (T = \text{constante}) \quad (1.13)$$

Nótese que si $\Delta V/V$ o $\Delta \rho/\rho$ son adimensionales, K debe tener dimensiones de presión (Pa o psi). Asimismo, el módulo de compresibilidad representa el cambio en la presión correspondiente a un cambio relativo en el volumen o la densidad del fluido, mientras la temperatura permanezca constante. Entonces se llega a la conclusión de que el módulo de compresibilidad de una sustancia verdaderamente incompresible ($V = \text{constante}$) es infinito. Un valor grande de K indica que se necesita un cambio también grande en la presión para causar un pequeño cambio relativo en el volumen y, de este modo, un fluido con un K grande en esencia es incompresible. Esto es típico para los líquidos y explica por qué éstos suelen considerarse como incompresibles. Por ejemplo, la presión del agua en condiciones atmosféricas normales debe elevarse hasta 210 atm para comprimirla en 1 por ciento, lo que corresponde a un valor del módulo de compresibilidad de $K = 21\,000$ atm.

El inverso del módulo de compresibilidad es el **coeficiente de compresibilidad** β ,

$$\beta = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dP} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dP} \right)_T \quad (1.14)$$

Capítulo 1

1.8 Ecuaciones de estado para gases

Realmente no existe tal cosa como un gas perfecto, pero el aire y otros gases reales que están bastante alejados de su fase líquida se pueden considerar así. La ecuación de estado para un **gas perfecto** es:

$$\frac{P}{\rho} = Pv = RT \quad (1.15)$$

teniendo además calores específicos constantes. En la ecuación anterior, P es la presión absoluta, ρ la densidad, v el volumen específico, R la constante del gas, que depende del gas en particular, y T la temperatura absoluta. Se debe diferenciar claramente el gas perfecto del fluido ideal. **Un fluido ideal no tiene fricción y es incompresible, mientras que un gas perfecto tiene viscosidad y, por tanto, puede desarrollar esfuerzos cortantes, además de ser compresible.**

Para el aire, el valor de R es 287 N.m/kg.K (1 715 pie-lb/slug°R). Ya que $\gamma = \rho g$, la Ec. (1.15) también se puede escribir como

$$\gamma = \frac{gP}{RT} \quad (1.16)$$

con la cual se puede calcular el peso específico de cualquier gas a cualquier temperatura y presión, si se conocen R y g .

La ley de Avogadro establece que todos los gases a la misma temperatura y presión bajo la acción de un valor dado de g , tienen el mismo número de moléculas por unidad de volumen, es decir, que el peso específico del gas es proporcional a su peso molecular. Así, si M representa el peso molecular (o masa molar), $\gamma_2/\gamma_1 = M_2/M_1$, y de la Ec. (1.16) $\gamma_2/\gamma_1 = R_1/R_2$ para los mismos valores de temperatura, presión y g . Con esto,

$$M_1R_1 = M_2R_2 = \text{constante} = \tilde{R} \quad (1.17)$$

donde \tilde{R} es conocida como la **constante universal de los gases** y, de acuerdo con la Ec. (1.17), es la misma para todos los gases y su valor depende de las unidades utilizadas; por ejemplo,

$$\begin{aligned} \tilde{R} = & 8314,3 \text{ J/kmol}\cdot\text{K} \\ & 8,3143 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \\ & 1,9859 \text{ Btu/lb}\cdot\text{mol}\cdot^\circ\text{R} \\ & 1543,3 \text{ ft}\cdot\text{lbf/lb}\cdot\text{mol}\cdot^\circ\text{R} \\ & 49\,710 \text{ ft}\cdot\text{lbf/slug}\cdot^\circ\text{R} \end{aligned}$$

Propiedades de los fluidos y definiciones

Ya que $v = V/m$, usando la Ec.(1.17), la Ec.(1.15) se puede escribir como

$$PV = mRT = \frac{m\tilde{R}T}{M} \quad (1.18)$$

Con frecuencia se usa el mol como medida de la cantidad de una sustancia cuando se trata con sustancias y reacciones químicas. Por ende, el *kilogramo-mol* (kgmol o kmol) se puede definir como la unidad SI para la cantidad de sustancia que tiene una masa numéricamente igual al peso kilogramo molecular de la sustancia. La relación matemática entre el número de moles N (en kmol), la masa m (en kg) y el peso molecular M (en kg/kmol) es entonces

$$N = \frac{m}{M} \quad (1.19)$$

Con lo que la Ec.(1.18) se puede escribir como

$$PV = N\tilde{R}T \quad (1.20)$$

Lo anterior se cumple sólo para gases perfectos. La ecuación exacta para cualquier gas real es más complicada que la Ec. (1.17), y con esto MR no es estrictamente constante. Para gases reales el valor de MR varía entre 48700 y 49800 pie-lb/slug-°R, lo cual representa una variación menor del 3%.

Otra ecuación fundamental para un gas perfecto es

$$Pv^n = P_1 v_1^n = \text{constante} \quad (1.21)$$

donde P es la presión absoluta, v el volumen específico y n puede tener cualquier valor desde cero a infinito, dependiendo del proceso al que está sujeto el gas. Si el proceso es a temperatura constante (*isotérmico*), $n = 1$. Si no hay transferencia de calor hacia o desde el gas, el proceso se conoce como *adiabático*. Un proceso adiabático sin fricción es llamado *isentrópico* y n se representa mediante k , donde $k = c_p/c_v$, la relación del calor específico a presión constante con el de volumen constante. Para expansión con fricción n es menor que k y para compresión con fricción es mayor. Para aire y gases a temperaturas normales, k se puede tomar como 1.4.

Combinado las Ecs.(1.15) y (1.21), es posible obtener otras relaciones útiles, tales como:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} \quad (1.22)$$

Capítulo 1

1.9 Compresibilidad de los gases

Derivando la Ec. (1.21), se obtiene

$$nPv^{n-1}dv + v^n dP = 0 \quad (1.23)$$

Despejando de esta expresión dP y sustituyéndolo en la Ec.(1.12b) se obtiene,

$$K = nP \quad (1.24)$$

de manera que para un proceso isotérmico de un gas $K = P$ y para un proceso isentrópico $K = kP$.

1.10 Tensión superficial y capilaridad

Las moléculas de un líquido ejercen fuerzas pequeñas de atracción, unas sobre otras. Dentro de un líquido, en el que cada molécula está completamente rodeada de otras moléculas, la fuerza neta es cero. Sin embargo, para las moléculas de la superficie del líquido no existen fuerzas de atracción que actúen de arriba de la superficie hacia el interior del líquido (el efecto de las moléculas de aire es pequeño y se considera despreciable). Como resultado, las moléculas de la capa superficial experimentan fuerzas netas debidas a las moléculas vecinas, que están justo debajo de la superficie. Este impulso hacia abajo sobre las moléculas de la superficie causa que el líquido se contraiga y resista ser estirado o roto, propiedad que se conoce como **tensión superficial**.

El efecto neto de la tensión superficial es hacer que el área de la superficie de un líquido sea tan pequeña como sea posible. Esto es, un volumen dado de líquido tiende a adoptar la forma que tiene el área superficial menor. Como resultado, las gotas de agua y las burbujas de jabón tienen formas esféricas. Al formarse una gota o una burbuja, la tensión superficial tira de las moléculas a reunir las para minimizar el área superficial.

Por otro lado, es la misma tensión superficial la que permite que un insecto se pose sobre la superficie de un líquido. La superficie actúa como una membrana elástica bajo tensión y las fuerzas moleculares a lo largo de la depresión formada sobre la superficie del agua por las patas del insecto, forman un ángulo con la superficie. Las componentes verticales de estas fuerzas equilibran el peso del insecto.

Es de esta forma como en la interfaz entre un líquido y un gas o dos líquidos inmiscibles se forma una capa especial sobre el líquido, aparentemente debido a la atracción de las moléculas de líquido debajo de la superficie. Esto puede observarse al colocar una aguja sobre una superficie de agua en reposo, donde la aguja queda soportada por el líquido.

La formación de esta capa puede visualizarse como energía de superficie o trabajo por unidad de área requerido para atraer las moléculas de fluido hacia la superficie.

Cuantitativamente, la tensión superficial (σ) en una película líquida se define como la fuerza por unidad de longitud que actúa a lo largo de una línea (por ejemplo, a lo largo de un alambre) cuando se estira la superficie:

$$\sigma = \frac{F}{L} \quad (1.25)$$

La tensión superficial aumenta la presión dentro de una gota y dentro de una burbuja de agua. En una pequeña gota esférica de radio R , la presión interna necesaria para balancear la fuerza debida a la tensión superficial, se calcula analizando las fuerzas que actúan en un cuerpo libre de forma hemisférica, como se muestra en la Figura 1.4a, de donde

$$-(P_i)_m (\pi R^2) + \sigma(2\pi R) = 0$$

donde $(P_i)_m$ es la presión interna de la gota sobre la de la atmósfera. Despejando $(P_i)_m$

$$(P_i)_m = \frac{2\sigma}{R} \quad (1.26)$$

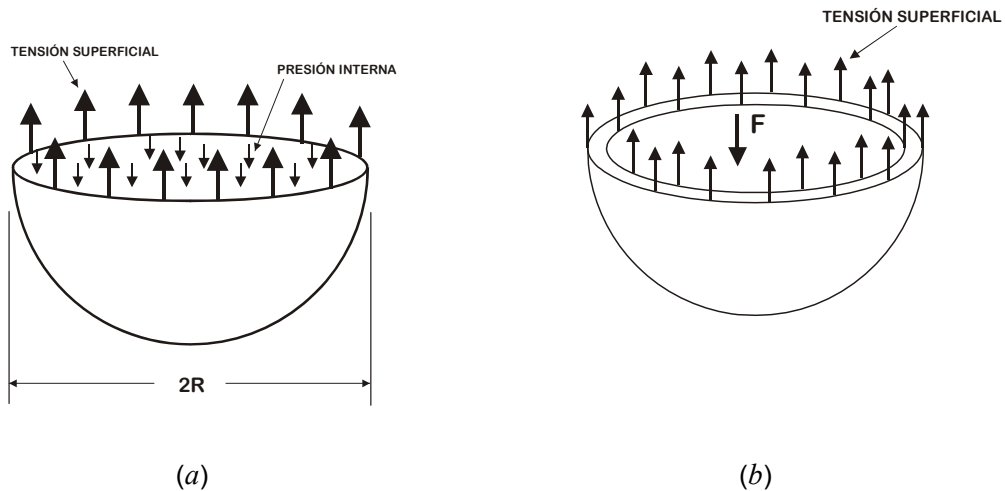


Figura 1.4 Tensión superficial sobre (a) media gota de agua y (b) media burbuja.

Considérese ahora el caso de una burbuja. Si se corta la burbuja por la mitad, del diagrama de cuerpo libre que se muestra en la Figura 1.4b se observa que la tensión superficial existe en dos superficies, la interior y la exterior de la burbuja. Considerando que los radios interior y exterior son aproximadamente iguales, para la condición de equilibrio dentro de la burbuja, se tiene que

$$-(P_i)_m \pi R^2 + 2[\sigma(2\pi R)] = 0$$

$$(P_i)_m = \frac{4\sigma}{R} \quad (1.27)$$

Capítulo 1

Adhesión, cohesión y acción capilar.

El que un líquido se adhiera o no a una superficie, depende de las tensiones relativas de las fuerzas adhesivas y cohesivas entre las moléculas. Todos los líquidos tienen cohesión y adhesión. La primera permite al líquido resistir esfuerzos de tensión, mientras que la segunda le permite adherirse a otro cuerpo.

Las fuerzas adhesivas (o de adhesión) son fuerzas de atracción entre moléculas diferentes. Las fuerzas cohesivas (o de cohesión) son fuerzas atrayentes entre moléculas semejantes. Las fuerzas cohesivas mantienen reunida una sustancia y las fuerzas adhesivas mantienen juntas a sustancias diferentes.

Si las fuerzas adhesivas entre las moléculas de un líquido y las de la superficie son mayores que las fuerzas cohesivas entre las moléculas del líquido, el líquido mojará la superficie. Por otro lado, si las fuerzas cohesivas son mayores que las fuerzas adhesivas, el líquido no humedecerá la superficie.

Aunque las fuerzas cohesivas y adhesivas son difíciles de analizar, una medida relativa de sus efectos es el ángulo de contacto (ϕ). Éste es el ángulo entre la superficie y una línea que se traza tangente al líquido, como se muestra en la Figura 1.5. En esta figura se observa que ϕ es menor de 90° si el líquido moja la superficie y mayor de 90° si no la moja.

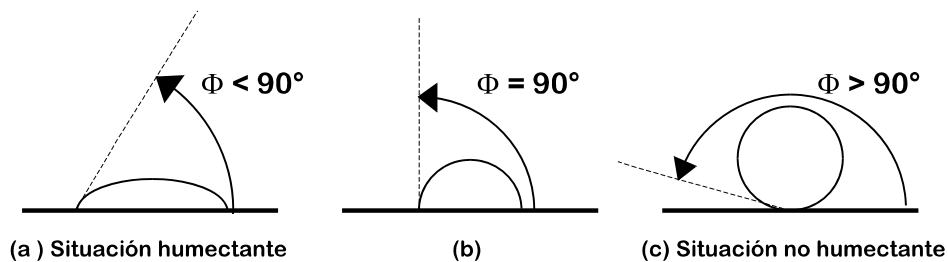


Figura 1.5 Ángulo de contacto.

Cuando un líquido está en contacto con un sólido, si la adhesión del líquido con el sólido excede la cohesión en el líquido, el líquido moja la superficie sólida y la tensión superficial hace que el líquido suba sobre el punto de contacto y forme un menisco curvado hacia arriba (cóncavo), como se muestra en la Figura 1.6a para el caso de agua y vidrio. Esta curvatura se mide por el ángulo θ . El ascenso capilar, h , para un fluido y un sólido dados, depende del diámetro interior del tubo. La elevación h se incrementa con la disminución del diámetro interior del tubo.

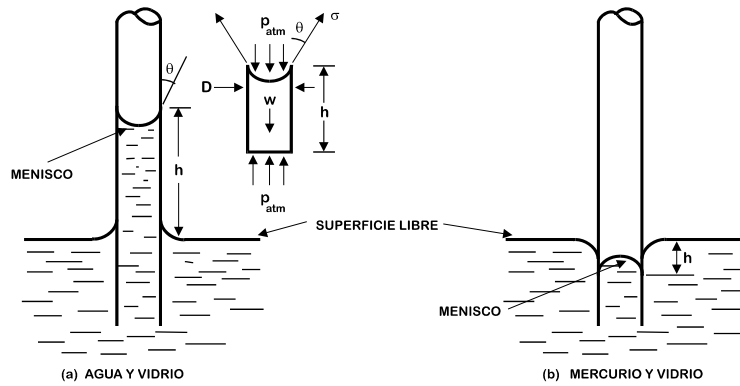


Figura 1.6 Efectos capilares de cohesión y adhesión.

Si la adhesión del líquido con el sólido es menor que la cohesión en el líquido, entonces la tensión superficial tiende a abatir la superficie del líquido por abajo del punto de contacto y se forma un menisco curvado hacia abajo, como se muestra en la Figura 1.6b para el caso de mercurio y vidrio. Estos efectos son llamados capilaridad. En la Figura 1.7 se muestran los efectos de capilaridad para el mercurio y el agua en tubos circulares de vidrio.

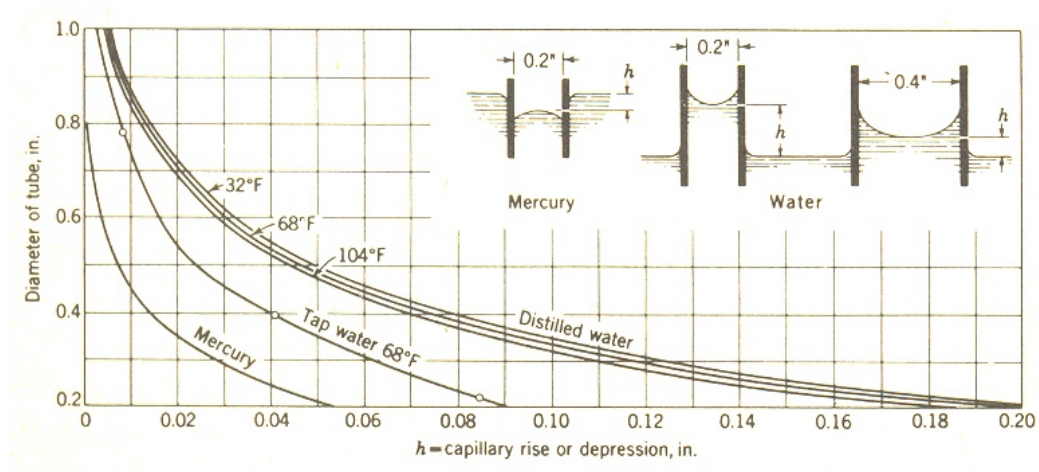


Figura 1.7 Capilaridad en tubos circulares de vidrio limpios.

Capítulo 1

Del diagrama de cuerpo libre de la Figura 1.6a, se tiene que

$$\sigma(\pi D)\cos\theta - w = 0$$

donde w es el peso de la columna de líquido, el cual es igual a γV , siendo $V = Ah$ el volumen de la columna. Con esto,

$$\sigma(\pi D)\cos\theta - \gamma\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)h = 0$$

$$h = \frac{4\sigma\cos\theta}{\gamma D} \quad (1.28)$$

Esta expresión se puede usar para calcular el aumento o depresión capilar aproximada en un tubo. Si el tubo está limpio, $\theta = 0^\circ$ para el agua y aproximadamente de 140° para el mercurio. Para tubos de diámetros mayores de $\frac{1}{2}$ pulgada (12 mm), los efectos de capilaridad se desprecian. Las curvas de la Figura 1.8 son para agua o mercurio en contacto con aire. Si el mercurio está en contacto con el agua, los efectos de la tensión superficial son ligeramente menores que cuando está en contacto con aire.

1.11 Presión de vapor

La **presión de vapor** o más comúnmente **presión de saturación** es la presión a la que a cada temperatura las fases líquida y vapor se encuentran en equilibrio; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas. En la situación de equilibrio, las fases reciben la denominación de **líquido saturado** y **vapor saturado**.

Considérese una ampolla de cristal en la que se ha realizado el vacío y que se mantiene a una temperatura constante; si se introduce una cierta cantidad de líquido en su interior éste se evaporará rápidamente al principio hasta que se alcance el equilibrio entre ambas fases. Las moléculas de la superficie del líquido que tengan una mayor energía escapan de la superficie pasando a la fase vapor (evaporación) mientras que las moléculas del vapor chocarán con las paredes de la ampolla y entre sí perdiendo energía y cayendo al líquido (condensación).

Inicialmente sólo se produce la evaporación ya que no hay vapor; sin embargo a medida que la cantidad de vapor aumenta y por tanto la presión en el interior de la ampolla, se va incrementando también la velocidad de condensación, hasta que transcurrido un cierto tiempo ambas velocidades se igualan. Llegados a este punto se habrá alcanzado la presión máxima posible en la ampolla (presión de vapor o de saturación) que no podrá superarse salvo que se incremente la temperatura.

Propiedades de los fluidos y definiciones

El equilibrio se alcanzará más rápidamente cuanto mayor sea la superficie de contacto entre el líquido y el vapor, pues así se favorece la evaporación del líquido; del mismo modo que un charco de agua extenso pero de poca profundidad se seca más rápido que uno más pequeño pero de mayor profundidad que contenga igual cantidad de agua. Sin embargo, el equilibrio se alcanza en ambos casos para igual presión.

El factor más importante que determina el valor de la presión de saturación es la propia naturaleza del líquido, encontrándose que en general entre líquidos de naturaleza similar, la presión de vapor a una temperatura dada es tanto menor cuanto mayor es el peso molecular del líquido.

La actividad molecular, y por tanto la presión de saturación, se incrementa con la temperatura. A cualquier temperatura, la presión sobre la superficie del líquido puede ser mayor que su presión de saturación, pero no puede ser menor, ya que cualquier ligera reducción provoca una rápida tasa de evaporación conocida como **ebullición**.

En la Tabla 1.1 se presenta la presión de vapor para algunos líquidos seleccionados.

Tabla 1.1 Presión de vapor para algunos líquidos a 20°C (68°F).

	N/m ² , abs	mbar, abs	psia
Mercurio	0,17	0,0017	0,000025
Agua	2 340	23,4	0,339
Keroseno	3 200	32	0,46
Tetracloruro de carbono	12 100	121	1,76
Gasolina	55 000	550	8,0

1.12 Bibliografía

1. Çengel, Y.A., y Cimbala, J.M., Mecánica de Fluidos, fundamentos y aplicaciones, 1ª ed., McGraw-Hill Interamericana, 2006.
2. Daugherty, R.L., & Franzini, J.B., Fluid Mechanics with Engineering Applications, 6th ed., McGraw-Hill, 1977.
3. Gerhart, P.M., Gross, R.J. y Hochstein, J.I., Fundamentos de Mecánica de Fluidos, 2ª ed., Addison-Wesley Iberoamericana, 1995.
4. Shames, I.H., Mechanics of Fluids, 2nd ed., McGraw-Hill, 1982.

