

I Introducción a la Mecánica de fluidos

Aula Virtual

<http://www.erivera-2001.com>
satii@entelnet.bo

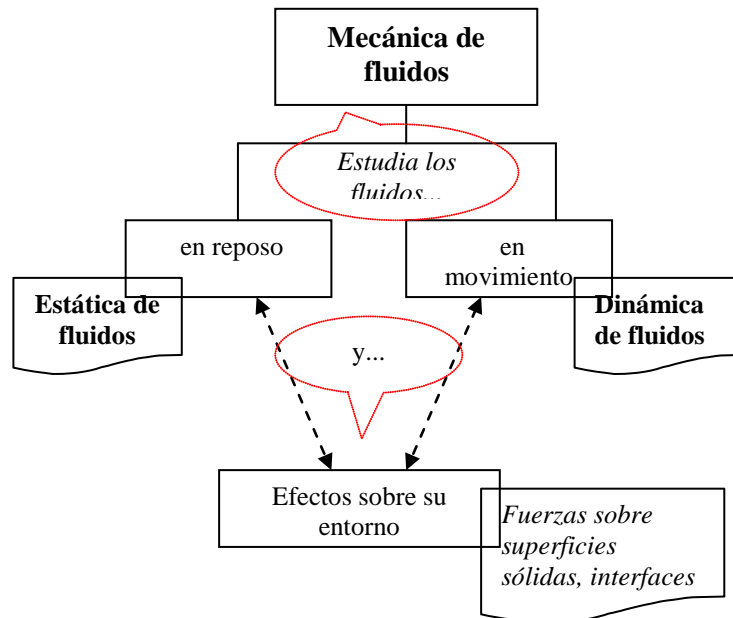


Contenido

- 1.1. [La ciencia de la Mecánica de Fluidos](#)
[Resumen histórico de la Mecánica de Fluidos](#)
- 1.2. [Definición de Fluido](#)
- 1.3. [El fluido como medio continuo](#)
- 1.4. [Dimensiones y unidades](#)
- 1.5. [Principio de Homogeneidad dimensional](#)
- 1.6. [Propiedades de los fluidos](#)
- 1.7. [Principio de viscosidad.- El coeficiente de viscosidad](#)
[Fluidos newtonianos y no newtonianos](#)
[Variación de la viscosidad con la temperatura](#)
- 1.8. [Otras propiedades de los fluidos](#)
- 1.9. [El gas ideal](#)
- 1.10. [Fuerzas másicas y de superficie.- Tensión](#)
[Autoevaluación](#)

1. La ciencia de la Mecánica de Fluidos

La mecánica de los fluidos es la ciencia que estudia el comportamiento mecánico¹ de los fluidos (en reposo o en movimiento) y su efecto sobre su entorno, tal como superficies de sólidos o interfaces con otros fluidos.



1.1. Resumen histórico de la Mecánica de Fluidos

La Mecánica de fluidos tiene sus orígenes en la hidráulica, tanto en Mesopotamia como en Egipto alrededor del año 400 a.C. proliferaron las obras hidráulicas que aseguraban el regadío. Posteriormente, los imperios griegos, chino y especialmente, el romano se caracterizan por una gran profusión de obras hidráulicas.

A lo largo de la historia, aparecen inventos e investigadores que aportan mejoras sustanciales en el campo que hoy se denomina Mecánica de fluidos.

Al final de siglo XIX comienza la unificación entre hidráulicos e hidrodinámicos. La Mecánica de Fluidos moderna nace con Pascal, que en las primeras décadas del XX elaboró la síntesis entre la **hidráulica** práctica y la **hidrodinámica** teórica.

Cinco matemáticos del siglo XVIII, Bernoulli, Clairaut, D'Alembert, Lagrange y Euler habían elaborado con el naciente cálculo diferencial e integral una síntesis **hidrodinámica** perfecta; pero no habían obtenido grandes resultados prácticos. Por otra parte el técnico hidráulico fue desarrollando multitud de formulas empíricas y experiencias en la resolución de problemas que sus construcciones hidráulicas le presentaban, sin preocuparse de buscarles base teórica alguna. Excepcionalmente un científico, Reynolds, buscó y halló apoyo experimental a sus teorías, y un técnico, Froude, buscó basé física a sus experimentos; pero **Prandtl hizo la síntesis de las**

¹ Movimiento mecánico: Cambio posicional en el tiempo y el espacio

A continuación se incluye una lista de algunos de los principales hombres cuyos trabajos contribuyeron al desarrollo de la ciencia de la Mecánica de Fluidos como hoy la conocemos.

- ✓ **Arquímedes** (287-212 a.C.) Leyes de la Flotación.
- ✓ **Leonardo da Vinci** (1452-1519) Ecuación de Continuidad.
- ✓ **Torricelli** (1608-1647) Salida por un orificio. Relación entre la altura y la presión atmosférica.
- ✓ **Pascal** (1623-1662) Ley de Pascal.
- ✓ **Newton** (1642-1726) Ley de viscosidad dinámica.
- ✓ **Bernoulli** (1700-1782) Teorema de Bernoulli.
- ✓ **Euler** (1707-1783) Ecuaciones diferenciales del movimiento del fluido ideal; formulación del teorema de Bernoulli; Teorema fundamental de las turbomáquinas.
- ✓ **D'Alembert** (1717-1783) Ecuación diferencial de continuidad.
- ✓ **Lagrange** (1736-1813) Función potencial y función de corriente.
- ✓ **Venturi** (1746-1822) Flujo en embocaduras y contracciones; Medidor de Venturi.
- ✓ **Poiseuille** (1799-1869) Resistencia en tubos capilares: Ecuación de Poiseuille.
- ✓ **Weisbach** (1806-1871) Fórmula de resistencia en tuberías.
- ✓ **Froude** (1810-1879) Ley de semejanza de Froude.
- ✓ **Navier** (1785-1836) y **Stokes** (1819-1903) Ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes del movimiento de los fluidos viscosos.
- ✓ **Reynolds** (1842-1912) Número de Reynolds; Distinción entre flujo laminar y turbulento.
- ✓ **Rayleigh** (1842-1919) Propuso la técnica del análisis dimensional.
- ✓ **Joukowski** (1847-1921) Estudios del golpe de ariete; perfiles aerodinámicos de Joukowski.
- ✓ **Prandtl** (1875-1953) Teoría de la capa límite. Fundador de la moderna mecánica de fluidos.



Arquímedes de Siracusa
<http://es.wikipedia.org/wiki/Arqu%C3%ADmedes>



Blaise Pascal
http://es.wikipedia.org/wiki/Blaise_Pascal



Leonhard Euler
http://es.wikipedia.org/wiki/Leonhard_Euler



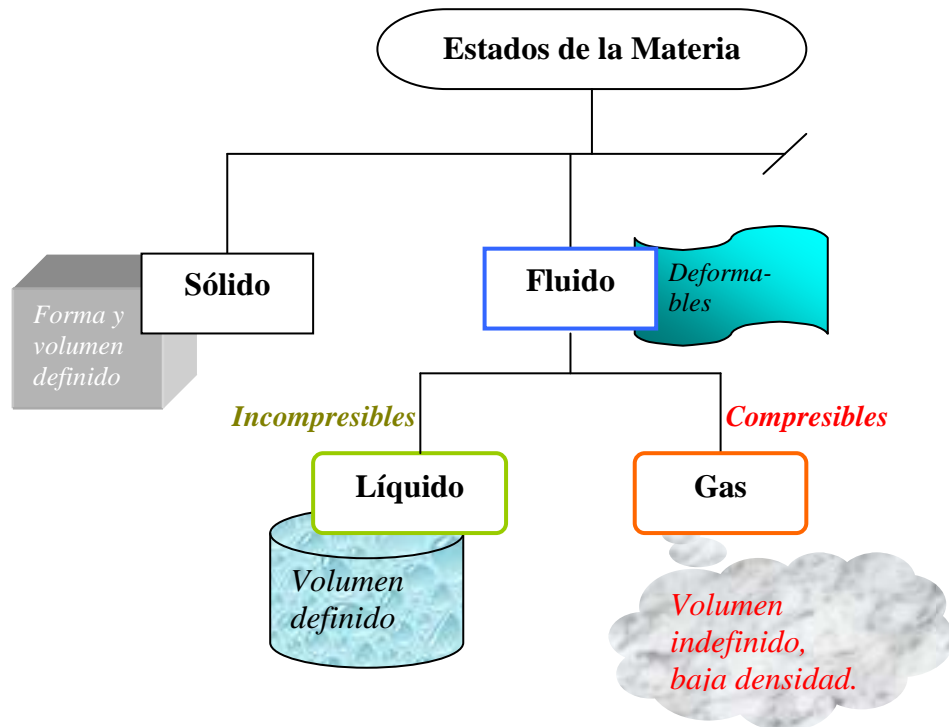
Ludwig Prandtl.
http://es.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Prandtl

Sir Isaac Newton
http://es.wikipedia.org/wiki/Isaac_Newton



2. Definición de Fluido

La materia fundamentalmente se presenta en dos² estados:



Un fluido es parte de un estado de la materia la cual no tiene un volumen definido, sino que adopta la forma del recipiente que lo contiene a diferencia de los sólidos, los cuales tienen forma y volumen definido. Los fluidos tienen la capacidad de fluir, es decir, puede ser trasvasada de un recipiente a otro. Dentro de la clasificación de fluidos, los líquidos y gases presentan propiedades diferentes. Ambos tipos de fluidos, tienen la propiedad de no tener forma propia y que estos fluyen al aplicarles fuerzas externas. La diferencia está en la llamada compresibilidad. Para el caso de los gases estos pueden ser comprimidos reduciendo su volumen. Por lo tanto:

- Los gases son compresibles,
- Los líquidos son prácticamente incompresibles.

Otra característica entre los sólidos y los fluidos es que los primeros se resisten a cambiar de forma ante la acción de los agentes externos, en cambio los fluidos prácticamente no se resisten a dichos agentes.

Definición de fluido: Fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando es sometida a una tensión cortante, aunque esta sea muy pequeña.

² El plasma es considerado un tercer estado de la materia, también últimamente se habla de un cuarto (quinto) estado de la materia.

Consideremos un fluido entre dos placas paralelas, que se sujeta a una tensión cortante debido al movimiento de la placa superior.

Condición de no deslizamiento: no existe movimiento relativo entre el fluido y el entorno, la cara del fluido en contacto con la placa inferior es estacionario y el fluido en contacto con la placa superior se mueve con velocidad U .

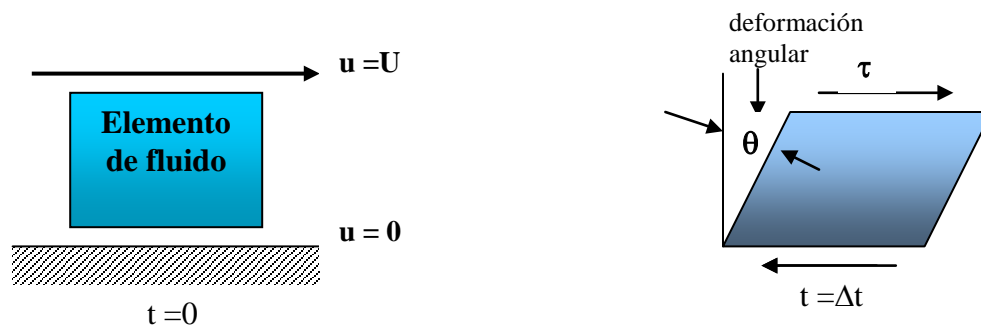


Figura 1.1.- El fluido entre las dos placas sufre una deformación θ debido a la tensión τ .

Un fluido no ofrece resistencia a la deformación por esfuerzo constante. Esta es la característica que distingue esencialmente un fluido de un sólido.

1.3 El fluido como medio continuo

Como toda la materia, los fluidos están compuestos por un gran número de moléculas en permanente movimiento. Esto se debe a que en la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería lo que interesa son los efectos promedio o macroscópicos de un gran número de moléculas. Estos efectos macroscópicos son los que corrientemente percibimos y medimos. Es por ello que en la definición de fluido no se hace referencia a la estructura molecular de la materia. Por esta razón se trata a un fluido como una sustancia **infinitamente indivisible**, dicho de otro modo **un medio continuo**, sin importar el comportamiento individual de las moléculas.

Como una consecuencia de esta idealización, se considera que cada propiedad del fluido tiene un valor definido en cada punto del espacio. Por ello, la densidad, temperatura, velocidad, etc., se consideran como funciones continuas de la posición y el tiempo.

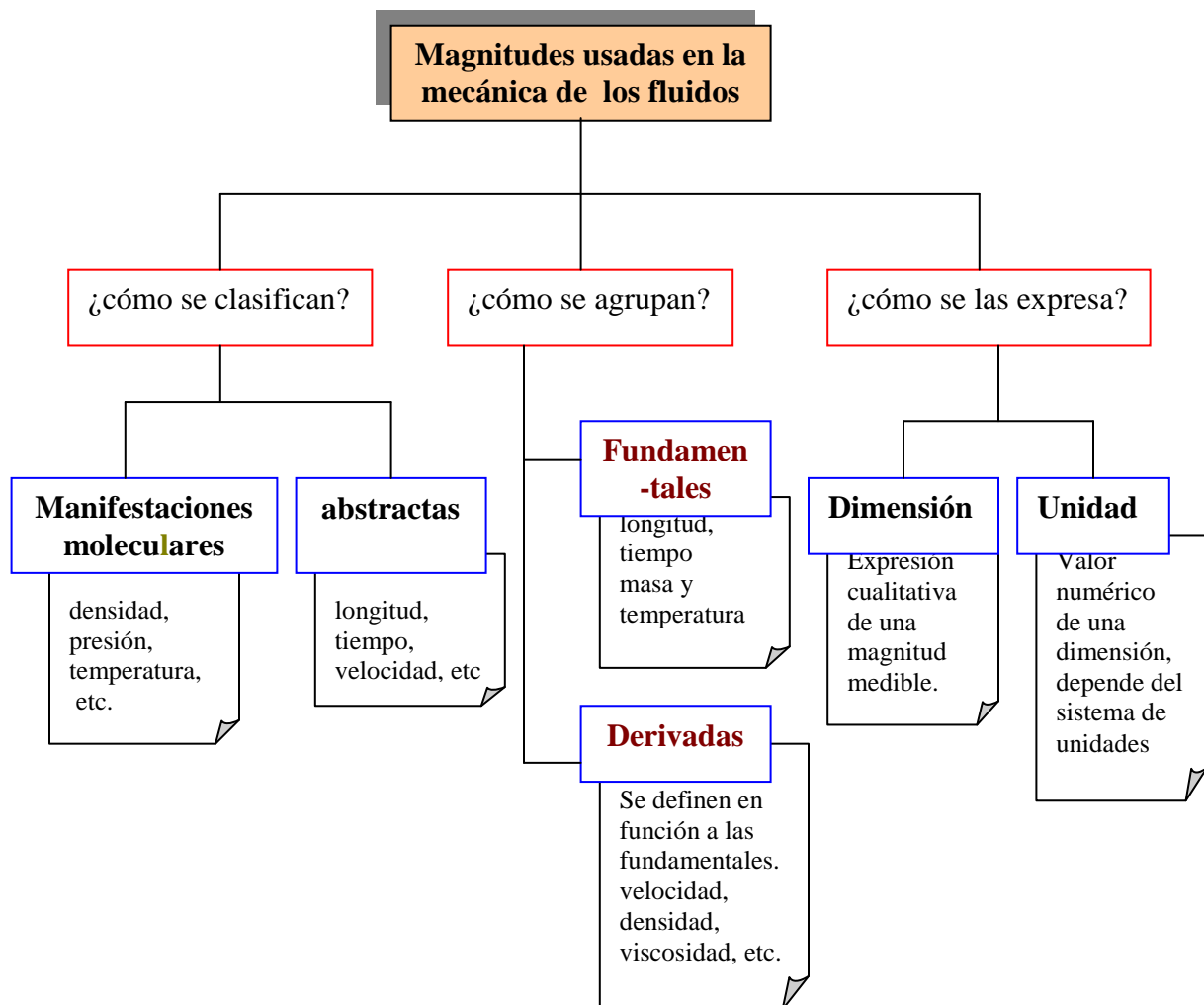
$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad T = T(x, y, z, t) \quad \vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$$

La idealización del continuo se emplea sólo cuando pueda conducir a resultados razonablemente correctos. Así cuando el recorrido libre medio de las moléculas es del mismo orden de magnitud que la longitud significativa más pequeña de un problema, esta aproximación carece de sentido. La acción de cada molécula es en estos casos significativa y el problema debe tratarse de otra manera.

1.4 Dimensiones y unidades

En los cursos de física básica el estudiante de ingeniería ha aprendido a manejar sistemas de dimensiones y unidades, por lo que seguramente estos conceptos le resultan muy familiares. Sin embargo dada la importancia de este tema en la solución de problemas de mecánica de fluidos que exigen respuestas concretas, se presenta en estas notas un breve repaso de dimensiones y unidades.

En la mecánica de fluidos, como en otras ramas de las ciencias de ingeniería, se usan magnitudes de diferente naturaleza con la característica común de que son susceptibles de medición. Unas son de naturaleza **abstracta**, como el tiempo, la longitud, la velocidad, etc. y otras son una medida de las **manifestaciones moleculares globales** de las sustancias como por ejemplo: la densidad, la presión, la temperatura, etc.



Un grupo pequeño de estas magnitudes se seleccionan como magnitudes independientes (tabla 1.1) las mismas que sirven de base para definir el grupo de magnitudes dependientes (tabla 1.2). La relación entre las magnitudes dependientes e independientes (fundamentales) se establece mediante los principios y/o las definiciones. Así la velocidad se relaciona con la longitud y el tiempo mediante la definición de velocidad y la fuerza se relaciona con la masa, la longitud y el tiempo mediante la segunda ley de Newton.

$$velocidad = \frac{desplazamiento}{tiempo} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{longitud}{tiempo}$$

$$Fuerza = masa \times \frac{\Delta V}{\Delta \theta} = \frac{\Delta s}{\Delta^2 \theta} = masa \frac{longitud}{(tiempo)^2}$$

Cada una de las magnitudes utilizadas en la mecánica está asociada con una **dimensión** física, se puede decir que la dimensión es la medida de una magnitud física. En tanto que la unidad es cantidad numérica que se le asigna a una dimensión y cuyo valor depende del sistema de unidades utilizado. Lo que significa que a una dimensión dada se le pueden asociar diferentes números. Así por ejemplo la dimensión de la aceleración de la gravedad es L/θ^2 pero la expresión numérica puede ser: 9.81 o 32.2 según el sistema de unidades que se use.

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad SI \text{ sistema internacional}$$

$$g = 32.2 \left[\frac{pie}{s^2} \right] \quad BU \text{ sistema británico}$$

En este cuaderno de apuntes se usa con preferencia el Sistema Internacional de unidades (SI). Pero debido a que todavía existe en las industrias de nuestro medio mucha literatura técnica como manuales de operación, de diseño, etc. donde se utiliza el sistema británico de unidades se recomienda al estudiante revisar este sistema de unidades.

Tabla 1.1
Magnitudes fundamentales
usadas en mecánica de fluidos

Magnitud	Representación dimensional	Unidad SI
Masa	M	Kg
Longitud	L	M
Tiempo	θ	S
Temperatura	T	$^{\circ}\text{K}$

Tabla 1.2
Magnitudes derivadas
importantes en la mecánica de
fluidos

Magnitud	Representación dimensional	Unidad SI
Velocidad	$L\theta^{-1}$	m/s
Aceleración	$L\theta^{-2}$	m/s^2
Fuerza	$ML^2\theta^{-2}$	$N (Kg.m/s^2)$
Área	L^2	M^2
Volumen	L^3	M^3
Presión	$F/L^2 = ML^{-1}\theta^{-2}$	$Pa (N/m^2)$
Densidad	ML^{-3}	Kg/m^3
Energía	$FL = ML^{-1}\theta^{-2}$	$J (Kg.m/s^2)$
Potencia	$FL/\theta = ML^{-1}\theta^{-3}$	$W (Kg.m/s^3)$
Energía Interna u	$FL/M = M^2L^{-2}$	$J/Kg (N-m/Kg)$
Viscosidad	$ML^{-1}\theta^{-1}$	$Kg/m.s$
Viscosidad cinemática	$L^2\theta^{-1}$	m^2/s

1.5 Principio de Homogeneidad dimensional

Cualquier ecuación deducida analíticamente y que represente un fenómeno físico debe satisfacerse en cualquier sistema de unidades.

Este principio se sustenta en el hecho de que los fenómenos naturales ocurren de manera independiente a los sistemas de unidades, pues estos últimos son invención del hombre.

Una consecuencia de este principio es que, una ecuación válida que relaciona magnitudes físicas debe ser dimensionalmente consistente (homogénea). Esto quiere decir, en términos sencillos, que las dimensiones de cada término de una ecuación deben ser las mismas.

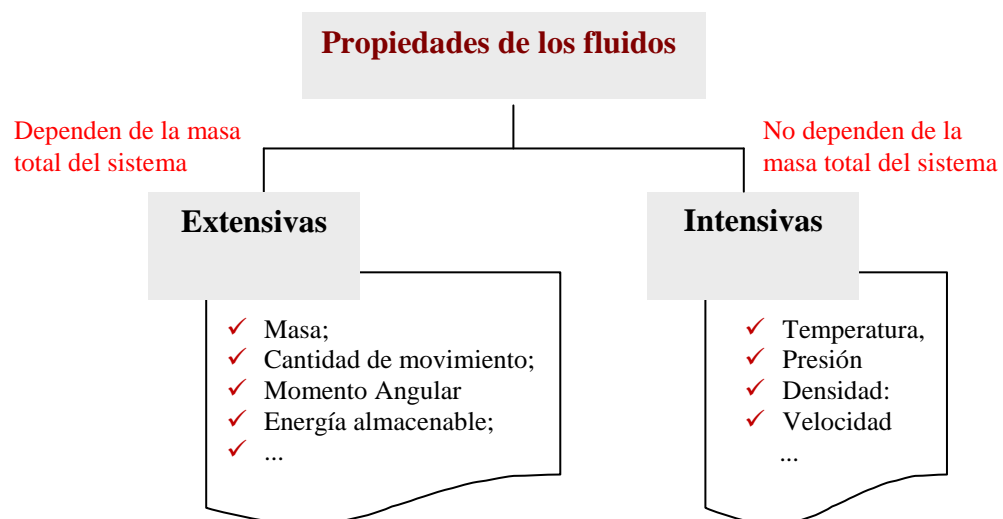
2 manzanas + 2 naranjas \neq 4 manzanas

3 conejos \neq 3 zanahorias

1.6 Propiedades de los fluidos

✓ Propiedades Extensivas e Intensivas

En termodinámica se distingue entre aquellas propiedades cuyo valor depende de la cantidad total de masa presente, llamadas propiedades extensivas, y aquellas propiedades cuya medida es independiente de la cantidad total de masa presente que son llamadas propiedades intensivas.



✓ Densidad

Una de las formas más útiles de caracterizar una sustancia es especificar la cantidad de sustancia por unidad de volumen. El resultado de ésta caracterización se denomina **densidad** de la sustancia.

Definición: La densidad de un material se define como la masa contenida en la unidad de volumen del material. Por tanto operacionalmente la densidad esta dada por:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad 1.6.1$$

✓ Peso específico

Los ingenieros que no han adoptado todavía el SI emplean frecuentemente el peso específico (densidad de peso), definida como el peso de la unidad de volumen de una sustancia, operacionalmente

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \left[\frac{kg_f}{m^3} \right]; \quad \left[\frac{N}{m^3} \right] \quad 1.6.2$$

✓ Relación entre peso específico y densidad.

Teniendo en cuenta que el peso es igual a $W = m \cdot g$, en base a las ecuaciones anteriores se puede ver que la densidad y el peso específico están relacionados del siguiente modo:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = g \left(\frac{m}{V} \right) = g\rho \quad 1.6.3$$

En este curso usaremos preferentemente la **densidad**.

La densidad de los materiales cambia, en mayor o menor grado, al variar las condiciones de presión y temperatura, sobre todo en los gases. Una gran parte de los materiales usados en la ingeniería se expanden³, cuando se les calienta. Como resultado la densidad de estas sustancias disminuye al aumentar la temperatura, hay algunos casos en que la densidad aumenta cuando se eleva la temperatura un determinado intervalo. Es el caso del agua en el intervalo de (0 - 4) °C.

✓ Densidad relativa o Gravedad específica

La densidad relativa de una sustancia se define como la razón entre la densidad de la sustancia y la densidad del agua a una temperatura determinada (4 °C). Operacionalmente:

³ Esto se debe a que las moléculas están vibrando a distancias mayores cuando la temperatura es elevada y, en consecuencia, se incrementa su distancia promedio de separación. Ya que la masa en la unidad de volumen cambiará si las moléculas se separan, la densidad de una sustancia variará con la temperatura.

$$DR = \frac{\rho_{sustancia}}{\rho_{agua}} \quad 1.6.4$$

En virtud a que la densidad y el peso específico están relacionados, la densidad relativa también se puede definir como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua a una temperatura determinada. Así:

$$DR = \frac{\gamma_{sustancia}}{\gamma_{agua}} = \frac{g\rho_{sustancia}}{g\rho_{agua}} = \frac{\rho_{sustancia}}{\rho_{agua}} \quad 1.6.5$$

Nótese que la gravedad específica de una sustancia es una cantidad adimensional.

✓ Propiedades que involucran el flujo de calor

Para flujo de fluidos que involucran transferencia de calor tal como dinámica de gases las siguientes propiedades termodinámicas son importantes.

Calor específico	c_p y c_v	$J/kg \cdot K$
Energía Interna específica	u	J/kg
Entalpia específica	$h = u + p/\rho$	J/kg

Atención: El estudiante se encargará de definir estas propiedades.

1.7 Principio de viscosidad.- El coeficiente de viscosidad

Para que exista movimiento de un cuerpo a través de un fluido o para el movimiento del fluido dentro de un conducto se debe ejercer una fuerza que sobrepase la resistencia ofrecida por el fluido. La magnitud de la resistencia ofrecida por el fluido es una resistencia a la deformación y estará determinada por la velocidad de deformación como por una propiedad del fluido denominada viscosidad

Entonces la **viscosidad** se puede definir como la resistencia de los fluidos a fluir. A mayor viscosidad, menor flujo. En términos microscópicos se relaciona con las fuerzas intermoleculares, y con el tamaño y forma de las moléculas que constituyen el líquido. La viscosidad de la mayoría de los líquidos disminuye al aumentar la temperatura *¿Por qué? ¿y de los gases? ¿cómo influye la presión sobre la viscosidad?*

En la práctica se utilizan dos tipos de viscosidad:

- Viscosidad dinámica μ
- Viscosidad cinemática ν

✓ Viscosidad dinámica

El principio de viscosidad de Newton establece que: *para un flujo laminar de ciertos fluidos llamados newtonianos, la tensión cortante en una interface tangente a la dirección de flujo, es proporcional al gradiente de la velocidad en dirección normal a la interface.*

Para comprender este principio consideremos que entre dos placas paralelas de igual superficie y separadas por una distancia h se encuentra un fluido homogéneo a temperatura constante ¿por qué?, como se ve en la figura.

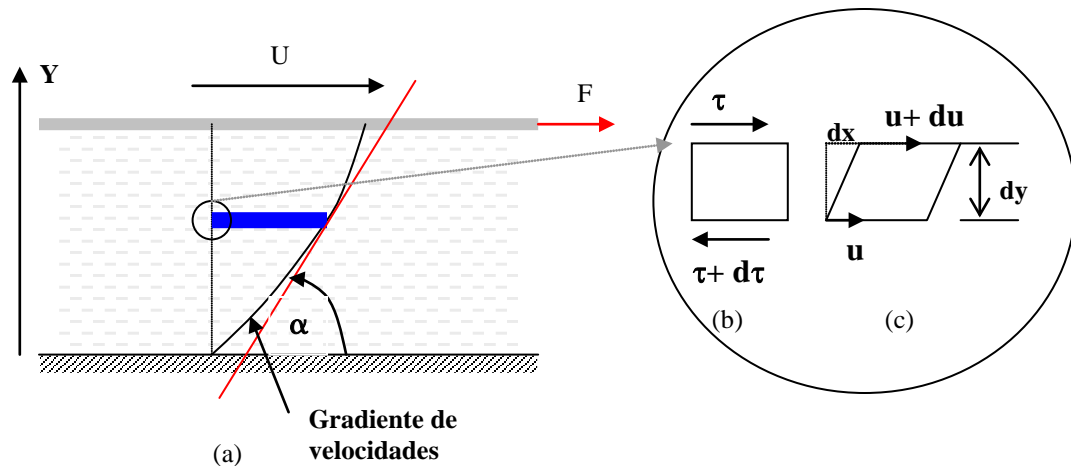


Figura 1.3: gradiente de velocidades y tensión cortante

De la figura 1.6.a se puede escribir la siguiente relación para la velocidad de deformación angular:

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \frac{\Delta x / \Delta y}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{1}{\Delta y} = \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

Ya que para valores pequeños de $\Delta\alpha$, se tiene que: $\Delta\alpha = \text{tg}(\Delta\alpha) = \Delta x / \Delta y$.

Entonces en el límite.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta y} \rightarrow \frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \quad 1.7.1$$

Es decir que la deformación angular que sufre el elemento de fluido mostrado en la figura, cuando es sometido a un es fuerza de corte, es igual al gradiente de velocidad en la dirección y (du/dy). Entonces, se puede decir que la tensión τ en la intercara superior del elemento diferencial de fluido es directamente proporcional a la velocidad de deformación, lo que concuerda con el principio de Newton.

$$\tau \propto \frac{du}{dy} \quad 1.7.2$$

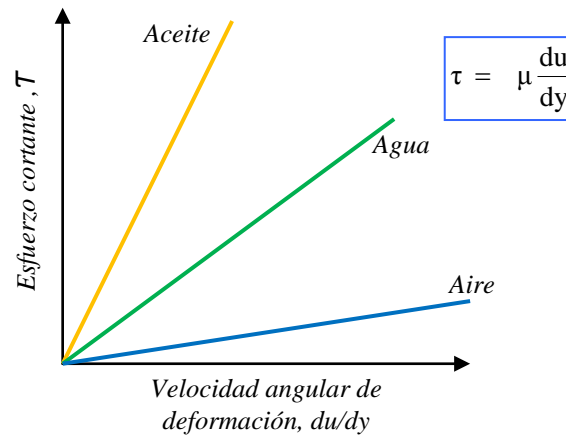
Introduciendo un coeficiente de proporcionalidad, μ , se tiene finalmente

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad 1.7.3$$

La última ecuación es la llamada ecuación de Newton de la viscosidad y el coeficiente de proporcionalidad μ , es el llamado coeficiente de viscosidad dinámica.

Figura 1.4 El esfu

erzo cortante, en un fluido Newtoniano, es proporcional a la velocidad de deformación angular (razón de



Las unidades de la viscosidad dinámica en el SI, se obtienen aplicando el principio de homogeneidad dimensional a la ecuación de Newton de la viscosidad.

$$\left[\frac{N}{m^2} \right] \equiv \mu \left[\frac{1}{s} \right] \Rightarrow \mu \equiv \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] = [Pa \cdot s] = \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right] \quad 1.6.9$$

✓ Viscosidad cinemática

Frecuentemente en los cálculos de mecánica de fluidos se presenta el cociente de la viscosidad dinámica entre la densidad del fluido. Por ello, de manera convencional, la viscosidad cinemática se define como la razón entre la viscosidad dinámica y la densidad.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad 1.7.4$$

✓ Fluidos newtonianos y no newtonianos

Los fluidos se clasifican desde el punto de vista de la relación que existe entre la viscosidad y la velocidad de deformación en fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos.

- Fluido newtoniano es todo fluido que se comporta según la ley de Newton de la viscosidad. Es decir que la viscosidad es función exclusiva de la condición del fluido.
- Los fluidos no newtonianos no se comportan de acuerdo con la ley de Newton de la viscosidad. La viscosidad del fluido no newtoniano depende del gradiente de velocidad, además de la condición del fluido.

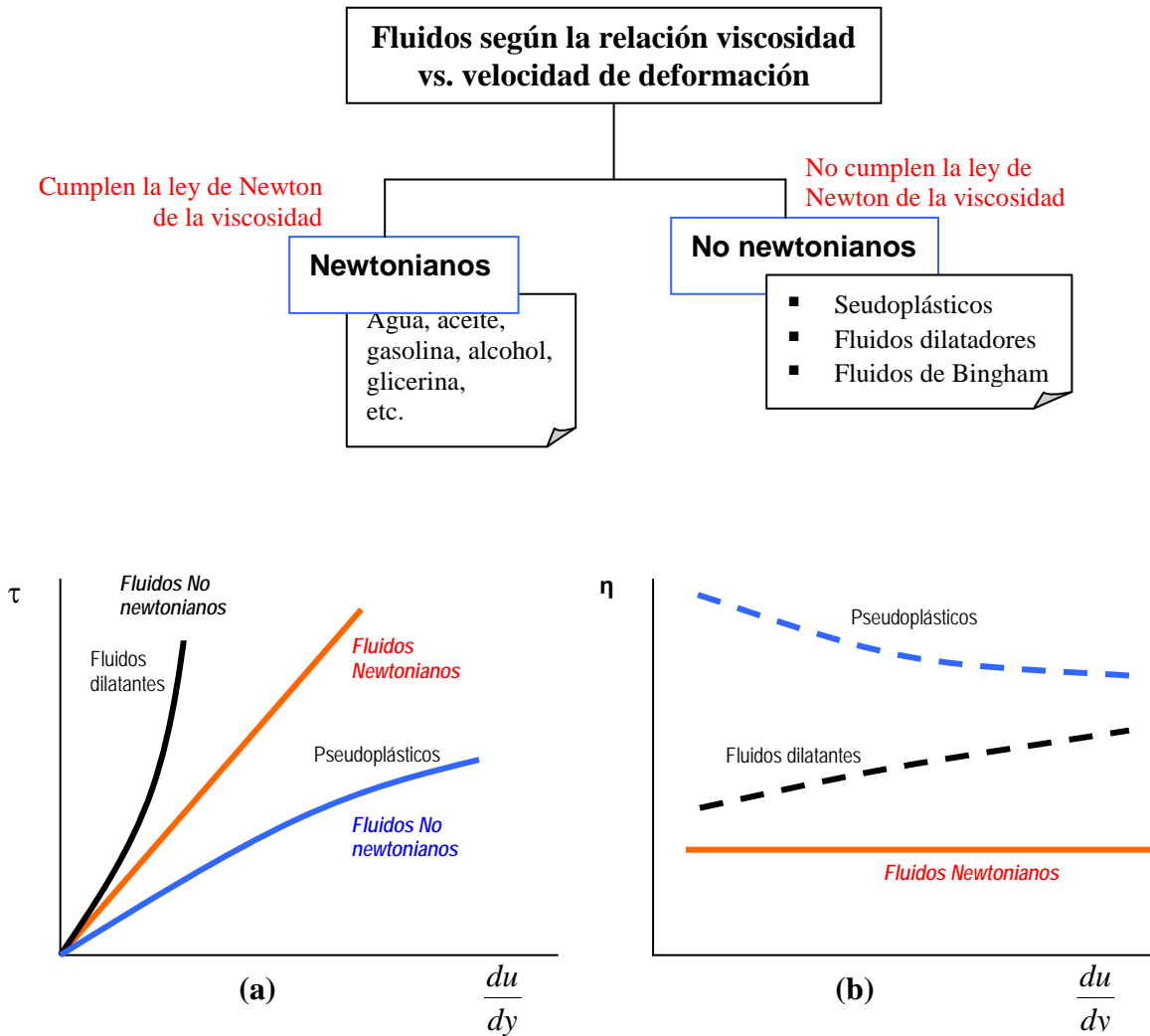


Figura 1.5 Fluidos newtonianos y no newtonianos: (a) Esfuerzo cortante y (b) viscosidad aparente vs. Velocidad de deformación angular

Por lo general, los fluidos no newtonianos se clasifican con relación a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser independientes o dependientes del tiempo. Un gran número de ecuaciones empíricas se han propuesto para modelar las relaciones observadas entre τ y du/dy para fluidos independientes del tiempo. Para flujo unidimensional el modelo de la ley de potencia puede ser usado para muchas aplicaciones de ingeniería

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad 1.7.5$$

donde el exponente, n, es el índice de comportamiento del flujo y k, el índice de consistencia.

Esta ecuación se reduce a la ley de viscosidad de Newton para $n=1$ y $k = \mu$.

La ecuación anterior puede reescribirse en la forma

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy} = \eta \frac{du}{dy} \quad 1.7.6$$

donde, η , se denomina viscosidad aparente. La mayor parte de los fluidos no newtonianos tienen viscosidades aparentes que son relativamente altas comparadas con la viscosidad del agua.

Los fluidos en los cuales la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la relación de deformación ($n < 1$) se llaman pseudoplásticos. La mayoría de los fluidos no newtonianos pertenecen a este grupo (pulpa de papel en agua, soluciones poliméricas, suspensiones coloidales, etc.). Si la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la relación de deformación ($n > 1$) el fluido se llama dilatante (suspensiones de almidón y arena).

Un “fluido” (lodos de perforación, suspensiones de arcilla, pasta dental) se comportan como sólido hasta que se excede un esfuerzo de deformación mínimo, τ_0 , y exhibe subsecuentemente una relación lineal entre el esfuerzo y la relación de deformación, se conoce como plástico de Bingham o ideal. El modelo de esfuerzo de corte es:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \frac{du}{dy} \quad 1.7.7$$

✓ Variación de la viscosidad con la temperatura.

El aceite para motor, por lo general, es bastante difícil de vaciar cuando está frío, lo cual indica que tiene una viscosidad alta. Conforme la temperatura del aceite va aumentando, su viscosidad disminuye notablemente. Todos los fluidos exhiben este comportamiento en mayor o menor grado.

Los gases se comportan de manera diferente a los líquidos en el hecho de que la viscosidad aumenta al tiempo que aumenta la temperatura. También se tiene que la magnitud del cambio es, por lo general, menor que la que se da en los líquidos.

En general, la viscosidad de un fluido depende tanto de la temperatura como de la presión, aunque la presión influye débilmente en la viscosidad. Para los líquidos, tanto la viscosidad dinámica como la cinemática se consideran independientes de la presión, salvo para presiones extremadamente altas. Ocurre lo mismo en el caso de los gases para la viscosidad dinámica – para presiones moderadas- en cambio la viscosidad cinemática depende de la presión pues la densidad de un gas es directamente proporcional a la presión.

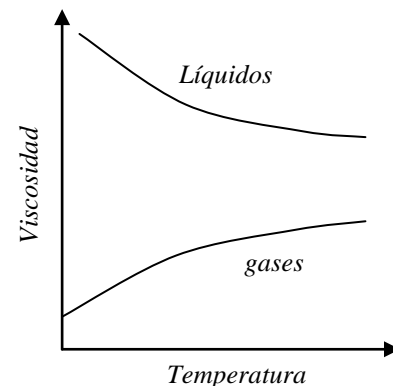


Figura 1.6. Variación de la viscosidad con la temperatura.

Indicé de viscosidad

Una medida de qué tanto cambia la viscosidad de un fluido con la temperatura está dada por su índice de viscosidad, referido en ocasiones como IV. Este indicador es especialmente importante en los aceites lubricantes y en los fluidos hidráulicos que se utilizan en equipos que deben operar en condiciones extremas de temperatura.

Este índice se define como un coeficiente que permite juzgar el comportamiento de la viscosidad de un fluido; está en función de la elevación o disminución de la temperatura a que está sometido el fluido. En el lenguaje común, la denominación S.A.E., seguida de un número, se utiliza

corrientemente para designar el índice de viscosidad de un aceite. Cuanto mayor sea el índice de viscosidad, tanto menor será la variación de la viscosidad de éste con las variaciones de temperatura.

Muchos asumen que dos aceites con el mismo grado de viscosidad ISO o SAE tendrán la misma viscosidad y comportamiento en todas las temperaturas operacionales. Las viscosidades ISO o SAE están establecidas a una temperatura estándar y es necesario calcular la viscosidad a las temperaturas operacionales para determinar la funcionalidad de ese aceite. La variación de viscosidad depende del ÍNDICE DE VISCOSIDAD que tiene cada aceite.

La numeración ISO de un aceite es su grado de viscosidad a 40°C. Quiere decir por ejemplo que un aceite ISO 68 es un aceite cuya viscosidad a 40°C es 68 cSt ($\pm 10\%$).

La numeración SAE de un aceite es su grado de viscosidad a 100°C. Por ejemplo todos los aceites SAE 40 deben tener entre 12.5 cSt y 16.3 cSt a 100°C.

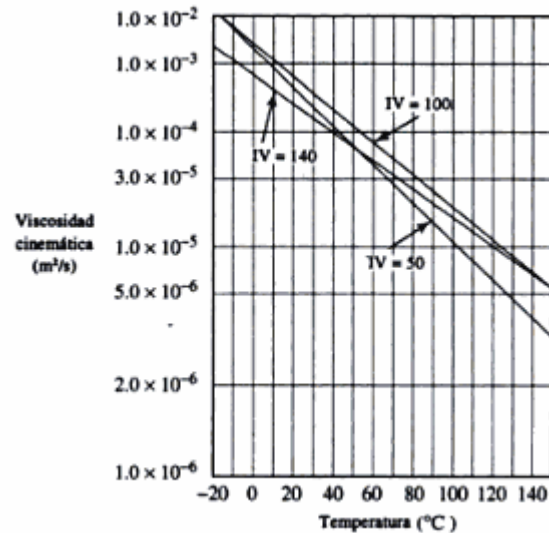


Figura 1.7. Variación vs. Temperatura.

Un fluido con un alto índice de viscosidad muestra un cambio pequeño de viscosidad con respecto a la temperatura, en tanto que un fluido con un bajo índice de viscosidad muestra un cambio grande en su viscosidad con relación a la temperatura.

La viscosidad de los líquidos se expresa en función de la temperatura por la siguiente correlación

$$\mu = a10^{b/(T-c)} \quad 1.7.8$$

donde T es la temperatura absoluta

a , b y c son constantes que se determinan empíricamente.

Para el agua: $a=2.414 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$; $b=247.8 \text{ K}$ y $c=140 \text{ K}$. Valores que permiten estimar la viscosidad del agua con un error de 2.5% para un rango de temperaturas de $0 - 370 \text{ }^\circ\text{C}^4$

Para los gases, la viscosidad se expresa en forma aproximada mediante la siguiente correlación⁵:

$$\mu = \frac{a\sqrt{T}}{1+b/T} \quad 1.7.9$$

donde T es la temperatura absoluta

a , b constantes empíricas

$a = 1.458 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{1/2})$ y $b=110.4 \text{ K}$ para el aire en condiciones atmosféricas.

Los siguientes links te permiten acceder a sitios web en los que puedes obtener mayor información práctica, como por ejemplo realizar cálculos de índice de viscosidad de aceites lubricantes.

<http://www.widman.biz/Seleccion/Viscosidad/Conversiones/Modulos/modulos.html>

<http://www.widman.biz/Seleccion/Viscosidad/viscosidad.html>

⁴ Touloukian et al., 1975; citado por Yunus A. Cengel; Mecánica de Fluidos.

⁵ Correlación de Sutherland (de The U.S. Standard Atmosphere). Citado por Yunus A. Cengel; Mecánica de Fluidos.

Formulas para la estimación de la variación de la viscosidad con la temperatura.

Aceites.

Existen varias formulas que nos permiten evaluar la variación de la viscosidad del aceite al cambiar la temperatura. Las más importantes son:

Poiseuille (1840)

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha T + \beta T^2}$$

donde

μ_0 es la viscosidad dinámica a 0 gC.

T es la temperatura en °C.

α, β son coeficientes constantes.

Andrade (1930)

$$\mu = Ae^{\frac{B}{T}}$$

donde

A, B , son constantes

T es la temperatura absoluta.

En forma logarítmica, esta ecuación es

$$\ln \mu = A + \frac{B}{T}$$

Barr

$$[\log(\nu + 0.8)]^{0.3} = A + \frac{B}{T}$$

donde

ν es la viscosidad cinemática en mm^2/s

Ecuación de la viscosidad ASTM

fue deducida por Walther:

$$\log(\log Z) = A - B \log T$$

donde T es la temperatura absoluta y

$$Z = \nu + 0.7 + C - D + E - F + G - H$$

Los coeficientes $C \dots H$ son, a su vez, funciones de ν

$$C = \exp(-1.14883 - 2.65868\nu)$$

$$D = \exp(-0.0038308 - 12.5645\nu)$$

$$E = \exp(5.46491 - 37.6289\nu)$$

$$F = \exp(13.0458 - 74.6851\nu)$$

$$G = \exp(37.4619 - 192.643\nu)$$

$$H = \exp(80.4945 - 400.468\nu)$$

Si la viscosidad no es demasiado baja, algunos de los términos se pueden despreciar.

Para calcular la viscosidad a una temperatura dada, se puede utilizar la expresión más simple:

$$Z = \nu + 0.7 + \exp(-1.47 - 1.84\nu - 0.51\nu^2)$$

$$\nu = (Z - 0.7) - \exp[-0.7487 - 3.295(Z - 0.7) + 0.6119(Z - 0.7)^2 - 0.3193(Z - 0.7)^3]$$

1.8 Otras propiedades de los fluidos

✓ Compresibilidad

A cada incremento/decremento de la presión que se ejerce sobre un fluido le corresponde una contracción/expansión del fluido. Esta deformación (cambio del volumen) es llamada elasticidad o más concretamente compresibilidad. El parámetro usado para medir el grado de compresibilidad de una sustancia es el módulo volumétrico de elasticidad, E_v . Definido operacionalmente por la siguiente ecuación

$$E_v = - \frac{dp}{\frac{dV}{V}} = \frac{dp}{\frac{d\rho}{\rho}} \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad 1.8.1$$

Las unidades para E_v son las mismas que para la presión. ¿por que?

Los líquidos son en general muy poco compresibles (prácticamente incompresibles), lo que indica que necesitaríamos grandes cambios de presión para lograr un cambio muy pequeño en el volumen de un líquido. Así por ejemplo para el agua $E_v = 2.179 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$. Entonces un incremento de la presión de 10^6 N/m^2 daría lugar a un cambio de un 0.05% del volumen.

El módulo volumétrico de elasticidad de un fluido es una medida de cuán difícil es comprimirlo.

El módulo volumétrico no es normalmente aplicado a los gases, ya que en estos caso se aplican en general ecuaciones de la termodinámica. Así para un gas ideal a temperatura constante se tiene.

$$p = \rho RT \Rightarrow \frac{dp}{d\rho} = RT$$

$$\therefore E_v = \rho RT = p \quad 1.8.2$$

Tabla 1.3
Valores del módulo volumétrico para algunos líquidos.
(fuente: mecánica de fluidos aplicada, Robert L. Mott, Prentice Hall, 1996)

Líquido	Módulo volumétrico MPa
Alcohol Etílico	896
Benceno	1062
Aceite industrial	1303
Agua	2179
Glicerina	4509
Mercurio	24750

✓ Tensión Superficial

El efecto de las fuerzas intermoleculares es de tirar las moléculas hacia el interior de la superficie de un líquido, manteniéndolas unidas y formando una superficie lisa.

La tensión superficial mide las fuerzas internas que hay que vencer para poder expandir el área superficial de un líquido. La energía necesaria para crear una nueva área superficial, trasladando las moléculas de la masa líquida a la superficie de la misma, es lo que se llama tensión superficial.

A mayor tensión superficial, mayor es la energía necesaria para transformar las moléculas interiores del líquido a moléculas superficiales. El agua tiene una alta tensión superficial, por los puentes de hidrógeno.

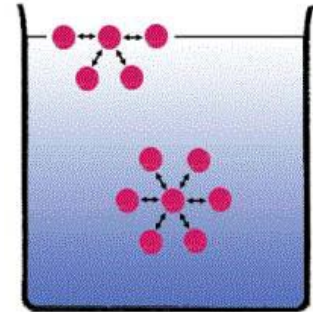


Figura 1.8
Tensión superficial

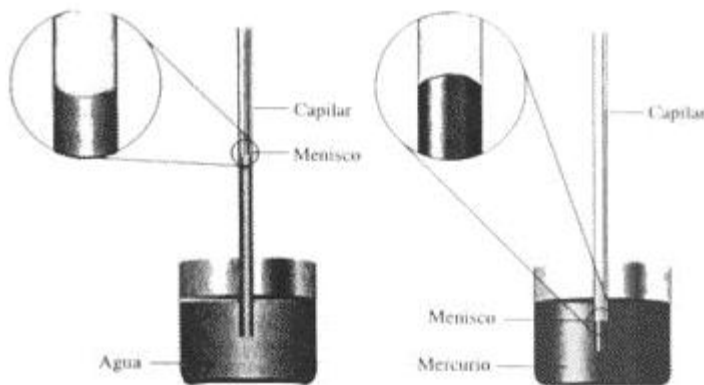


Figura 1.9: AGUA: Fuerzas de adhesión > Fuerzas de cohesión
MERCURIO: Fuerzas de cohesión > Fuerzas de adhesión

de cohesión, en cambio en caso del mercurio, las fuerzas de cohesión son mayores que las de adhesión y el menisco tiene los bordes curvados hacia abajo.

✓ Presión de Vapor

La Presión de Vapor de un líquido es la presión ejercida por su vapor cuando ambas fases están en equilibrio dinámico.

La presión de vapor aumenta con la temperatura porque las moléculas del líquido caliente se mueven con más energía. Prácticamente toda la vaporización tiene lugar en la superficie del líquido.

1.9 El gas ideal

En el caso ideal de que las moléculas de un fluido interaccionen sólo por las colisiones perfectamente elásticas, es decir **carentes de atracción intermolecular se dice que el fluido es un gas perfecto o ideal.**

El comportamiento de muchos gases se aproxima al gas ideal, es el caso del aire y el oxígeno.

La relación entre la presión, temperatura, volumen y número de moles está dada por la teoría cinética de los gases.

✓ Capilaridad

La capilaridad es el fenómeno por el cual un líquido asciende por tubos muy estrechos. El líquido asciende debido a las fuerzas atractivas entre sus moléculas y la superficie interior del tubo. Estas fuerzas son las llamadas **fuerzas de adhesión.**

El menisco de un líquido es la superficie curvada que forma en un tubo estrecho. Para el agua tiene la forma ascendente (como una U) porque las fuerzas que provocan la adhesión de las moléculas de agua al vidrio son mayores que las fuerzas

▪ Ecuaciones de estado

Las variables termodinámicas, como la presión p , la temperatura T , el volumen V , y el número de moles n en un sistema térmico no son independientes entre sí; las relaciones entre ellas se llaman ecuaciones de estado. Los gases ideales obedecen la ley de Boyle.

$$\frac{pV}{n} = \text{constant} \quad \text{con} \quad T = \text{constante} \quad 1.9.1$$

También se cumple que:

$$p = \text{cte} \cdot T \quad \text{con} \quad V = \text{constante} \quad 1.9.2$$

Estas dos ecuaciones combinadas dan como resultado la ecuación general de los gases ideales:

$$\frac{pV}{T} = nR \quad \text{donde} \quad R = \text{constante} \quad \text{universal} \quad 1.9.3$$

1.10 Fuerzas másicas y de superficie.- Tensión

La hipótesis del *fluido como medio continuo* nos permite pensar en una distribución continua, en la masa fluida, de las fuerzas resultantes de las interacciones del fluido con su entorno. Sin embargo para fines prácticos es conveniente distinguir estas interacciones, teniendo en cuenta la forma como actúan sobre la masa fluida, en dos tipos de fuerzas:

- Fuerzas másicas
- Fuerzas superficiales

✓ **Las fuerzas másicas** actúan a distancia es decir que no es necesario que haya contacto físico entre la fuente de la fuerza y el medio fluido. Estas fuerzas se deben a los campos de fuerzas como por ejemplo: campo gravitacional, campo magnético, campo eléctrico. Y se **distribuyen en todo el volumen de la masa fluida**.

✓ **Las fuerzas de superficie** incluyen todo tipo de **fuerzas debidas al contacto directo** del medio fluido con su entorno. Estas fuerzas se distribuyen en toda la superficie que entra en contacto directo con el medio exterior. Por ello se denominan fuerzas superficiales o de contorno.

Las fuerzas de superficie merecerán mayor atención en estos apuntes, pues son las que adquieren mayor relevancia en la mecánica de los fluidos y sus aplicaciones prácticas en la ingeniería mecánica.

Las fuerzas sobre los fluidos se dividen en internas y externas. Las primeras son fuerzas relacionadas con la presión, que son una consecuencia natural de la fluidez, o sea de la propiedad que tienen los fluidos a ponerse en movimiento bajo la acción de cualquier fuerza. Dentro de las fuerzas internas también están las debidas a la viscosidad, o sea la resistencia que presentan los fluidos a ponerse en movimiento provocado por la fricción que hay entre las diferentes capas de fluido. Los llamados fluidos ideales presentan una viscosidad despreciable a diferencia de los viscosos, los cuales presentan una viscosidad no nula. En la segunda categoría de las fuerzas, las llamadas externas, son fuerzas que al igual que en los sólidos actúan sobre el volumen. De ellas, la más común e importante es el peso del fluido.

✓ **Tensión**

El concepto de tensión (esfuerzo) es un concepto matemático que permite describir la forma como las fuerzas de superficie que actúan sobre las fronteras del medio fluido se transmiten a través de él. Para entender este mecanismo de transferencia, consideremos una pequeña porción finita, ΔA , de la superficie del contorno de un fluido, sobre la que actúa la fuerza superficial ΔF , resultante de las fuerzas transmitidas desde el exterior al elemento de superficie⁶, tal como se muestra en la figura.

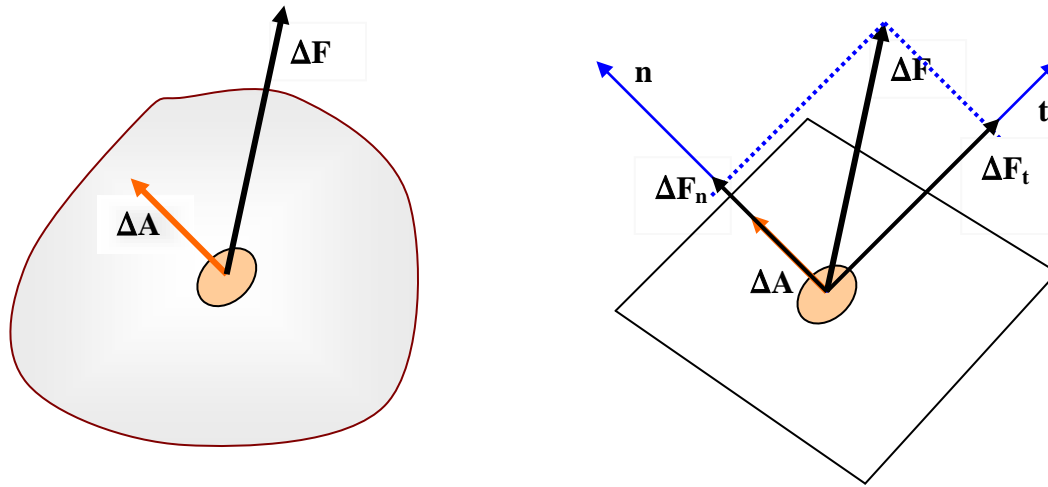


Figura 1.10
Esfuerzo en un medio fluido considerado como medio continuo

En la figura también se muestra, que la fuerza ΔF , ha sido descompuesta, por conveniencia, en dos componentes ortogonales ΔF_n y ΔF_t según la dirección normal, \mathbf{n} , y tangencial, \mathbf{t} , al elemento de área ΔA . esto nos permite definir ahora la tensión normal, σ , y la tensión tangencial o cortante, τ , en un punto como el límite de la razón $\Delta F/\Delta A$, cuando el área, ΔA , tiende a cero.

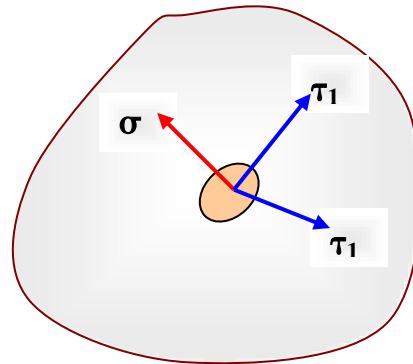
$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} = \frac{dF_n}{dA} \qquad \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A} = \frac{dF_t}{dA} \qquad 1.10.1$$

Se puede decir entonces que σ y τ son componentes de una fuerza por unidad de área en un punto del medio fluido.

⁶ Por nuestros estudios de física básica sabemos que en general un sistema de fuerzas se reduce a una fuerza **resultante** y un **par**, sin embargo en este caso dadas las dimensiones infinitesimales del elemento superficial, el par actuando sobre dicho elemento de superficie tiende a cero, debido a que todas las fuerzas tienden ser uniformes y paralelas, en el límite. Por ello en este análisis se desprecia el par.

En la práctica la fuerza tangencial, $\Delta \mathbf{F}_t$, se descompone a su vez en dos componentes ortogonales en el plano tangente al elemento de superficie $\Delta \mathbf{A}$. Esto da lugar a tres componentes de esfuerzo en el elemento de superficie, como se ve en la figura.

Figura 1.11
 Componentes del esfuerzo en el elemento de superficie dA



Al tratar con magnitudes vectoriales tales como la fuerza, se acostumbra considerar las componentes en un sistema ortogonal de coordenadas. En coordenadas rectangulares, se puede considerar los esfuerzos actuando sobre planos cuyas normales trazadas hacia fuera se encuentran en las direcciones x, y o z. Así para la cara x, se tiene

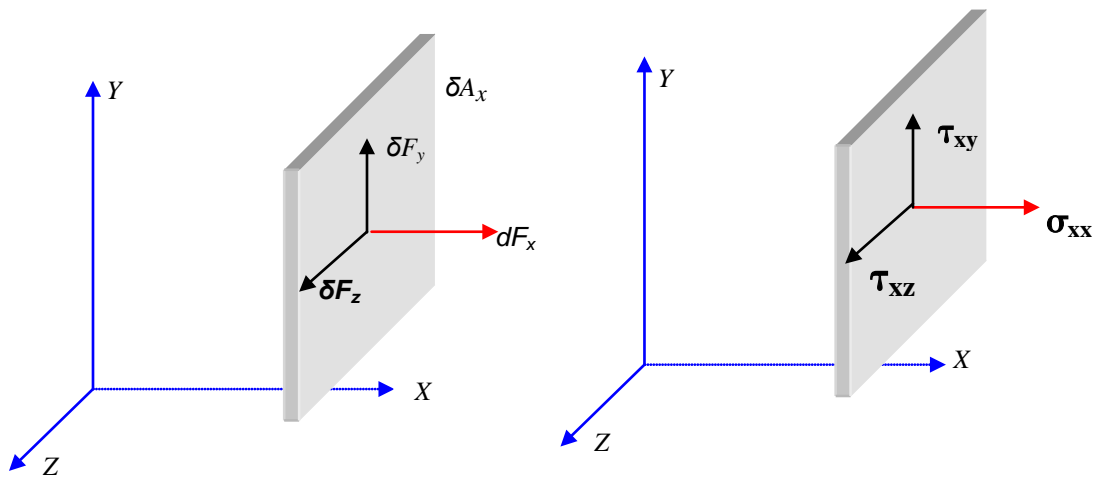


Figura 1.12 Componentes de fuerza (a) y componentes de esfuerzo (tensión), sobre el elemento diferencial de área, dA_x .

Con relación a la figura 1.9, se pueden escribir las expresiones de las tres componentes de esfuerzo mostradas:

$$\sigma_{xx} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_x}; \tau_{xy} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \frac{\delta F_y}{\delta A_x}; \tau_{xz} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \frac{\delta F_z}{\delta A_x}$$

En la figura 1.13 se muestra el caso general de las 9 componentes de esfuerzo en las caras de un elemento diferencial de fluido. Para identificar las tensiones se usan dos subíndices. El primer subíndice indica la dirección normal a la cara en la cuál actúa la tensión y el segundo indica la dirección de la tensión.

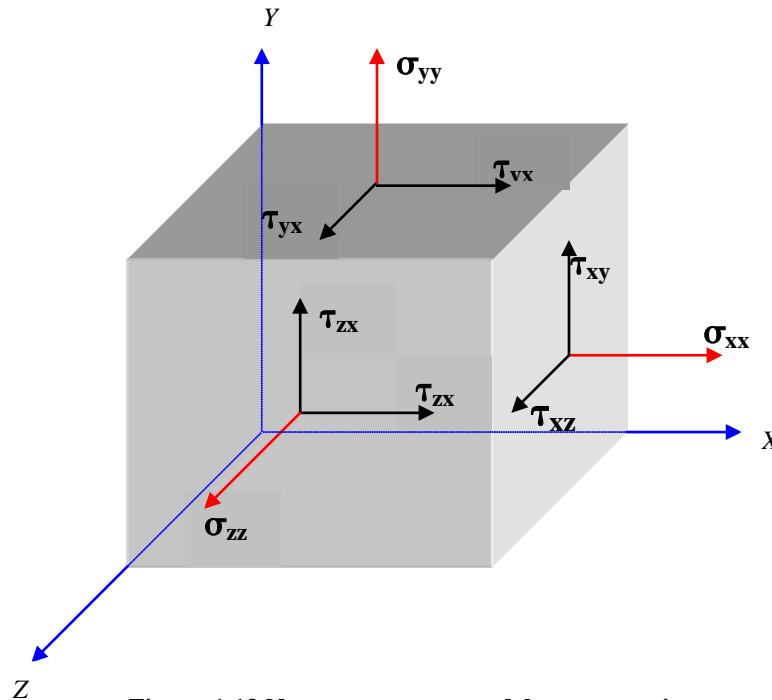


Figura 1.13 Nueve componentes del tensor tensiones

• Cuestiones para responder

- 1.1. ¿Cuál es la diferencia entre propiedades intensivas y extensivas?
- 1.2. ¿Qué es la gravedad específica? ¿Cómo está relacionada con la densidad?
- 1.3. ¿A presiones más elevadas el agua hierve a temperaturas más altas? Explique.
- 1.4. ¿Por qué se ha establecido el concepto de tensión?
- 1.5. ¿Por qué se representa mediante una notación compleja las tensiones ligadas a un elemento infinitesimal ortogonal?
- 1.6. ¿Puede un fluido soportar esfuerzo de tensión normal positivos (tracción)? ¿tiene algo que ver la tensión normal con la presión p ?
- 1.7. ¿Puede ser negativo el coeficiente de compresibilidad de un fluido? ¿Qué se puede decir acerca del coeficiente de expansión volumétrica?
- 1.8. ¿Qué es un fluido Newtoniano? Es el agua un fluido Newtoniano?
- 1.9. Considere dos pequeñas bolas de vidrio idénticas que se deja caer en dos recipientes idénticos, uno lleno con agua y otro con aceite. ¿Cuál de las dos bolas llegará primero al fondo del recipiente? ¿Por qué?
- 1.10. Algunas de las siguientes sustancias: breá, barro, cera, gelatina, pasta de dientes, crema de afeitar, arena. Presentan características de comportamiento tanto sólido como fluido bajo diferentes condiciones. Explique y dé ejemplos.

• Preguntas de opción múltiple

- 1.11. La viscosidad absoluta μ de un fluido es fundamentalmente función de la

- a) Densidad b) temperatura c) presión d) velocidad e) tensión superficial
- 1.12. Un aceite tiene una viscosidad cinemática de $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y una densidad relativa de 0.8 ¿cuál es su viscosidad dinámica $2n \text{ kg/m-s}$
- a) 0.08 b) 0.10 c) 0.125 d) 1.0 e) 1.25

• **Problemas a resolver**

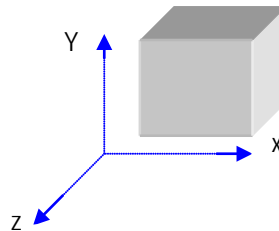
- 1.13. La distribución de velocidad para flujo laminar entre placas paralelas está dada por

$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{2y}{h} \right)^2 \right]$$

donde h es la distancia que separa las placas y el origen se ubica en el punto medio entre las mismas . Considere un flujo de agua a 15°C , $u_{\max} = 0.30 \text{ m/s}$ y $h = 0.50 \text{ mm}$. Calcule el esfuerzo de corte en la placa superior e indique su dirección-

- 1.14. Un eje con diámetro exterior de 18 mm gira 20 revoluciones por segundo dentro de una chumacera estacionaria de 60 mm de longitud. Una delgada película de aceite de 0.2 mm de espesor llena el anillo concéntrico entre el eje y la chumacera. El momento de torsión necesario para hacer girar el eje es 0.0036 N-m. estime la viscosidad del aceite que llena el claro.

- 1.15. Sobre el elemento fluido mostrado, indique los esfuerzos posibles representados por $\tau_{zx} = - 500 \text{ N/m}^2$ y $\sigma_{yy} = 750 \text{ N/m}^2$



Bibliografía

- Frank M. White; Mecánica de Fluidos; McGraw-Hill; 2004; V Ed.
- Irving Herman Shames Mechanics of fluids; McGraw-Hill , 2003, 4th Ed.
- Robert L. Mott, Mecánica de Fluidos Aplicada, Prentice-Hall;2006; IV Ed.
- Robert W. Fox Introducción to Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc. IV Ed.
- Claudio Mataix; Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas; Alfaomega;II Ed.
- Yunus Cengel; Mecánica de Fluidos; McGraw-Hill; 2006.