



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
MERIDA VENEZUELA

Mecánica de Fluidos

Prof. *Jesús Muñoz*

¿Qué es la Mecánica de Fluidos?

Es una rama de la mecánica que se ocupa de estudio de los fluidos en movimiento o en reposo y los efectos consiguientes sobre los contornos, que pueden ser una superficie sólida u otro fluido.

- Se basa en la teoría y la experimentación.
- Dispone de un conjunto de leyes de conservación bien documentadas



Mecánica de Fluidos

La ***hidrostática*** es la parte de la mecánica de fluidos que estudia las leyes de comportamiento de los fluidos en equilibrio.

La ***hidrodinámica*** es la parte de la mecánica de fluidos que estudia las leyes de comportamiento de los fluidos en movimiento.

Definición de Fluido

Es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene.

También se puede definir como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de un esfuerzo de corte, sin importar cuan pequeño pueda ser este esfuerzo.

Definición de Fluido

Los fluidos abarcan las fases líquida y gaseosa de las formas físicas en las cuales existe la materia.

- Los líquidos a una presión y temperatura determinadas ocupan un volumen determinado.
- Los gases a una presión y temperatura determinadas tienen también un volumen determinado, pero puestos en libertad se expansionan hasta ocupar el volumen completo del recipiente que lo contiene, y no presentan superficie libre.

Definición de Fluido

Los fluidos están formados por un gran número de *partículas*, cada una de las cuales se considera como una pequeña masa de fluido formada por un gran número de moléculas que ocupan un volumen pequeño. Las partículas se mueven con el flujo como una unidad.



Condición de no deslizamiento

El flujo de fluidos con frecuencia se encuentra limitado por superficies sólidas las cuales afectan el flujo. El agua en un río no puede fluir a través de rocas grandes y las rodea. La velocidad normal del agua hacia la superficie de la roca debe ser cero, deteniéndose por completo en ésta. Lo que no es tan obvio es que el agua que se aproxima a la roca desde cualquier ángulo también se detiene por completo en la superficie y por consiguiente la velocidad tangencial en la superficie también es cero.



Condición de no deslizamiento

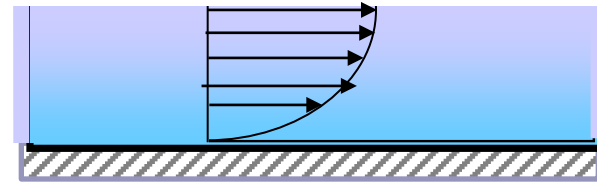
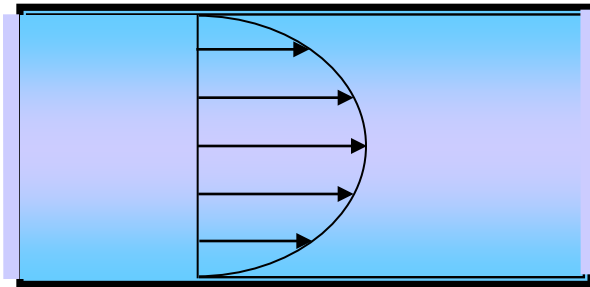
Todas las observaciones experimentales indican que un fluido en movimiento en contacto con una superficie sólida estacionaria, llega a detenerse completamente en la superficie y adquiere una velocidad cero. También, una capa de fluido adyacente a una superficie en movimiento tiene la misma velocidad que ésta. Un fluido en contacto directo con un sólido se pega a la superficie debido a los efectos viscosos y no hay deslizamiento.

Ocurre un fenómeno semejante para la temperatura. Cuando se ponen en contacto dos cuerpos a temperaturas diferentes, se tiene transferencia de calor hasta que los dos cuerpos adquieren la misma temperatura en los puntos de contacto. A este efecto se le llama condición de no salto de temperatura.

Condición de no deslizamiento

La propiedad del fluido responsable de la condición de no deslizamiento y del desarrollo de la capa límite es la viscosidad

La capa límite es la región adyacente a la superficie sólida en la cual los efectos viscosos y por consiguiente, los gradientes de velocidad son significativos.



Superficies sólidas estacionarias

The top of the slide features five circles arranged horizontally. From left to right, the first, third, and fifth circles are solid light purple. The second and fourth circles are white with a light purple outline.

Medio Continuo

Se trata el fluido como una sustancia infinitamente divisible, dejando de lado el comportamiento de las moléculas individuales.

Se consideran los efectos promedio o macroscópicos de muchas moléculas.

Permite considerar que cada propiedad del fluido tiene un valor definido en cada punto en el espacio.

La suposición del medio continuo es válida al tratar el comportamiento de fluidos bajo condiciones normales.

Los gases están formados por átomos espaciados con amplitud, sin embargo se descarta su naturaleza atómica y se ve como una materia homogénea y continua, sin agujeros.

A vacíos muy altos o elevaciones muy grandes debe aplicarse la teoría del gas rarificado o enrarecido.

Métodos de Análisis

- **Descripción Lagrangiana:**

Es el estudio de la mecánica de partículas, donde nos concentramos en una partícula individual y observamos el movimiento de la partícula: posición, velocidad y aceleración como una función del tiempo.

Con esta descripción podemos seguir muchas partículas y tomar nota de la influencia de unas sobre otras, tarea que se vuelve abrumadora cuando el número de partículas se vuelve extremadamente grande como en el flujo de fluidos.

Métodos de Análisis

- **Descripción Euleriana:**

Este es el método de descripción apropiado para la mecánica de fluidos. Este método se basa en la descripción de campo de las propiedades como la velocidad, la presión etc.

Se calcula por ejemplo el campo de presiones $p(x,y,x,t)$ del flujo y no los cambios de presión $p(t)$ que experimenta una partícula al moverse.

Métodos de Análisis

En la descripción euleriana del flujo se observa la velocidad de las partículas que pasan por un punto, la razón de cambio de la velocidad como una función de la posición en la región de estudio y se determina si la velocidad está cambiando con el tiempo en un punto en particular $V(x,y,z,t)$.

Sistemas de Dimensiones y Unidades

Dimensiones primarias o fundamentales:
Son aquellas cantidades físicas a partir de las cuales todas las demás pueden formarse. Se tratan simplemente como dimensiones, las cuales son en términos de un sistema particular de dimensiones: longitud, tiempo, masa y/o fuerza y temperatura.

M, F, L, t, T



Sistemas de Dimensiones y Unidades

Las unidades: son los nombres y magnitudes arbitrarios que son adoptados como estándares de medición para las dimensiones primarias. Por ejemplo la dimensión primaria de longitud puede medirse en unidades de metros, pies yardas o millas, relacionadas entre sí por medio de factores de conversión de unidades.

Sistemas de Dimensiones

Corresponden a maneras diferentes de especificación de las dimensiones primarias.

1. Masa $[M]$, longitud $[L]$, tiempo $[t]$, temperatura $[T]$.
2. Fuerza $[F]$, longitud $[L]$, tiempo $[t]$, temperatura $[T]$.
3. Fuerza $[F]$, Masa $[M]$, longitud $[L]$, tiempo $[t]$, temperatura $[T]$.

Sistemas de Unidades de Ingeniería más comunes

El SI, abreviatura del Sistema Internacional de unidades se basa en el sistema de dimensiones MLtT.

La unidad de la masa es el kilogramo (kg).

La unidad de longitud es el metro (m).

La unidad de tiempo es el segundo (s).

Y la unidad de temperatura es el kelvin (K).

La fuerza es una dimensión secundaria y su unidad, el newton (N), se define a partir de la segunda ley de Newton como

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m/s}^2$$

Sistemas de Unidades de Ingeniería más comunes

El sistema de unidades inglés gravitacional, se basa en el sistema de dimensiones FLtT.

La unidad de la fuerza es la libra (lbf).

La unidad de longitud es el pie (pie).

La unidad de tiempo es el segundo (s).

Y la unidad de temperatura es el rankine (R).

La masa es una dimensión secundaria, la unidad de masa, el slug, se define en terminos de la segunda ley de Newton como

$$1 \text{ slug} = 1 \text{ lbf} \cdot \text{s}^2 / \text{pie}$$

Sistemas de Unidades de Ingeniería más comunes

El sistema de unidades de Ingeniería Inglés, se basa en el sistema de dimensiones FMLtT.

La unidad de la fuerza es la libra fuerza (lbf).

La unidad de masa es la libra masa (lbm).

La unidad de longitud es el pie (pie).

La unidad de tiempo es el segundo (s).

Y la unidad de temperatura es el rankine (R).

La segunda ley de Newton se escribe con $\vec{F} = \frac{m\vec{a}}{g_c}$

Donde g_c es la *constante de proporcionalidad*, tiene tanto dimensiones como unidades.

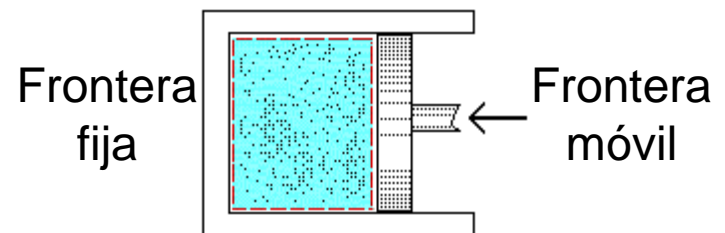
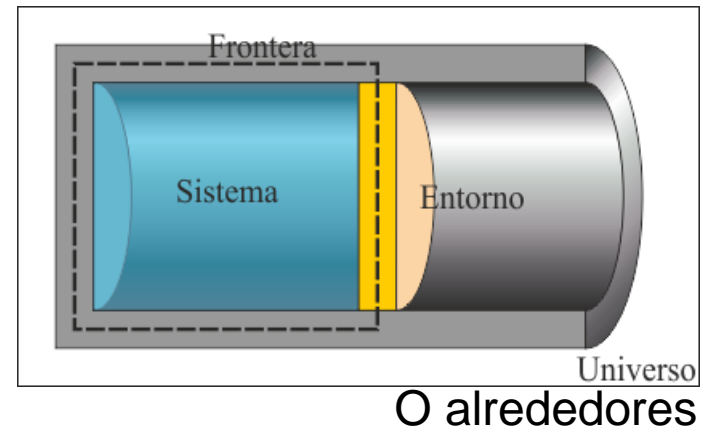
Sistemas de Unidades de Ingeniería más comunes

$$1lbf \equiv \frac{1lbm \times 32.2 \text{ pies} / s^2}{g_c}$$

$$g_c = 32.2 \text{ pies} \cdot lbm / lbf \cdot s^2$$

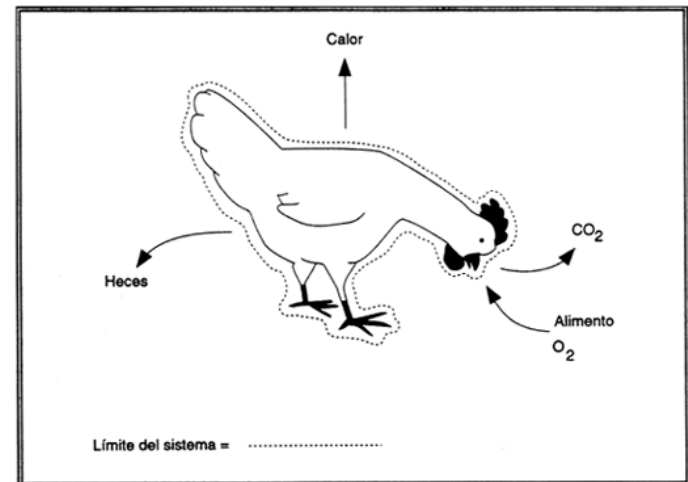
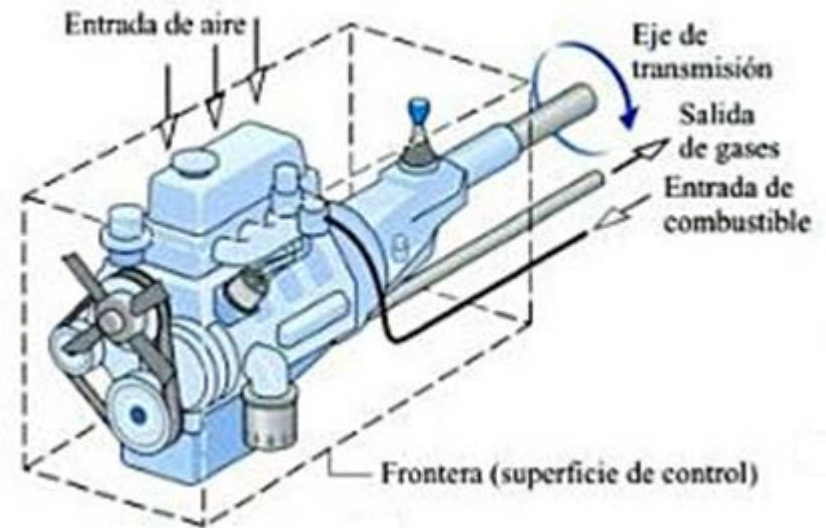
Sistema y volumen de control

- Un sistema se define como una cantidad de materia o una región en el espacio elegidas para su estudio. La masa o región que se encuentra afuera del sistema se conoce como los alrededores. La superficie real o imaginaria que separa el sistema de sus alrededores se llama frontera y puede ser fija o movable. La frontera tiene espesor cero y no ocupa ningún volumen. Si el sistema es cerrado conocido como masa de control consta de una cantidad fija de masa y ninguna masa puede cruzar la frontera, pero la energía en forma de calor y trabajo si, y el volumen no tiene que ser fijo. En un caso especial cuando no se permite que la energía cruce la frontera, se conoce como sistema aislado.



Sistema y volumen de control

- Un sistema abierto o volumen de control es una región seleccionada de modo adecuado en el espacio. Suele encerrar un aparato con flujo de masa, como un compresor, una turbina o una tobera, etc. Tanto masa como energía pueden cruzar las fronteras de un volumen de control. Cualquier región arbitraria puede ser el volumen de control y la elección adecuada hace el análisis mucho más fácil. Puede ser de tamaño y forma fijos como un difusor o puede tener fronteras móviles.



Propiedades termodinámicas de un fluido

El campo de velocidades es una de las propiedades más importantes e interactúa con las propiedades termodinámicas:

Presión P

Densidad ρ

Temperatura T

Al entrar en juego el trabajo y el calor:

Energía interna u

Entalpía $h = u + P/\rho$

Entropía s

Calores Específicos C_p y C_v .

Los efectos de fricción y conducción del calor requieren los denominados coeficientes de transporte:

Viscosidad absoluta o dinámica
 μ

Conductividad Térmica k

Presión y Temperatura

Presión: Es el esfuerzo de compresión en un punto en un fluido en reposo. En la dinámica de un fluido las diferencias o gradientes de presión son generalmente las responsables del flujo, especialmente cuando es en conductos. No es importante en el flujo de líquidos a baja velocidad, a menos que baje tanto para provocar **cavitación**. Es importante en los **flujos compresibles** de gases a alta velocidad.

Temperatura: Esta relacionada con el nivel de energía interna del fluido. Las propiedades de un líquido normalmente dependen de la temperatura. Puede variar considerablemente durante el flujo compresible de un gas. A pesar del uso de las escalas Celsius y Fahrenheit, muchas de las aplicaciones requieren para el cálculo el uso de escalas absolutas: Kelvin y Rankine.

$$R = {}^{\circ}F + 459.69$$

$$K = {}^{\circ}C + 273.16$$



Energía y Calores específicos

La energía puede existir en numerosas formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear.

La energía interna es la suma de las formas microscópicas de la energía, relacionadas con la estructura molecular de un sistema y su grado de actividad. Abarca las formas sensible y latente y se conocen como **energía térmica**. Incluye las formas de energía cinética y potencial a nivel molecular. El componente sensible explica los movimientos traslacional, rotacional y vibracional de los átomos y moléculas que componen la materia. El componente latente relaciona las fuerzas intermoleculares que influyen en el cambio de fase entre los estados sólido, líquido y vapor. En componente químico que explica la energía almacenada en las uniones químicas entre átomos; y un componente nuclear que explica las fuerzas de unión en el núcleo del átomo.

Energía y Calores específicos

La energía macroscópica está relacionada con el movimiento y la influencia de algunos efectos externos: la gravedad, el magnetismo, la electricidad y la tensión superficial. La energía que un sistema tiene como resultado de su movimiento en relación con algún marco de referencia se llama energía cinética, cuando todas las partes del sistema se mueven con la misma velocidad, la energía cinética por unidad de masa se expresa $V^2/2$. Donde V denota la velocidad del sistema en relación con algún marco fijo de referencia. La energía que un sistema tiene como resultado de su elevación en un campo gravitacional se llama energía potencial, en términos de unidad de masa es gz , donde g es la aceleración gravitacional y z es la elevación del centro de gravedad de un sistema en relación con algún plano de referencia seleccionado de manera arbitraria.

Energía y Calores específicos

En los sistemas con flujo de fluidos o volúmenes de control se encuentra la **entalpía** $h = u + Pv = u + P/\rho$. En donde P/ρ es la energía de flujo o trabajo de flujo, la cual es la energía por unidad de masa necesaria para mover el fluido y mantener el flujo, se trata como parte de la energía del fluido y la entalpía representa la energía microscópica de una corriente de fluido. Nótese que es una propiedad específica.

Un sistema compresible simple, es aquel en el cual la energía total consta de tres partes: energías interna, cinética y potencial y carece de efectos como el magnético, el eléctrico y la tensión superficial. En términos de unidad de masa $e = u + ec + ep$. Para sistemas abiertos el fluido que entra o sale del volumen de control tiene la forma adicional de energía de flujo P/ρ . El energía total de un fluido en movimiento en términos específicos es: $e = u + P/\rho + ec + ep = h + ec + ep$.

Con la entalpía se toma en cuenta el trabajo de flujo, energía asociada con la acción de empujar el fluido.

Energía y Calores específicos

Para un gas ideal, los cambios diferenciales y finitos en la energía interna y la entalpía se pueden expresar en términos de los calores específicos como: $du=C_vdT$ y $dh=C_pdT$. Donde C_v y C_p son los calores específicos a volumen constante y a presión constante del gas ideal y se usan a las temperaturas promedio. Los cambios finitos se pueden expresar como:

$$\Delta u=C_v\Delta T \text{ y } \Delta h=C_p\Delta T.$$

Para las sustancias incompresibles $C_v=C_p=C$ los calores específicos son idénticos. Para los líquidos $\Delta u=C\Delta T$. Con ρ constante la diferenciación de la entalpía $h=u + P/\rho$ da $dh=du + dP/\rho$. Si se integra el cambio de entalpía queda: $\Delta h=\Delta u+\Delta P/\rho \approx C\Delta T+\Delta P/\rho$. Por lo tanto:

$$\Delta h=\Delta u \approx C\Delta T \text{ para procesos a presión constante.}$$

$$\Delta h= \Delta P/\rho \text{ para los procesos a temperatura constante de los líquidos.}$$

Propiedades de los Fluidos

- **Densidad:** es la masa por unidad de volumen.

Donde $m \rightarrow \text{kg, SI}$

$V \rightarrow \text{m}^3, \text{SI}$

Agua a 4°C y presión normal $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad 1\rho = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Peso específico:** es el peso por unidad de volumen.

Donde $\rho \rightarrow \text{m}^3/\text{s}, \text{SI}$

$g \rightarrow 9.81 \text{ m/s}^2, \text{SI}$

Agua a 4°C y presión normal $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$

$$\gamma = \rho g \quad 1\gamma = \frac{1\text{N}}{\text{m}^3} = 1 \frac{1\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^2}$$

Propiedades de los Fluidos

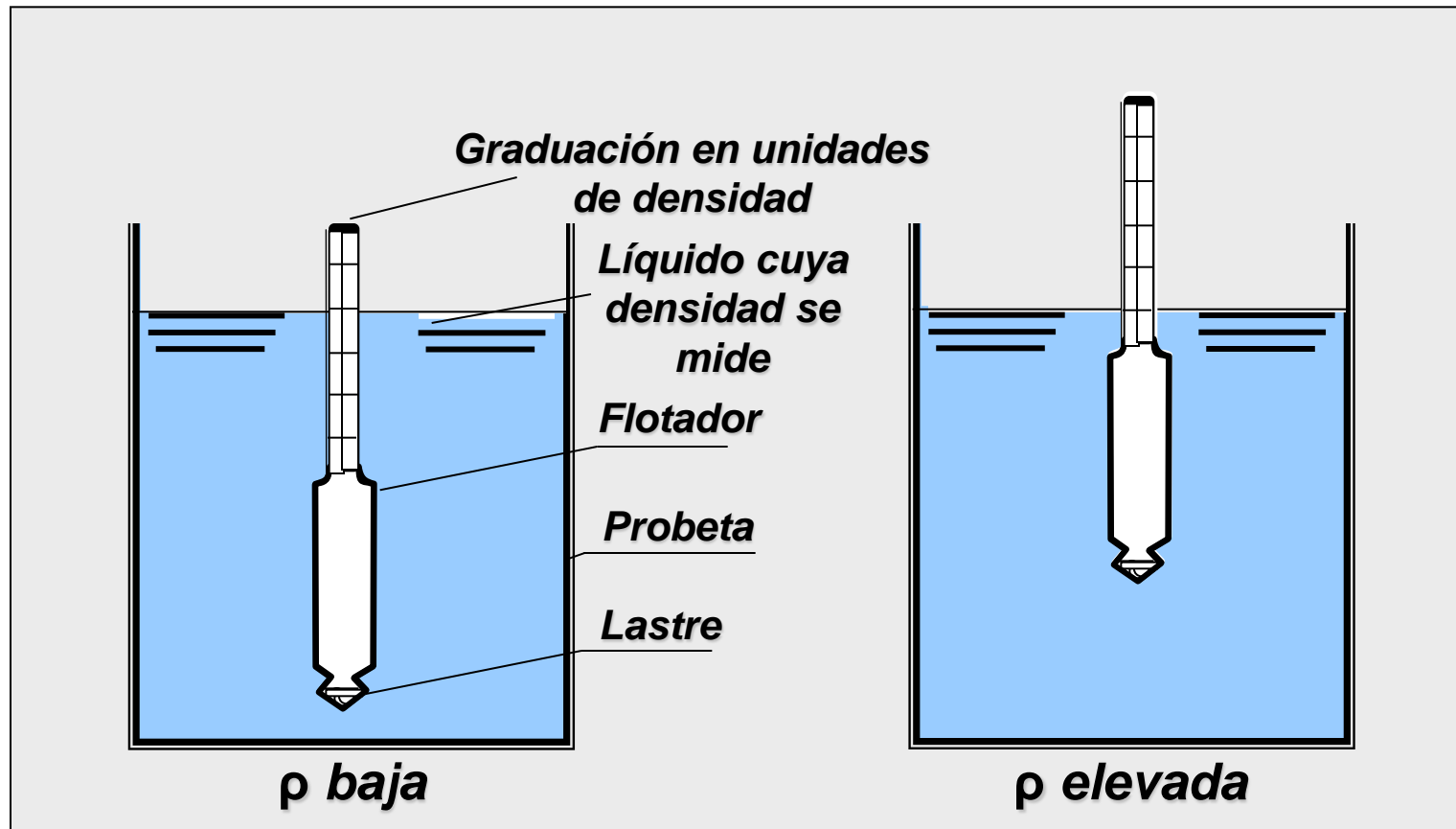
- **Densidad relativa:** es la relación entre la masa del cuerpo a la masa de un mismo volumen de agua a la presión atmosférica normal y 4 °C. Es una magnitud *adimensional*. La *DR* es función de la temperatura y la presión.

$$DR = \frac{\gamma}{\gamma_{H_2O_{4^\circ C y P_{atm}}}} \quad \rho_{H_2O_{4^\circ C y P_{atm}}} = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$DR = \frac{\rho}{\rho_{H_2O_{4^\circ C y P_{atm}}}} \quad \gamma_{H_2O_{4^\circ C y P_{atm}}} = 9810 \text{ N} / \text{m}^3$$

Propiedades. Medición de densidad

La densidad de un líquido se mide fácilmente con el densímetro.



Propiedades. Medición de densidad

$$P = \rho g V$$

Donde:

$P \rightarrow$ peso del líquido desalojado
por el flotador

$\rho \rightarrow$ densidad del líquido

$V \rightarrow$ volumen del líquido desalojado

$$P = W$$

Condición de equilibrio

$$W = \rho g V \quad \rho = \frac{W}{g V} = \frac{m}{V}$$

Propiedades de los Fluidos

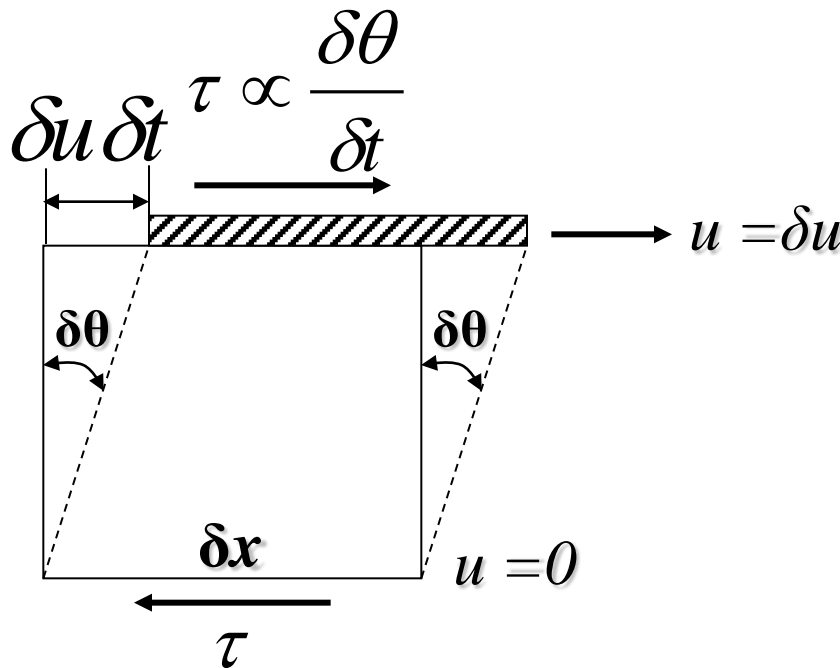
- Volumen específico:
es el recíproco de la
densidad.

Donde $\rho \rightarrow \text{kg/ m}^3$, SI

$$v = \frac{1}{\rho} \quad 1v = 1 \frac{m^3}{kg}$$

Propiedades de los Fluidos

- **Viscosidad absoluta o dinámica:** es aquella propiedad de un fluido con virtud de la cual ofrece resistencia al corte. Es el coeficiente de fricción interna del fluido.



$$\operatorname{tg} \delta\theta = \frac{\delta u \delta t}{\delta y}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{du}{dy}$$

**Ley de
viscosidad
de Newton**

Propiedades de los Fluidos

En SI:

$$\mu \rightarrow \text{Pa.s} = \text{kg/m.s}$$

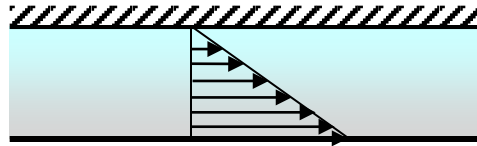
$$\tau \rightarrow \text{Pa} = \text{N/m}^2$$

En C.G.S $1 \text{ g/cm.s} = 1 \text{ P (Poise)}$

Propiedades de los Fluidos

Característica de la viscosidad absoluta:

- **du/dy es constante en régimen laminar**



- **Un fluido no ofrece resistencia a la deformación. En un sólido $\mu=\infty$ y $du/dy=0$**
- **En un fluido ideal $\mu=0$**
- **$\mu\neq 0$ fluido real \rightarrow resistencia a la deformación y pérdidas de energía en la corriente.**
- **En fluidos en reposo $u=0$, $du/dy=0$, solo existen esfuerzos normales o presión.**

Propiedades de los Fluidos

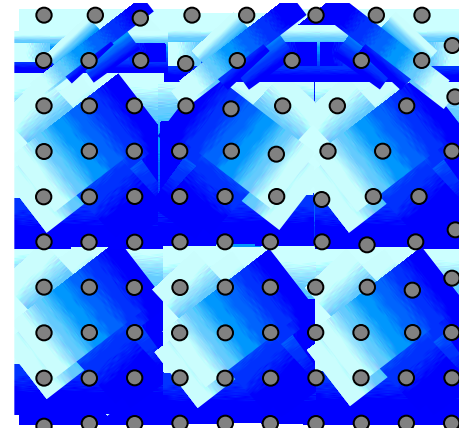
- La viscosidad depende mucho de la temperatura en los líquidos en los que las fuerzas de cohesión desempeñan un papel dominante. $\mu \downarrow$ con $\uparrow T$. En muchos casos las curvas se aproximan con la ecuación de Andrade

$$\mu = C_1 e^{C_2/T}$$

Donde las constante c_1 y c_2 se determinan a partir de mediciones.

Propiedades de los Fluidos

- En el caso de un gas son los choques moleculares los que originan los esfuerzos internos, al $\uparrow T$ y con ella la actividad molecular, $\mu \uparrow$



Clasificación de los Fluidos

Los fluidos se clasifican de acuerdo a la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la relación de deformación.

Fluidos Newtonianos:

μ depende de la presión y de la temperatura y no de du/dy

Fluidos No Newtonianos

Ejemplos de Fluidos Newtonianos

Los fluidos newtonianos son los más comunes tales como el agua, la gasolina, el aire, la mayor parte de los gases y en general los fluidos de pequeña viscosidad en condiciones normales.



Medición de Viscosidad

Considerando un fluido dentro de un pequeño espacio dentro de dos cilindros concéntricos.

El cilindro exterior se mueve a velocidad angular constante, para lo cual se requiere un momento de torsión.

El cilindro exterior permanece estacionario.

La resistencia a la rotación del cilindro se debe a la viscosidad.

El único esfuerzo existente que puede resistir el momento de torsión aplicado en el caso de este flujo simple es el esfuerzo cortante, que depende del gradiente de velocidad.

El espacio es pequeño, $h \ll R$, se puede suponer una distribución lineal para el gradiente de velocidades.

$$\tau = \mu \left| \frac{du}{dr} \right|$$

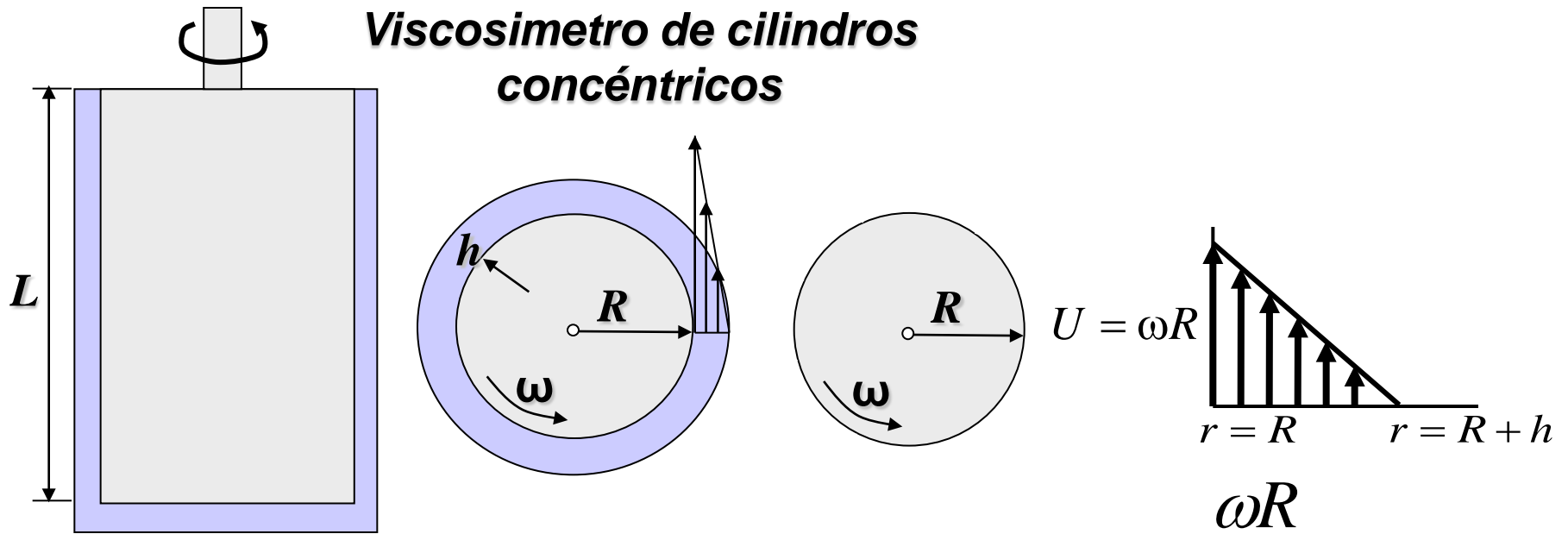
du/dr es el gradiente de velocidad.

u es la componente tangencial de la velocidad

$$\left| \frac{du}{dr} \right| = \frac{\omega R}{h}$$

Medición de Viscosidad

Viscosímetro de cilindros concéntricos



Torque = esfuerzo x área x brazo de momento

$$\tau = \mu \frac{\omega R}{h}$$

$$T = \tau \times 2\pi R L \times R \Rightarrow T = \mu \frac{\omega R}{h} \times 2\pi R L \times R = \frac{2\pi \mu \omega R^3 L}{h}$$

$$\mu = \frac{T \times h}{2\pi \omega R^3 L}$$

Fluidos No Newtonianos

La ciencia de los fluidos no newtonianos a los cuales pertenecen las grasas, materiales plásticos, metales líquidos, suspensiones, la sangre, etc; se llama reología.

Modelo de la ley de potencia

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

$\eta \rightarrow$ **viscosidad aparente**

Fluidos No Newtonianos

Fluidos No Newtonianos

**Independientes
del tiempo**

**Dependientes
del tiempo**

Tixotrópicos:

$\frac{du}{dy} = \text{cte}$ $\eta \downarrow$
con t

pinturas

Seudoplásticos $\downarrow \eta \uparrow \frac{du}{dy}$:

soluciones poliméricas,
suspensiones coloidales y pulpa de
papel en agua.

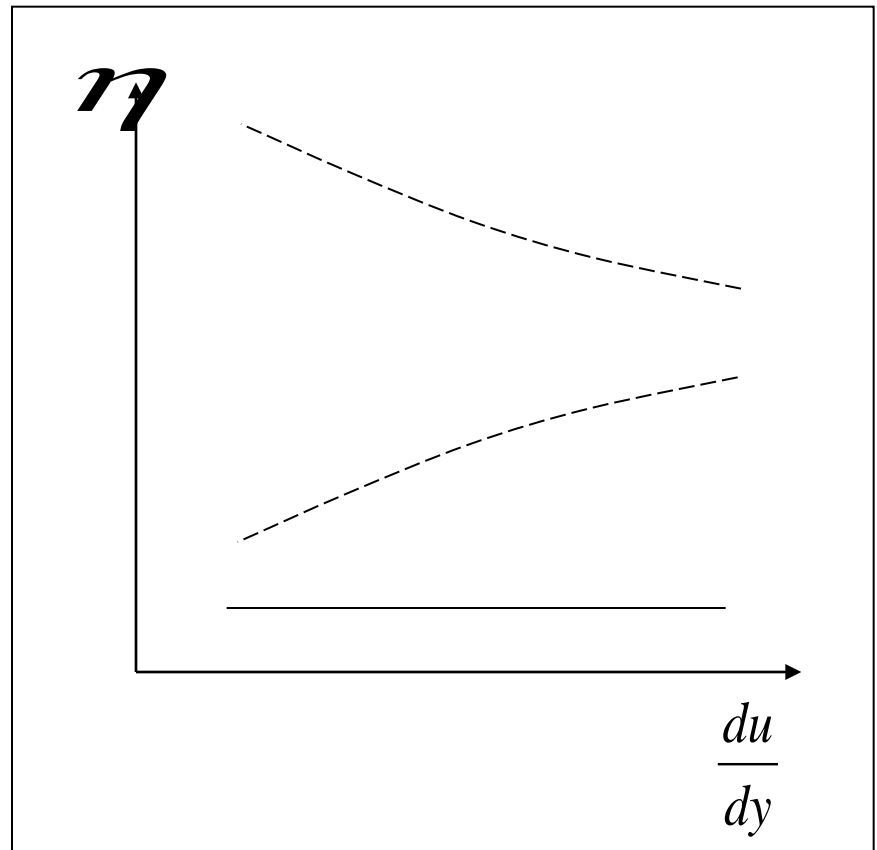
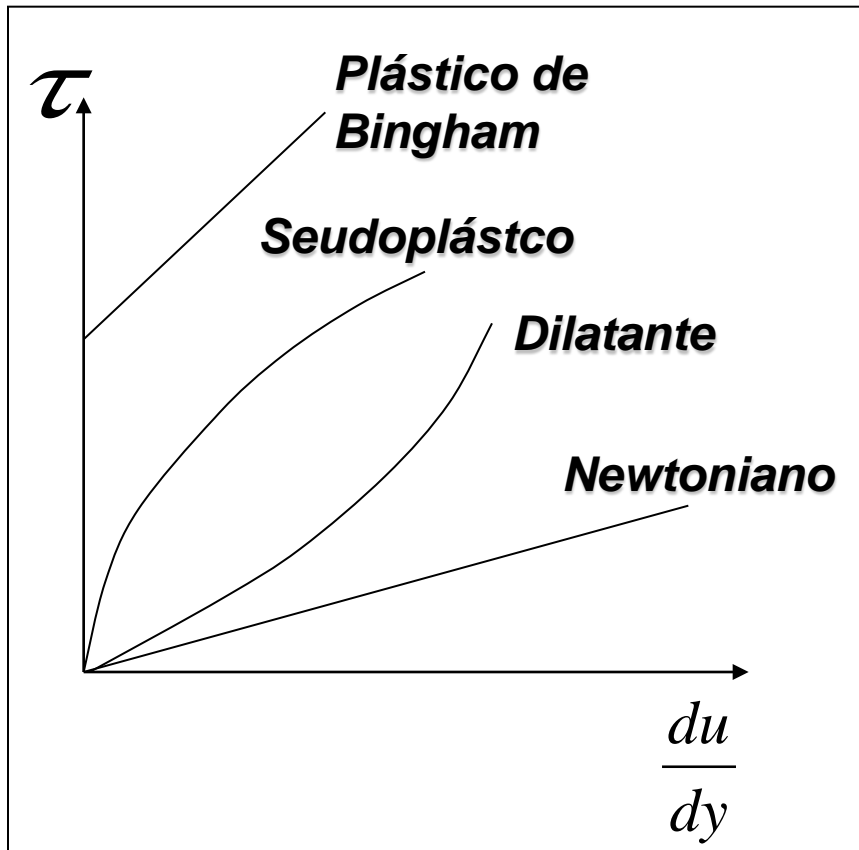
Dilatantes $\uparrow \eta \uparrow \frac{du}{dy}$:

suspensiones de almidón y de
arena (arenas movedizas,
lodos).

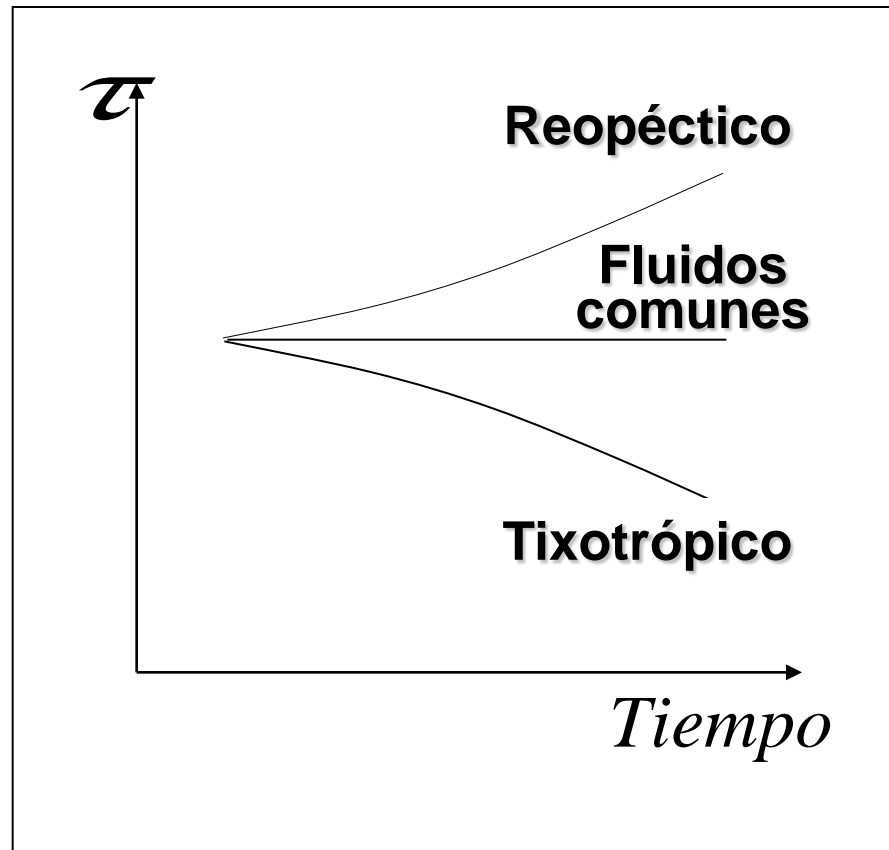
Plástico de Bingham:

Pasta de dientes

Fluidos No Newtonianos y Newtonianos



Fluidos No Newtonianos y Newtonianos



Propiedades de los Fluidos

- **Módulo de elasticidad volumétrica:**

Los fluidos suelen expandirse cuando se calientan o despresurizan, y se contraen cuando se enfrían o presurizan y esto depende del fluido.

Es la relación entre la presión producida por fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo en ángulos rectos a su superficie y distribuidas uniformemente (cuerpo sumergido en un fluido) y la deformación volumétrica que es igual al cambio de volumen dividido por el volumen inicial, mientras la temperatura permanece constante.

$$B = -V \left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_T = \rho \left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_T$$

$$\frac{\partial V}{V}$$



Deformación volumétrica

$$\frac{\partial \rho}{\rho}$$



Cambio relativo de densidad

Propiedades de los Fluidos

El volumen y la presión son inversamente proporcionales, el volumen decrece al aumentar la presión y en consecuencia $\frac{\partial P}{\partial v}$ es una cantidad negativa y el signo negativo en la definición garantiza que B sea una cantidad positiva. Al diferenciar $\rho = 1/v$ da $d\rho = -\frac{dv}{v^2}$ lo cual se puede ordenar como $\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dv}{v}$

Donde v es el volumen específico.

Para un gas ideal $P = \rho RT$ y $\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_T = RT = \frac{P}{\rho}$

Así el coeficiente de compresibilidad o modulo volumétrico de un gas es igual a su presión absoluta y aumenta cuando aumenta la presión. para un gas ideal $B = P$.

El módulo volumétrico también se puede expresar de manera aproximada en términos de cambios finitos Si se hace la sustitución de $B = P$ en la definición y se ordena:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{P} \quad (T = \text{constante})$$

El incremento porcentual de la densidad de un gas ideal durante una compresión isotérmica es igual al incremento porcentual en la presión. Para aire a 100 KPa una disminución de 1% en el volumen $\frac{\Delta v}{v} = -0,01$ corresponde a un incremento de $\Delta P = 1$ KPa en la presión. Pero para aire a 100 MPa, $B = 100$ MPa y una disminución de 1% en el volumen corresponde a un incremento de 1 MPa.

Propiedades de los Fluidos

El módulo volumétrico del agua en condiciones estándar es aprox. 2100 MPa, 21000 veces la presión atmosférica.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{B} = \frac{21\text{MPa}}{2100\text{MPa}} \times 100 = 1\%$$

Incremento de presión
210*Patm

Módulo volumétrico del agua

Por esta razón es común considerar los líquidos incompresibles.

Propiedades de los Fluidos

El incremento de presión (esfuerzo de compresión) necesario para producir una variación relativa de densidad o deformación volumétrica se calcula:

$$\Delta P = B \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Propiedades de los Fluidos

En el flujo de gases son significativos los efectos de compresibilidad o cambios en la densidad producidos por el flujo. La compresibilidad se hace importante cuando la velocidad alcanza una fracción significativa de la velocidad del sonido. **La velocidad del sonido c** de un fluido es la velocidad de propagación de las perturbaciones de presión (ondas sonoras) a través del mismo. El módulo volumétrico también sirve para calcular la **velocidad del sonido**, la cual está dada por

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad c^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s = k \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \quad k = \frac{C_p}{C_v}$$

El subíndice s se refiere a un proceso isentrópico y el subíndice T a un proceso isotérmico para el cambio de presión con respecto al cambio relativo en la densidad

Aunque esto es cierto tanto para líquidos como para gases, la compresibilidad afecta sólo a los gases. En gases ideales se tiene una relación entre la presión y la densidad dada por la ecuación de estado

$$P = \rho RT \quad \Rightarrow \quad c^2 = k \left[\frac{\partial(\rho RT)}{\partial \rho} \right]_T = kRT$$

Donde en el sistema internacional R en J/KgK o m^2/s^2K es la constante del gas y T la temperatura absoluta en Kelvin.

Por ejemplo en aire a 20°C

$$c = \sqrt{1.4 \times 287 \times 293} = 343 \text{ m/s.}$$

Si la velocidad del aire alcanza una fracción significativa de este valor en estas condiciones de temperatura, por ejemplo 100 m/s , se deben tener en cuenta los efectos de compresibilidad. La velocidad del sonido en el agua se ha tabulado.

PROPIEDADES PARA EL AGUA

Tensión superficial, presión de vapor y velocidad del sonido

$T, ^\circ C$	$\sigma, N/m$	Presión de Vapor en KPa	Velocidad del sonido en el agua en m/s
0	0,0756	0,611	1402
10	0,0742	1,227	1447
20	0,0728	2,337	1482
30	0,0712	4,242	1509
40	0,0696	7,375	1529
50	0,0679	12,34	1542
60	0,0662	19,92	1551
70	0,0644	31,16	1553
80	0,0626	47,35	1554
90	0,0608	70,11	1550
100	0,0589	101,3	1543
120	0,055	198,5	1518
140	0,0509	361,3	1483
160	0,0466	617,8	1440
180	0,0422	1002	1389
200	0,0377	1554	1334
220	0,0331	2318	1268
240	0,0284	3344	1192
260	0,0237	4688	1110
280	0,019	6412	1022
300	0,0144	8581	920
320	0,0099	11274	800
340	0,0056	14586	630
360	0,0019	18651	370
374	0*	22090*	0*

Propiedades de los Fluidos

- **Numero adimensional de Mach:** corresponde a la relación entre la velocidad del fluido (o de un objeto en aire tranquilo) y la velocidad del sonido en el mismo fluido en el mismo estado.

$M < 1$ subsónico

$M \approx 1$ Transónico

$M = 1$ Sónico

$M > 1$ Supersónico

$M \gg 1$ Hipersónico.

$$M = \frac{c}{V}$$

Un flujo de aire puede considerarse incompresible cuando $M \leq 0.3$, correspondiente a velocidades del aire menor que 100 m/s en condiciones estándar.

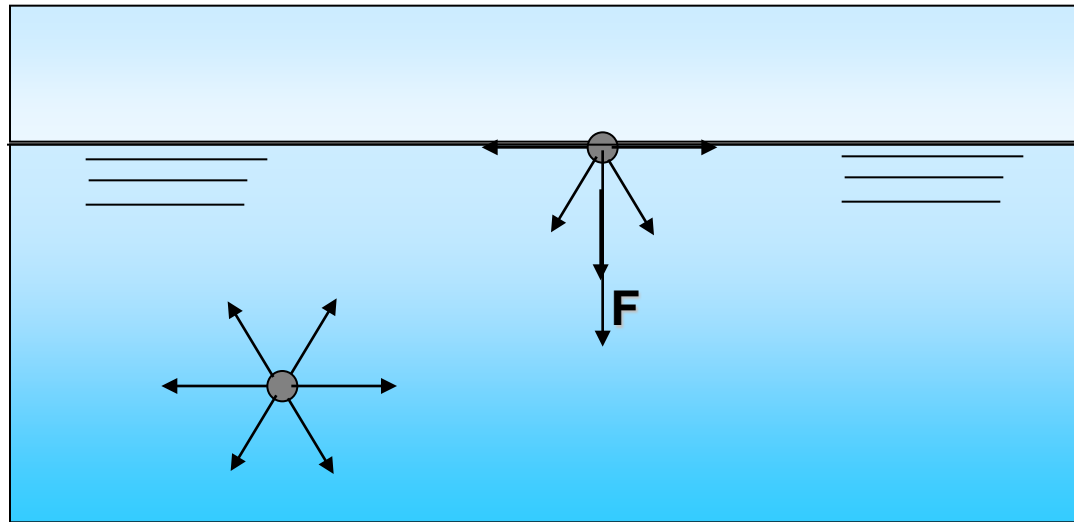
Propiedades de los Fluidos

La velocidad del sonido en el agua es aprox. 1450 m/s en condiciones estándar. La mayor parte de los flujos de líquidos son incompresibles, puesto que las velocidades del flujo son pequeñas y la velocidad del sonido muy grande.

Para aire en condiciones estándar, el flujo puede considerarse incompresible si la velocidad es menor que unos 100 m/s. Esto comprende una gran variedad de flujos de aire: movimiento de automóviles y trenes, aviones ligeros, despegue y aterrizaje de aviones de gran velocidad, la mayoría de los flujos en tuberías y en turbomáquinas a moderadas velocidades de giro.

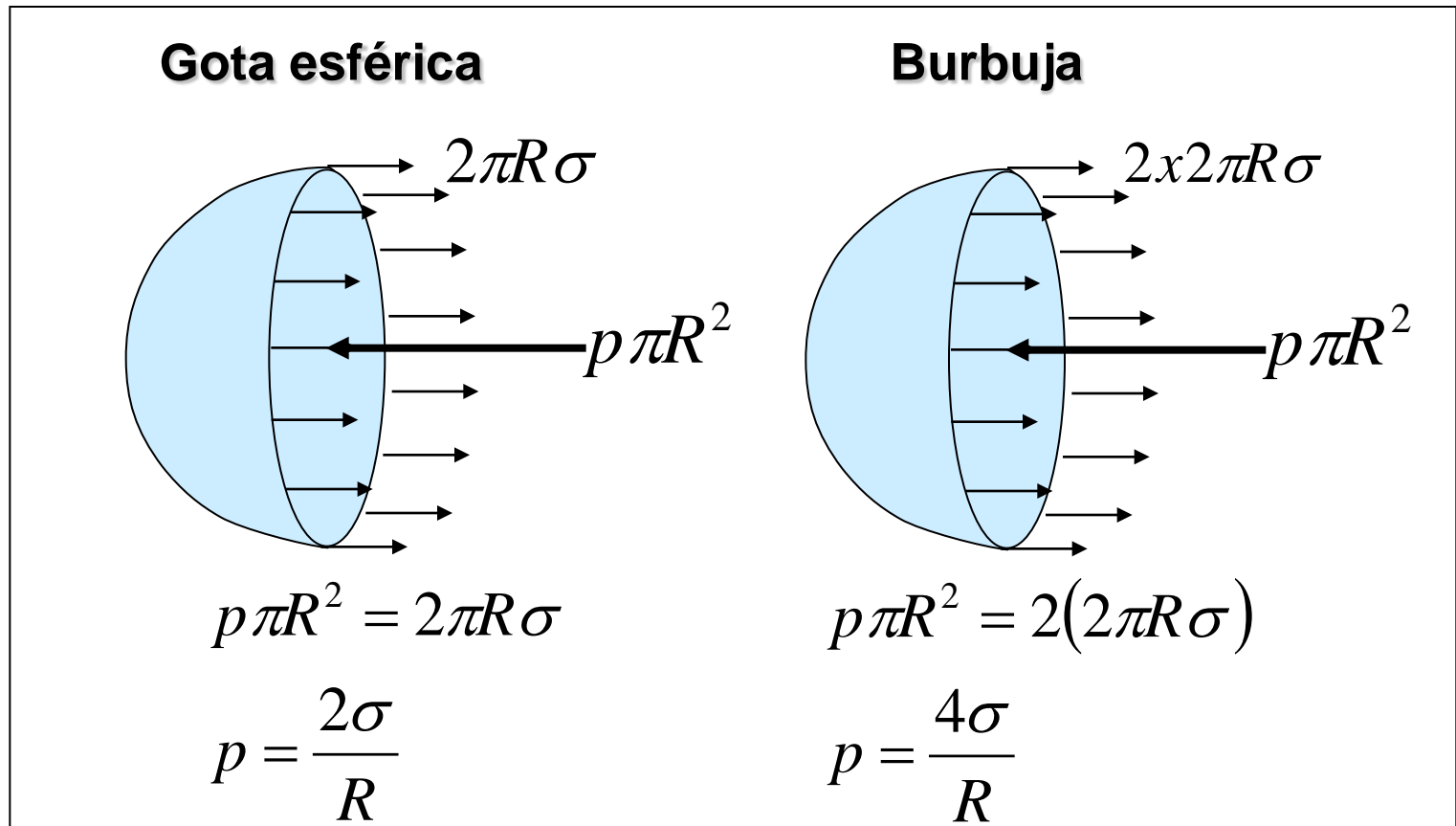
Propiedades de los Fluidos

- ***Tensión Superficial:*** es una propiedad que resulta de las fuerzas de atracción entre las moléculas, se manifiesta sólo en los líquidos en una interfaz, por lo regular una interfaz líquido-gas.



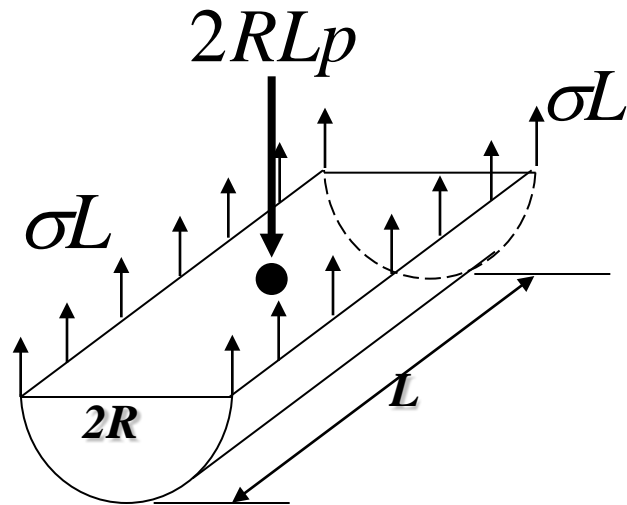
Propiedades de los Fluidos

La tensión superficial tiene unidades de fuerza por unidad de longitud, N/m (lbf/ft).



Propiedades de los Fluidos

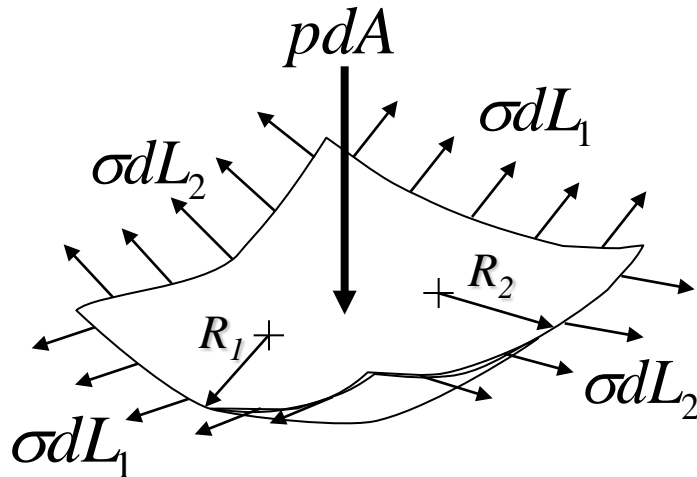
Cilindro líquido



$$2RLp = 2\sigma L$$

$$P = \frac{\sigma}{R}$$

Entreface de forma arbitraria



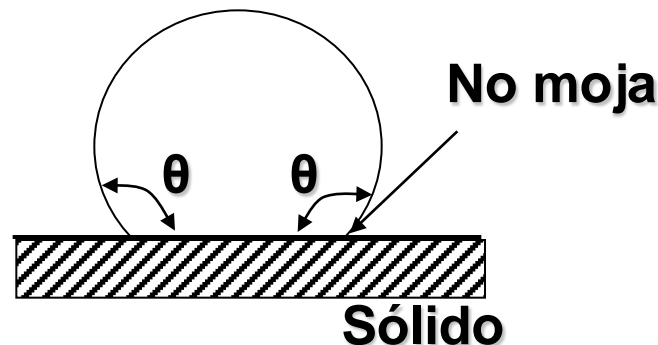
$$p = \sigma (R_1^{-1} + R_2^{-1})$$

Propiedades de los Fluidos

Un efecto importante es el ángulo de contacto θ que aparece cuando la interfase llega hasta una pared sólida.

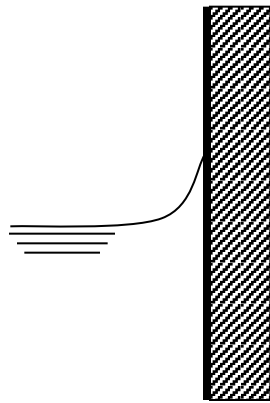
Si $\theta > 90^\circ$ el líquido no moja, tiene mayor fuerza de cohesión.

Si $\theta < 90^\circ$ el líquido moja, mayor fuerza de adhesión.

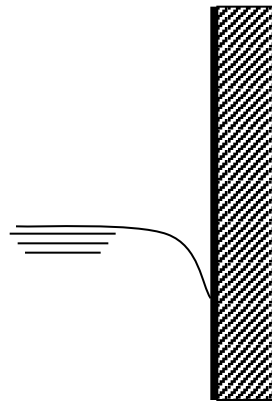


Fenómenos debido a la tensión superficial

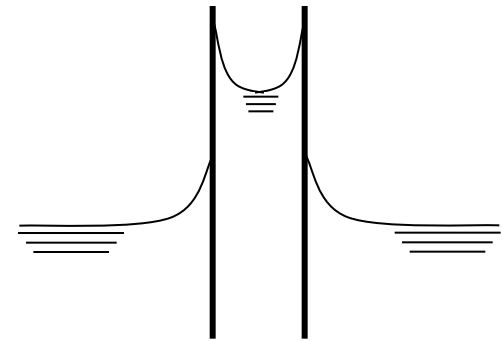
La tensión superficial explica también los fenómenos de formación de menisco y el de la elevación del líquido en tubos capilares.



**Contacto entre
agua y vidrio**

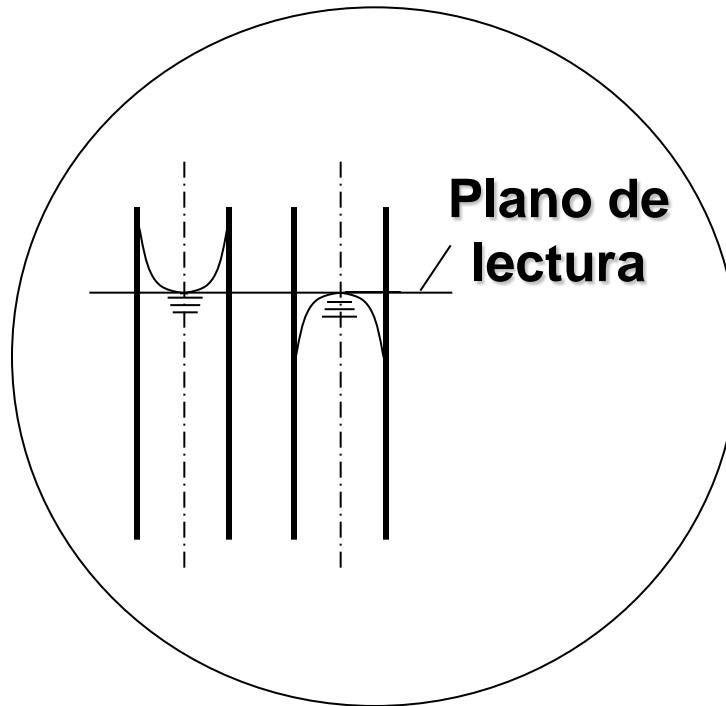


**Contacto entre
mercurio y vidrio**

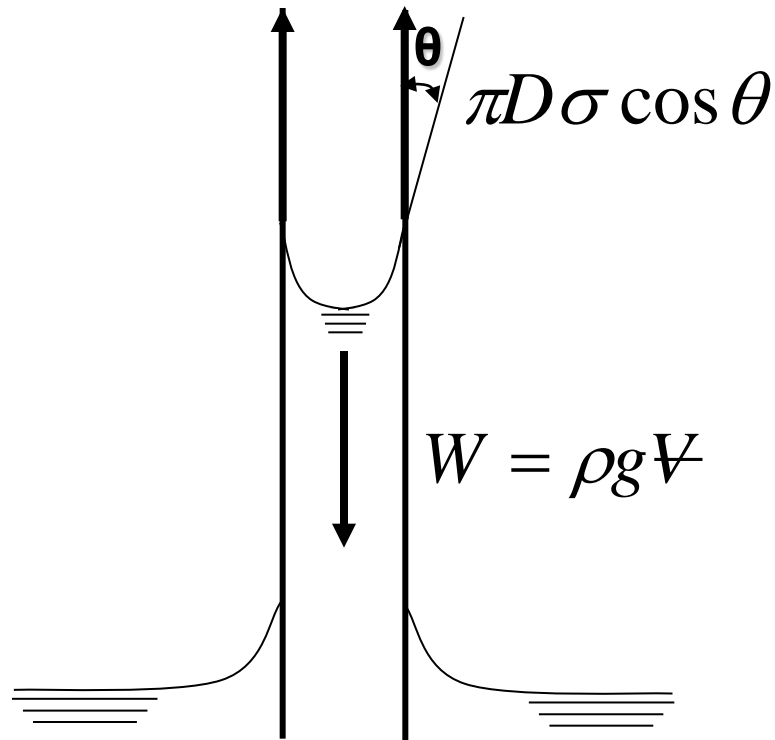


Elevación capilar

Lectura de manómetros con menisco



Elevación Capilar



Elevación capilar

$$W = \rho g V = \rho g \frac{\pi D^2}{4} h$$

$$\sigma \pi D \cos \theta = \gamma \frac{\pi D^2}{4} h$$

$$\sigma \pi D = \rho g \frac{\pi D^2}{4} h$$

$$h = \frac{4\sigma}{\gamma D}$$

Propiedades de los Fluidos

Valores de la Tensión Superficial

Líquido	σ a 20°C (N/m)
Agua con aire húmedo	0.0741
Agua con aceite	0.0275
Mercurio con agua	0.3750
Mercurio con aire	0.5
Alcohol con agua	0.002
Solución de jabón con aire	0.03

Temperatura de saturación y presión de saturación

La temperatura y la presión son propiedades dependientes para las sustancias puras durante los procesos de cambio de fase. A una presión determinada, la temperatura a la cual una sustancia pura cambia de fase se conoce como temperatura de saturación T_{sat} .

De manera semejante, a una temperatura dada, la presión a la cual una sustancia pura cambia de fase se llama presión de saturación P_{sat} .

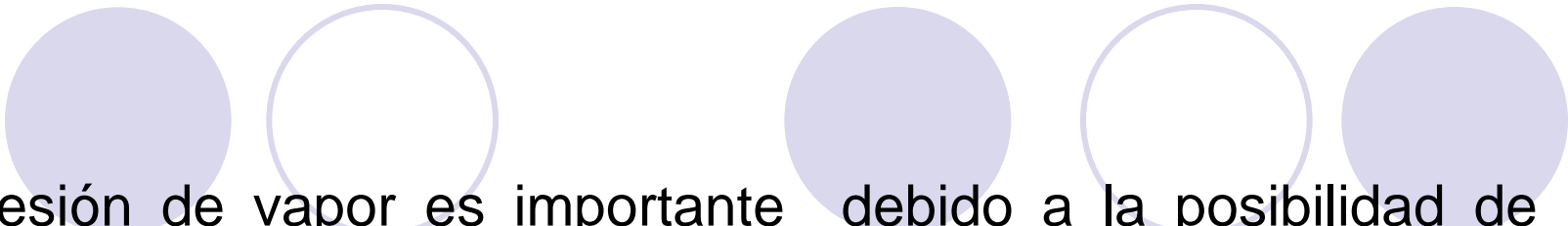
Temperatura de saturación y presión de saturación. PRESIÓN DE VAPOR

Por ejemplo a una presión absoluta de 1 atmósfera estándar (1 atm o 101.35 KPa) la temperatura de saturación del agua es 100 °C.

La presión de vapor de una sustancia pura se define como la presión ejercida por su vapor en equilibrio de fases con su líquido a una temperatura dada. P_v es una propiedad de la sustancia pura idéntica a la P_{sat} . La presión de vapor aumenta con la temperatura, por lo tanto una sustancia a temperaturas más altas hierve a presiones más elevadas. Se puede decir que la presión de vapor simplemente es la presión a la que un líquido hierve y está en equilibrio con su propio vapor.

El agua hierve a $T_{sat} = 134\text{ °C}$ en una olla de presión a 3 atm.

El agua hierve a $T_{sat} = 93\text{ °C}$ en una cacerola común a una elevación de 2000 m en donde la presión atmosférica es 0.8 atm.




La presión de vapor es importante debido a la posibilidad de la caída de presión del líquido en los sistemas de flujo por debajo de la presión de vapor en algunos lugares y la vaporización resultante.

Por ejemplo, agua a 10°C se evapora en forma instantánea y formará en las regiones de las puntas o los lados de succión de las aspas de las bombas donde la presión caiga por debajo de 1.23 KPa. Las burbujas de cavitación debido a que forman cavidades en el líquido se desintegran conforme son barridas de la zona de baja presión, con lo que se generan ondas de alta presión extremadamente destructivas. Así cae el rendimiento de la bomba y se produce la erosión de las aspas del impulsor. Esto se llama ***Cavitación.***

Presión de saturación o vapor del agua a diferentes temperaturas

Temperatura °C	Psat KPa
-10	0,260
-5	0,403
0	0,611
5	0,872
10	1,23
15	1,71
20	2,34
25	3,17
30	4,25
40	7,38
50	13,35
100	101,35 (1 atm)
150	475,8
200	1554
250	3973
300	8581



Uno de los parámetros adimensionales que describe el fenómeno de cavitación es el número de cavitación

$$Ca = \frac{Pa - Pv}{\frac{1}{2}\rho V^2};$$

Donde Pa es la presión ambiente

Pv la presión de vapor y

V la velocidad característica.

Según la geometría un flujo dado tiene un valor crítico de Ca por debajo del cual comenzará la cavitación.

Coeficiente de expansión volumétrica

En general, la densidad de un fluido depende con mayor fuerza de la temperatura que de la presión, y la variación de la densidad con la temperatura causa numerosos fenómenos naturales, como los vientos, las corrientes en los océanos, el ascenso de columnas de humo en las chimeneas, el manejo de globos de aire caliente, la transferencia de calor por convección natural. Para cuantificar estos efectos se necesita una propiedad que represente la variación de la densidad de un fluido con la temperatura a presión constante. Esta propiedad es el coeficiente de expansión volumétrica β definido como:

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$$

También se puede expresar de manera aproximada en términos de cambios finitos como:

$$\beta = \frac{\Delta v/v}{\Delta T} = -\frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta T} \quad (\text{a } P \text{ constante})$$

Un valor grande de β significará también un cambio considerable en la densidad con la temperatura y el producto $\beta \Delta T$ representa la fracción de cambio en el volumen de un fluido que corresponde a un cambio en la temperatura ΔT a presión constante. Para un gas ideal con $P = \rho RT$, $\beta_{gas \text{ ideal}} = \frac{1}{T}$ donde T es la temperatura absoluta.

Leyes de Conservación

- Conservación de la masa.
- Conservación de la cantidad de movimiento (2da ley de Newton).
- Conservación de la energía.



Técnicas de análisis de los flujos

- Volumen de Control o Análisis Integral.
- Análisis Diferencial.
- Estudio experimental o análisis dimensional.

