

Mecánica de Fluidos

Tema 1: Introducción

Programa del curso

Tema 1: Introducción a la Mecánica de Fluidos

Tema 2: Hidrostática

Tema 3: Dinámica de fluidos: Integral

Tema 4: Dinámica de fluidos: Diferencial

Tema 5: Análisis dimensional

Tema 6: Flujo viscoso en conductos

Tema 7: Flujo alrededor de cuerpos

Tema 8: Flujo compresible

Bibliografía Básica:

- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones. McGraw Hill. Disponible en librería: en formato físico y formato digital (versión reducida).
- White, F. M. Mecánica de Fluidos. McGraw Hill. Madrid 2008

Recursos:

- Transparencias y vídeos.
- Hojas de problemas. Hojas de test. Exámenes resueltos.
- Protocolos de laboratorio

Evaluación

Convocatoria ordinaria:

80% Parte I: Exámenes

5%: Prueba intermedia. Test: Temas 1 y 2 (semanas 4/5).

15%: Intercuatrimestral: Test (35%) y Problemas (65%): Temas 1, 2, 3 y 4.

60%: Final: Test (35%): Temas 5, 6, 7 y 8. Problemas (65%): Todos los temas.

20% Parte II: Laboratorio (semanas 10-15: 4 sesiones)

15%: Nota media de los informes o cuadernos de laboratorio.

5%: Participación activa en la realización de las prácticas de laboratorio.

Convocatoria extraordinaria:

Se examinará aquella parte completa (I y/o II) manteniéndose la nota de la parte aprobada. El criterio de ponderación es:

20% Laboratorio.

80% Nota del examen de la convocatoria extraordinaria (Test (35%) y Problemas (65%). Todos los temas).

En la convocatoria ordinaria, la nota de la Parte I será la nota del examen Final si no se alcanza en dicho examen una nota **mínima de 3.0**. En ambas convocatorias, la media ponderada se efectuará solo cuando tanto en las Partes I y II, la nota **sea igual o superior a 5**. No se permite el uso de calculadoras programables en los exámenes, así como tampoco de formularios, libros o apuntes.

Historia de la Mecánica de Fluidos

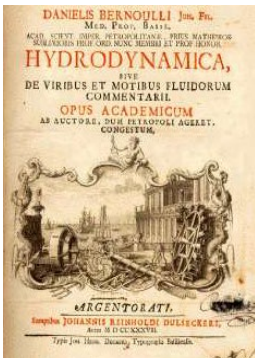
Antecedentes aislados:

- Navegación a vela
- Transporte de agua en canales
- Arquímedes (leyes flotabilidad)



Descubrimientos fundamentales:

- Leonardo da Vinci (1452–1519): Ecuación continuidad 1D;
Experimentación (chorros, olas, resaltos, torbellinos, cuerpos baja y elevada resistencia, ...)
- Isaac Newton(1642-1727): Leyes generales del movimiento, resistencia viscosa



S. XVIII: Divergencia Teoría /Práctica:

Hidrodinámica: Matemáticos teóricos

Leonhard Euler: Ecuaciones diferenciales fluido no viscoso,
D. Bernoulli, J. D'Alembert, J.-L. Lagrange, P.-S Laplace

Hidráulica: Ingenieros experimentales

Chézy, Pitot, Borda, Weber, Francis, Hagen, Poiseuille, Darcy,
Manning, Bazin, Weisbach,...

Canales, tuberías, resistencia barcos, olas, turbinas, ...

S. XIX: Unificación:

Navier (1785-1836) & Stokes (1819-1903): Teoría flujos viscosos

Froude (1810-1879 ; 1846-1924): Experimentación con modelos a escala

Rayleigh (1842-1919): Análisis Dimensional

Reynolds (1842-1912): Viscosidad como origen turbulencia

Prandtl (1875-1953): Teoría capa límite

Kármán (1881-1963): Caracterización de flujos de aire supersónicos e hipersónicos

Taylor (1886-1975): estudio estadístico de la turbulencia

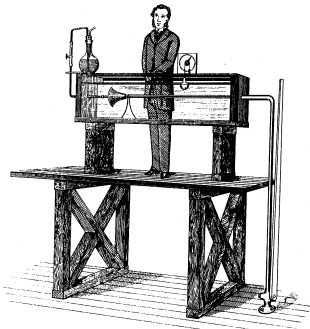


Fig. 9.1. Sketch of Reynolds's dye experiment, taken from his 1883 paper.

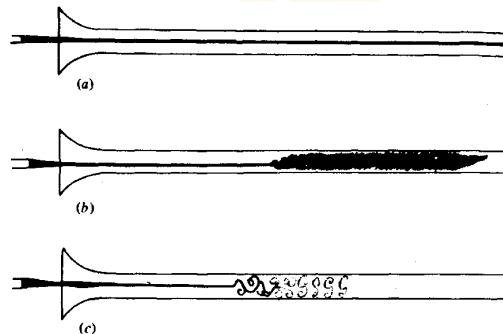
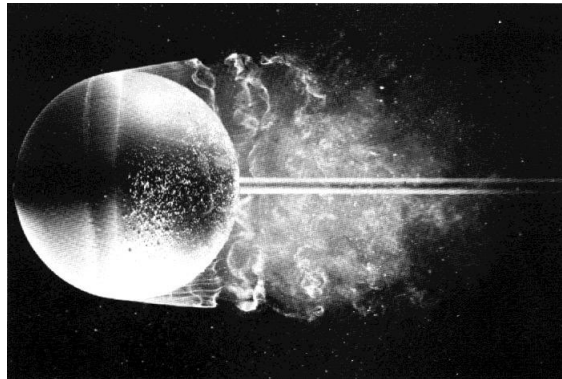
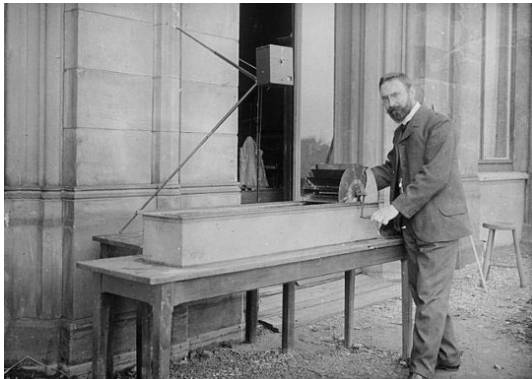


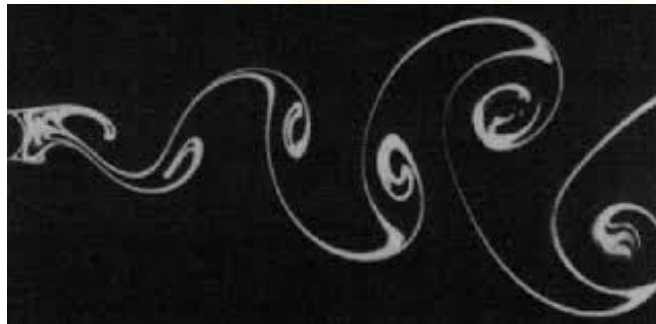
Fig. 9.2. Reynolds's drawings of the flow in his dye experiment.

Historia de la Mecánica de Fluidos

Ludwig Prandtl



Theodore Von Kármán



Aplicaciones

-Presas y compuertas

-Flujos Naturales: Meteorología,

Oceanografía, Hidrología

-Transporte: Aviación, cohetes, barcos, trenes, coches...

-Generación electricidad:

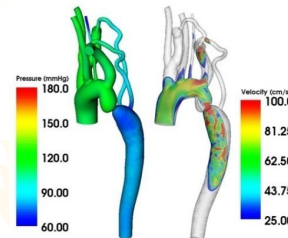
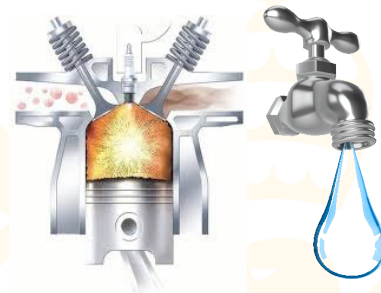
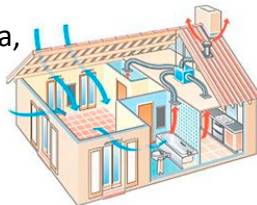
- Turbinas hidráulicas, de vapor y de gas.
- Energía eólica, mareomotriz, de las olas, ...

-Motores: Combustión, admisión, escape, toberas, ...

-Transporte fluidos:

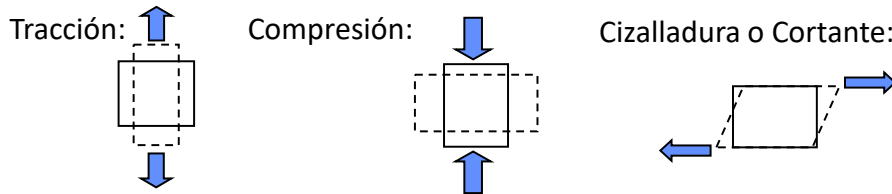
- Abastecimiento, saneamiento, regadío, petrolíferos, ...
- Ventilación, gaseoductos

-Medicina: Circulación sanguínea, respiración, ...

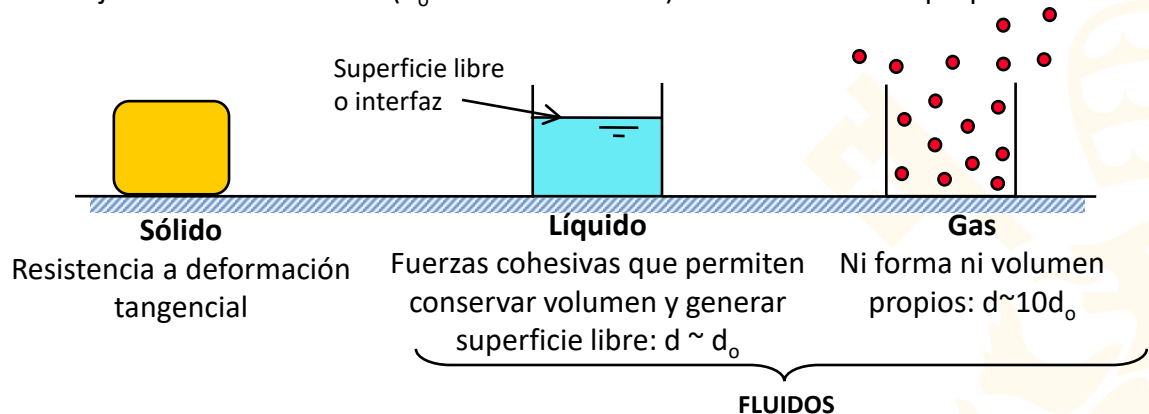


Concepto de fluido

- El fluido no tiene la capacidad de resistir tensiones tangenciales como el sólido.
- Cualquier mínimo esfuerzo cortante implica movimiento mientras se aplique (flujo).



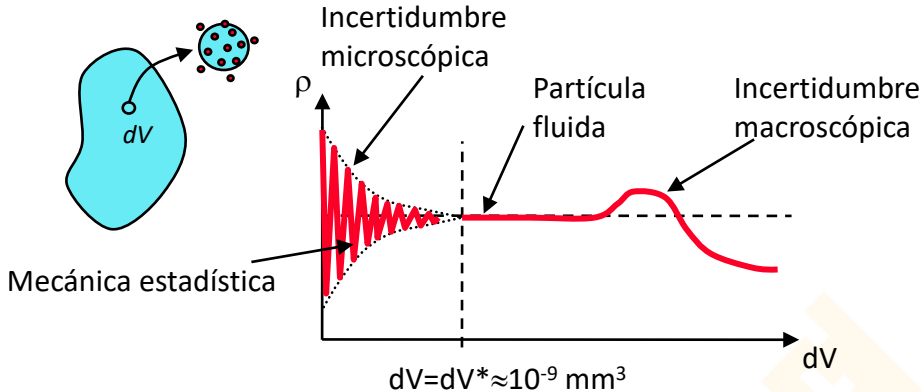
- Baja cohesión molecular (d_o -tamaño molécula) \rightarrow No tiene forma propia



- Existen sustancias, aparentemente sólidas, que no pueden clasificarse ni como sólidos ni como fluidos: asfalto, grafito, fangos... Se estudian bajo el campo de la Reología.

Fluido como medio continuo

- En un fluido, las moléculas no están fijadas en una red, sino que se mueven libremente. Por ello, la densidad, o masa por unidad de volumen, no tiene un significado preciso.



$$\rho = \lim_{dV \rightarrow dV^*} \frac{dm}{dV}$$

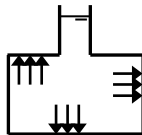
- El volumen límite $dV^* \approx 10^{-9} \text{ mm}^3$ para todos los líquidos y gases a presión atmosférica. Por ejemplo ese volumen de aire, en condiciones normales, contiene $3 \cdot 10^7$ moléculas.
- Generalmente, los problemas en la ingeniería están relacionados con dimensiones físicas mucho mayores: las propiedades del fluido podrán considerarse variables continuas en el espacio.
- El fluido es un medio continuo: la variación de sus propiedades es tan suave que se puede utilizar el cálculo diferencial para analizarlos.

Propiedades: densidad

- Masa por unidad de volumen [kg/m^3]
 - No presenta discontinuidades, salvo cambio de fase u onda de choque.
 - Líquidos: casi constante (incompresibles). En general tres órdenes de magnitud más densos que los gases. $\rho(p, T) \approx \rho(T)$
 - Densidad relativa: $\delta = \rho / \rho_{\text{H}_2\text{O}}$
- Ej: $\text{H}_2\text{O} \cong 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
 $\text{Hg} \cong 13600 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Gases: la densidad varía mucho en los gases, aumentando casi de forma proporcional a la presión: $\rho(p, T)$
 - Gas ideal: $\rho = P/RT$
 - Densidad relativa: $\delta = \rho / \rho_{\text{aire}}$
- ρ_{aire} (p=1 bar; T=25 °C; R = 287 J/kg-K): 1.17 kg/m^3

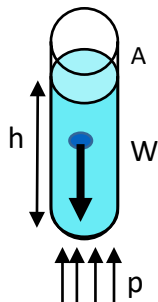
Propiedades: presión

- Es el esfuerzo (de compresión) en un punto en un fluido en reposo: $[Pa=N/m^2]$
- Magnitud escalar: $d\vec{F} = p \cdot d\vec{A}$
- Normal a la superficie



$$\begin{aligned} 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ atm} &= 1.01325 \text{ bar} \\ 1 \text{ kg/cm}^2 &= 0.981 \text{ bar} \end{aligned}$$

- Presión como columna de fluido: [mcf] $\left\{ \begin{array}{l} \text{mca} (\rho = 1000 \text{ kg/m}^3) \\ \text{mmHg} = \text{Torr} (\rho = 13600 \text{ kg/m}^3) \end{array} \right.$



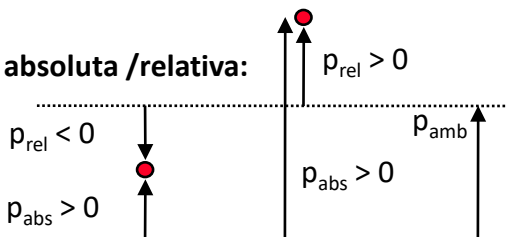
$$p = \frac{mg}{A} = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho h A g}{A} = \rho g h$$

$$1 \text{ atm} = 10.33 \text{ mca} = 760 \text{ mmHg}$$

- Cambio de columna de fluido 'x' a columna de fluido 'y': Igualdad en [Pa]

$$\rho_x g h_x = \rho_y g h_y \rightarrow h_y = h_x \cdot \frac{\rho_x}{\rho_y}$$

- Presión absoluta /relativa:**

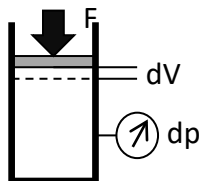


Una presión de 9000 Pa equivale a ($g = 10 \text{ m/s}^2$):

- ☐ a. 0,90 metros de columna de mercurio
- ☐ b. 9,00 metros de columna de agua
- ☐ c. 0,06618 metros de columna de mercurio

Propiedades: módulo de elasticidad volumétrica

- El fluido no presenta resistencia a deformación tangencial pero sí a la compresión.
- Los líquidos, que se consideran incompresibles, son más compresibles que los sólidos



$$E [Pa] = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T$$

$$\int_{\rho_1}^{\rho_2} E \frac{\partial \rho}{\rho} = \int_{p_1}^{p_2} \partial p \quad \Rightarrow \quad \rho_2 = \rho_1 e^{\Delta p / E}$$

$$\int_{V_1}^{V_2} -E \frac{\partial V}{V} = \int_{p_1}^{p_2} \partial p \quad \Rightarrow \quad V_2 = V_1 e^{-\Delta p / E}$$

| | |
|-----------------|--------------------------|
| Aire (p=1 bar): | E = 10 ⁻⁴ GPa |
| Agua: | E = 2 GPa |
| Aceite: | E = 1.7 GPa |
| Acero: | E = 200 GPa |

El módulo de elasticidad volumétrica:

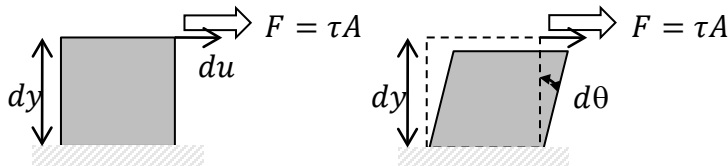
- ☐ a. de los líquidos es mayor que el de los sólidos.
- ☐ b. de los gases es mayor que el de los sólidos.
- ☐ c. tiene unidades de presión (Pa)

El módulo de elasticidad volumétrica:

- ☐ a. tiene unidades de fuerza (N)
- ☐ b. de los líquidos es mayor que el de los sólidos.
- ☐ c. de los líquidos es mayor que el de los gases.

Propiedades: viscosidad dinámica

- Medida de la resistencia al movimiento. Determina la velocidad de deformación al aplicar un esfuerzo cortante. $\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$



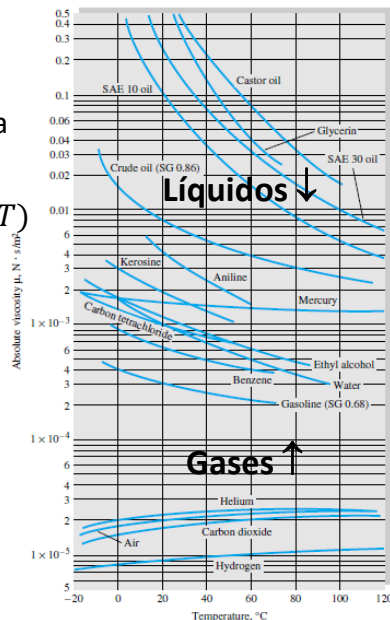
- Ley de Newton:

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

- La viscosidad de un fluido aumenta débilmente con la presión. Generalmente, en ingeniería, se desprecia su dependencia de la presión.
- El efecto de la temperatura es mucho más fuerte. $\mu(p, T) \approx \mu(T)$

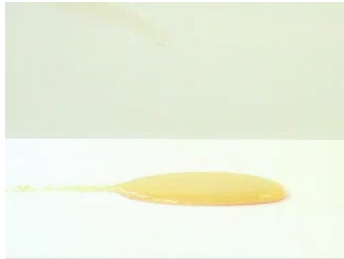
| | |
|----------------|---|
| Glicerina: | $\mu = 1.5 \text{ kg/ms}$ |
| Aceite SAE 30: | $\mu = 0.26 \text{ kg/ms}$ |
| Agua: | $\mu = 10^{-3} \text{ kg/ms}$ |
| Aire: | $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$ |

- Fluido ideal $\rightarrow \mu = 0$
- Los fluidos en reposo no soportan esfuerzos cortantes $\tau = 0$



Propiedades: viscosidad dinámica

- Viscosidad en función de la temperatura



Miel fría



Miel caliente

- Viscosidad cinemática: $\nu = \frac{\mu}{\rho} [\text{m}^2/\text{s}]$

| Fluid | μ , $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})^\dagger$ | Ratio $\mu/\mu(\text{H}_2\text{O})$ | ρ , kg/m^3 | ν $\text{m}^2/\text{s}^\ddagger$ | Ratio $\nu/\nu(\text{Hg})$ |
|---------------|--|--|------------------------------------|---|-------------------------------|
| Hydrogen | 8.8 E-6 | 1.0 | 0.084 | 1.05 E-4 | 920 |
| Air | 1.8 E-5 | 2.1 | 1.20 | 1.51 E-5 | 130 |
| Gasoline | 2.9 E-4 | 33 | 680 | 4.22 E-7 | 3.7 |
| Water | 1.0 E-3 | 114 | 998 | 1.01 E-6 | 8.7 |
| Ethyl alcohol | 1.2 E-3 | 135 | 789 | 1.52 E-6 | 13 |
| Mercury | 1.5 E-3 | 170 | 13,580 | 1.16 E-7 | 1.0 |
| SAE 30 oil | 0.29 | 33,000 | 891 | 3.25 E-4 | 2,850 |
| Glycerin | 1.5 | 170,000 | 1,264 | 1.18 E-3 | 10,300 |

Gases > Líquidos

→ La menor (muy pesado)

- Velocidad de deslizamiento nula: [vídeo](#)

Propiedades: viscosidad dinámica

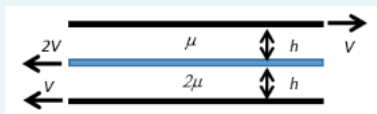
La ley de Newton de la viscosidad afirma que:

- ☐ a. Si no hay variación de velocidad normal a la superficie, la viscosidad es nula
- ☐ b. Los fluidos que no tienen viscosidad no producen esfuerzos tangenciales
- ☐ c. Los esfuerzos tangenciales de rozamiento son el producto de la tensión superficial por el gradiente de velocidad

Cuando se aumenta la temperatura:

- ☐ a. La viscosidad dinámica de los gases aumenta y la viscosidad dinámica de los líquidos disminuye.
- ☐ b. La viscosidad dinámica de los líquidos disminuye pero su viscosidad cinemática no cambia.
- ☐ c. La viscosidad cinemática de los gases permanece constante y la viscosidad dinámica de los líquidos aumenta.

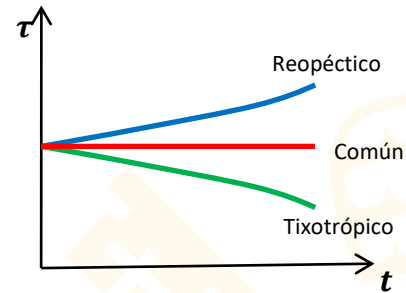
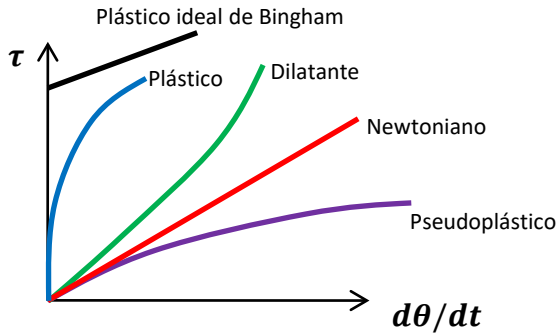
Se dispone de tres placas planas de área A separadas una distancia h entre ellas. Entre la placa superior y la placa central hay un líquido de viscosidad μ , y entre la placa inferior y central otro con viscosidad 2μ . Suponiendo distribuciones de velocidad lineal en ambos líquidos y que $A \gg h$, el esfuerzo cortante:



- ☐ a. Es el mismo tanto en la placa superior como en la parte superior de la placa central
- ☐ b. En la placa central es mayor en su parte inferior, debido a la mayor viscosidad del líquido
- ☐ c. Tiene un valor máximo que se localiza en la placa central

Tipos de fluido

- Fluido Newtoniano: cuando la razón de deformación es proporcional al esfuerzo cortante
 - La mayoría de los fluidos comunes: agua, aire, gasolina, aceite...
- Fluido no Newtoniano: $\mu \left(p, T, \frac{du}{dy}, t \dots \right)$. Reología: Grasas, plásticos, metales líquidos



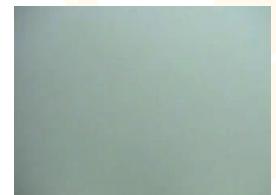
Dilatante: almidón, arena en agua, arenas movedizas...



Pseudoplástico: plasma de la sangre, resinas, pulpa de papel en agua...



Plástico: lodos, pasta de dientes, ketchup, mayonesa...



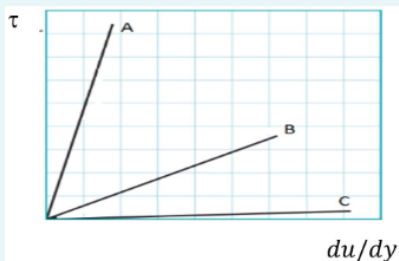
[Vídeo](#)

Tipos de fluido

Cuando un fluido es sometido a un gradiente de velocidad du/dy , presenta una viscosidad dinámica μ_1 , y cuando es sometido a un gradiente doble del anterior, su viscosidad es $\mu_2 = 3 \cdot \mu_1$. Si en ambos casos la temperatura es la misma, se trata de un fluido:

- ☐ a. Pseudoplástico
- ☐ b. Dilatante
- ☐ c. Newtoniano

¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta en referencia a la gráfica adjunta, en la que se representa el esfuerzo cortante frente a la velocidad de deformación?

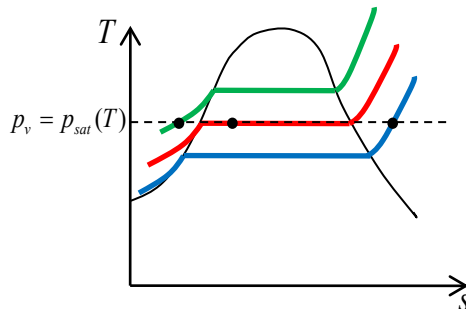


Seleccione una:

- ☐ a. El fluido A podría ser petróleo, el B aire y el C agua
- ☐ b. El fluido A podría ser petróleo, el B agua y el C aire.
- ☐ c. El fluido A podría ser agua, el B aire y el C petróleo.

Propiedades: presión de vapor

- Es la presión a la que un líquido hierve y está en equilibrio con su propio vapor.



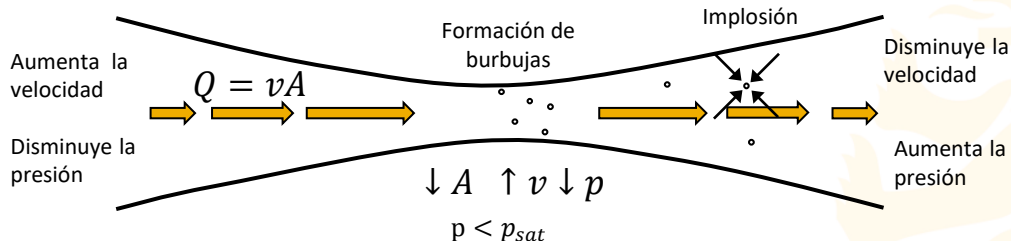
Agua: $p_{sat}(T = 20^\circ\text{C}) = 2337 \text{ Pa}$

Mercurio: $p_{sat}(T = 20^\circ\text{C}) = 0.17 \text{ Pa}$

Agua

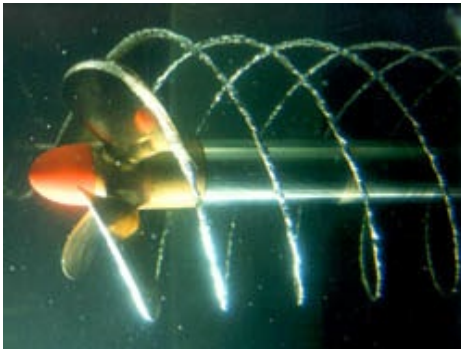
| t (°C) | P _{sat} (bar) | P _{sat} (m c.a.) |
|--------|------------------------|---------------------------|
| 20 | 0,02337 | 0,24 |
| 40 | 0,07375 | 0,75 |
| 60 | 0,19920 | 2,03 |
| 80 | 0,47360 | 4,83 |
| 100 | 1,0133 | 10,33 |

- Cuando la presión del líquido cae por debajo de la presión de vapor, aparece la cavitación. Cuando las burbujas de cavitación penetran en regiones de presiones más altas, colapsan de forma implosiva. Este colapso puede dañar o erosionar las superficies hasta destruirlas.

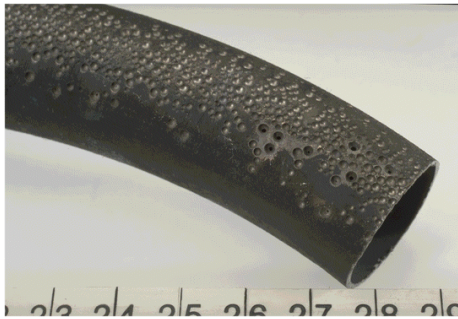


- Generación de burbujas

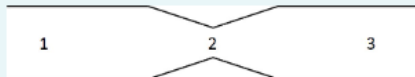
Vídeo



- Desgaste



Se observa que hay cavitación en el conducto de la figura, por el que fluye agua a 20°C , de la sección 1 a la sección 3. Entonces:



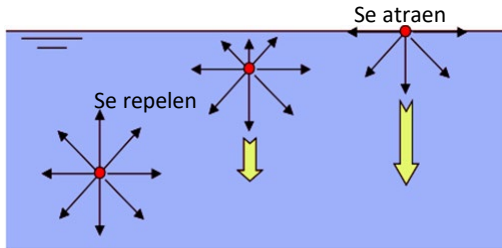
- ☐ a. Las burbujas que se forman son de aire.
- ☐ b. La presión en el líquido es menor o igual que la presión de vapor del agua a 20°C , en la sección 2.
- ☐ c. Las burbujas tienen más probabilidad de implosionar en la sección 2.

Por una tobera pasa un caudal de agua a 20°C . El riesgo de cavitación aumenta cuando:

- ☐ a. Circula agua a 40°C
- ☐ b. Circula agua a 10°C
- ☐ c. Se aumenta el diámetro menor de la tobera

Propiedades: tensión superficial

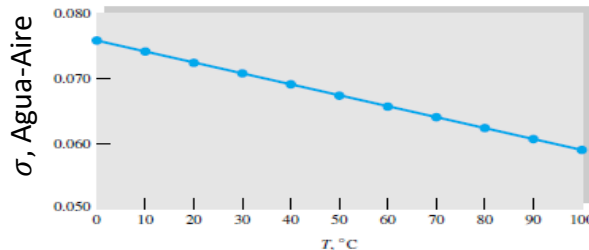
- Un líquido, al no ser capaz de expansionarse libremente, formará una interfase con un segundo líquido o un gas.
- Efecto macroscópico de la diferencia de fuerzas de cohesión molecular entre las partículas de distintos fluidos (interfase fluidos no miscibles)
- La fuerza resultante, junto a la conservación del volumen, se manifiesta macroscópicamente como una fuerza de tensión en la superficie. Es una magnitud escalar: σ [N/m] ó [J/m^2]



Superficie mínima

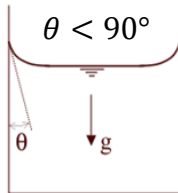
Agua-Aire (20°C): $\sigma=0.074$ N/m
Mercurio-Aire (20°C): $\sigma=0.48$ N/m

- Depende de la temperatura:

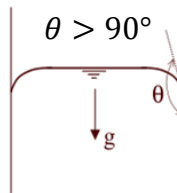


Propiedades: tensión superficial

- Ángulo de contacto: efecto macroscópico de la diferencia de fuerzas de cohesión molecular entre las partículas de distintos fluidos y sólidos



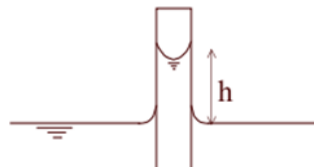
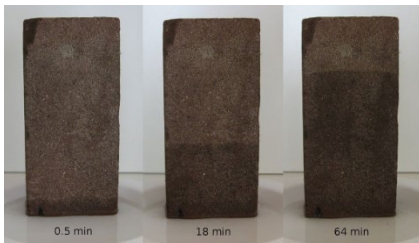
Cohesión < Adhesión
Fluido “moja” al sólido
Agua+vidrio+aire = 0°



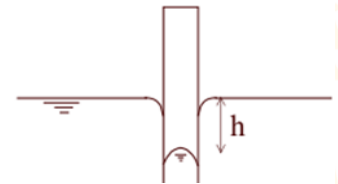
Cohesión > Adhesión
Fluido “no moja” al sólido
Mercurio+vidrio+aire = 130°



- Ascenso/Descenso capilar (capilaridad): En longitudes características pequeñas, las fuerzas de tensión superficial dominan a las de la gravedad.



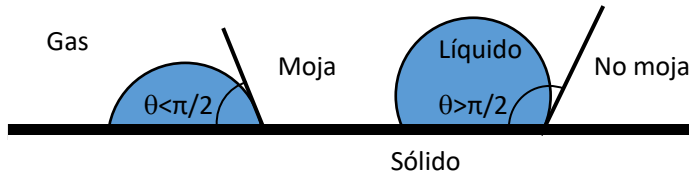
Ascenso



Descenso

Propiedades: tensión superficial

- Ángulo de contacto:



Agua



Alcohol



Mercurio

- Aplicaciones: ciencia de los materiales, aerosoles y revestimientos, jabones y detergentes, recuperación de petróleo, industria de la impresión, semiconductores, industria del papel, alimenticia, cosméticos, productos farmacéuticos, implantes médicos biocompatibles...

Propiedades: tensión superficial

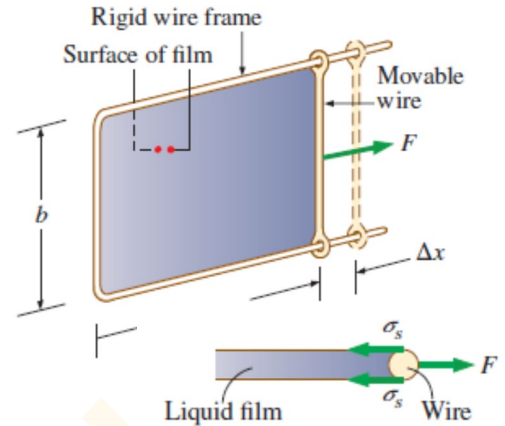
- Insectos



Moja



No moja



$$F = \sigma_s 2b$$



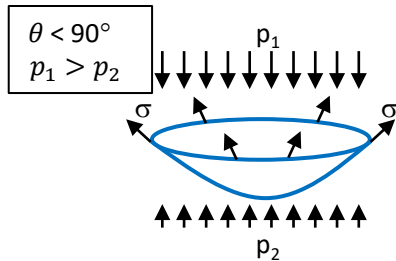
Variación (volátil)

Vídeo

[Vídeo circo](#) (efecto Marangoni)

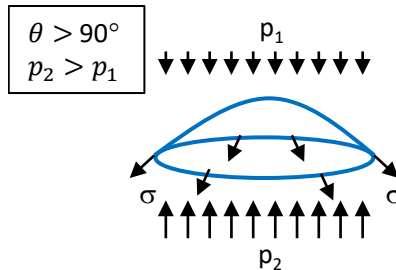
Propiedades: tensión superficial

- Salto de presión en interfase con forma de casquete esférico:



$$2\pi R \sigma \cos\theta + p_2 \pi R^2 = p_1 \pi R^2$$

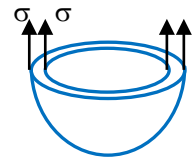
$$p_1 - p_2 = \frac{2\sigma \cos\theta}{R}$$



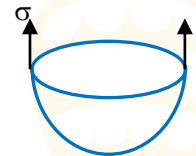
$$-2\pi R \sigma (-\cos\theta) + p_2 \pi R^2 = p_1 \pi R^2$$

$$p_2 - p_1 = -\frac{2\sigma \cos\theta}{R}$$

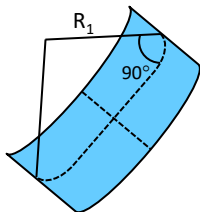
- Burbujas:



- Gotas:

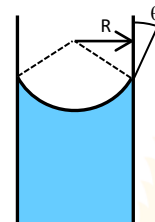


- Ley de Laplace: radios de curvatura



$$p_1 - p_2 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

- Meniscos



$$R_1 = R_2 = \frac{R}{\cos\theta}$$

Propiedades: tensión superficial

Una pompa de jabón debe su forma esférica a la tensión superficial de la mezcla de agua con jabón con el aire que está tanto fuera como dentro de la pompa. En tal caso, se puede afirmar que la presión de aire dentro de la pompa es:

- ☐ a. Menor que la presión fuera.
- ☐ b. Mayor que la presión fuera.
- ☐ c. Igual que la presión fuera.

Un tubo abierto de sección cuadrada de lado L , abierto a la atmósfera se introduce en un recipiente con agua. Si el agua asciende una altura h , mojando el tubo con un ángulo θ , la fuerza vertical que realiza la tensión superficial es:

- ☐ a. $\sigma \cos \theta$
- ☐ b. $4\sigma \cos \theta L$
- ☐ c. $4\sigma \cos \theta$

Si el ángulo húmedo de contacto entre una interfase líquida y una superficie vale 70° , a presión atmosférica:

- ☐ a. Daría lugar a elevación capilar
- ☐ b. Daría lugar a descenso capilar
- ☐ c. El fluido no moja a la pared