

# Operaciones Unitarias 1

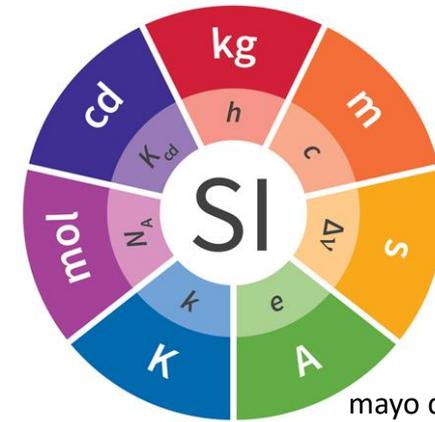
## Caracterización de sistemas fluidos

# Caracterización de sistemas fluidos Sistema de unidades Internacional (SI)

En la actualidad todavía son de uso común dos sistemas: el sistema inglés, el cual también se conoce como United States Customary System (*USCS*, sistema de uso común en Estados Unidos), y el sistema métrico *SI* (por *Le Système International d' Unités*), conocido también como Sistema Internacional.

Este último cubre todo el campo de la ciencia y la ingeniería. Es suficiente un subconjunto de unidades SI que comprendan la química, la gravedad, la mecánica y la termodinámica.

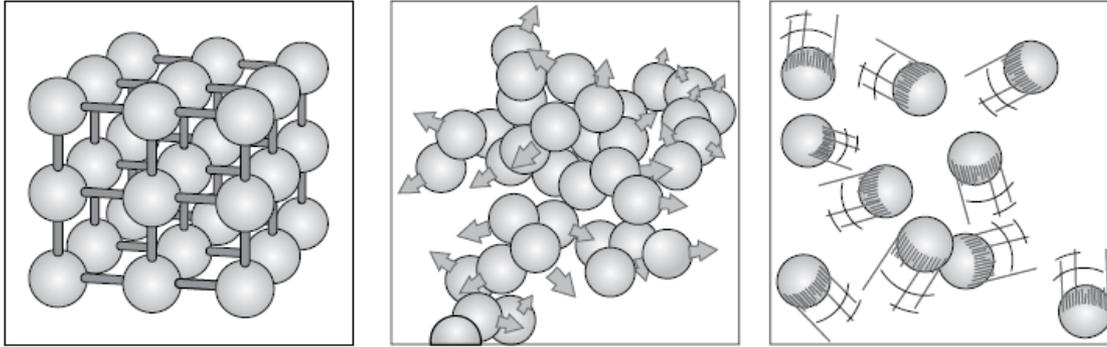
Tres de sus unidades fundamentales son la longitud (m), masa (kg) y tiempo (s). A diferencia del otro sistema (y de los mixtos) no incorpora la unidad fundamental de fuerza, por lo que no es necesario el factor de conversión  $g_c$ .



mayo de 2019

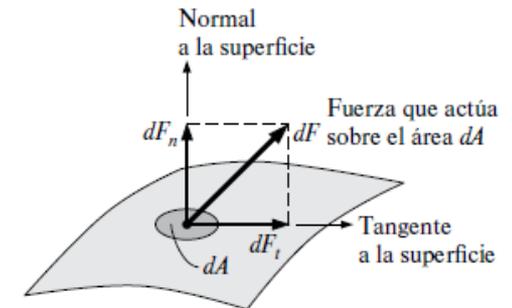
Dimensión	Unidad
Longitud	metro (m)
Masa	kilogramo (kg)
Tiempo	segundo (s)
Temperatura	kelvin (K)
Corriente eléctrica	ampere (A)
Cantidad de luz	candela (cd)
Cantidad de materia	mole (mol)

# Caracterización de sistemas fluidos definición de fluido



Fluido: una sustancia en fase líquida o gaseosa. En un sentido estricto, se puede considerar un fluido como un conjunto de moléculas distribuidas al azar, que se mantienen unidas a través de fuerzas internas relativamente débiles. Estas fuerzas de cohesión habilitan la formación de superficies de interfase

Un modo de diferenciar entre un sólido y un fluido es con base a la capacidad de la sustancia para oponer resistencia a un esfuerzo cortante (o tangencial) aplicado que tienda a cambiar su forma. Un sólido puede oponer resistencia a un esfuerzo cortante aplicado por medio de la deformación. Un fluido se deforma de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante, sin importar lo pequeño que sea. En los sólidos, el esfuerzo es proporcional a la deformación, pero en los fluidos el esfuerzo es proporcional al cambio o razón de deformación.



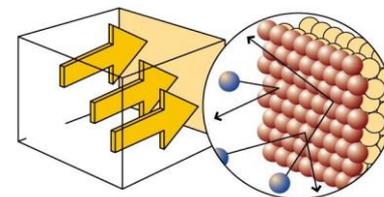
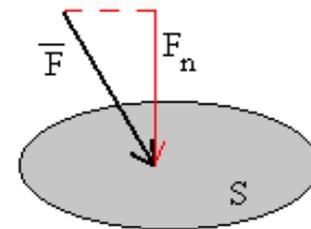
$$\text{Esfuerzo normal: } \sigma = \frac{dF_n}{dA}$$
$$\text{Esfuerzo cortante: } \tau = \frac{dF_t}{dA}$$

# Caracterización de sistemas fluidos Presión

Fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. Se habla de presión solo cuando se trata de un gas o un líquido. En el caso de sólidos es concepto adecuado es esfuerzo normal.

$$P = \frac{F_N}{S} \left[ \frac{N}{m^2} \right] = \left[ \frac{kg}{m \cdot s^2} \right] = [Pa]$$

En una bandeja de 1 m x 1 m, 102 gm de agua ejercen una presión de 1 Pa



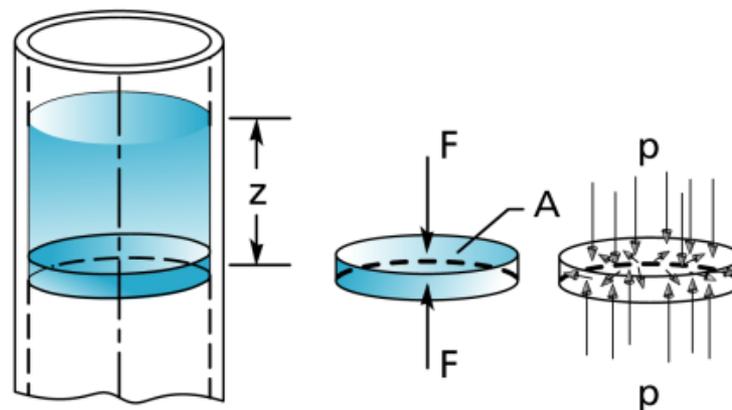
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa}$$

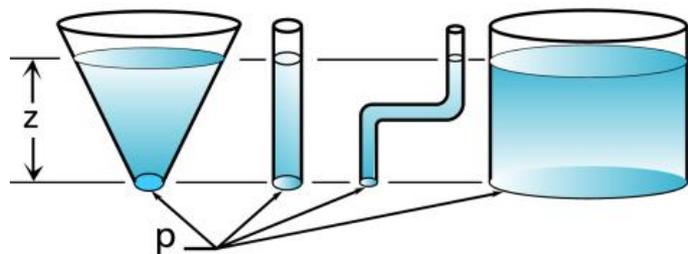
$$= 0.9807 \text{ bar}$$

$$= 0.9679 \text{ atm}$$



$$P = \frac{F}{A} = \rho g z \quad \text{presión}$$

$$P = \frac{P}{\rho g} = z \quad \text{Carga hidrostática}$$



# Caracterización de sistemas fluidos Presión

La presión real que se encuentra en una posición dada se llama presión absoluta,  $P_{abs}$ , y se mide en relación con el vacío absoluto, es decir ausencia total de colisiones (es decir, presión cero absolutas).

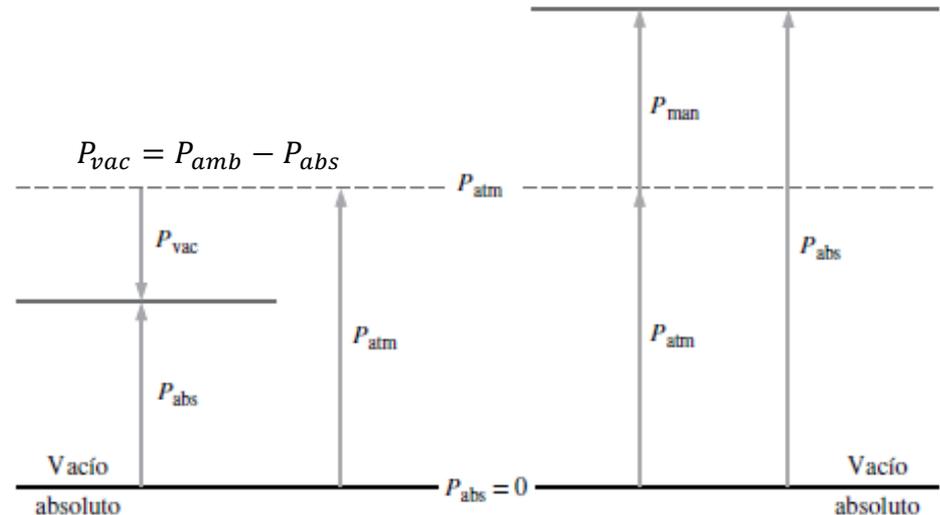
La mayoría de los instrumentos para medir la presión se calibran para que den una lectura de cero en la atmósfera, de modo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local  $P_{amb}$ . Esta diferencia se llama presión manométrica. La  $P_{man}$  puede ser positiva o negativa; las presiones por abajo de la atmosférica se conocen como presiones de vacío; los vacuómetros indican la diferencia entre la presión atmosférica y la absoluta.



InstrumentationTools.com

$$P_{man} = P_{abs} - P_{amb}$$

Presion barométrica  $P_{bar} (msnm) := 103125 \cdot Pa \cdot \exp\left(\frac{-1.1458 \cdot 10^{-4} \cdot msnm}{m}\right)$



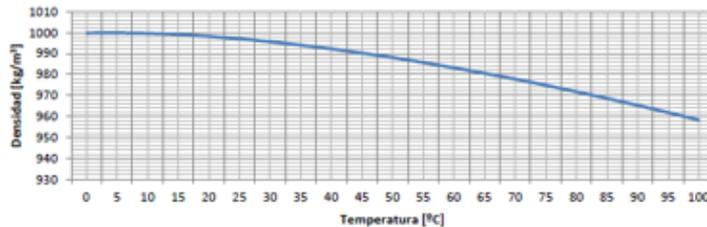
# Caracterización de sistemas fluidos densidad, gravedad específica, peso específico

La densidad se define como  $\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ . Su recíproco es el volumen específico; en general,  $\rho = f(P, T, comp)$ ;

líquidos y sólidos son incomprensibles  $\rho = f(T, comp)$

H<sub>2</sub>O (l) pura correlación 
$$\rho_w(T) := \frac{999.83952 + 16.945176 \cdot (T) - 7.9870401 \cdot 10^{-3} \cdot (T)^2 - 46.170461 \cdot 10^{-6} \cdot (T)^3 + 105.56302 \cdot 10^{-9} \cdot (T)^4 - 280.54253 \cdot 10^{-12} \cdot (T)^5}{1 + 16.879850 \cdot 10^{-3} \cdot (T)} \cdot \frac{kg}{m^3}$$

Correlación densidad - temperatura



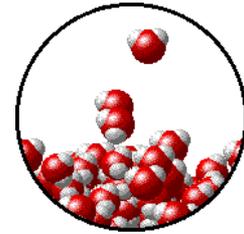
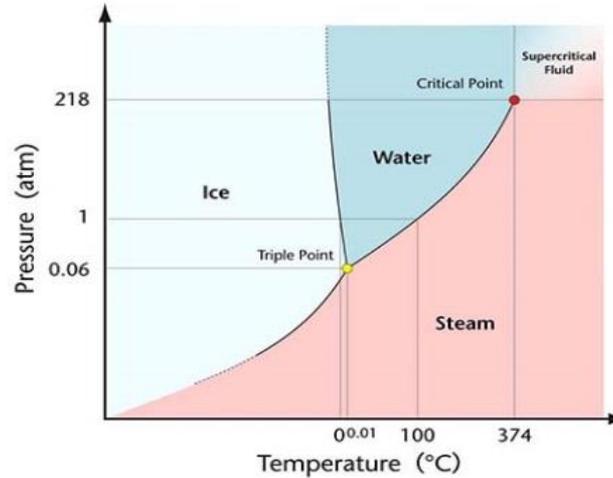
La gravedad específica o densidad relativa se define como  $GE = \frac{\rho}{\rho_{H_2O, 4^\circ C}} [ ]$ . En unidades SI, el valor numérico de la gravedad específica de una sustancia es exactamente igual a su densidad en  $[g \cdot cm^{-3}]$  o  $[kg \cdot L^{-1}]$  (o 0,001 multiplicado por la densidad en  $[kg \cdot m^{-3}]$ ) ya que la densidad del agua a 4 °C es 1  $[g \cdot cm^{-3}]$ .

El peso específico es el peso de una unidad de volumen de una sustancia o densidad de peso,  $\gamma_s = \rho g \left[ \frac{N}{m^3} \right]$ ;  $g$  es la

aceleración gravitacional  $g = 9,80665 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$

# Caracterización de sistemas fluidos presión de vapor

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  $P^{sat}$



Presión de saturación (o de vapor) del agua a varias temperaturas

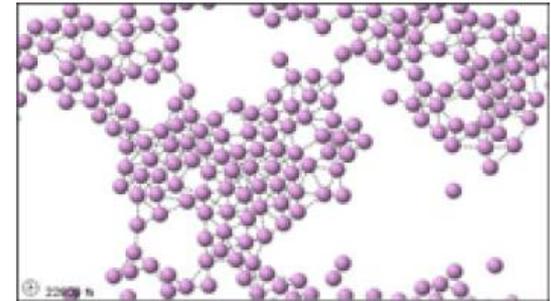
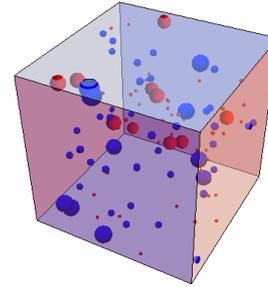
Temperatura $T, ^\circ\text{C}$	Presión de saturación $P_{sat}, \text{kPa}$
-10	0.260
-5	0.403
0	0.611
5	0.872
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1 554
250	3 973
300	8 581

La presión de vapor  $P^v$  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 y resulta ser idéntica a la presión de saturación  $P^{sat}$  ( $P^v \equiv P^{sat}$ ). Se debe tener cuidado en no confundir la presión de vapor con la presión parcial. La presión parcial se define como la presión de un gas o vapor en una mezcla con otros gases

$\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  pura correlación  $P^v = f(T \text{ } ^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) = 0,61121 \exp \left[ \left( 18,678 - \frac{T}{234,5} \right) \left( \frac{T}{257,14+T} \right) \right] [\text{kPa}]$  ecuación de Buck

# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad

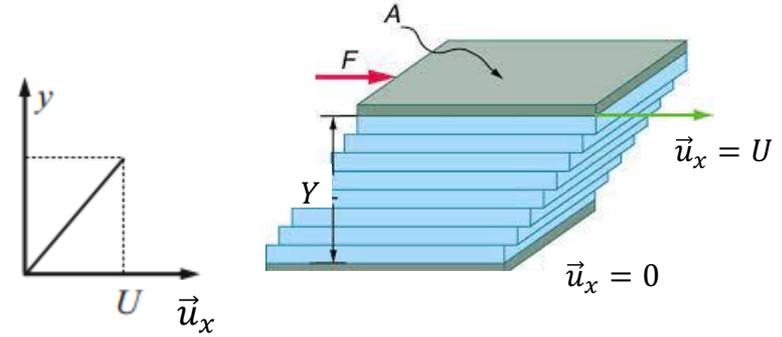
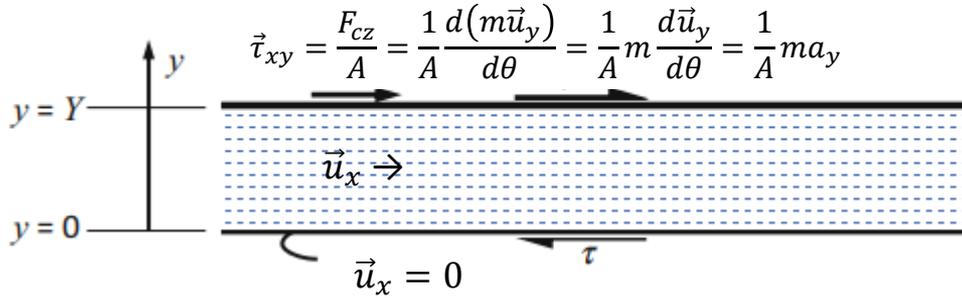
- Es una medida de la resistencia del fluido a la deformación por cizallamiento. Está asociada a su resistencia interna a moverse o fluir.
- Esta resistencia es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. Estas interacciones originan cambios de momento o cantidad de movimiento transferible a través del fluido. Estos cambios se traducen en aceleraciones o desaceleraciones que originan esfuerzos cortantes o tangenciales (Fuerza por unidad de área; 2da Ley de Newton). Las transferencias de momento no elásticas generan efectos irreversibles o disipativos o de fricción (disipación de energía como calor).
- La viscosidad es la propiedad que relaciona la magnitud y dirección del esfuerzo cortante creado, con el cambio de la velocidad respecto a la distancia perpendicular al área de transferencia del momento o cantidad de movimiento.
- Por lo tanto, está asociada a los fenómenos que ocurren en la interacción sólido – fluido, que crea la condición límite de no deslizamiento .



<https://youtu.be/VvDJyhYSJv8>

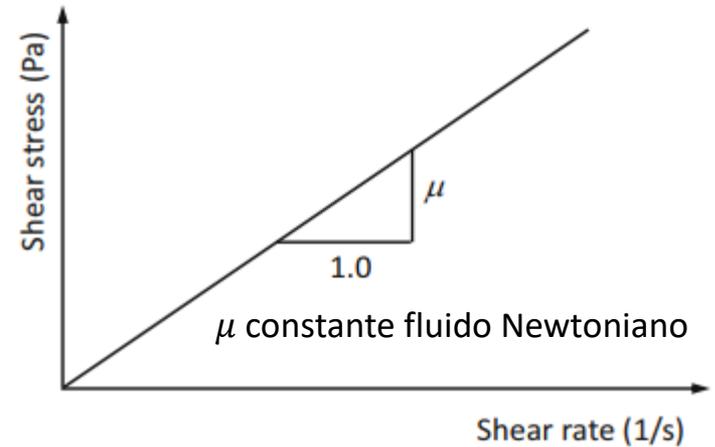
Concepto de viscosidad

# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad



$$\vec{\tau}_{xy} = \mu \frac{d(\vec{u}_x)}{dy} = \mu \dot{\gamma}; \quad \frac{N}{m^2} = \mu \left[ \frac{m}{s} \frac{1}{m} \right] \rightarrow Pa = [Pa \cdot s] \left[ \frac{1}{s} \right]$$

$$\mu [Pa \cdot s] = \mu \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right] \text{ viscosidad absoluta o viscosidad dinámica}$$



$$\mu \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right] \equiv \left[ \frac{N \cdot s}{m^2} \right] \equiv [Pa \cdot s]; \text{ unidad utilizada poise} \equiv 0,1 [Pa \cdot s] \text{ y el centipoise} \equiv 0,01 \text{ poise} \equiv 1 \times 10^{-3} \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$$

# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **newtoniano**

Ley de Newton de la viscosidad: aplicable a fluidos con  $\mu$  constante (independientes de  $\frac{d(\vec{u}_x)}{dy}$  y del

$$\vec{\tau}_{xy} = \mu \frac{d(\vec{u}_x)}{dy} = \mu \dot{\gamma}$$

tiempo de aplicación de la tensión cortante) a una dada T. El gradiente de velocidad  $\dot{\gamma} = \frac{d(\vec{u}_x)}{dy}$  es la

fuerza impulsora para el transporte de la cantidad de movimiento.

La tensión cortante  $\vec{\tau}_{xy}$  ejercida en la dirección  $\vec{x}$  sobre una porción de fluido que se encuentra en la dirección  $\vec{y}$  es

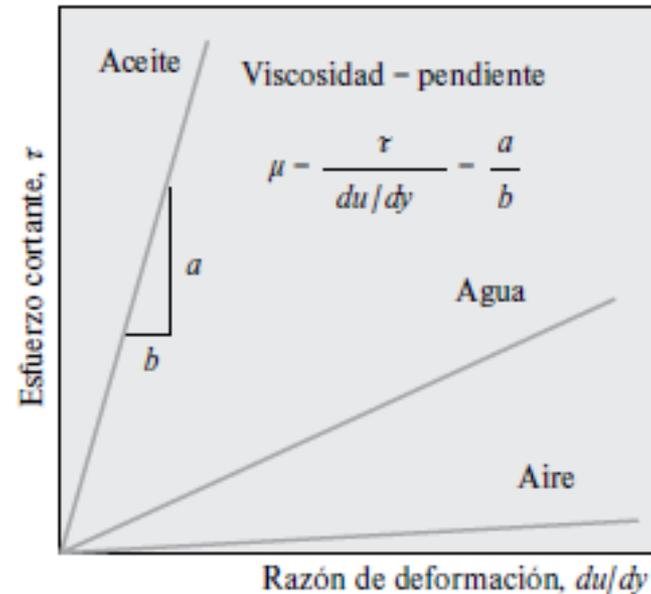
proporcional al gradiente en  $\vec{y}$  de  $\vec{u}_x$  ( $\frac{d(\vec{u}_x)}{dy}$ ).

## Viscosidad cinemática $\nu$

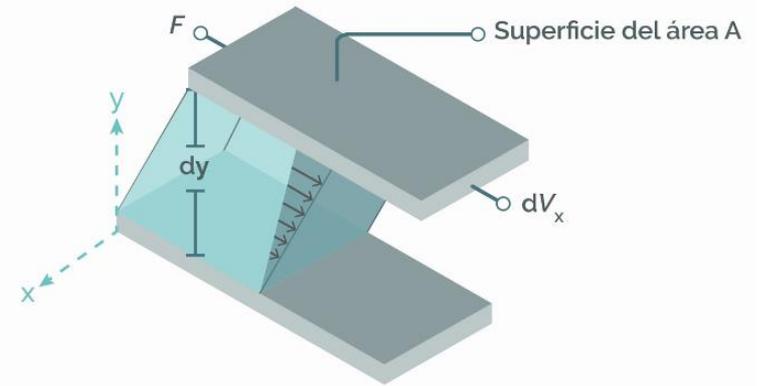
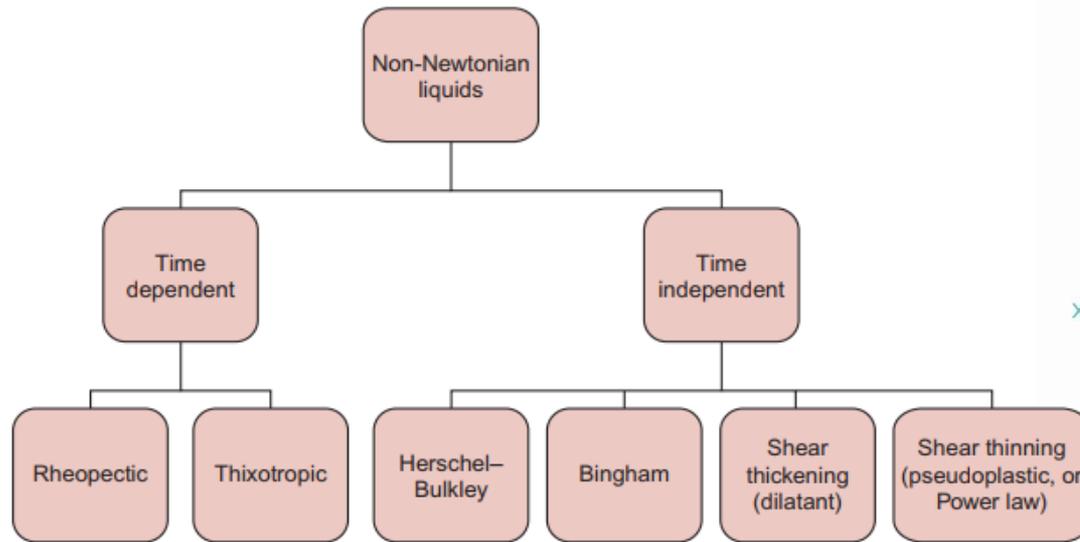
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{m^2}{s} \right];$$

otra unidad de la viscosidad cinemática es el stoke; 1

$$\text{stoke} = \left[ \frac{cm^2}{s} \right] = 1 \times 10^{-4} \left[ \frac{m^2}{s} \right].$$



# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano**



Se clasifican como independientes del tiempo y dependientes del tiempo. Esta clasificación se refiere al comportamiento de la viscosidad:

- que cambia con el gradiente de velocidad  $\dot{\gamma}$  (cambios en la pendiente  $\eta$ );
- o con  $\dot{\gamma}$  y el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante.

# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** independientes del tiempo

Responden inmediatamente con un flujo tan pronto como se aplica una pequeña cantidad de esfuerzo cortante.

Cambio con el gradiente de velocidad :

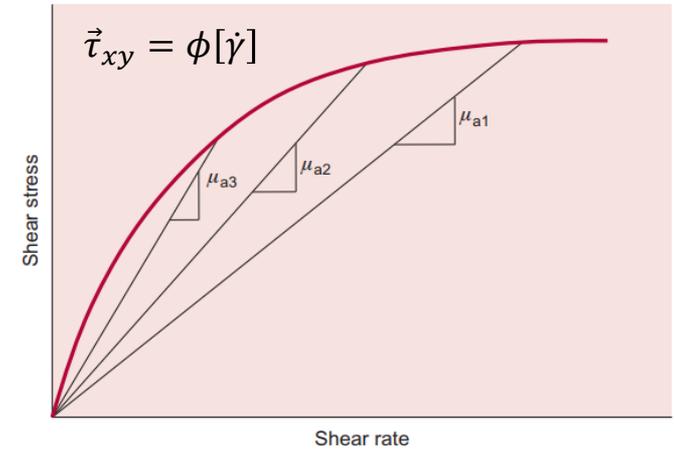
la tensión cortante  $\vec{\tau}_{xy}$  es función  $\phi$  **no lineal** del gradiente de velocidad

Se define la viscosidad aparente (o efectiva) mediante la relación:

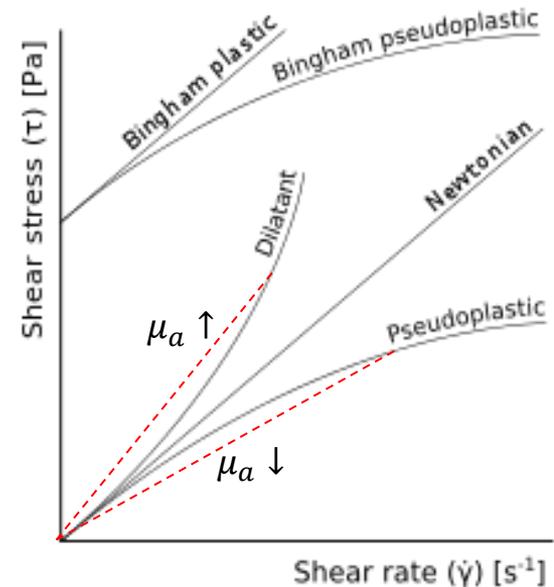
$$\mu_a = \frac{\phi[\dot{\gamma}]}{\dot{\tau}_{xy}} ; \mu_a \text{ es la pendiente de la línea recta que une al origen con cualquier punto sobre la curva de flujo; indica el comportamiento de la tensión cortante con el gradiente de velocidad}$$

En fluidos no newtonianos es importante establecer a qué  $\dot{\gamma}$  se refiere  $\eta$  (o  $\mu_a$ )

Dos tipos importantes de líquidos no newtonianos independientes del tiempo: fluidos adelgazantes de cizallamiento ( $\mu_a$  disminuye con el incremento de  $\dot{\gamma}$ ) y líquidos espesantes de cizallamiento ( $\mu_a$  aumenta con el incremento de  $\dot{\gamma}$ ).



$\mu_a$  depende del gradiente de cizallamiento  $\dot{\gamma}$



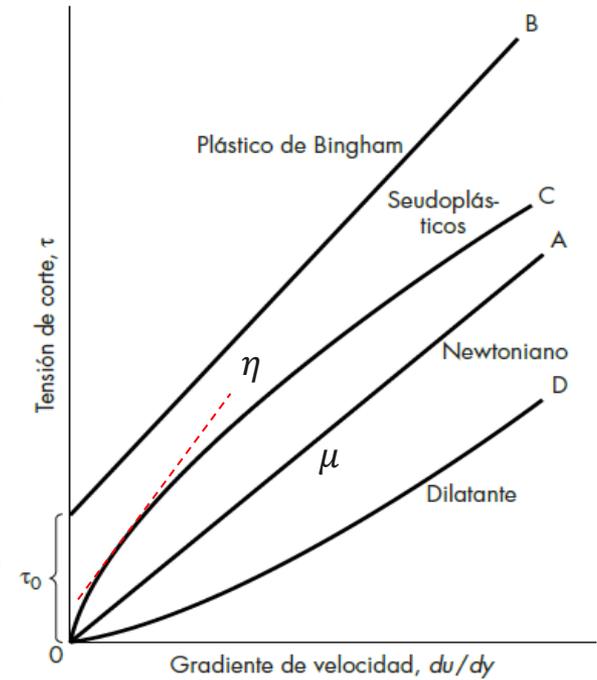
# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** independientes del tiempo

Fluidos No Newtonianos  $\vec{\tau}_{xy} = \phi[\dot{\gamma}]$

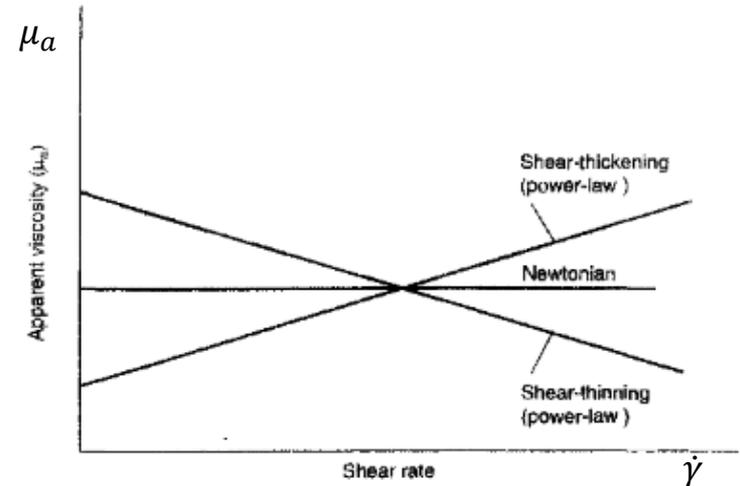
Según el comportamiento de  $\mu_a$  ( o de la pendiente  $\eta$ , los fluidos no newtonianos se clasifican :

**Pseudoplásticos o adelgazantes al corte (*shear-thinning fluid*):** el valor de  $\mu_a$  disminuye con  $\dot{\gamma}$  ; causa: alineamiento de las estructuras (i.e. macromoléculas en polímeros o partículas en *slurries*) ejemplos: suspensión acuosa de pulpa de papel, leche condensada, mayonesa, mostaza.

**Dilatante o espesantes al corte (*shear-thickening fluid*):** el valor de  $\mu_a$  se incrementa con  $\dot{\gamma}$  ; causa: incremento de volumen con  $\dot{\gamma}$  ; ejemplo suspensiones de almidón al 60% (oobleck)



<https://youtu.be/e6VbrjtrGr0> Como fabricar oobleck  
[https://youtu.be/2mYHGn\\_Pd5M](https://youtu.be/2mYHGn_Pd5M) Fluidos No Newtonianos

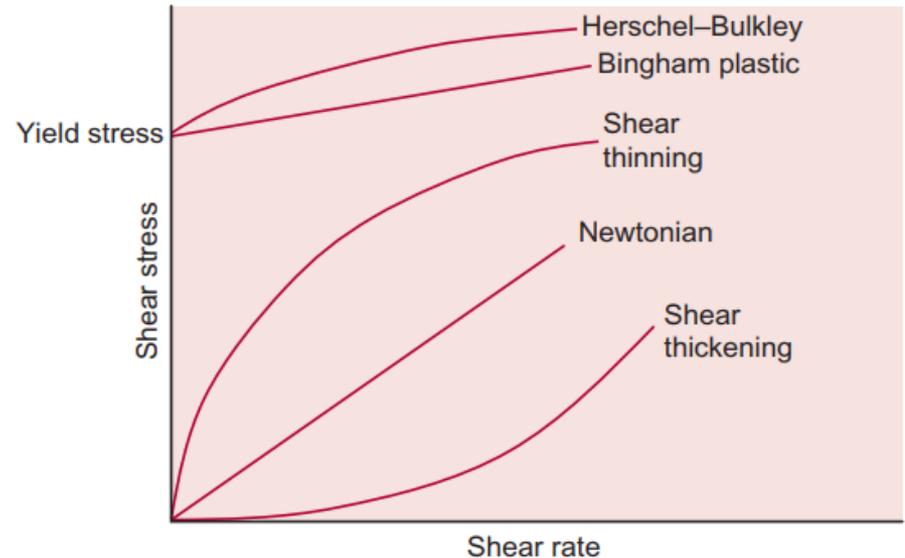


# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** independientes del tiempo

Otra clase importante requiere la aplicación de  $\vec{\tau}_{xy}$  antes de cualquier respuesta. Ejemplo: algunos ketchup no fluirán hasta que no se los golpee. Después de la aplicación  $\vec{\tau}_0$ , la respuesta puede ser similar a la de un líquido newtoniano; en ese caso, se llaman plásticos de Bingham. Por otro lado, si la respuesta es similar a un flujo de adelgazamiento por cizallamiento, entonces se llaman fluidos de Herschel Bulkley. Estos fluidos presentan una red intermolecular que resiste la fuerza de cizallamiento de bajo nivel cuando están en reposo. Es solo cuando la tensión aplicada excede las fuerzas que mantienen unida la red que el material comienza a fluir.



Eugene Cook Bingham  
1878 -1945; fundador  
de la reología



# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** dependientes del tiempo

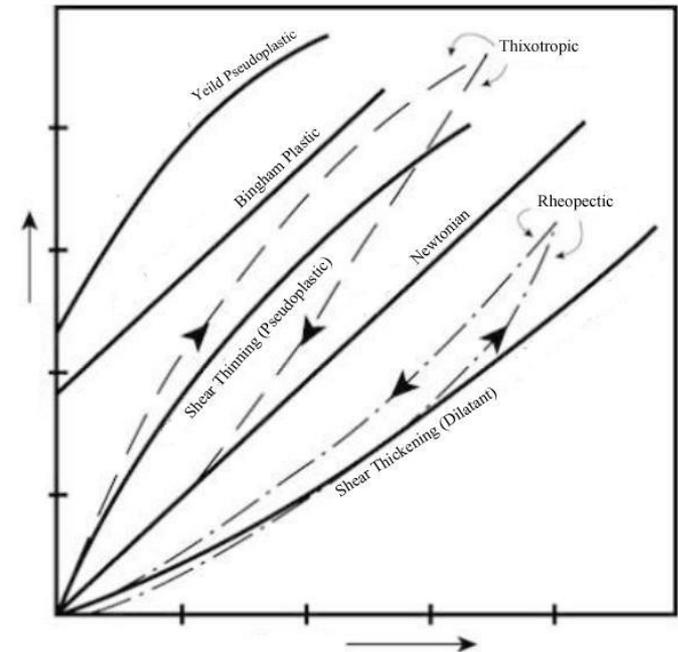
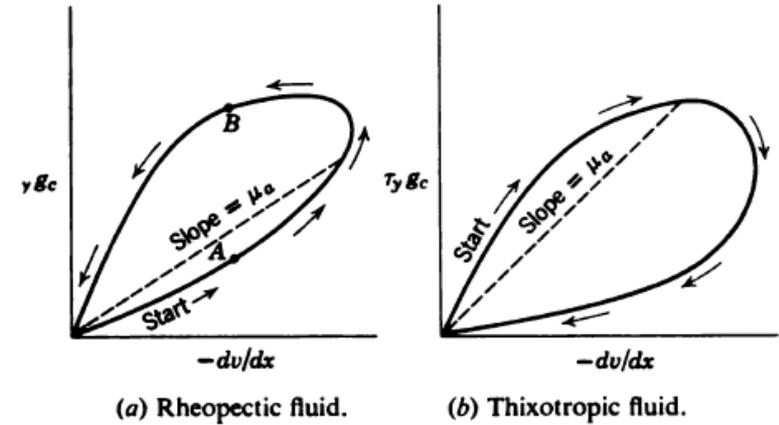
$$\vec{\tau}_{xy} = \phi[\dot{\gamma}, \theta]$$

muestran un cambio en la viscosidad aparente con el tiempo de aplicación de  $\vec{\tau}_{xy}$

Según el comportamiento de  $\mu_a$  se clasifican en:

**Reopécticos:** muestran un *incremento* en la viscosidad aparente durante un tiempo después de que se aplica por primera vez un esfuerzo constante. Las suspensiones de bentonita y algunos sales son reopécticos. **Tixotrópicos:** muestran un *decremento* de la viscosidad aparente con el tiempo, bajo un esfuerzo constante. Un ejemplo de comportamiento tixotrópico se encuentra en las pinturas. La salsa de tomate y mayonesa pueden presentar ligeros comportamientos tixotrópicos

En reología, se incorporan los fluidos viscoelásticos: presentan recuperación elástica luego de la deformación



# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad; modelos

$$\vec{\tau}_{xy} = \phi[\dot{\gamma}]$$

Modelo de Ostwald – de Waele o de ley de potencia (LP)  $\vec{\tau} = K(\dot{\gamma})^n$

Modelo de Herschel Bulkley  $\vec{\tau} = K(\dot{\gamma})^n + \vec{\tau}_o$



Fluid	K	n	$\vec{\tau}_o$	Typical examples
Herschel–Bulkley	>0	0 < n < ∞	>0	minced fish paste, raisin paste
Newtonian	>0	1	0	water, fruit juice, honey, milk, vegetable oil
Shear-thinning (pseudoplastic)	>0	0 < n < 1	0	applesauce, banana purée, orange juice concentrate
Shear-thickening	>0	1 < n < ∞	0	some types of honey, 40% raw corn starch solution
Bingham plastic	>0	1	>0	toothpaste, tomato paste



K, coeficiente de consistencia; n, índice reológico; n < 1 para Pseudoplásticos y n > 1 para dilatantes

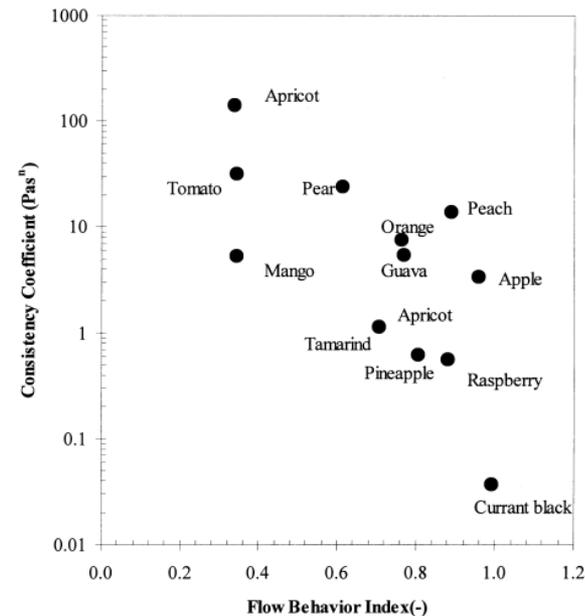
Modelo de Casson  $\vec{\tau}^{0,5} = K(\dot{\gamma})^{0,5} + \vec{\tau}_o^{0,5}$



apricot



pinapple



Guava



Raspberry

$$\vec{\tau} = K(\dot{\gamma})^n = [K(\dot{\gamma})^{n-1}]\dot{\gamma} = \mu_a \dot{\gamma}$$

$\mu_a$  depende del gradiente de cizallamiento  $\dot{\gamma}$

Dr. Ing. José Luis Zacu.

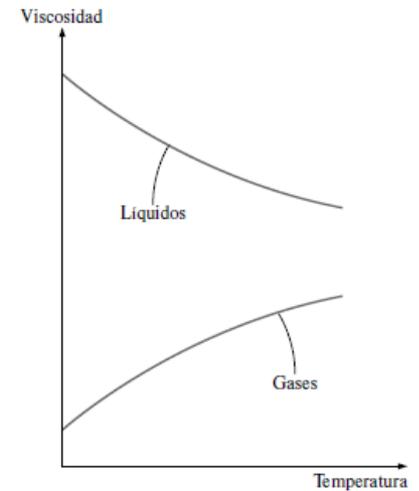
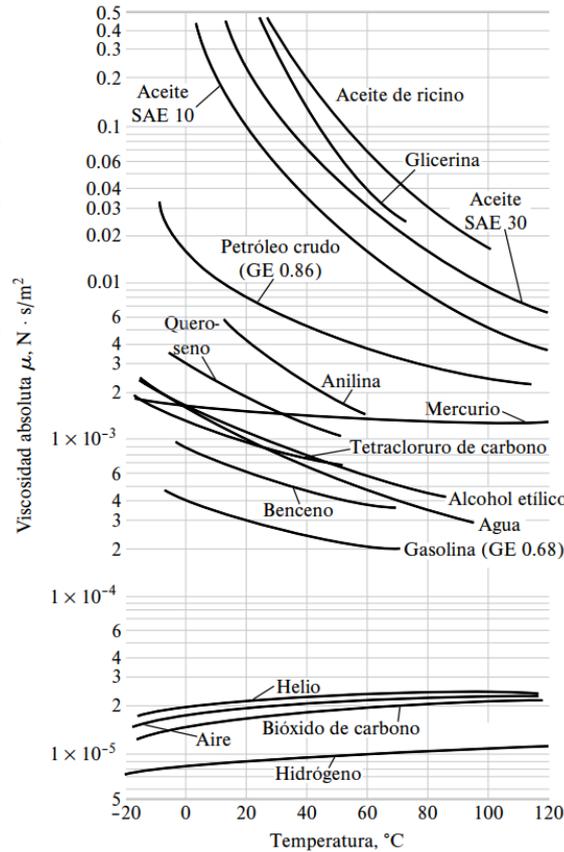
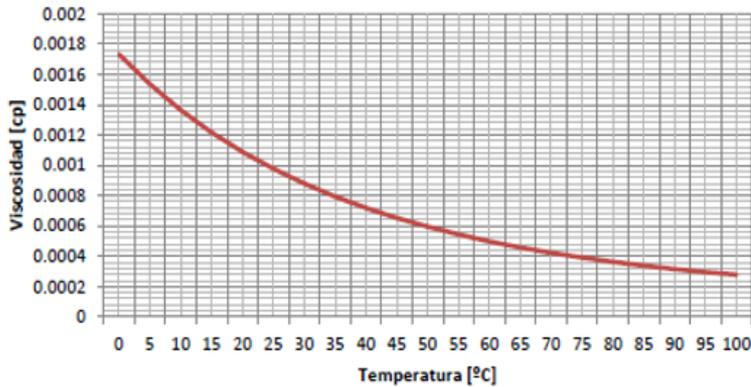
# Caracterización de sistemas fluidos viscosidad; correlaciones

Gases  $\mu = \frac{aT^{\frac{1}{b}}}{1+\frac{T}{b}}$  (aire:  $a = 1,458 \times 10^{-6} \left[ \frac{kg}{m \cdot s K^{0,5}} \right]$   $b = 110,4 [K]$ )

Líquidos  $\mu = a10^{\frac{b}{T-c}}$  (agua:  $a = 2,414 \times 10^{-5} \left[ \frac{N \cdot s}{m^2} \right]$   $b = 247,8 [K]$   $c = 140 [K]$   $0 < T < 370 [^{\circ}C]$ )

Temperatura Del agua (°C)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Temperatura Del agua (°C)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
5	$1.52 \times 10^{-6}$	25	$0.90 \times 10^{-6}$
10	$1.31 \times 10^{-6}$	30	$0.80 \times 10^{-6}$
15	$1.14 \times 10^{-6}$	35	$0.73 \times 10^{-6}$
20	$1.01 \times 10^{-6}$	40	$0.66 \times 10^{-6}$

Correlación viscosidad - temperatura



Viscosidades dinámicas de algunos fluidos a 1 atm y 20 °C (a menos que se indique otra cosa)

Fluido	Viscosidad dinámica $\mu$ , kg/m · s
<b>Glicerina:</b>	
-20 °C	134.0
0 °C	10.5
20 °C	1.52
40 °C	0.31
<b>Aceite para motor:</b>	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Mercurio	0.0015
Alcohol etílico	0.0012
<b>Agua:</b>	
0 °C	0.0018
20 °C	0.0010
100 °C (líquido)	0.00028
100 °C (vapor)	0.000012
Sangre, 37 °C	0.00040
Gasolina	0.00029
Amoniaco	0.00015
Aire	0.000018
Hidrógeno, 0 °C	0.0000088

agua  $\mu = \exp \left[ 1,003 - 1,479 \times 10^{-2} \left( \frac{9T}{5} + 32 \right) + 1,892 \times 10^{-5} \left( \frac{9T}{5} + 32 \right)^2 \right]$   $0 < T < 100 [^{\circ}C]$