

## MECANICA DE LOS FLUIDOS TEMA 1

**Propiedades de los fluidos.** Definición de la mecánica de los fluidos. Campo de aplicación. Características físicas del estado fluido: densidad, peso específico, viscosidad, compresibilidad. Clasificación de los fluidos: gases y líquidos ideales y reales, fluidos Newtonianos y no Newtonianos. Medición de la viscosidad.

### DEFINICIÓN DE FLUIDO

Un fluido es una porción de materia que se deforma constantemente a medida que se le aplica un esfuerzo, por pequeño que este sea; a diferencia de un sólido, que requiere un esfuerzo considerable para deformarse en forma finita o no continua. Una sustancia se puede encontrar en forma sólida, líquida o gaseosa dependiendo de la temperatura. En grandes escalas de tiempo algunos sólidos se comportan como fluidos por ejemplo la mezcla asfáltica que se usa para pavimentar o el vidrio de las ventanas de las catedrales medievales.

**DEFINICIÓN DE MECANICA DE LOS FLUIDOS:** No hay una única definición de la mecánica de los fluidos. Varía con los autores y con el tiempo.

En base a esto podemos definir la mecánica de los fluidos en la parte de la mecánica que estudia las leyes del comportamiento de los fluidos en equilibrio (estática), en movimiento: cinemática (trata de las velocidades y líneas de corriente), dinámica (incluye las relaciones entre velocidades y aceleraciones y las fuerzas que las producen) y la interacción de estos con sólidos o con otros fluidos en las fronteras.

Se divide en varias categorías: Hidrodinámica, Hidráulica, Dinámica de gases, Aerodinámica, Meteorología, Oceanografía y la Hidrología. Con la llegada de las computadoras se ha desarrollado la Dinámica de Fluidos Computacional que permite estudiar problemas avanzados con la ayuda de herramientas matemáticas complejas en tiempos breves.

**CAMPO DE APLICACIÓN:** las principales aplicaciones que interesan en la ingeniería se dan en el campo de los gases y los líquidos. Existen aplicaciones especiales en astrofísica y en ingeniería nuclear en el campo del plasma (gas ionizado a temperaturas superiores a 2500 K)

Ejemplos: maquinas de fluidos (turbinas, bombas), redes de distribución de agua y gas, regulación de máquinas, transmisiones y controles hidráulicos y neumáticos, transmisiones automáticas, aeronáutica, astronáutica, extracción de petróleo, gas natural, minerales, concentración de los mismos, modelos atmosféricos (meteorología), marítimos (oceanografía), geológicos, aplicaciones médicas, automotrices, generación de energía, aplicaciones industriales, aplicaciones médicas y otras.

### CARACTERISTICAS FÍSICAS DEL ESTADO FLUIDO

**DENSIDAD:** se define como la relación entre masa y volumen o es la masa por unidad de volumen. En símbolos:

$$\rho = m/V$$

Donde m es la masa y V el volumen.

A esta definición también se le llama densidad absoluta. Sus unidades son  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{lbm/ft}^3$ , etc.

La densidad varía con la temperatura y la presión. A medida que aumenta la temperatura disminuye la densidad, siendo la disminución más notoria en los gases. La presión produce un aumento en la densidad a medida que aumenta la primera. Este efecto es más importante en los gases que en los líquidos.

Densidad relativa: es la relación entre la densidad de la sustancia y la del agua a 4 °C y a 1 atm de presión. En símbolos:

$$\delta = \rho_s / \rho_a$$

donde  $\rho_s$  es la densidad de la sustancia y  $\rho_a$  la densidad del agua a 4 °C y 1 atm de presión.

Esta definición es la que corresponde a los físicos, muchas veces los ingenieros usan la densidad del agua a 15,6 °C (60 °F) y se la llama densidad relativa 60/60.

Algunos valores de densidad:

Sustancia	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	1000
Mercurio	13600
Glicerina	1264
Petróleo crudo	900
Etanol (95%)	802
Acido nítrico	1502
Aceite de soja	923

Ver tablas de propiedades en Mecánica de los fluidos de Francini, Mecánica de Fluidos de Mattaix, Manual del Ing. Químico (Perry), Problemas de flujo de fluidos, (Valiente Banderas).

Unidades: kg/m<sup>3</sup>, lbm/ft<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>, UTM/m<sup>3</sup>.

Además se usan otras unidades basadas en definiciones especiales de la densidad.

- Grados Baumé:

para líquidos más ligeros que el agua  $^{\circ}\text{Be} = (140/\rho_r) - 130$

Para líquidos más pesados que el agua  $^{\circ}\text{Be} = 145 - 145/\rho_r$

Donde  $\rho_r$  es la densidad relativa 60°F/60°F

- Grados API: se usa para los derivados del petróleo, siempre para líquidos más livianos que el agua.

$$^{\circ}\text{API} = (141,5/\rho_r) - 131,5$$

VOLUMEN ESPECÍFICO: es la inversa de la densidad. En símbolos:

$$v = 1/\rho$$

Peso específico: es el peso por unidad de volumen. En símbolos:

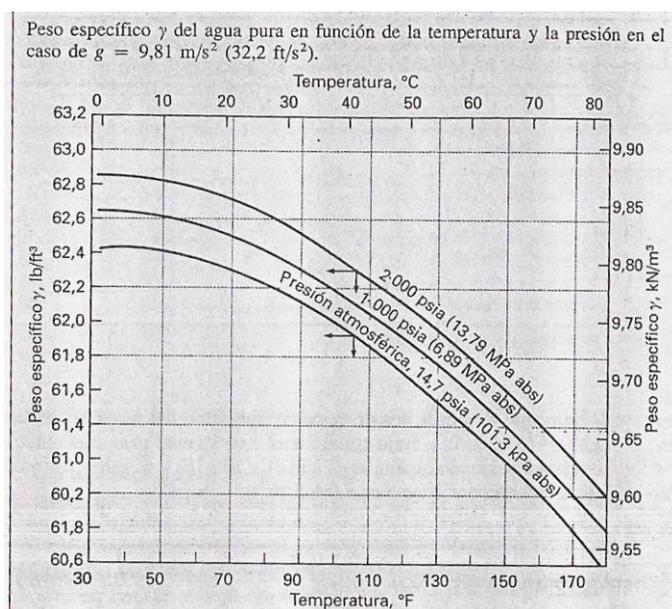
$$\gamma = W/V$$

Donde W es el peso y V el volumen. Las unidades son N/m<sup>3</sup>, slug/m<sup>3</sup>, kgf/m<sup>3</sup>.

La relación con la densidad viene dada por:

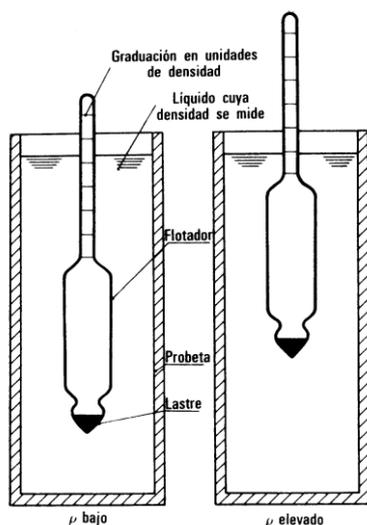
$$\gamma = W/V = m \cdot g/V = g \rho$$

## TEMA 1: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS



La medición de la densidad se usan densímetros o si no picnómetros

El densímetro se basa en el principio de Arquímedes en el cual un cuerpo sumergido en el seno de un fluido recibe una fuerza de abajo hacia arriba igual al peso del líquido desplazado. El instrumento consiste en un cuerpo hueco con un lastre en la parte inferior y un vástago circular en la parte superior. El peso del líquido es igual a  $m \cdot g$  donde  $m$  es la masa y  $g$  la aceleración de la gravedad. Para un peso determinado del densímetro, éste se sumergirá más o menos según sea la densidad del líquido. La longitud de la fracción de vástago emergente es proporcional a la densidad. En base a este principio se confecciona la escala. Cada densímetro tiene un determinado rango de medición.



**Picnómetro:** consiste en pesar un volumen definido de líquido, con esto se saca el peso específico y por cálculo la densidad.

**Balanza de Mohr:** se sumerge una pesa de volumen y peso conocidos en el líquido suspendidos en un brazo de balanza equilibrado. La desviación del brazo y el peso aplicado para volver al equilibrio es el peso del líquido desalojado. Se procede de idéntica manera que el picnómetro

**Densidad de mezclas líquidas:**

Mezclas ideales (aquellas que no reducen su volumen al mezclarse):

$$1/\rho_m = \sum (X_i / \rho_i)$$

Donde  $\rho_m$  = densidad de la mezcla  
 $X_i$  = fracción en masa de cada componente  
 $\rho_i$  = densidad de cada componente

Densidad de gases:

Gases ideales:  $PV = nRT = M RT/PM$

**$\rho_{gas} = M /V = P PM/RT$**

Donde M masa del gas  
 PM peso molecular  
 R cte universal de los gases  
 n número de moles  
 V volumen del gas  
 P presión del gas

Gases reales: se usa la ecuación corregida por el factor de compresibilidad (Z) el cual se obtiene en función de la presión y temperatura reducida. En símbolos  
 $PV = ZnRT$

**$\rho_{gas} = P PM / (ZRT)$**

Mezcla de gases: en este caso se define la temperatura reducida ( $T_r$ ) y la presión reducida ( $P_r$ ) para la mezcla a partir de la Presión crítica ( $P_c$ ) y temperatura crítica ( $T_c$ ) de cada componente:

**$P'_c = \sum P_{ci} y_i$**   
 **$T'_c = \sum T_{ci} y_i$**

**$P'_r = P/P'_c$**   
 **$T'_r = T/T'_c$**

Y con esta presión y temperatura crítica se determina Z para la mezcla y se procede como un gas real.

MODULO DE COMPRESIBILIDAD:

El módulo de elasticidad volumétrico en los fluidos se llama coeficiente o módulo de compresibilidad y se define como la variación de presión que produce una variación unitaria de volumen. En símbolos

**$E = - \Delta P \cdot V / \Delta V,$                       en forma diferencial  **$E = 1/C = - \delta P \cdot V / \delta V$****

Donde E = módulo de compresibilidad  
 $\Delta P$ ;  $\delta P$  = variación de presión  
 V = volumen  
 $\Delta V$ ;  $\delta V$  = variación de volumen

Es análogo al módulo de elasticidad de los sólidos y se mide en unidades de presión. Depende de la temperatura y de la presión. Aumenta con la temperatura hasta un punto y luego disminuye. Con la presión aumenta constantemente

Presión Psia	Temperatura °F				
	32	68	120	200	300
15	292000	320000	332000	308000	
1500	300000	330000	342000	319000	248000
4500	317000	348000	362000	338000	271000
15000	380000	410000	426000	405000	350000

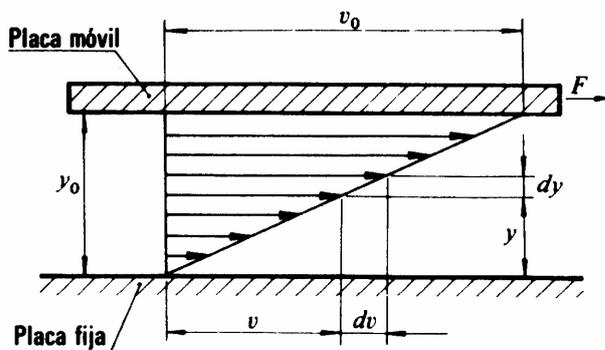
En rigor todos los fluidos son compresibles, si comparamos el módulo de elasticidad volumétrico para el agua y el acero vemos que este último alcanza 26000000 psi y el agua es 80 veces más compresible que el acero. El mercurio con  $E_v = 3800000$  psi tiene una compresibilidad del 8 % de la del agua y el tetracloruro de carbono  $E_v = 160000$  es unas 2 veces más compresible que el agua.

¿Cuándo se puede considerar que el agua es incompresible?. Por ejemplo considerando un valor medio de  $E_v$  de 320000, una variación de 1000 psi dá como resultado una variación del volumen del orden de 0,3 %, en este caso se puede considerar incompresible.

### VISCOSIDAD

La viscosidad de un fluido es la medida de su resistencia a la deformación cortante o angular. El origen de la misma es debido a las fuerzas intermoleculares.

Consideramos la siguiente experiencia colocamos dos placas separadas una distancia  $y_0$ , entre las dos se coloca un fluido (por ejemplo aceite). La placa inferior se mantiene fija y la superior se desplaza por efecto de una fuerza  $F$  a una velocidad  $v_0$ . Por efecto de las fuerzas de adhesión la capa de líquido en contacto con cada placa. Las restantes capas de líquido tienen velocidades comprendidas entre 0 y  $v_0$ .



La relación entre fuerza y velocidad se conoce como ley de Newton de la viscosidad.

$$F = \text{cte. } A \cdot dv/dy$$

Donde  $F$  fuerza actuante  
 $A$  área de la placa  
 $dv/dy$  gradiente de velocidad.

$$F/A = \text{cte } dv/dy$$

A la relación  $F/A$  es el esfuerzo de corte  $\tau$

A la constante se le llama coeficiente de viscosidad y es una propiedad de la substancia. La viscosidad depende de la temperatura y de la presión. Se la simboliza con la letra griega  $\mu$ .

La ecuación se puede escribir como

$$\tau = \mu \cdot dv/dy$$

Las dimensiones de  $\mu$  son  $\{[F]/[A]\}/[T]^{-1} = [F][T]/[A]$

Las unidades son  $\text{Ns/m}^2$ ,  $\text{lb.s/ft}^2$ , una de las unidades más usadas es el poise (P) que es equivalente a  $0,10 \text{ N.s/m}^2$ . Dado que es muy grande se usa el centipoise (cP) que es igual a  $0,01 \text{ P}$ . La viscosidad del agua es de 1 cp a  $15^\circ\text{C}$  ( $68,4^\circ\text{F}$ ).

Los datos de viscosidad se pueden encontrar en tablas o en ábacos para las distintas substancias.

La viscosidad varía con la temperatura disminuye para los líquidos y aumenta para los gases. Esta variación se debe al origen de las fuerzas viscosas en los líquidos y en los gases.

Esta relación puede ser lineal o nó, es decir  $\mu$  es constante o varía con el gradiente de velocidad y esta particularidad permite clasificar a los fluidos en newtonianos ( $\mu$  constante) y no newtonianos ( $\mu$  variable).

En el caso de los fluidos no newtonianos se han propuesto ecuaciones de variación de  $\mu$  en función de diversos parámetros. Una metodología es comparar los comportamientos con un fluido newtoniano y definir una viscosidad aparente que cumpla con la ecuación de Newton. Esta viscosidad aparente varía con el gradiente de velocidad y es la pendiente de una recta que es tangente a la curva del esfuerzo de corte en un punto correspondiente a ese gradiente de corte.

Damos a continuación algunos ejemplos:

Fluido	Ecuación	Viscosidad aparente
Newtoniano	$\tau = \mu \cdot dv/dy$	Constante
Pseudoplástico (ley exponencial)	$\tau = K \cdot (dv/dy)^n \quad n < 1$	$\mu_0 = K \cdot (dv/dy)^{n-1}$ $n < 1$
Dilatante (ley exponencial)	$\tau = K \cdot (dv/dy)^n \quad n > 1$	$\mu_0 = K \cdot (dv/dy)^{n-1}$ $n > 1$
Plástico Bingham	$\tau = \tau_0 + K_p \cdot dv/dy$	$\mu_0 = \tau_0 / (dv/dy) + K_p$
Plástico Casson o Tixotrópico	$\tau = \mu \cdot dv/dy$	$\mu_0 = [(\tau_0 / (dv/dy))^{1/2} + K_p]^2$

K y n dependen del fluido. K se llama coef de consistencia del fluido y n es n es el indice de comportamiento del fluido ; es un coeficiente experimental o parámetro empírico de ajuste de curva que depende de la substancia.

Estos dos coeficientes experimentales son válidos para cada substancia en un rango limitado de velocidades de corte y dependen de la misma. Esta ecuación no predice la viscosidad a velocidad cero ni a velocidad infinita. Las dimensiones de K depende del valor numérico de n. A pesar de todas estas objeciones es la ecuación más ampliamente usada y de la que se disponen más datos experimentales de los parámetros n y m.

Ejemplos de fluidos

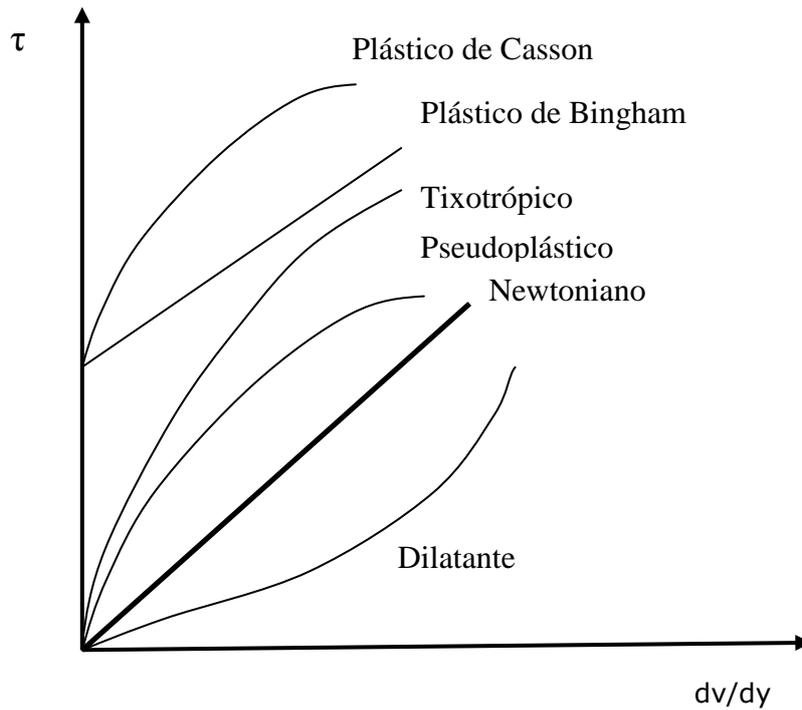
Newtonianos: todos los gases, dispersiones de gas en agua, líquidos de bajo peso molecular, soluciones acuosas de bajo peso molecular, petróleo,

Pseudoplásticos: soluciones de goma, adhesivos, soluciones de polímeros, algunas grasas, suspensiones de almidón, acetato de celulosa, mayonesa, algunas sopas y suspensiones de detergentes, algunas pulpas de papel, pinturas, pasta de papel de empapelar, fluidos biológicos

Dilatantes: algunas soluciones de harina de maíz y azúcar, almidón, arenas movedizas, arena de playa húmeda, polvo de hierro disperso en líquidos de baja viscosidad, agregados de cemento húmedo.

Plásticos Bingham: algunos plásticos fundidos, margarina, grasa de cocina, algunas grasas, pasta de dientes, algunas sopas y suspensiones de detergentes, algunas pulpas de papel.

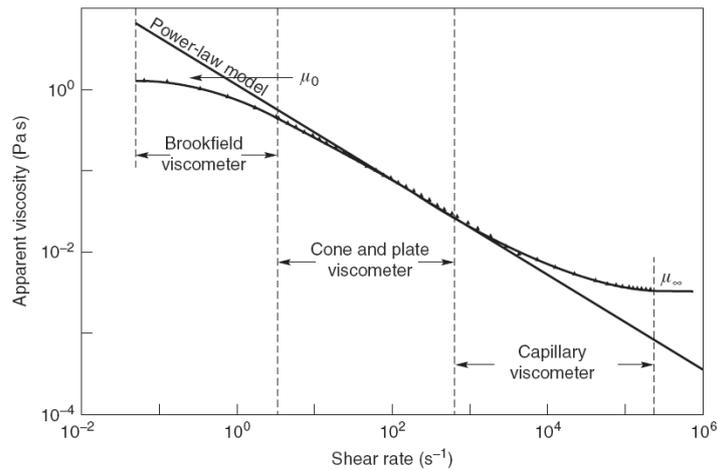
Plásticos Casson: sangre, salsa de tomate, jugo de naranja, chocolate cocido, tinta de impresión



Typical values of power-law constants for a few systems

System	Temperature (K)	$n$ ( _ )	$K$ (Pa s $n$ )
<b>Agro- and food-related products</b>			
Aerated poultry waste slurry ( $x$ is % volume of solids)	283–298	$1.81-0.161 \ln x$	$1.12 \cdot 10^{-11} (x)^{2.59}$
Ammonium alginate solution (3.37%)	297	0.5	13
Apple butter	–	0.15	200
Apple sauce	300	0.3–0.45	12–22
Apricot puree	300	0.3–0.4	5–20
Banana puree	293–315	0.33–0.5	4–10
Carrot puree	298	0.25	25
Chicken (minced)	296	0.10	900
Chocolate	303	0.5	0.7
Guava puree	296.5	0.5	40
Human blood	300	0.9	0.004
Mango pulp	300–340	0.3	3–10
Marshmallow cream	-	0.4	560
Mayonnaise	298	0.6	5–100
Papaya puree	300	0.5	10
Peach puree	300	0.38	1–5
Peanut butter	–	0.07	500
Pear puree	300	0.4–0.5	1–5
Plum puree	287	0.35	30–80
Tomato concentrate (5.8% solid)	305	0.6	0.22
Tomato ketch up	295	0.24	33
Tomato paste	–	0.5	15
Whipped desert toppings	-	0.12	400
Yoghurt	293	0.5–0.6	25
<b>Polymer melts</b>			
High density polyethylene (HDPE)	453–493	0.6	$3.75-6.2 \cdot 10^3$
High impact polystyrene	443–483	0.20	$3.5-7.5 \cdot 10^4$
Polystyrene	463–498	0.25	$1.5-4.5 \cdot 10^4$

Polypropylene	453–473	0.40	$4.5-7 \cdot 10^3$
Low density polyethylene (LDPE)	433–473	0.45	$4.3-9.4 \cdot 10^3$
Nylon	493–508	0.65	$1.8-2.6 \cdot 10^3$
Polymethylmethacrylate (PMMA)	493–533	0.25	$2.5-9 \cdot 10^4$
Polycarbonate	553–593	0.65–0.8	$1-8.5 \cdot 10^3$
<b>Personal care products</b>			
Nail polish	298	0.86	750
Mascara	298	0.24	200
Toothpaste	298	0.28	120
Sunscreen lotions	298	0.28	75
Ponds cold cream	298	0.45	25
Oil of Olay	298	0.22	25



**Figure 1.6** Demonstration of zero shear and infinite shear viscosities for a shear-thinning polymer solution (Boger, 1977)

Viscosidad cinemática: al cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad se llama viscosidad cinemática.

En símbolos:

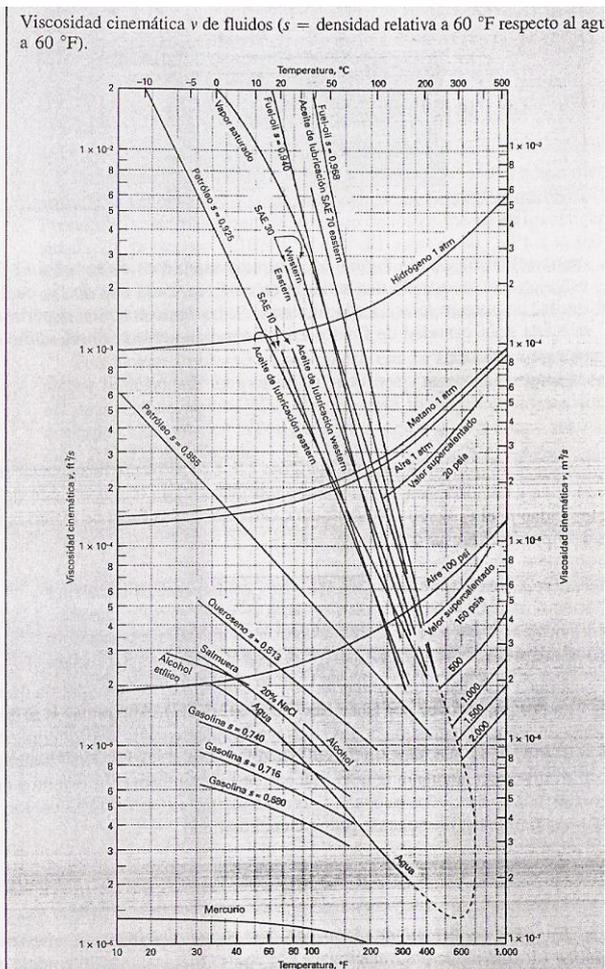
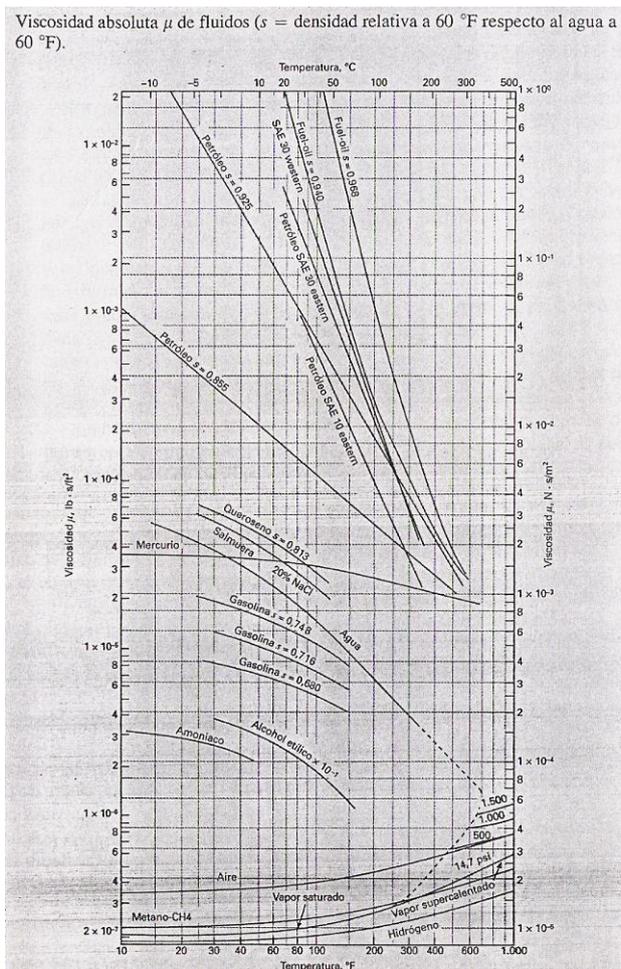
$$\nu = \mu/\rho$$

Las unidades son  $m^2/s$  y  $ft^2/s$ . Anteriormente se usaba el Stokes (St) =  $cm^2/s$  y más comúnmente el centi stokes (cSt) = 0,01 St.

### Índice de viscosidad

Es la medida de cuanto cambia la viscosidad con la temperatura. Un alto índice indica poca variación de la viscosidad con la temperatura. Un bajo índice indica lo contrario. El índice se determina midiendo la viscosidad a 40 °C y 100 °C y comparando con fluidos de referencia.

# TEMA 1: PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS



Variación de la viscosidad con la temperatura.

## Medición de la viscosidad

La viscosidad se mide mediante instrumentos llamados viscosímetros. Hay varios tipos de viscosímetros que difieren entre sí por el principio de funcionamiento y el tipo de unidades de la viscosidad del fluido que miden. Un grupo miden el torque de un cilindro que gira a distintas velocidades dentro de un vaso inmóvil lleno del fluido, otros miden el tiempo que tarda un volumen de fluido en atravesar un capilar o un orificio calibrado o el tiempo que tarda en caer una esfera sumergida en el líquido en cuestión.

Viscosímetro de tipo capilar: uno de los más utilizados es el de Ostwald. En este instrumento se mide la viscosidad por comparación del tiempo que tarda en escurrir un volumen determinado del fluido en cuestión con el tiempo de escurrimiento de un fluido conocido en condiciones de carga y temperatura especificada.

Este método usa la ecuación de Hagen-Poiseuille para régimen laminar a través de tubos capilares:

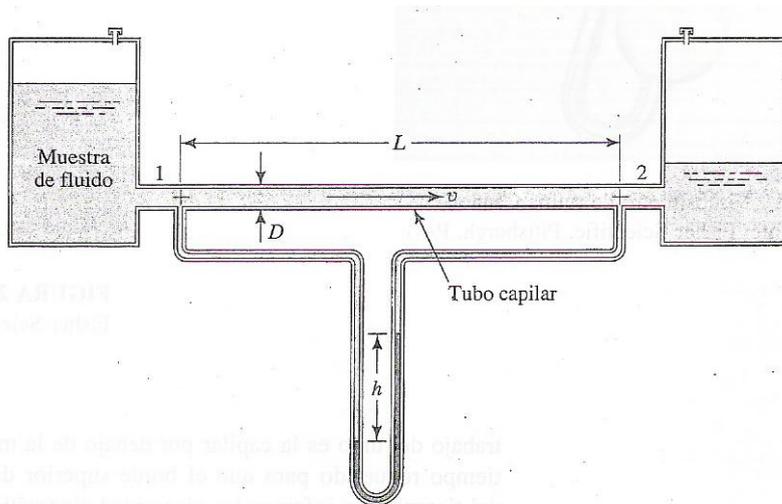
El caudal Q es igual al volumen escurrido por unidad de tiempo. En símbolos

$$Q = V/t = \Delta P \pi r^4 / (8 \mu l)$$

Donde ΔP es la variación de presión necesaria para desplazar el fluido a través del capilar de longitud l y radio r. La variación de presión se calcula como pgl

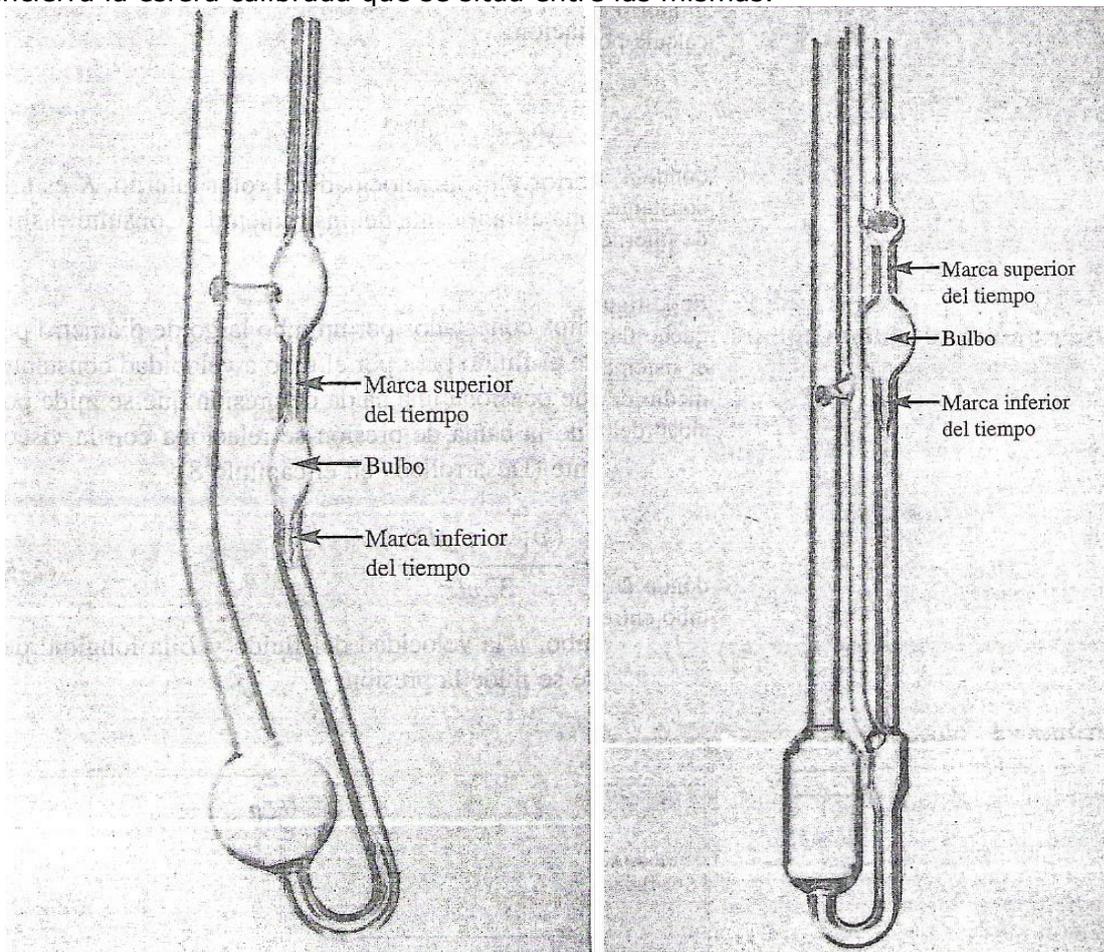
Reemplazando y despejando

$$\mu = \frac{\Pi r^4 \cdot \rho g t}{8V}$$



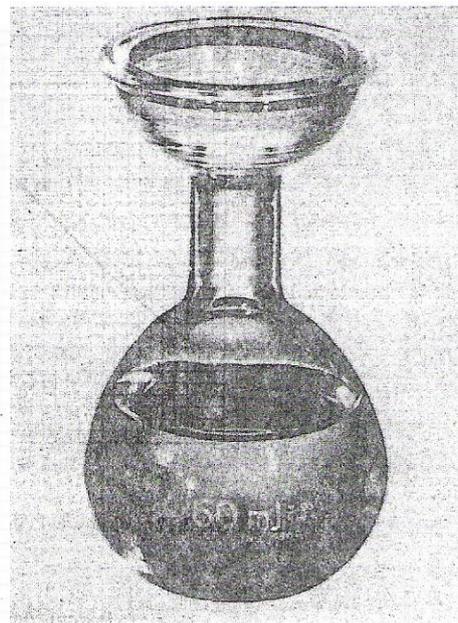
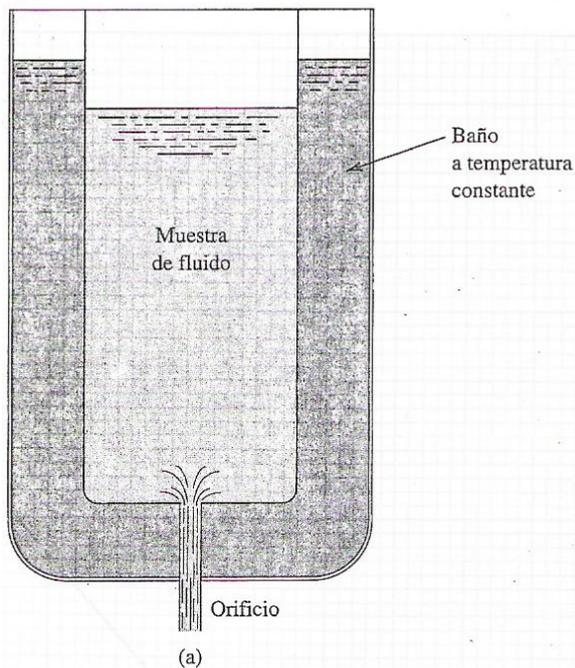
En este caso el fluido pasa del recipiente izquierdo al derecho a través del tubo capilar horizontal de longitud conocida y se mide la pérdida de carga entre los puntos 1 y 2.

El viscosímetro de Ostwald mide el tiempo que tarda un fluido para pasar entre dos marcas. La longitud del capilar está dada por el fabricante y corresponde a la parte inferior del mismo y no a la distancia entre marcas. Estas últimas sirven para medir el volumen que encierra la esfera calibrada que se sitúa entre las mismas.



Hay otros viscosímetros que usan la misma ley pero se usan para líquidos más viscosos como petróleo. Estos son los viscosímetros Saybolt y Furol. El primero se usa más en USA y

el segundo en Inglaterra. Las unidades son segundos (SSU Y SSF). Consta de un recipiente termostatzado donde se coloca el líquido y en la parte inferior hay un orificio provisto de un tapón que se retira y se mide el tiempo de escurrimiento de un volumen definido de líquido. La diferencia es el diámetro del tubo por donde escurre el líquido.



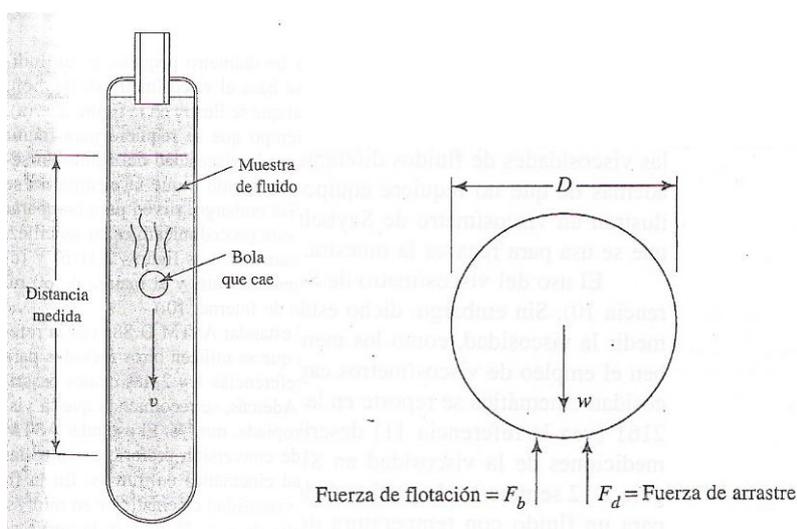
(c) Matraz de 60 ml, para recolectar la muestra de Saybolt

El viscosímetro Engler compara el tiempo que tarda en escurrir 200 cm<sup>3</sup> de un fluido y el correspondiente al agua. La viscosidad en este caso se llama ° E

$$^{\circ} E = \text{Tiempo de vaciado de } 200 \text{ cm}^3 \text{ de fluido} / \text{ tiempo de vaciado de } 200 \text{ cm}^3 \text{ de agua}$$

T= 20 °C ; para el agua el tiempo es 48,51 s

Viscosímetro de esfera descendente. Este instrumento se basa en la ley de Stokes para una esfera que cae en un líquido en régimen laminar por efecto de la gravedad.



La ecuación que se usa es la siguiente:

$$\mu = t(\rho_b - \rho_l) K (cp)$$

donde t es el tiempo de caída, (s)

$\rho_b$  densidad del material de la esfera ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_l$  densidad del líquido ( $\text{g/cm}^3$ )

K constante de la esfera

Viscosímetro rotatorio:

Se hace girar un cilindro a velocidad angular constante dentro de un vaso, también circular, en reposo. El espacio comprendido entre el cilindro y el vaso se llena del líquido cuya viscosidad se desea determinar. Una variante de este dispositivo consiste en girar el vaso y mantener el cilindro fijo. De esta manera se mide el esfuerzo de corte a través del par motor y el gradiente de velocidad. Se llevan estos resultados a una gráfica y se tiene la curva  $\tau$  en función de la  $dv/dy$ .

Para el segundo tipo de viscosímetro rotatorio se puede establecer:

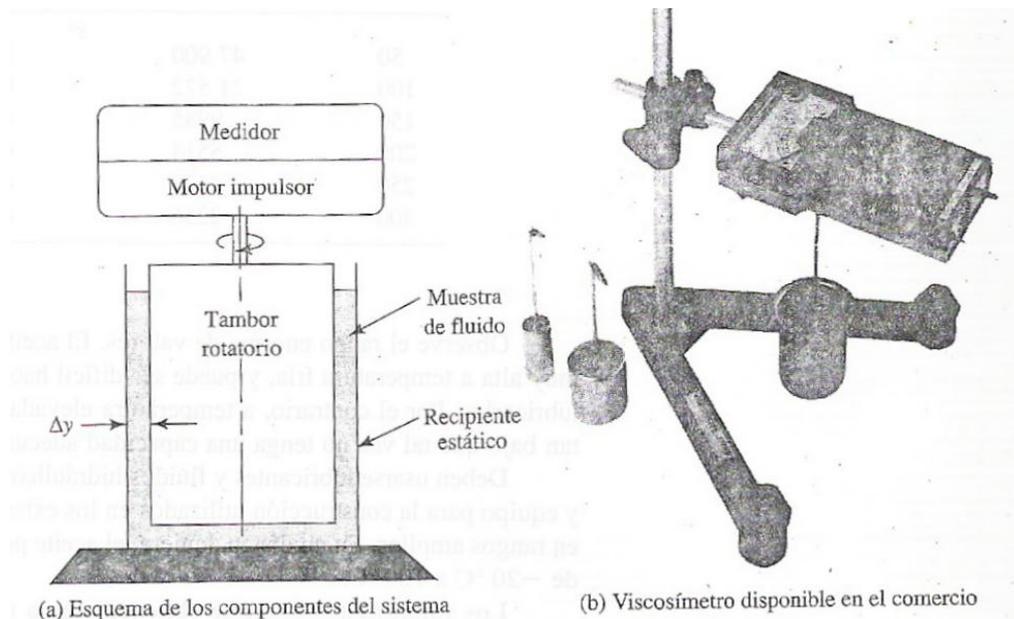
Cuando la distancia entre los dos cilindros es pequeña se puede definir el gradiente de velocidad como

$$dv/dr = (\omega R_2 - 0.R_1)/(R_2 - R_1)$$

donde R es el radio del cilindro interno,  $\omega$  es la velocidad angular ( $2\pi n$ ). El área efectiva de aplicación del torque es  $2\pi Rh$  donde h es la altura del cilindro. La fuerza se puede medir como  $T/R_2$  donde T es el torque aplicado. Luego

$$\tau = F/A = (T/R_2) / (2\pi R_2 h) = \mu \cdot dv/dr = \mu (\omega R_2 - 0.R_1)/(R_2 - R_1)$$

$$\mu = T (R_2 - R_1) / (2\pi h \omega R_2^3)$$



Viscosidad de mezclas y suspensiones

Muchas veces es necesario estimar la viscosidad de una mezcla o de una suspensión. Para ello se recurre a una serie de fórmulas empíricas de las cuales las principales son:

**Mezcla de gases:**  $PM_{mezcla} / \mu_{mezcla} = \sum y_i PM_i / \mu_i$

Donde PM es el peso molecular de la mezcla

$\mu_{mezcla}$  = viscosidad de la mezcla

$y_i$  = fracción molar de cada gas

$PM_i$  = peso molecular de cada gas  
 $\mu_i$  = viscosidad de cada gas

Líquidos:

Cuando faltan datos experimentales

$$\mathbf{Log ((log\mu)10) = m\rho_i - 2,9}$$

$$m = I/PM$$

$I = \sum A_n + \sum P$  (constante que depende de la estructura de tablas apéndice XIII, Problemas de flujo de fluidos, Antonio Valente Banderas)

$\mu$  = viscosidad en cp  
 $\rho_i$  = densidad del líquido a 20 °C en g/cm<sup>3</sup>.

Para mezclas de líquidos ideales la viscosidad se tiene a partir de

$$\mathbf{Log \mu_{mezcla} = \sum x_i log\mu_i}$$

$\mu_{mezcla}$  = viscosidad de la mezcla  
 $\mu_i$  = viscosidad de cada componente  
 $x_i$  = fracción molar de cada líquido

Suspensiones diluidas de sólidos en líquidos (se incluyen a los microorganismos)

Para fase sólida igual o inferior al 10 % en volumen:

$$\mathbf{\mu_{sus} = \mu_l (1+2,5\phi)}$$

$\mu_{sus}$  = viscosidad de la suspensión  
 $\mu_l$  = viscosidad del líquido  
 $\phi$  = fracción de volumen de sólidos (volumen de sólidos/volumen total)

Para concentraciones mayores (hasta 30 % en volumen)

$$\mathbf{\mu_s = \mu_l [ 0,59 / (0,77-\phi)^2]}$$

Falta viscosidad de gases

### TENSIÓN SUPERFICIAL E INTERFACIAL

Estas tensiones son el resultado de las propiedades moleculares que ocurren en la superficie o en la interfase. La tensión superficial es la tendencia de un líquido a exponer una mínima superficie libre. La tensión interfacial es la tendencia similar que existe entre dos líquidos en contacto.

Consideremos que tenemos dos fluidos inmiscibles entre sí a presiones  $p_1$  y  $p_2$  cada uno, considerando una superficie curva con radios de curvatura  $r_1$  y  $r_2$  para cada fluido la ecuación de Young Laplace se puede escribir:

$$\mathbf{p_1 - p_2 = \sigma (1/r_1 + 1/r_2)}$$

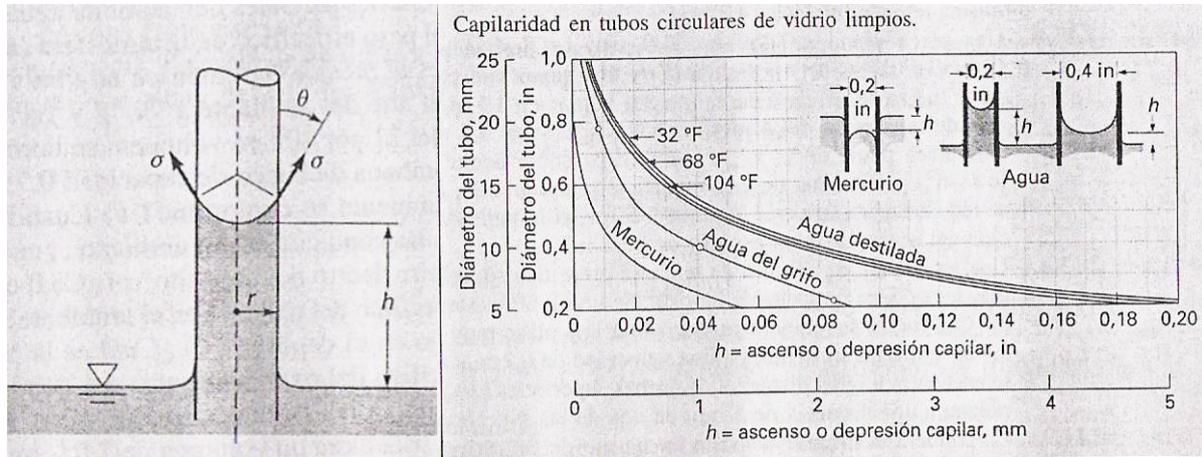
$$\mathbf{1/r_m = 1/2(1/r_1 + 1/r_2)}$$

$$\mathbf{p_1 - p_2 = 2 \sigma / r_m}$$

Medición de la tensión interfacial:

Ascenso capilar: en este caso se mide la altura del líquido que asciende por el interior de un capilar. La tensión superficial es la fuerza que equilibra el peso de la columna de líquido que asciende.

$$\sigma = \frac{g\rho r h}{2\cos\theta} = \frac{r\Delta p}{2\cos\theta}$$

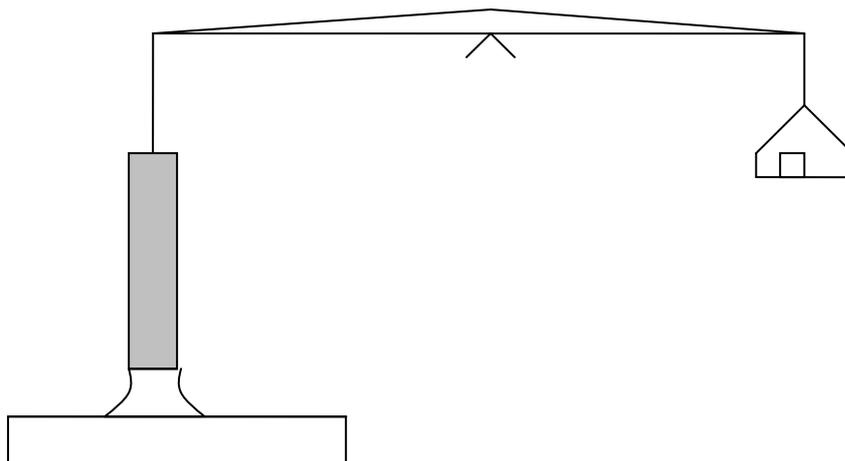


Método del plato de Wilhelmy:

Consiste en sumergir una placa de platino o vidrio en el líquido sujeta de una balanza de brazos, la cual se equilibra mediante pesas. Se sumerge parcialmente y se equilibra. La pesa incluye el peso de la placa menos el empuje del líquido y la fuerza derivada de la tensión superficial.

$$F = W_p - b + 2(x+y)\sigma \cos\theta$$

Donde b es la fuerza de flotación de la parte sumergida, x ; y son las dimensiones transversales de la placa.

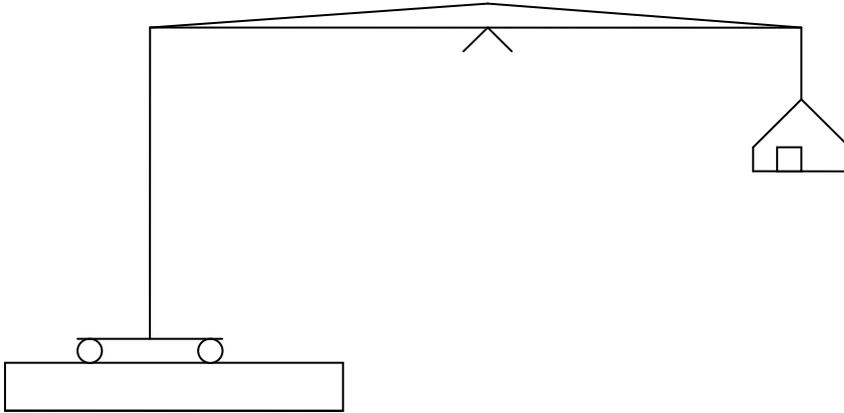


Tensiómetro de Du Noüy

Este método es el más usado. Consiste en un anillo calibrado, sujeto a un brazo horizontal articulado, que se sumerge en el líquido y luego se levanta. La fuerza necesaria para separarlo del líquido determina la tensión superficial. El anillo debe trabajar plano, por lo que se mueve es el vaso que contiene el líquido. Al separarse la acción de la tensión

superficial inclina el brazo horizontal que sostiene el anillo y se lee en una escala el valor de tensión superficial directamente. La tensión es

$$\sigma = C F / (4\pi r)$$



Hay otros métodos (método de la gota suspendida, peso máximo de la gota antes de desprenderse de un capilar) que son menos precisos.

### TENSIÓN DE VAPOR

Todo líquido tiende a evaporarse, lo cual ocurre cuando el líquido proyecta moléculas al espacio por encima de su superficie. Si es un espacio restringido la presión parcial ejercida por las moléculas aumenta hasta que la frecuencia a que las moléculas que salen del líquido es similar a las que regresan al líquido (equilibrio dinámico). Para esta condición de equilibrio, la presión del vapor se conoce como presión de vapor de saturación.

La actividad molecular aumenta al subir la temperatura y disminuir la presión, una tendencia seguida por la presión de vapor. Si a una temperatura cualquiera se baja la presión de un líquido por debajo de la presión de saturación el líquido hierve y se forman burbujas de gas. Se puede decir que la presión de vapor es la presión de ebullición de un líquido a una dada temperatura.

Este concepto es muy importante para los líquidos ya que está relacionado con el fenómeno de cavitación, cuando la presión de los mismos dentro de una cañería, bomba o accesorio baja por debajo de la tensión de vapor y se produce la vaporización parcial del fluido. Luego al alcanzar una zona de mayor presión (por ejemplo aguas abajo de una bomba) las burbujas se condensan bruscamente y producen sobrepresiones en la cañería, bombas o accesorios que ocasionan un rápido deterioro o rotura de los elementos. Los datos de tensión de vapor se encuentran en los libros de Termodinámica, o en los libros de Mecánica de Fluidos mencionados anteriormente.

### CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

Se define un fluido ideal como aquel en donde no se presentan esfuerzos de corte, es decir de viscosidad nula. Un fluido real es aquel que ofrece resistencia a los esfuerzos de corte, o sea que el coeficiente de viscosidad es distinto de cero.