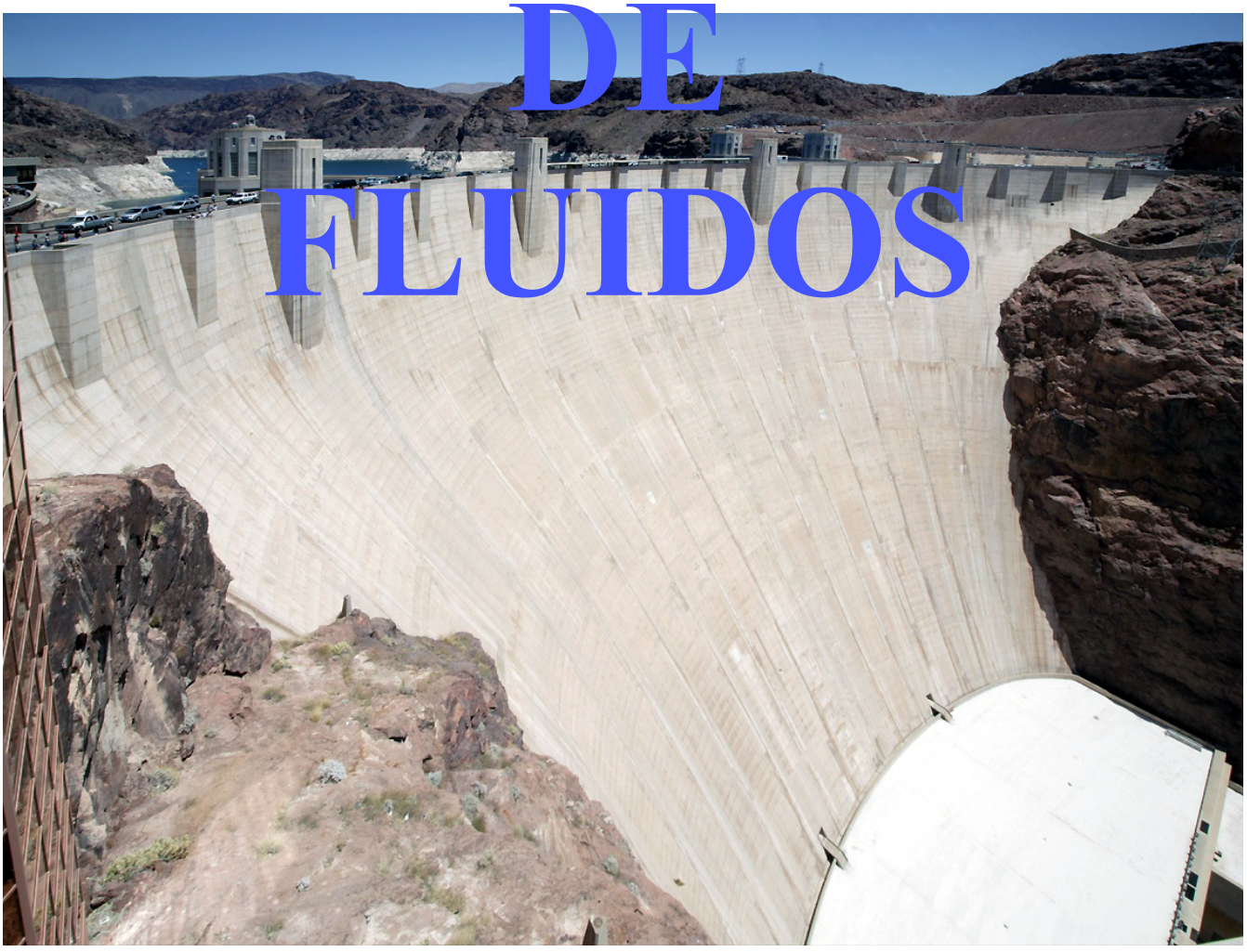
MECÁNICA DE FLUIDOS



Pedro Fernández Díez

pfernandezdiez.es

I.- INTRODUCCIÓN A LOS FLUIDOS

pfernandezdiez.es

I.1.- PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos son agregaciones de moléculas, muy separadas en los gases y próximas en los líquidos, siendo la distancia entre las moléculas mucho mayor que el diámetro molecular, no estando fijas en una red, sino que se mueven libremente.

Un fluido se denomina medio continuo, cuando la variación de sus propiedades es tan suave que se puede utilizar el calculo diferencial para analizarlo.

En Mecánica de Fluidos solo hay cuatro dimensiones primarias, de las que se derivan todas las demás, a saber, masa, longitud, tiempo y temperatura.

Las propiedades más interesantes de los fluidos son:

a) La isotropía, por cuanto mantienen igualdad de propiedades en todas direcciones.

b) La movilidad, por cuanto carecen de forma propia, por lo que se amoldan a la del recipiente que los contiene; a un esfuerzo infinitamente pequeño le corresponde una deformación infinitamente grande.

c) La viscosidad, que constituye una resistencia a la deformación, la cual no sigue las leyes del rozamiento entre sólidos, siendo las tensiones proporcionales, en forma aproximada, a las velocidades de las deformaciones; esta ley fue formulada por Newton, que decía: cuando las capas de un líquido deslizan entre sí, la resistencia al movimiento depende del gradiente de la velocidad dv/dx, y de la superficie:

$$F = \gamma\ S\ \frac{dv}{dx}$$

siendo γ la constante de proporcionalidad; ahora bien, la velocidad va variando progresivamente de capa en capa, y no bruscamente

Si la velocidad relativa de desplazamiento es nula, la tensión también lo será.

d) La compresibilidad, según la cual, para cualquier esfuerzo a que se someta al fluido, su volumen prácticamente no varía; así, para el caso del agua, por cada kg/cm^2 que aumenta su presión, se comprime 1/20.000

de su volumen. Para los fluidos compresibles, el volumen especifico será función de la presión y de la temperatura, siendo complicadas las expresiones que ligan estas variables

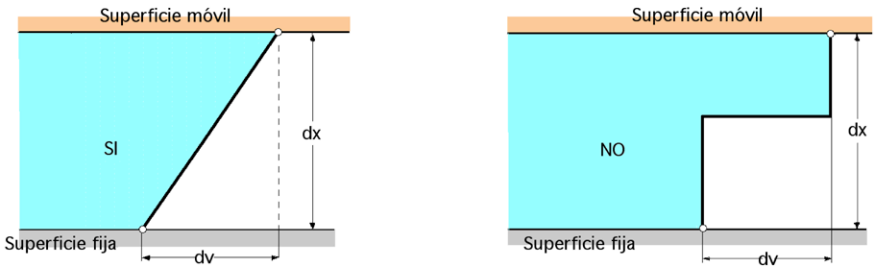


Fig I.1- Isotaquias de velocidades

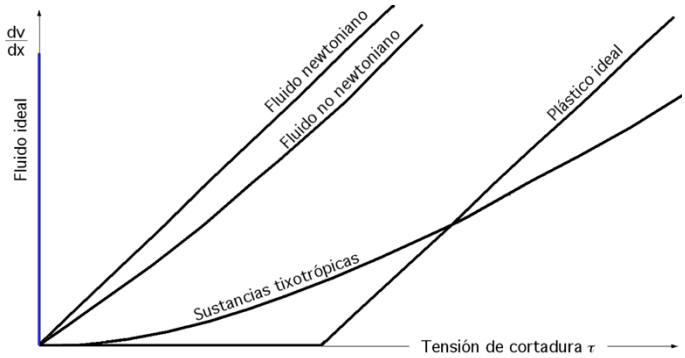


Fig I.2.- Comportamiento de algunos fluidos

La expresión del coeficiente de compresibilidad es: $k = -\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$

Los ***fluidos perfectos*** tienen:
- *Isotropía perfecta*
- *Movilidad perfecta*
- *Fluidez perfecta, es decir, ausencia de viscosidad*
- *Compresibilidad nula*

De la ausencia de rozamiento en un fluido perfecto, resulta que:

- Toda deformación se efectuaría sin trabajo

- Todo elemento de un fluido, puede ejercer solamente esfuerzos normales sobre un elemento vecino, o sobre una pared próxima

En la Fig I.2 se representan las gráficas cartesianas de algunos de los diferentes tipos de fluidos, tomando como eje de ordenadas $\frac{dv}{dx}$ y como eje de abscisas el esfuerzo cortante.

I.2.- VISCOSIDAD DINÁMICA Y CINEMÁTICA

En la Ley de Newton enunciada anteriormente, η es la viscosidad absoluta o coeficiente de viscosidad dinámica; despejando este valor en dicha ecuación se tiene:

$$\eta = \frac{F}{S}\,\frac{dx}{dv} = \tau\,\frac{dx}{dv}$$

siendo la relación $\frac{F}{S}$ *el rozamiento por unidad de superficie.*

El rozamiento en los líquidos se corresponde con el esfuerzo cortante en los sólidos. Se sabe que, el esfuerzo cortante en los sólidos, origina a veces otros esfuerzos como los de tracción y compresión; lo equivalente en los líquidos es que originan variaciones de presión, de tal modo, que la presión media sobre un elemento considerado, puede verse afectada por una pequeña variación en más o en menos.

La relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido es la viscosidad cinemática $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Unidades.- El Poise es la viscosidad absoluta γ o *dinámica* de un fluido en el cual, la fuerza de una dina actuando sobre una capa de 1 cm^2 de superficie, le imprime una velocidad de 1 cm/seg a otra capa paralela a la misma superficie, situada a 1 cm de distancia.

En consecuencia se tiene: $\begin{cases} \textit{Sistema cegesimal: 1 Poise} = \frac{\textit{dinas. seg}}{cm^2} \\ \textit{Sistema técnico: 1 U.T.M.} = 98 \textit{ Poises} \end{cases} \Rightarrow \quad 1 \textit{ Poise} = \frac{1}{98} \frac{kg\ seg}{m^2}$

La viscosidad *dinámica* del agua a 20°C es igual a 0,01 Poises, 1 Centipoise

La viscosidad *cinemática* se define en la forma $\nu = \frac{\eta}{\rho}$, siendo ρ la densidad.

El coeficiente de viscosidad *cinemática* ν del agua para 0°C y 760 mm de presión es:

$$\nu_a = 0{,}0178 \textit{ Stokes} = 1{,}78.10^{-6} \frac{m^2}{seg}$$

mientras que a 20°C es de 0,01 Stokes o un Centistoke.

I.3.- MEDIDA DE LA VISCOSIDAD

Viscosímetro absoluto calibrado.- Mediante un viscosímetro absoluto calibrado, se determina el tiempo de derrame del volumen constante de líquido cuya viscosidad se desea conocer.

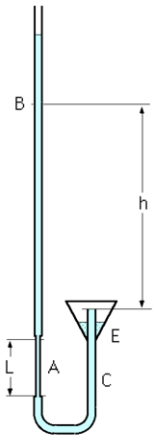


Fig I.3a.- Viscosímetro absoluto calibrado

- Si el derrame es debido a la acción de su propio peso, se determina la viscosidad cinemática

- Si el derrame es debido a una diferencia de presión, se determina la viscosidad dinámica

El fluido circula a temperatura constante, bajo una diferencia de presión también constante, a través de dos tubos capilares calibrados, Fig I.3.a.

El capilar A se mantiene a temperatura constante; el líquido fluye a través del capilar, desde la bureta graduada cilíndrica B al embudo E, por rebosamiento

del tubo grueso C.

En el instante t, si la diferencia de nivel del líquido en los dos tubos comunicantes B y C es h, la diferencia de presión que rige el flujo es: $\gamma h = \rho g h$.

El volumen de líquido dV que fluye durante el tiempo dt viene dado por la expresión:

$$dV = Q\, dt = \frac{\pi\, (p_0 - p_1)\, R^4}{8\, \eta\, l}\, dt = \frac{\pi\, h\, \rho\, g\, R^4}{8\, \eta\, l}\, dt$$

siendo R el radio del capilar, l la longitud del mismo y Q el caudal de fluido que circula.

Llamando V al volumen que fluye entre los instantes t_1 y t_2 correspondientes a los niveles h_1 y h_2, y dado que la bureta graduada es cilíndrica, se tiene:

$$-\frac{dV}{dh} = \frac{V}{h_1 - h_2} \quad \Rightarrow \quad dV = -\frac{V}{h_1 - h_2}\, dh = \frac{\pi\, h\, \rho\, g\, R^4}{8\, h\, l}\, dt$$

$$\frac{V}{h_1 - h_2}\, \frac{dh}{h} = \frac{\pi\, \rho\, g\, R^4}{8\, \eta\, l}\, dt \quad \Rightarrow \quad \frac{V}{h_1 - h_2}\, ln\, \frac{h_1}{h_2} = \frac{\pi\, \rho\, g\, R^4}{8\, \eta\, l}\, (t_2 - t_1)$$

por lo que la viscosidad cinemática es:

$$\upsilon = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi\, g\, R^4\, (h_1 - h_2)\, (t_2 - t_1)}{8\, l\, V\, ln\, \frac{h_1}{h_2}}$$

que permite hacer una medida absoluta de la viscosidad cinemática, lo cual comporta la determinación de todas las magnitudes que intervienen en la expresión anterior.

También es fundamental definir la temperatura para determinar el estado del fluido.

Viscosímetro empírico.- El viscosímetro empírico se basa en el derrame de líquidos por un pequeño orificio calibrado, Fig I.3.b. Aplicando la ecuación de Poiseuille se puede medir la viscosidad η del líquido conociendo su densidad ρ y el tiempo que tardaría en pasar entre dos graduaciones fijas del tubo graduado A y B, conociendo la viscosidad de un líquido patrón η' con el que se le compara, su densidad y el tiempo que tardaría en pasar entre los mismos puntos.

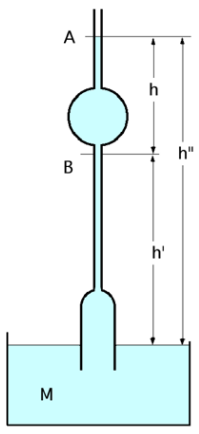


Fig I.3b
Viscosímetro empírico

Según la ecuación de Poiseuille:

$$Q = \frac{\pi\, \Delta p\, R^4}{8\, \eta\, l} = 2\, \pi\, \frac{\Delta p}{l}\, \left(\frac{R}{2}\right)^4 \frac{1}{\eta} = \frac{Volumen}{Tiempo}\, \left(\frac{m^3}{seg}\right)$$

El volumen del líquido a medir es:

$$V = 2\,\pi\,\frac{\Delta p}{l}\,(\frac{R}{2})^4\,\frac{t}{\eta} = \left|\,\Delta p = g\,h = g\,(h''-h') = \rho\,g\,h\,\right| = 2\,\pi\,\frac{\rho\,g\,h}{l}\,(\frac{R}{2})^4\,\frac{t}{\eta}$$

El volumen del líquido patrón es:

$$V = 2\,\pi\,\frac{\Delta p'}{l}\,(\frac{R}{2})^4\,\frac{t'}{\eta} = \left|\,\Delta p' = \gamma'\,h = \rho'\,g\,h\,\right| = 2\,\pi\,\frac{\rho'\,g\,h}{l}\,(\frac{R}{2})^4\,\frac{t'}{\eta'}$$

Dividiéndolas miembro a miembro resulta:

$$1 = \frac{\rho\,t\,\eta'}{\rho'\,t'\,\eta} \quad \Rightarrow \quad \frac{\eta}{\eta'} = \frac{\rho\,t}{\rho'\,t'} \quad \Rightarrow \quad \frac{\upsilon}{\upsilon'} = \frac{t}{t'}$$

La cubeta M tiene que ser lo suficientemente grande como para que el aumento de nivel en la misma sea despreciable; ademas, acelera el paso del líquido por la pipeta, evitando la formación de gotas a la salida por tensión superficial. Para calcular la variación de la presión se toma un valor medio en alturas. Las viscosidades medidas con estos aparatos oscilan entre 0,01 ÷ 15 Poises, oscilando el tiempo de paso entre 70 ÷ 700 segundos.

Viscosímetro de cilindros coaxiales.- Para dar una primera definición de la viscosidad basta con medir la fuerza necesaria para desplazar, en su plano, una placa plana paralelamente a otra, pero las dificultades prácticas que comportaría la realización de dicha medida, hace que, en la práctica, se reemplacen las dos placas por dos cilindros coaxiales, de radios r_1 y r_2, dejando entre ellos un ligero espacio $(r_1 - r_2 = e)$ que contiene el fluido a estudiar, Fig I.4.

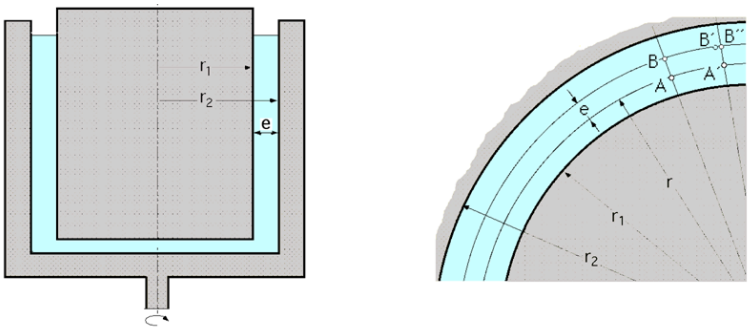


Fig I.4.- Viscosímetro de cilindros coaxiales

Si se hace girar el cilindro exterior alrededor de su eje a velocidad constante, el cilindro interior tiende a girar en el mismo sentido, por lo que si se desea mantenerlo inmóvil, es necesario ejercer sobre él un par M en sentido inverso al del movimiento del cilindro exterior.

En régimen permanente, este par resistente C debe equilibrar el par motor que provoca la rotación del cilindro exterior, ya que no existe ninguna aceleración de la masa del fluido a la cual se apliquen los dos pares; la determinación del par C permite determinar la medida absoluta de la viscosidad del fluido.

En el fluido, la velocidad angular varía progresivamente de, $0 < w < 2\pi$, a lo largo de los radios de los cilindros, siendo n el número de revoluciones por minuto del cilindro exterior.

Si se consideran dos circunferencias concéntricas de radios r y $r + dr$ en las que el fluido se mueve con velocidades angulares respectivas, w y $w + dw$, y si se toman dos partículas de fluido cuyos

centros respectivos están sobre estas dos circunferencias, en el instante *t*, puntos A y B sobre el mismo radio; durante el tiempo dt, si la partícula que estaba en A pasa a A', la partícula que estaba en B pasará a B'.

La partícula cuya velocidad angular sea mayor, está mas lejos que el punto B'', situado sobre el radio que pasa por A; el deslizamiento durante el tiempo dt de la partícula exterior, en relación a la partícula interior, está representado por $\overline{B''B'}$ y la diferencia de velocidades en el deslizamiento del espesor de la capa fluida que contiene las partículas es:

$$\frac{\overline{BB'}}{dt} = (r + dr)\, dw$$

El gradiente de esta velocidad relativa siguiendo el radio es, despreciando los términos de segundo orden: $r \frac{dw}{dr}$.

La tensión tangencial en el líquido es:

$$\tau = \frac{F_{roz}}{S} = \eta \frac{dv}{dr} = \eta\, r \frac{dw}{dr}$$

El par M es el mismo a lo largo del radio *r*, ya que debe también equilibrar, en régimen permanente, el par motor C, por lo que, M = C.

Si la longitud vertical de los dos cilindros en contacto con el líquido es L, el momento de las fuerzas de viscosidad respecto al eje es:

$$M = F\, r = (2\, \pi\, r\, L\, \tau)\, r = 2\, \pi\, r^3 L\, \eta \frac{dw}{dr} \quad ; \quad M = C \quad ; \quad dw = \frac{C\, dr}{2\, \pi\, r^3 L\, \eta}$$

La integración de la ecuación anterior permite obtener la velocidad angular, en la forma:

$$w = -\frac{C}{4\, \pi\, r^2 L\, \eta} + Cte = \left| \begin{array}{c} Para: r = r_i \; ; \; w = 0 \\ Cte = \frac{C}{4\, \pi\, r_i^2 L\, \eta} \end{array} \right| = -\frac{C}{4\, \pi\, r^2 L\, \eta} + \frac{C}{4\, \pi\, r_i^2 L\, \eta} = \frac{C}{4\, \pi\, L\, \eta} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r^2} \right)$$

Para $\begin{cases} r = r_2 \\ w = \pi\, n/30 \end{cases}$ con *n* el nº de rpm del cilindro exterior, despejando la viscosidad η se obtiene:

$$\eta = \frac{C}{4\, \pi\, L\, w} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) = \frac{15\, C}{2\, \pi^2 L\, n} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right)$$

El cálculo precedente no tiene en cuenta el efecto de borde en las secciones rectas inferiores de los cilindros, por lo que se suele introducir un término correctivo que incluya el fondo circular, de forma que se pueda considerar que el fondo se comporta como una altura suplementaria *h*, quedando la expresión de la viscosidad en la forma:

$$\eta = \frac{15\ C}{2\ \pi^2\ (L + h)\ n}\ (\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2})$$

En este método, la determinación de η se limita a realizar una serie de medidas geométricas (r_1, r_2, L), cinemáticas *n* y mecánicas C. Es evidente que además, la temperatura y la presión del fluido tienen que ser conocidas y medidas.

El aparato debe estar situado en un recinto a temperatura regulable, de forma que se pueda mantener fija en el transcurso de la medida.

Por convenio internacional, existen unidades basadas en el tiempo que tarda el líquido en pasar a través de un orificio perfectamente calibrado.

En Europa se utilizan los grados Engler
En USA se utilizan los segundos Saybold
En Inglaterra se utilizan los segundos Reedwood

Los *grados Engler* se obtienen dividiendo el tiempo de vaciado del líquido problema a través del orificio calibrado y el tiempo que tardaría por el mismo orificio un líquido patrón, agua destilada, efectuando ambas mediciones a la misma temperatura; en consecuencia:

$$E_t^o = \frac{t}{t_{agua}}$$

siendo las temperaturas más usuales para realizar estas mediciones de 20°C, 50°C 100°C.

Los *segundos Saybold* se obtienen midiendo el tiempo que 60 cm^3 de fluido tardarán en circular por un orificio calibrado siendo las temperaturas más usuales de 70°F, 100°F, 130°F y 210°F.

Los *segundos Reedwood* se obtienen midiendo el tiempo que 50 cm^3 de líquido tardarían en circular por un orificio calibrado, siendo las temperaturas mas usuales de 70°F, 100°F, 140°F y 200°F.

Los coeficientes de viscosidad de los aceites lubricantes se expresan en unidades arbitrarias; en USA se utiliza el número S.A.E., iniciales de Society of Automotive Engineers.

A 130°F, la viscosidad de algunos aceites es:
- *SAE 10, está comprendida entre 160 y 220 centipoises*
- *SAE 20, está comprendida entre 230 y 330* ""
- *SAE 30, está comprendida entre 360 y 430* ""

I.4.- INFLUENCIA DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA EN LA VISCOSIDAD

Para temperaturas elevadas, la viscosidad de los líquidos es muy pequeña; un valor de la temperatura tendiendo a infinito, se corresponde con un valor cero de la viscosidad. La ecuación que liga la temperatura con la viscosidad es de la forma, Fig I.5:

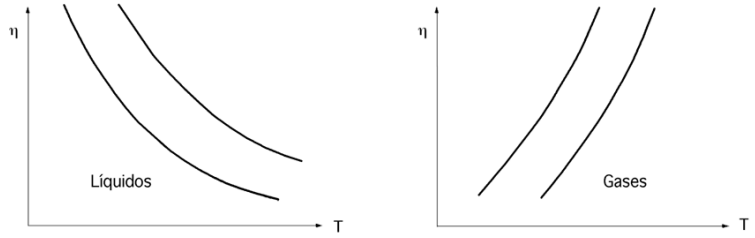


Fig I.5.- Influencia de la presión y temperatura en la viscosidad

$$log \frac{\eta_t}{\eta_0} = \frac{C}{T - T_0} \quad \Rightarrow \quad \eta_t = \eta_0 \ 10^{\frac{C}{(T - T_o)}}$$

siendo η_0, C y T_0 valores característicos para cada líquido.

Para líquidos, la variación de la viscosidad con la presión viene dada por: $\eta_p = \eta_0 \ a^p$, con η_0 y a parámetros característicos para cada líquido.

Para gases, la ley de dependencia entre la viscosidad y la temperatura se puede expresar bastante bien por la fórmula de Sutherland:

$$\eta_T = \eta_0 \ \frac{(1 + \frac{C}{273}) \sqrt{\frac{T}{273}}}{1 + \frac{C}{T}}$$

en la que los valores de η_0 y C vienen dados en la Tabla I.1 y sirven para valores de T comprendidos entre 100 ÷ 1500°K.

Tabla I.1.- Valores de C y η_0 de la fórmula de Sutherland

Fluido	*C*	η_0 *(kg.seg/m²)*
Aire	*114*	*0,166*
Oxígeno	*128*	*0,18*
Hidrógeno	*74*	*0,083*
Nitrógeno	*110*	*0,16*
Anhidrido carbónico	*260*	*0,137*
Monóxido de Carbono	---	*0,16*
Vapor de agua	*673*	*0,087*

Por lo que respecta a las presiones, la viscosidad depende de ellas según la expresión:

$$\eta_p = \eta_0 (1 + \beta p)$$

siendo pocas las experiencias que permiten calcular β.

Algunos valores de β son:
- *Para el CO_2 a 25°C...* $\beta = 7470.10^{-6}$
- *Para el benzol a 20°C* $\beta = 930.10^{-6}$
- *Para el agua.....* $\beta = 17.10^{-6}$

Se observa que cuando la temperatura del fluido aumenta, la influencia de la presión disminuye.

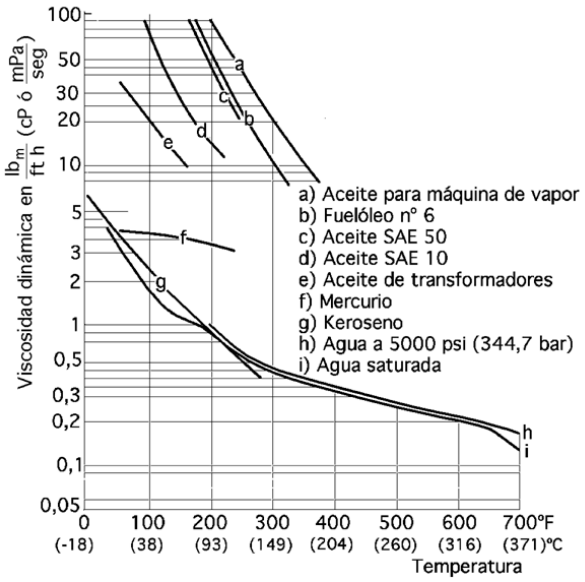


Fig I.6.- Viscosidad dinámica para algunos líquidos

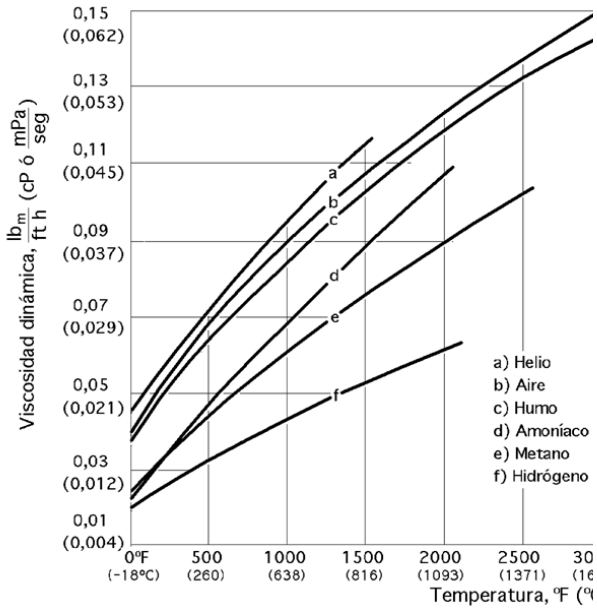


Fig I.7.- Viscosidad dinámica para algunos gases a p_{atm}

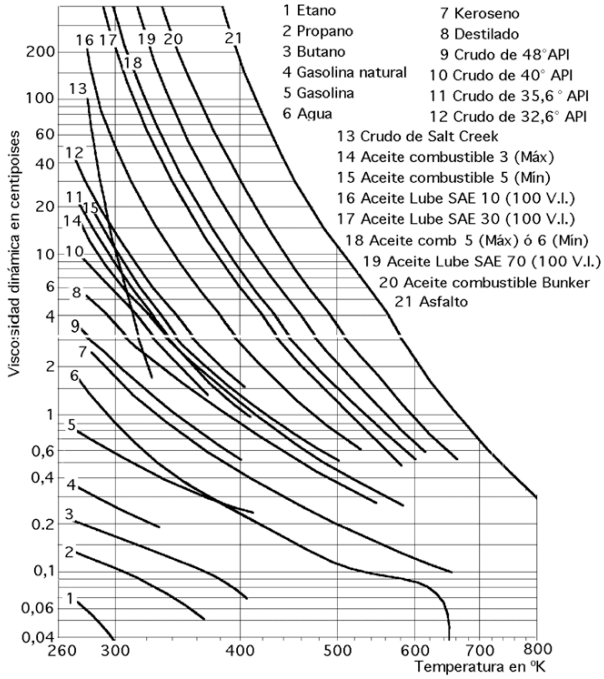


Fig I.8.- Viscosidad del agua y de líquidos derivados

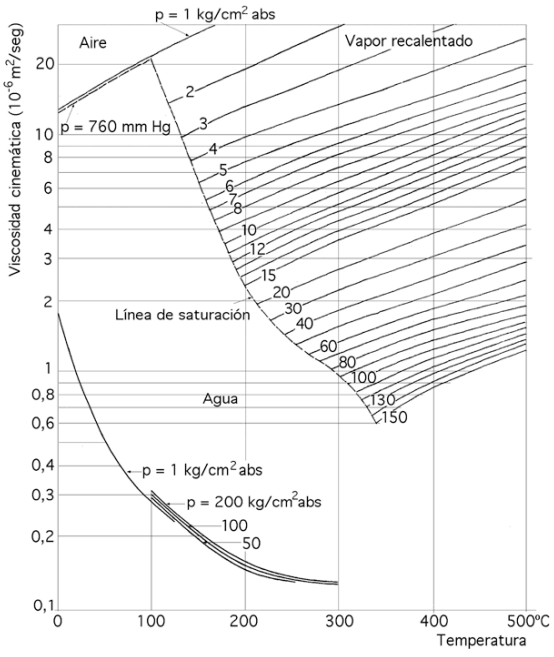


Fig I.9.- Viscosidad cinemática del aire, agua y vapor de agua

I.5.- INDICE DE VISCOSIDAD

Para definir el *índice de viscosidad* se parte de dos tipos de aceite patrón:

- Un aceite parafínico al que se asigna índice 100 (Pensilvania)

- Un aceite asfáltico al que se asigna índice 0 (Gulf Coast)

Mezclando estos aceites patrones en diferentes porcentajes, se obtienen otros índices compren-

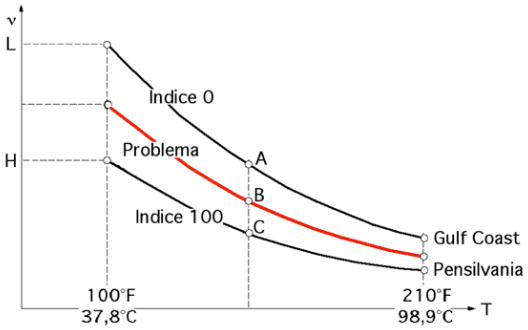


Fig I.10.- Indice de viscosidad

didos entre 0÷100; el líquido problema se compara con el más próximo a uno de estos índices, obteniéndose de esta forma el índice del líquido problema:

$$V.I.\ (Viscosity\ index) = 100\ \frac{AB}{AC} = 100\ \frac{L - \nu}{L - H}$$

$$si,\ \begin{cases} \nu \to L\ ;\ V.I. = 0 \\ \nu \to H\ ;\ V.I. = 100 \end{cases}$$

Tabla I.2.- Valores de H y L para υ a 100°C

Viscosidad cinemática a 100°							
H	*L*	*H*	*L*	*H*	*L*	*H*	*L*
8,00	*63,72*	*108,86*	*9,00*	*76,35*	*135,17*	*10,00*	*89,18*	*162,49*	*11,00*	*102,54*	*191,85*
8,10	*64,97*	*111,42*	*9,10*	*77,61*	*137,84*	*10,10*	*90,46*	*165,36*	*11,00*	*102,54*	*191,86*
8,20	*66,25*	*114,06*	*9,20*	*78,88*	*140,51*	*10,20*	*91,81*	*168,30*	*11,20*	*105,30*	*197,96*
8,30	*67,50*	*116,65*	*9,30*	*80,18*	*143,28*	*10,30*	*93,13*	*171,19*	*11,30*	*106,72*	*201,15*
8,40	*68,75*	*119,30*	*9,40*	*81,45*	*145,99*	*10,40*	*94,46*	*174,07*	*11,40*	*108,10*	*204,24*
8,50	*70,04*	*121,92*	*9,50*	*82,71*	*148,69*	*10,50*	*95,82*	*177,07*	*11,50*	*109,49*	*207,34*
8,60	*71,29*	*124,53*	*9,60*	*83,98*	*151,41*	*10,60*	*97,15*	*179,98*	*11,60*	*110,89*	*210,47*
8,70	*72,54*	*127,15*	*9,70*	*85,26*	*154,15*	*10,70*	*98,49*	*182,90*	*11,70*	*112,27*	*213,60*
8,80	*73,79*	*129,78*	*9,80*	*86,57*	*156,98*	*10,80*	*99,82*	*185,85*	*11,80*	*113,71*	*216,83*
8,90	*75,09*	*132,51*	*9,90*	*87,85*	*159,72*	*10,90*	*101,20*	*188,87*	*11,90*	*115,11*	*219,98*

Tabla I.3.- Correlaciones entre diversas unidades de viscosidad dinámica y cinemática

Viscosidad absoluta o dinámica				
Pa.seg	*Centipoise*			
Nseg/m²= kg/m.seg	*0,01 gr/cm.seg*	*lb/ft.seg*	*lb/ft.hora*	*lb.seg/ft²*
1	*1000*	*0,672*	*2420*	*0,0209*
0,001	*1*	*6,72E-04*	*2,42*	*0,0000209*
1,49	*1488*	*1*	*3600*	*0,0311*
0,000413	*0,413*	*0,000278*	*1*	*0,0000086*
47,9	*47900*	*32,2*	*115900*	*1*

Viscosidad cinemática			
m²/seg	*Centistoke*	*ft²/seg*	*ft²/hora*
	0,01 cm²/seg		
1	*106*	*10,8*	*38800*
10^{-6}	*1*	*$10,8.10^{-6}$*	*0,0388*
0,0929	*92900*	*1*	*3600*
0,0000258	*25,8*	*0,000278*	*1*

I.6.- TENSIÓN SUPERFICIAL Y CAPILARIDAD

La diferencia entre las moléculas que están dentro de un líquido y las que están en la superficie es que, en las primeras, las fuerzas atractivas que actúan en el pequeño espacio en que se manifiestan, se contrarrestan, mientras que en las segundas no sucede lo mismo, por cuanto existirá una resultante $\vec{R}$ que se dirige hacia el seno del líquido, Fig I.11.

Por lo tanto, si se quiere aumentar la superficie libre del líquido, será a expensas de llevar moléculas del mismo, a dicha superficie, tomándolas del interior del líquido, lo cual requiere un consumo

de energía. para poder evaluar el consumo de energía por unidad de superficie aumentada, que se conoce como *tensión superficial*, se forma una laminilla jabonosa que al aplicarla un esfuerzo $\vec{F}$ avanzará una cierta longitud l, Fig I.12, obteniéndose así un trabajo equivalente al necesario para llevar moléculas a la superficie; cualquiera que sea el grado de estiramiento la fuerza aplicada $\vec{F}$ será siempre constante, en contra de lo que ocurre con una membrana, que sigue la ley de Hooke.

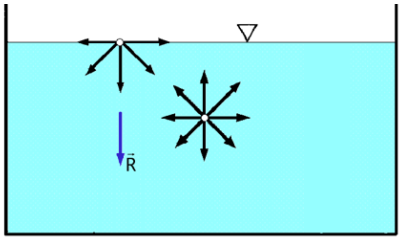


Fig I.11.- Fuerzas de tensión superficial

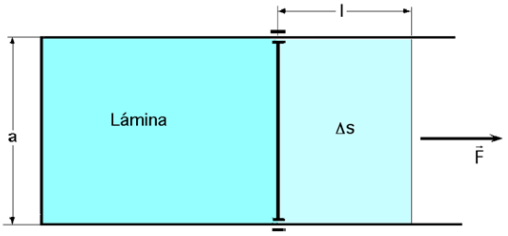


Fig I.12.- Esquema para la determinación del trabajo

El trabajo realizado es proporcional a ΔS siendo la constante de proporcionalidad la tensión superficial σ:

$$Trabajo:\ F\,l = \left| \sigma = \frac{F}{2\,a} \ \Rightarrow\ F = 2\,a\,\sigma \right| = 2\,a\,\sigma\ l = \Delta S\,\sigma$$

siendo σ la tensión superficial, que es una fuerza por unidad de longitud perpendicular a la fuerza $\vec{F}$, ó también, el trabajo realizado por unidad de superficie, al aumentar la superficie.

El aumento de superficie se consigue al aplicar la fuerza $\vec{F}$, ya que la lámina al estar formada por un volumen de líquido limitado por dos capas superficiales cuyo espesor es de algunas moléculas, al aplicar la fuerza $\vec{F}$ habrá moléculas de este volumen de líquido que se desplazaran hacia las capas superficiales. El conjunto de fenómenos que vienen ligados a la tensión superficial se conocen como efectos de superficie. Ampliando los efectos de superficie a láminas que separan una pared sólida y un líquido, o una pared solida y un gas, tendremos los fenómenos de capilaridad.

Si llamamos:

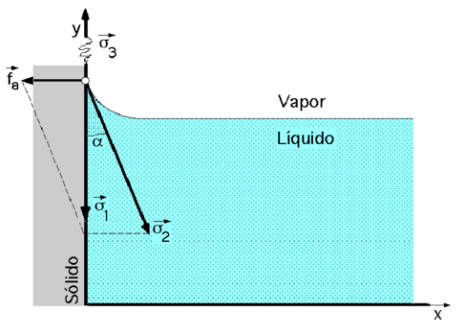


Fig I.13.- Parámetros de capilaridad

σ_1 *tensión superficial entre sólido y líquido*

σ_2 *tensión superficial entre líquido y vapor*

σ_3 *tensión superficial entre vapor y sólido*

α *ángulo de contacto o ángulo de capilaridad*

f_a *la fuerza adherente (atracción) entre la porción aislada y la pared*

, Fig I.13: $\begin{cases} f_a = \sigma_2\ sen\,\alpha \\ \sigma_3 - \sigma_1 = \sigma_2 \cos\alpha \end{cases} \Rightarrow\ tg\,\alpha = \dfrac{f_a}{\sigma_3 - \sigma_1}$

$$\left.\begin{array}{l} sen\,\alpha = \dfrac{f_a}{\sigma_2} \\ cos\,\alpha = \dfrac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_2} \end{array}\right\} \Rightarrow \left(\frac{f_a}{\sigma_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_2}\right)^2 = 1 \Rightarrow \sigma_2^2 = f_a^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \left| \sigma_3 - \sigma_1 = \frac{f_a}{tg\,\alpha} \right| =$$

$$= f_a^2 + \left(\frac{f_a}{tg\,\alpha}\right)^2 = f_a^2\,\left(1 + \frac{1}{tg^2\alpha}\right) = \frac{f_a^2}{sen^2\alpha}$$

Como conclusión se puede decir que, si:

$$\begin{cases} (\sigma_3 - \sigma_1) > 0, & \sigma_3 > \sigma_1 \Rightarrow tg\,\alpha\ es\ (+), & el\ líquido\ moja \\ (\sigma_3 - \sigma_1) < 0, & \sigma_3 < \sigma_1 \Rightarrow tg\,\alpha\ es\ (-), & el\ líquido\ no\ moja \end{cases}$$

I.7.- ALTURA ALCANZADA POR UN LIQUIDO EN EL INTERIOR DE UN TUBO DE PEQUEÑO DIÁMETRO

La columna líquida (ABCD) estará en equilibrio bajo la acción de su propio peso y de la componente vertical de la fuerza de tensión superficial, que actúa sobre la circunferencia de intersección de la columna líquida con el tubo, Fig I.14. A partir de la componente vertical $\vec{F}$ se obtiene el valor de *h* que *es* la altura alcanzada por el líquido en el interior del capilar:

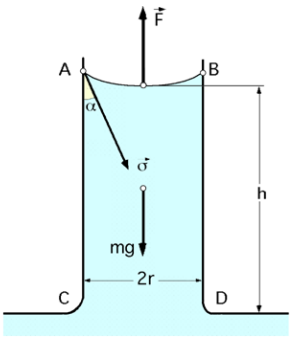


Fig I.14.- Altura alcanzada en un capilar por tensión superficial

$$F = 2\,\pi\,r\,\sigma\,cos\,\alpha = \pi\,r^2\,\gamma\,h \Rightarrow h = \frac{2\,\sigma\,cos\,\alpha}{r\,\gamma}$$

que es directamente proporcional al coeficiente de tensión superficial σ, y está en razón inversa de la densidad del líquido ρ y del radio del tubo *r*.

Si $\alpha \rightarrow 0$, la expresión anterior permite medir el coeficiente de tensión superficial en la forma $\sigma = \dfrac{h\,r\,\rho\,g}{2}$

Si admitimos que el menisco tiene forma esférica de radio R, el valor de la presión interior será:

$$h\,\gamma = p = \frac{2\,\sigma\,\cos\alpha}{r} = \frac{2\,\sigma}{R}$$

Tabla I.4.- Valores del coeficiente de tensión superficial σ, dinas/cm

Líquido	*Tensión superficial dinas/cm*		*Líquido*	*Tensión superficial dinas/cm*
Mercurio en aire	*523*		*Aceite lubricante*	*35,7-38,7*
Mercurio en agua	*401*		*Aceite crudo*	*23,8-38,7*
Mercurio en vacío	*495*		*Benzol*	*29,4*
Agua	*72,5*		*Petróleo*	*26*
Glicerina	*30*		*Alcohol etílico*	*22*
Aceite de ricino	*36,4*		*Tetracloruro de carbono*	*27,2*

que es una depresión, para cuando el menisco tenga forma cóncava, y una sobrepresión para cuando tenga forma convexa.