ANEXO

a).- Determinación de la viscosidad. Viscosidad dinámica o absoluta

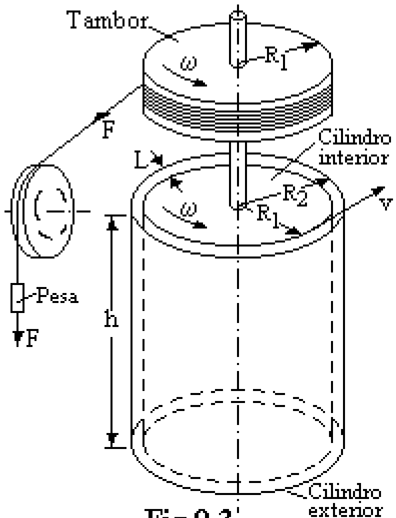


Fig.9.3

Isaac Newton estudió el comportamiento de un fluido lubricante contenido entre dos cilindros concéntricos, según muestra la figura (Fig.9.3), cuyos radios R_1 y R_2 tenían una diferencia L muy pequeña entre sí, es decir:

$$L = R_2 - R_1 \qquad (9.1)$$

Siendo L el espesor de la película lubricante.
El área A de la superficie del cilindro interior es:

$$A = 2.\pi.R_1.h \qquad (9.2)$$

Donde es h la altura del cilindro y R_1 su radio.
Si por efecto de la fuerza F, correspondiente al peso de la pesa indicada en la figura (Fig.9.3), el cilindro interior gira a una velocidad angular ω, su velocidad tangencial v es:

$$v = \omega.R_1 \qquad (9.3)$$

Además, como la fuerza es aplicada tangencialmente al tambor, cuyo radio es R_1, igual al del cilindro interior, según se indica, aparecerá un momento, dado por la expresión:

$$M = F.\ R_1 \qquad (9.4)$$

Al comienzo el movimiento es acelerado, luego se equilibran los momentos originados por la fuerza F y la fuerza resistente del lubricante, haciéndose ω constante.
Analizando un pequeño arco entre los dos cilindros, de tal forma que se puede considerar como recto el tramo de arco considerado, según muestra la figura (Fig.9.4), manteniéndose inmóvil el cilindro exterior y el interior con un movimiento uniforme, por ser ω constante, se observa lo siguiente:

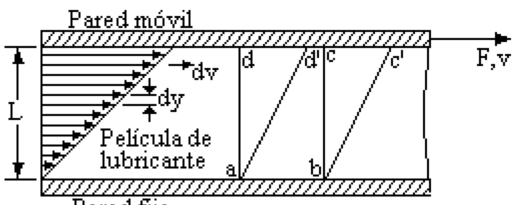


Fig.9.4

1- El líquido en contacto con la pared del cilindro móvil tiene igual velocidad tangencial v que ésta.
2- El líquido en contacto con la pared fija está en reposo, es decir, v =0.
3- En las capas intermedias el líquido aumenta su velocidad uniformemente, siendo por lo tanto el flujo laminar.
4- Si es A el área de la placa móvil y es F la fuerza que actúa sobre la misma, el esfuerzo de corte unitario entre las partículas del fluido es:

$$\tau = \frac{F}{A} \qquad (9.5)$$

En un instante dado, una porción del fluido ocupa la posición *abcd* indicada en la figura (9.4); un instante posterior ocupará la posición *abc'd'*, y así sucesivamente, es decir que la deformación unitaria por cizalladura del líquido aumenta constantemente.
Newton determinó que el esfuerzo cortante τ_f es directamente proporcional a la derivada respecto al tiempo de la deformación unitaria por cizalladura, o sea a la velocidad v de la placa, e inversamente proporcional al espesor L de la película fluida, o sea:

$$\frac{F}{A} \propto \frac{v}{L}$$

(9.6)

La proporcionalidad dada por la (9.6) se transforma en igualdad introduciendo una constante de proporcionalidad μ, a la que se denominó coeficiente de viscosidad dinámica o absoluta, o directamente viscosidad, o sea:

a) $\frac{F}{A} = \mu \frac{v}{L}$ $\Rightarrow$ b) $F = \mu . A \frac{v}{L}$ $\Rightarrow$ c) $\mu = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{v}{L}} = \frac{F.L}{v.A}$

(9.7)

Si se considera la variación diferencial de la velocidad entre dos capas de fluido separadas un *dy*, se tiene:

$$F = \mu . A \frac{dv}{dy} \qquad (9.8)$$

Siendo *dy* perpendicular al flujo.

Si en la expresión (9.7c) está dado A en cm^2, v en cm/s, F en dina y L en cm, la dimensión de μ resulta:

$$|\mu| = \frac{dina.cm}{\frac{cm}{s}.cm^2} = \frac{dina.s}{cm^2}$$

(9.9)

A la expresión dada por la (9.9) se la denomina *poise*. Por lo tanto se tiene que es:

a) 1 *poise* = $\frac{dina.s}{cm^2}$ y b) 1 centipoise (cp) = 10^{-2} poise

(9.10)

b).- Viscosímetro de Mac Michel: La viscosidad absoluta o dinámica μ se la puede obtener con el viscosímetro de MacMichel, cuyo esquema se representa en la figura (Fig.9.5), el cual se basa en los cilindros concéntricos utilizados por Newton. El mismo consta de dos cilindros, uno interior y otro exterior, introduciéndose en el espacio existente entre ambos el líquido cuya viscosidad se desea obtener. El cilindro interno de radio R_1 se encuentra frenado por un muelle o resorte M calibrado, en tanto que el cilindro externo de radio R_2 gira. La aguja I indica en una escala graduada un valor proporcional a la viscosidad del líquido.

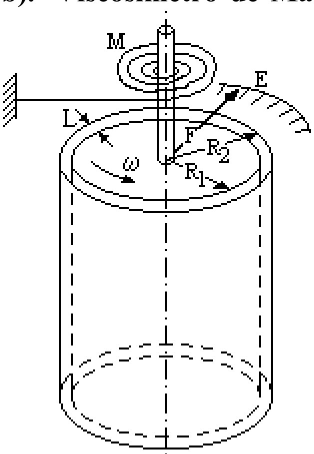


Fig.9.5

También se puede obtener mediante una expresión, la cual se obtiene de la manera siguiente: Si se multiplican ambos miembros de la expresión (9.8) por R_1, y teniendo en cuenta la (9.4) que da el momento M se obtiene:

$$F.R_1 = M = \mu . A \frac{v}{L} R_1$$

(9.11) La expresión (9.11) es válida solo para $L \ll R_1$, lo que ocurre cuando es $L \leq 0{,}01 R_1$.

Si en la (9.11) se reemplaza L, A y ω por sus valores dados por la (9.1), (9.2) y (9.3) respectivamente, se obtiene:

$$M = \mu.2\pi.R_1.h\frac{\omega.R_1}{R_2 - R_1}R_1$$

(9.12)

Despejando μ de la (9.12), finalmente se obtiene:

$$\mu = \frac{M.(R_2 - R_1)}{2\pi.\omega.h.R_1^3}$$

(9.13)

La expresión (9.13) se utiliza en el viscosímetro de MacMichel para obtener la viscosidad absoluta o dinámica.
Ya que obtener las condiciones exigidas con este instrumento para lograr medidas precisas de la viscosidad, por variación de la velocidad, vibraciones, etc., es muy dificultoso, y debido a la necesidad de contar con los valores de la viscosidad de los fluidos con rapidez y precisión, se han estudiado la aplicación de las leyes de la mecánica de los fluidos, para lograr construir instrumentos que permitan en algunos casos, y dentro de ciertos límites, obtenerla.

c).- Ley de Stokes

Cuando un fluido viscoso se mueve alrededor de una cuerpo con movimiento estacionario, o cuando ésta se desplaza en el interior de un fluido viscoso en reposo, se ejerce sobre el cuerpo debido a la viscosidad, una fuerza resistente F_s. Para analizar las fuerzas que actúan y facilitar el cálculo se adopta un cuerpo de forma esférica, pero los resultados son aplicables a un cuerpo de cualquier forma. Stokes encontró que esta fuerza resistente F_s está dada por la expresión:

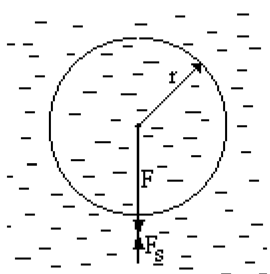


Fig.9.6

$$F_s = 6\pi.\mu.v \qquad (9.14)$$

La expresión (9.14) constituye la ley de Stokes.
Si se introduce una esfera dentro del fluido, la cual se indica en la figura (Fig.9.6), y se la deja caer partiendo del reposo, es decir con velocidad inicial nula:

$$v = 0$$

(9.15)
La resistencia debida a la fuerza de la viscosidad es nula al principio. Además sobre la esfera actúan la fuerza del peso propio P hacia abajo, y el empuje E que recibe la esfera, de abajo hacia arriba, igual al peso del volumen desalojado. Si es ρ_e la densidad del material de la esfera y ρ_f la densidad del fluido, se tiene:

Peso de la esfera: $$P = m_e.g = \frac{4}{3}\pi.r^3\rho_e.g \qquad (9.16)$$

Empuje: $$E = \frac{4}{3}\pi.r^3\rho_f.g \qquad (9.17)$$

La resultante de estas dos fuerzas opuestas es F_R, la que resulta de restar a la (9.16) la (9.17):

$$F_R = P - E = \frac{4}{3}\pi.r^3.g(\rho_e - \rho_f)$$

(9.18)
Del segundo principio de Newton se obtiene la aceleración a_e de la esfera:

a) $F_R = m_e \cdot a_e \Rightarrow$ b) $a_e = \dfrac{F_R}{m_e}$

(9.19)

Como la masa de la esfera es:

$$m_e = \frac{4}{3}\pi . r^3 . \rho_e$$

(9.20)

Dividiendo la (9.18) por la (9.20) se obtiene, según la (9.19b):

$$a_e = \frac{\rho_e - \rho_f}{\rho_e} g$$

(9.21)

Como resultado de esta aceleración, la esfera adquiere una velocidad v_e dirigida hacia abajo, existiendo una resistencia F_s del fluido sobre la esfera que se opone a su caída. A medida que aumenta la velocidad de la esfera, aumenta también la resistencia en proporción directa, por lo que se alcanzará al cabo de un tiempo una velocidad tal, que la fuerza F_R dirigida hacia abajo, dada por la (9.18), y la resistencia F_s, dada por la (9.14), serán iguales, moviéndose la esfera a partir de ese instante con velocidad constante, llamada velocidad límite. Por lo tanto, se puede escribir:

a) $F_R = F_s \Rightarrow$ b) $\dfrac{4}{3}\pi . r^3 . g\left(\rho_e - \rho_f\right) = 6\pi . \mu . r . v_e$

(9.22)

La relación (9.22b) se cumple siempre que la velocidad no sea tan grande que se origine un régimen turbulento en el fluido. Si esto ocurre, la resistencia que opone el fluido es mucho mayor que la dada por la ley de Stokes.

De la expresión (9.22b) se obtiene, por pasajes de términos, el valor de μ:

$$\mu = \frac{2}{9}\frac{r^2 . g}{v_e}\left(\rho_e - \rho_f\right)$$

(9.23)

La velocidad v de la esfera se la puede obtener dividiendo el camino l recorrido por la esfera por el tiempo empleado en hacerlo, es decir:

$$v_e = \frac{l}{t}$$

(9.24)

Por lo tanto, reemplazando el valor de v_e dado por la (9.24) en la (9.23) se obtiene:

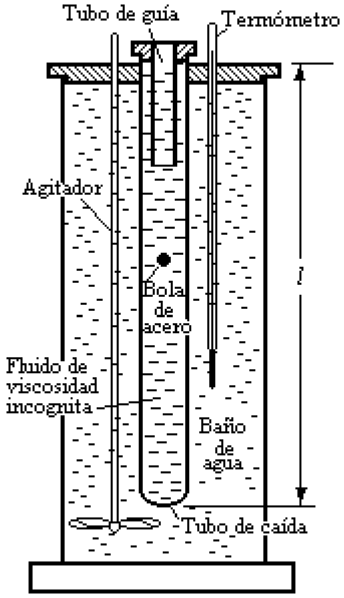


Fig.9.7

a) $\mu = \dfrac{2}{9}\dfrac{r^2 . g}{\frac{l}{t}}\left(\rho_e - \rho_f\right) \Rightarrow$ b) $\mu = \dfrac{2}{9}\dfrac{r^2 . g}{l}\left(\rho_e - \rho_f\right) . t$ (9.25)

En la (9.25) se toma como constante k a:

$$k = \frac{2}{9}\frac{r^2.g}{l} \qquad (9.26)$$

Por lo tanto, la (9.25) resulta, reemplazando *k* dado por la (9.26):

$$\mu = k\,(\,\rho_e\, - \rho_f\,).t \qquad (9.27)$$

d).- Viscosímetro de caída de bola: La expresión (9.27) es la utilizada en el viscosímetro de *caída de bola*, el cual se muestra en la figura (Fig.9.7), consistente en un tubo que contiene el líquido cuya viscosidad se quiere medir, inmerso en *baño maría* de temperatura constante, donde conociendo r, ρ_e, ρ_f, l y g, dejando caer la esfera o bola dentro del líquido incognita y midiendo el tiempo t de caída, se puede determinar la viscosidad absoluta en centipoises. Pero la (9.27) solo es aplicable a un fluido contenido en un tubo de dimensiones infinitas, de tal forma que la bola al caer no esté expuesta a las condiciones de borde causadas por las paredes del tubo, que introducen errores apreciables. Para evitar este inconveniente y obtener un instrumento de utilidad práctica, se calibra el instrumento mediante un fluido de viscosidad conocida, obteniéndose la constante total K del aparato, resultando:

$$\mu = K\,(\,\rho_e\, - \rho_f\,).t \qquad (9.28)$$

Se utiliza una esfera de pequeño diámetro en relación al diámetro del tubo de caída. Solo se recomienda el uso de este instrumento para viscosidades iguales o mayores a 1000 centipoises, ya que para valores menores el tiempo de caída es muy corto, con lo que se introducirían errores apreciables.

e).-Ley de Hagen - Poiseuille

En el estudio de la lubricación, es importante conocer como se comporta el flujo de un líquido viscoso a través de un tubo capilar. La ley de Hagen - Poiseuille es el resultado del estudio realizado sobre el flujo de un líquido viscoso a través de un tubo capilar, y permite medir en forma sencilla la viscosidad absoluta y acceder al concepto de la *viscosidad cinemática*. También permite calcular la pérdida de presión en los conductos hidráulicos y de alimentación para una velocidad determinada.

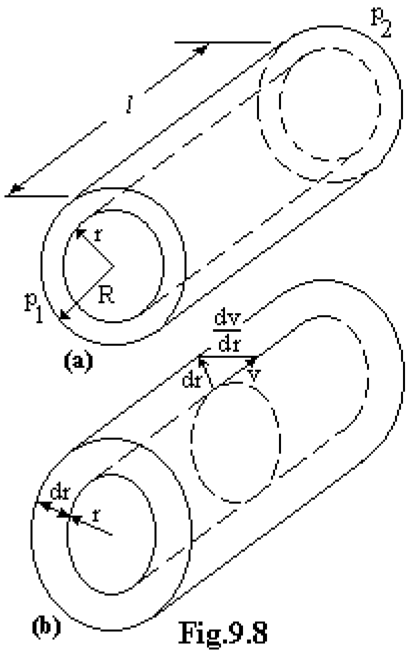


Fig.9.8

Tomando un tubo capilar de longitud l y radio R, el cual se muestra en la figura (Fig.9.8), siendo l mucho mayor que R, por lo que se pueden despreciar las pérdidas provocadas por el líquido a la entrada y a la salida del tubo. Además el peso del líquido dentro del capilar es muy pequeño, de tal manera que no influye sobre las fuerzas de cizallamiento que se oponen al movimiento. Es decir que el movimiento del líquido solo lo produce la diferencia de presión entre los dos extremos del tubo. Además, la velocidad de desplazamiento del líquido es constante, no existiendo ninguna aceleración.

Si se considera un elemento cilíndrico de lubricante de radio r que se mueve debido a la diferencia de presiones:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \qquad (9.29)$$

Para la capa de líquido, que se encuentra a la distancia r, la velocidad es v. El gradiente de velocidad entre dos capas de lubricante que se encuentran a la distancia dr una de otra, según se muestra en la figura (Fig.9.8b), es: $\frac{dv}{dr}$

$Grad =$

(9.30)

En el centro del tubo, según se observa en la figura (Fig.9.9), la velocidad del líquido viscoso es máxima, siendo nula en la pared debido a la resistencia por rozamiento que opone la rugosidad de la misma. Es decir, que a medida que aumenta r disminuye v, resultando por lo tanto el gradiente negativo:

$$\frac{dv}{dr} < 0 \qquad (9.31)$$

El área A_n de la superficie normal al eje del elemento cilíndrico de fluido, de radio r, sobre el cual actúan las presiones p_1 y p_2 está dado por la expresión:

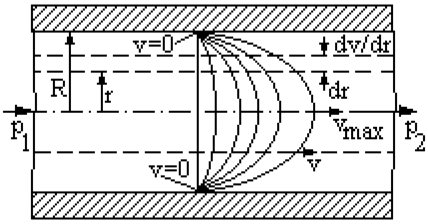


Fig.9.9

$$A_n = \pi.r^2 \qquad (9.32)$$

La fuerza F_e resultante de las presiones que se ejercen sobre el área dada por la (9.32) es:

$$F_e = \Delta p.A_n = (p_1 - p_2).\pi.r^2 \qquad (9.33)$$

Por otra parte, el área A_c de la superficie cilíndrica de longitud l y radio r, del elemento de fluido es:

$$A_c = 2\pi.r.l \qquad (9.34)$$

La fuerza que ejerce la viscosidad sobre el área de la superficie cilíndrica dada por la (9.34), estará dada por la expresión (9.8), pero teniendo en cuenta, según la (9.30), que por ser negativo, el gradiente será - dv/dr. Por lo tanto se tendrá:

$$\text{a)} \quad F_\mu = \mu.A.\left(-\frac{dv}{dr}\right) \quad \Rightarrow \quad \text{b)} \quad F_\mu = -\mu.A\frac{dv}{dr} \qquad (9.35)$$

Por la (9.34), la (9.35b) resulta:

$$F_\mu = -\mu.2\pi.r.l\frac{dv}{dr} \qquad (9.36)$$

Por no existir aceleración, el sistema de fuerzas que actúan, debidas a las presiones y a la viscosidad del líquido, está en equilibrio, es decir:

$$F_e = F_\mu \qquad (9.37)$$

Por lo tanto, se pueden igualar el tercer miembro de la (9.33) con el segundo miembro de la expresión (9.36), obteniendo:

$$(p_1 - p_2).\pi.r^2 = -\mu.2\pi.r.l.\frac{dv}{dr} \qquad (9.38)$$

Despejando dv de la (9.38), se obtiene:

$$-dv = \frac{p_1 - p_2}{2\mu.l} r.dr \qquad (9.39)$$

Integrando la (9.39) para obtener v:

$$\text{a)}\quad \int -dv = \int \frac{p_1 - p_2}{2\mu.l} r.dr = \frac{p_1 - p_2}{2\mu.l} \int r.dr \quad \Rightarrow \quad \text{b)}\quad -v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}.r^2 + C$$

(9.40)

C es la constante de integración, la cual es posible conocer aplicando las condiciones conocidas del flujo, ya que se sabe que para $r = R$ es $v = 0$; luego, aplicándolo en la (9.40b):

$$\text{a)}\quad 0 = \frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}.R^2 + C \quad \Rightarrow \quad \text{b)}\quad C = -\frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}.R^2$$

(9.41)

Reemplazando en la (9.40) el valor de C dado por la (9.41b), se obtiene:

$$\text{a)}\quad -v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}.r^2 + \left(-\frac{p_1 - p_1}{4\mu.l}.R^2 \right) \quad \Rightarrow \quad \text{b)}\quad v = \frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}\left(R^2 - r^2\right)$$

(9.42)

La expresión (9.42b) es una función parabólica. Para $r = 0$ es v = máximo, resultando la (9.42b), aplicando esta condición:

$$v_{max} = \frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}.R^2$$

(9.43)

El caudal Q de líquido que circula se lo puede obtener sabiendo que el mismo es igual a la velocidad del fluido por el área de la sección que atraviesa, es decir:

$$dQ = v.dA$$

(9.44)

El diferencial de área dA, el cual se muestra en la figura (Fig.9.10), está dado por la expresión:

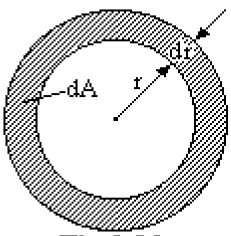


Fig.9.10

$$dA = 2.\pi.r.dr$$

(9.45)

Reemplazando en la (9.44) el valor de v dado por la (9.42b) y el valor de dA dado por la (9.45), se obtiene:

$$dQ = \frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}\left(R^2 - r^2\right)2\pi.r.dr$$

(9.46)

Integrando al (9.46), el primer miembro entre Q y 0, y el segundo miembro entre 0 y R:

$$\int_0^Q dQ = \int_0^R \frac{p_1 - p_2}{4\mu.l}\left(R^2 - r^2\right)2\pi.r.dr = \frac{2\pi\left(p_1 - p_2\right)}{4\mu.l}\int_0^R \left(R^2 - r^2\right)r.dr$$

(9.47)

Resolviendo la (9.47), se obtiene:

$$Q = \frac{\pi.R^4}{8\mu.l}\left(p_1 - p_2\right)$$
(9.48)
O también, despejando de la (9.48) el coeficiente de viscosidad μ, su valor será:

$$\mu = \frac{\pi.R^4\left(p_1 - p_2\right)}{8.Q.l}$$
(9.49)
La expresión (9.49) es la ley de Hagen – Poiseuille para el flujo de un líquido viscoso en un tubo capilar, y permite conocer la viscosidad absoluta o dinámica cuando se conoce la diferencia constante de presiones a la entrada y salida del tubo, su radio y longitud y el caudal que circula.

f).- Viscosidad cinemática

Según lo visto anteriormente, un tubo capilar permite obtener la viscosidad absoluta de un líquido. Debido a que es difícil obtener un aparato que realmente cumpla con todos los requisitos mecánicos, para lograr que un fluido adquiera velocidad y desplazamiento uniforme, la obtención de medidas con precisión de la viscosidad absoluta en forma directa es dificultosa.
Por tal motivo, y por el hecho de poder obtener un flujo laminar dentro de un tubo capilar, por el cual circula un fluido con velocidad moderada, ha hecho posible el diseño de instrumentos más baratos y más fácil de operar, con los que se pueden obtener la viscosidad absoluta en forma indirecta, midiendo el tiempo que emplea una cierta cantidad de fluido en atravesar por un conducto cilíndrico calibrado.
Utilizando la caída libre de un líquido a través de un tubo capilar, se obtiene las condiciones de la diferencia de presiones constantes a la entrada y salida del mismo, siendo de aplicación al mismo la expresión (9.49). Además, la altura del líquido para obtener la fuerza necesaria para que se produzca su movimiento, depende de su densidad.
La diferencia de presiones $\Delta p = p_1 - p_2$ puede ser sustituida por la altura media efectiva h de caída del líquido, conociendo su densidad ρ y la aceleración g de la gravedad, por lo que se puede escribir:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho.g.h$$
(9.50)

Reemplazando en la (9.49) el valor de Δp dado por la (9.50), se obtiene:

a) $$\mu = \frac{\pi.R^4.\rho.g.h}{8.Q.l}$$ $\Rightarrow$ b) $$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\pi.R^4.g.h}{8.Q.l}$$
(9.51)

El segundo miembro de la (9.51b) se denomina *viscosidad cinemática*, y se la designa con el símbolo ν, siendo por lo tanto, la viscosidad cinemática de un fluido igual a su viscosidad absoluta μ dividida su densidad ρ. Por lo tanto, se puede escribir:

a) $$\nu = \frac{\pi.R^4.g.h}{8.Q.l}$$ $\Rightarrow$ b) $$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$ $\Rightarrow$ c) $$\mu = \nu.\rho$$
(9.52)
La viscosidad cinemática ν se mide en *stokes*, utilizándose generalmente el *centistokes*, es decir su centésima parte, por resultar la primera una unidad muy grande. De la expresión (9.52b) se

puede obtener como está compuesta esta unidad, reemplazando en la misma las unidades de la viscosidad μ absoluta y de la densidad ρ por las unidades básicas que las componen, por lo que se obtiene:

$$|\nu| = \left|\frac{\mu}{\rho}\right| = \frac{\dfrac{gr.cm}{s^2}\,\dfrac{s}{cm^2}}{\dfrac{gr}{cm^3}} = \frac{cm^2}{s} \qquad (9.53)$$

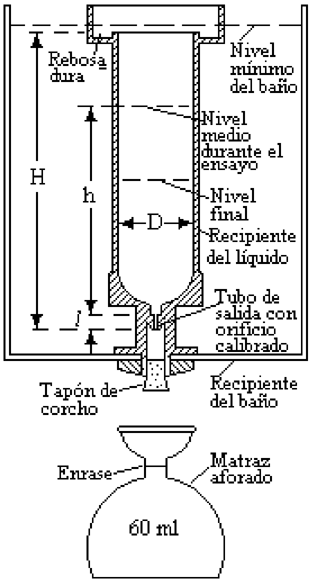


Fig.9.11

Se tiene entonces que es:

a) 1 *stokes* $= 1\dfrac{cm^2}{s}$ y b) 1 *centistokes* = 10^{-2} *stokes* (9.54)

La viscosidad cinemática es la más utilizada, existiendo distintos aparatos que dan su medida, denominándose generalmente la viscosidad, según el aparato con la cual se la obtiene.

g).- Viscosidad Saybolt

El viscosímetro *Saybolt*, cuyo esquema se muestra en la figura (Fig.9.11), es uno de los aparatos más utilizados, principalmente en los Estados Unidos de Norteamérica, para obtener la viscosidad de un líquido, la cual se obtiene midiendo el tiempo en segundos que tarda en escurrir, a través de un orificio calibrado, 60 cm^3 del mismo,a una temperatura determinada, que por lo general está entre 100 ºF (37,8ºC) y 210ºF (98,9ºC). El equipo se completa con la resitencia de calentamiento, los termómetros y el agitador.

Existen dos tipos de viscosidades Saybolt, la *Universal* (seg. SU) y la *Furol* (seg.SF), utilizándose la primera para líquidos livianos, y la segunda para líquidos pesados, donde los tiempos de caída sean superiores a 250 segundos Saybolt Universal. Los equipos utilizados para ambos casos, difieren únicamente en los diámetros de los orificios calibrados de escurrimiento, siendo para Saybolt Universal ∅1,765mm ± 0,01524 mm y para Saybolt Furol ∅3,15mm ± 0,02719 mm. La longitud *l* del tubo de salida con el orificio calibrado es de 12,2682 mm ± 0,1016 mm. El ensayo se realiza, previa colocación del tapón de corcho para impedir que caiga el líquido, introduciendo este último en el recipiente del líquido, hasta que rebose el mismo. Se calienta el baño a la temperatura de medición y retirando el tapón, se lo deja caer en el matraz aforado, tomándose el tiempo con un cronómetro, hasta que el líquido llegue al enrase. El tiempo así obtenido es la viscosidad en segundos Saybolt del líquido ensayado.

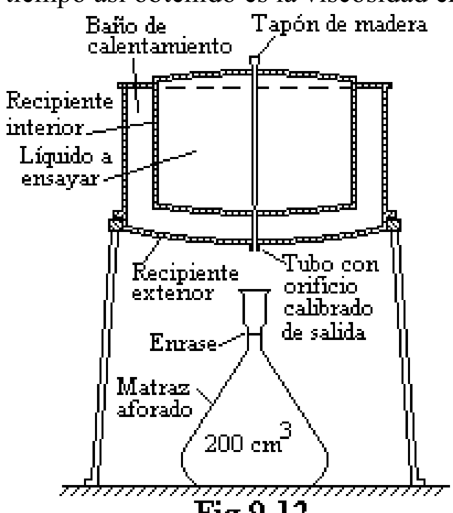


Fig.9.12

Las viscosidades Saybolt en segundos, por debajo de los 200 segundos comienza a presentar una gran diferencia con la viscosidad cinemática, no debiéndose utilizar el aparato para obtener las viscosidades cinemáticas cuando el tiempo en segundos Saybolt es igual o menor a 40 segundos.

h).- Viscosidad Redwood

En Inglaterra se utiliza la *viscosidad Redwood*, que se obtiene de la misma manera que la Saybolt, difiriendo en el volumen que escurre, el cual es de 50 cm^3, diferenciándose también dos tipos, según el diámetro del orificio de escurrimiento, el Redwood Nº1, con orificio de salida de ∅ 1,62 mm y Redwood Nº2, con orificio de salida de ∅ 3,80 mm, obteniéndose la viscosidad en segundos Redwood.

i).- Viscosidad Engler

La *viscosidad Engler* se utiliza en el continente europeo, y consiste en el cociente entre el tiempo en segundos que tarda en derramarse 200 cm^3 del líquido cuya viscosidad se desea conocer, y el tiempo en segundos que tarda en derramarse 200 cm^3 de agua, todo, por lo general, a 20 ºC de temperatura, pudiendo en los caso de líquidos muy viscosos utilizar temperaturas de 50 ºC y hasta 100 ºC. El aparato, el cual se denomina viscosímetro Engler, consta, según muestra la figura (Fig.9.12), de dos recipientes, entre los que se vierte el aceite o el agua que constituirá el baño de calentamiento, y en el recipiente interior el líquido cuya viscosidad se desea medir; un tubo de salida de longitud *l* de 20 mm con orificios calibrados a la entrada de ∅ 2,4 mm y a la salida de ∅ 2,8 mm, y un tapón de madera para impedir la caída del líquido hasta que no se obtengan las condiciones del ensayo; un matraz aforado para 200 cm^3. El equipo se completa con los termómetros, agitador y sistema de calentamiento. Una vez obtenidas las condiciones de ensayo, se retira el tapón y se toma con un cronómetro el tiempo de caída del líquido, dividiéndose por el tiempo de caída del agua, cuyo valor constituye la constante del aparato, variando entre 51 y 52 segundos a 20 ºC, obteniéndose un número que da la viscosidad en *grados Engler* (ºE).

j).- Conversión a los distintos sistemas

Herschel ha demostrado que la viscosidad cinemática puede representarse por la ecuación:

$$\nu = A.t - \frac{B}{t}$$

(9.55)

Donde A y B son constantes obtenidas experimentalmente y t el tiempo en segundos. Las constantes A y B para las viscosidades Saybolt, Redwood y Engler, se dan en la siguiente tabla:

Viscosidad	A	B
Saybolt Universal	0,22	180
Redwood	0,26	171
Engler	0,147	374

. La ecuación dada por la (9.55) es lo bastante precisa para trabajos en la práctica. Una vez obtenida la viscosidad cinemática, conociendo la densidad del líquido se puede conocer la viscosidad absoluta aplicando la (9.52).

k).- Viscosímetro Ostwald modificado

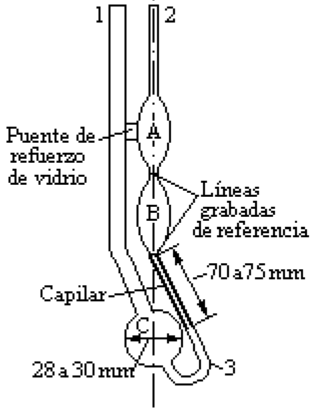


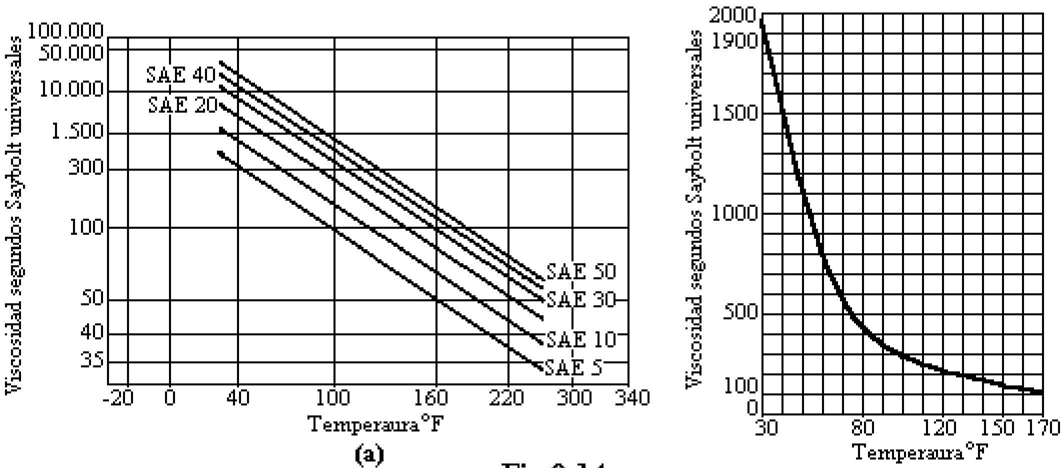
Fig.9.13

En la actualidad, el viscosímetro que utiliza el principio del tubo capilar, más empleado para obtener la viscosidad cinemática, por su gran exactitud, es el viscosímetro de Ostwald modificado, empleado universalmente como patrón de medida. En la figura (Fig.9.13) se muestra en forma esquemática este viscosímetro, funcionando de la siguiente forma: Se carga el líquido por el tubo 1, se lleva a la temperatura constante el aparato mediante un baño líquido, se aspira el líquido cargado hasta el tubo 2 hasta que el bulbo *B* se encuentre totalmente lleno y se lo deja caer, siendo el valor de la viscosidad el tiempo empleado en segundos por el menisco para descender entre las dos líneas grabadas de referencia

en ambos extremos, superior e inferior, del bulbo *B*. El aparato debe ser previamente calibrado con un fluido normalizado.
Otro viscosímetro que utiliza el principio de tubo capilar es el de *nivel suspendido*, ideado por Ubelohde y modificado por Fitz Simons, el cual, en caso de ser de interés, el estudiante puede consultar la bibliografía especializada que se menciona al final del capítulo.

l).- Influencia de la temperatura en la viscosidad

La viscosidad de un fluido disminuye con el aumento de la temperatura, como por ejemplo los lubricantes elaborados a partir de los hidrocarburos, presentan un brusca disminución de la viscosidad al aumentar la temperatura. Es importante que el lubricante conserve su viscosidad dentro de ciertos límites, ya que si la misma disminuye demasiado se pueden producir desgastes prematuros y excesivos, incluso el deterioro de la pieza lubricada.
Por tal motivo es importante conocer la variación de la viscosidad con la temperatura. La Sociedad Norteamericana de Ensayos de Materiales (ASTM), desarrolló un método empírico



(a) **Fig.9.14** (b)

para obtener la variación de la viscosidad de los aceites lubricantes hidrocarbonados con la temperatura, relacionándolas mediante gráficos o cartas, construidos con una ecuación logarítmica, como la que se muestra a continuación:

$$\log_{10} \log(\nu + 0{,}8) = n \log_{10} T + C \qquad (9.56)$$

Esta ecuación da una línea recta y concuerda muy bien con los resultados de ensayos. En la (9.56) es ν la viscosidad cinemática en centistokes, *T* la temperatura absoluta en grados Rankine, *n* y *C* constantes para el aceite en cuestión. En al figura (Fig.9.14a) se muestra, solo en forma ilustrativa, una de las cartas de la ASTM para la viscosidad en segundos Saybolt Universal, en tanto que la figura (Fig.9.14b) correspondería a un gráfico de la misma relación viscosidad-temperatura con los mismos datos, pero en coordenadas cartesianas.

Con las cartas de la ASTM indicada en la figura (Fig.9.14a) se puede conocer como varía la viscosidad para distintas temperaturas, permitiendo conocer la viscosidad de un aceite a cualquier temperatura si se conoce sus viscosidades a dos temperaturas determinadas.
Índice de viscosidad: Una manera muy usada para conocer la variación de la viscosidad con la temperatura de un aceite lubricante, es utilizando el *Índice de Viscosidad* VI. El índice de viscosidad VI, establecido por Dean y Davis, da la aptitud de un lubricante para mantener su fluidez o viscosidad dentro de un intervalo de temperatura. El mismo surgió de haber asignado a un lubricante que tenía muy poca disminución de su viscosidad con el aumento de la temperatura el índice cien, es decir VI = 100, y a otro lubricante que presentaba una gran disminución de su viscosidad con el aumento de la temperatura, el índice cero, o sea VI = 0. Este índice de viscosidad VI está dado por la expresión:

$$VI\% = \frac{L-U}{L-H} \times 100$$

(9.57)

En la (9.57) se tiene que es:

- U : viscosidad de la muestra de lubricante a 40 ºC
- L viscosidad a 40 ºC de un aceite con VI = 0, y de la misma viscosidad que la muestra a 100 ºC
- H es la viscosidad a 40 ºC de un aceite con VI = 100 y de la misma viscosidad que la muestra a 100 ºC.

La ecuación (9.57) está representada gráficamente en la figura (Fig.9.15), donde la línea superior representa un aceite de VI = 0, y la inferior un aceite de VI = 100. El aceite cuyo VI se desea conocer está representado por la línea de trazos. Es decir, que el índice de viscosidad da una medida de la aproximación del aceite incógnita al de índice de viscosidad 100. Dean y Davis encontraron dos series de aceites, una de índice de viscosidad 100 y la otra de índice de viscosidad 0, y ambas de la misma viscosidad a 210 ºF, los que aparecen en la Tablas de índices de viscosidad ASTM (D567).

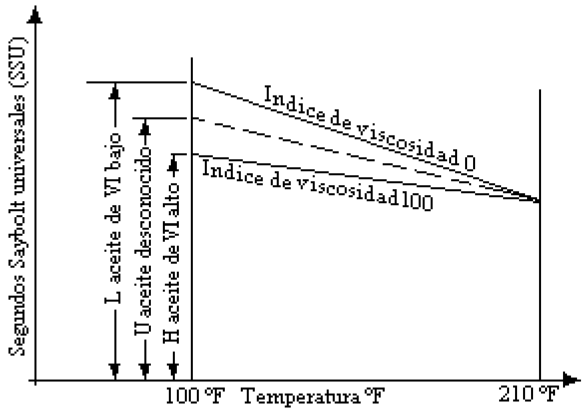


Fig.9.15

Actualmente, con el agregado de aditivos a los aceites lubricantes hidrocarbonados, y con la aparición de los lubricantes sintéticos, se obtienen VI superiores a 100.

Para la elección de un lubricante, es necesario conocer, además de la temperatura, a que velocidades y presiones estará expuesto, utilizándose los que presenten resistencia adecuadas a estos factores. Se debe tratar de utilizar sistemas sencillos y efectivos de lubricación. Se debe, sobre todo, seguir los consejos del fabricante, consultando los casos especiales cuando sea necesario