



MANUAL GENERAL DE

VISCOSIDAD

Por: Dr-Ing. Fidel Fernández



visite:

www.messen.com.ve

Prohibida la reproducción total o parcial de este material sin la debida autorización escrita de Messen C.A.

Otros Cursos:



Inscritos en el
Ministerio del Poder Popular
para la **Educación y el INCES**



Ministerio
del Poder Popular
para la **Educación**



NOMBRE DEL CURSO: MANUAL GENERAL DE VISCOSIDAD

ELABORADO POR: FIDEL FERNÁNDEZ

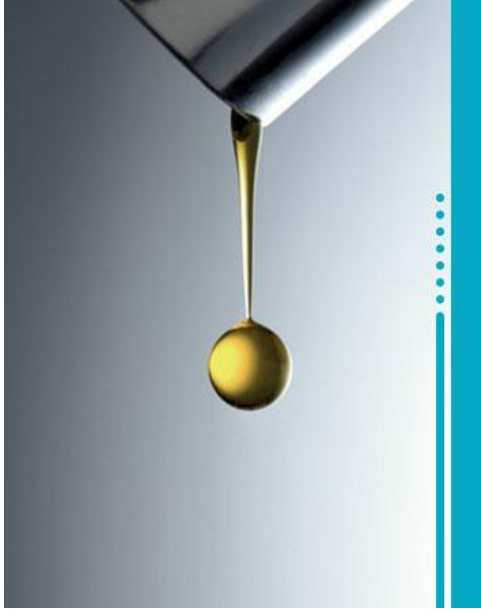
Copyright© Messen C.A. 2005-2015

Autoedición

Prohibida su reproducción parcial o total sin autorización Escrita de **MESSEN C.A.**
Todos los derechos de propiedad intelectual reservados.



Significado Físico de la Viscosidad



Siempre que un fluido líquido o gaseoso fluye ó cuando se altera su forma, entran a jugar un conjunto de fuerzas las cuales ofrecen resistencia a la fuerza que causa el flujo ó el cambio de forma del fluido bajo consideración.. Esta propiedad del fluido se denomina **viscosidad**. Un determinado fluido se considera móvil ó viscoso de acuerdo a su tendencia a fluir rápidamente ó no.

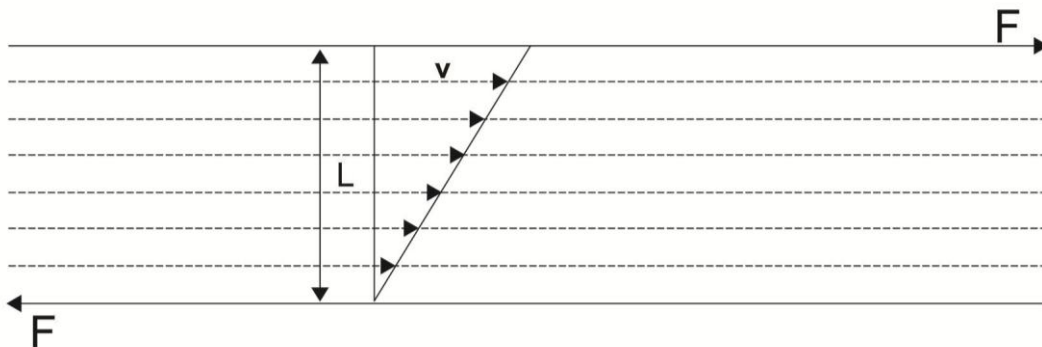
La viscosidad esta relacionada solamente con las fuerzas dentro del seno del fluido, siendo originadas por el movimiento relativo de las porciones ó capas contiguas del fluido. De donde la viscosidad puede ser considerada como una **fricción interna**.

Para poder visualizar más claramente el mecanismo de la viscosidad consideremos el caso de un líquido fluyendo sobre una superficie plana. La capa molecular líquida que está en contacto directo con la superficie plana es atraída por las moléculas del material que constituye dicha superficie y puede considerarse a los efectos prácticos que dicha capa líquida **permanece estacionaria**. El flujo puede ser considerado en este caso como un movimiento de deslizamiento de las sucesivas capas líquidas una sobre la otra.

Al considerar una capa líquida separada a una distancia L de la superficie plana, la misma se estará moviendo con una velocidad v_i paralela a la superficie plana. La capa líquida contigua a la considerada experimentará una tendencia a ser arrastrada hacia adelante y al mismo tiempo será retenida por la capa líquida que se encuentra debajo de la misma, la cual posee un movimiento más lento y así sucesivamente el fenómeno se transmite de capa líquida a capa líquida hasta llegar a aquella cuya velocidad de traslación es cero. Existirá por tanto una fuerza (F), actuando sobre una determinada capa líquida, la cual es debida a las velocidades relativas de las capas líquidas superiores e inferiores.

La explicación más sencilla que puede hacerse sobre esta fuerza es que la misma es proporcional al gradiente de velocidad en los alrededores inmediatos de la superficie plana:

$$\frac{v_1 - v_2}{L}$$



Si dos capas laminares líquidas que poseen un área A de contacto se mueven con velocidades constantes v_1 y v_2 la fuerza requerida para mantener constante la diferencia de velocidades:

$$F = \eta A \cdot \frac{(v_1 - v_2)}{(L_1 - L_2)}$$

Donde L_1 y L_2 están medidas en dirección perpendicular a las capas laminares líquidas. Puesto que la velocidad del líquido cambia continuamente las diferencias pueden sustituirse por diferenciales y escribir:

$$F = \eta A \frac{dv}{dL} \quad (1)$$

F - fuerza tangencial

η - viscosidad dinámica

A - superficie de rozamiento interno

$\frac{dv}{dL}$ - gradiente de velocidad de movimiento de las capas en dirección perpendicular a la superficie de la capa.

En la cual como se ha comprobado experimentalmente η es una característica constante para cada líquido a la presión atmosférica ordinaria la cual decrece con el aumento de la temperatura pero para líquidos simples y soluciones verdaderas es independiente de $\frac{dv}{dL}$

(fluidos newtonianos).

Analizando dimensionalmente la ecuación (1) se tiene:

$$[F] = [MLT^{-2}] \qquad A = [L^2]$$

$$[dv] = [LT^{-1}] \qquad dL = [L]$$

donde sustituyendo en (1) se obtiene para η que sus dimensiones son

$$\eta = [ML^{-1}T^{-1}]$$

η se denomina coeficiente de viscosidad y su significado físico se ve claro si los factores del miembro derecho de la ecuación (1) se le asigna el valor 1. El coeficiente de viscosidad es la fuerza requerida por unidad de área para mantener la diferencia de velocidad unitaria entre dos plano paralelos líquidos separados una unidad de distancia.

En el S.I. la unidad del coeficiente de viscosidad es el Pascal • segundo (Pa•s) ó su submultiplo miliPascal • segundo (mPa•s) . Los instrumentos de medición de trabajo utilizan la unidad del sistema cgs, Poise (P) con su submultiplo centiPoise (cP).

El recíproco del coeficiente de viscosidad se denomina fluidez (ϕ), se expresa como $1/\eta$ y es la base de la moderna reología o ciencia de los fluidos.

2.- TEORIA DE LOS PRINCIPALES MÉTODOS PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD

Viscosidad absoluta o dinámica: Se determina actualmente mediante los métodos basados en el principio desarrollado por el físico Poiseville.

El líquido es forzado a pasar a través de un tubo capilar y η se determina a partir del volumen descargado en la unidad de tiempo, la presión y las dimensiones del aparato a una temperatura bien establecida. Este método posee las ventajas siguientes:

- Poco costoso y simple que son los instrumentos de medición con relación a otros.
- La pequeña cantidad de líquido que se requiere para la determinación.
- La facilidad con la cual puede ser mantenida constante la temperatura.
- La circunstancia de que la teoría matemática puede desarrollarse estrictamente y sin aproximaciones.

Las leyes que gobiernan el flujo de un líquido a través de un tubo capilar se han deducido a partir de las ecuaciones hidrodinámicas.

Consideremos una porción AB de un tubo capilar de forma cilíndrica que posee un área circular de radio R, una longitud AB=L (figura 2) y manteniendo una diferencia de presión ΔP entre A y B. Asumamos que el flujo es tal que cada partícula de líquido se mueve paralelo al eje del cilindro con una velocidad constante v, por razones de simetría esta velocidad será la misma para todos los puntos que se encuentran sobre el mismo círculo, de manera que el líquido puede considerarse compuesto de láminas cilíndricas que se mueven con velocidades las cuales son funciones de sus radios.

La fuerza ejercida por la presión sobre un cilindro de radio r es:

$$F_p = A \cdot \Delta P = \pi r^2 \cdot \Delta P$$

En tanto que la resistencia alrededor de la superficie del cilindro causada por la viscosidad de acuerdo a la ecuación (1) está dada por el producto: Area x coeficiente de viscosidad x gradiente de velocidad o sea:

$$F_V = (2\pi rL)\eta \cdot \frac{dv}{dr}$$

Si el movimiento del cilindro no es acelerado, es decir, si v permanece constante, las fuerzas actuantes sobre el cilindro serán iguales y de signos contrarios

$$F_P = -F_V$$

Por lo tanto:

$$\pi^2 \Delta P = -2\pi L \eta \frac{dv}{dr}$$

$$r\Delta P = -2L\eta \frac{dv}{dr} \quad (2)$$

El gradiente de velocidad es:

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{r \cdot \Delta P}{2L\eta} \quad (3)$$

Integrando la ecuación se tiene:

$$v = -\frac{r^2 \cdot \Delta P}{2L\eta} + c \quad (4)$$

determinando la constante de integración (c), si asumimos que la lámina líquida en contacto con las paredes del tubo capilar está adherida a las mismas, esto quiere decir que:

$$v = 0 \text{ para } r = R$$

la constante de integración será entonces :

$$c = \frac{R^2 \cdot \Delta P}{4L\eta}$$

y la velocidad

$$v = \frac{\Delta P}{4L\eta} (R^2 - r^2) \quad (5)$$

Esta es la ecuación de una parábola (fig. 2) el eje de la cual es el eje v , mientras que el eje de r está a la distancia $R^2 \Delta\rho/4L\eta$ de la cúspide de la curva . Como v es la distancia recorrida en la unidad de tiempo, las partículas de líquido forman un perfil que está dado por la ecuación (5) por unidad de tiempo. Es decir, el volumen de líquido que pasa en la unidad de tiempo, (v) es el volumen de un paraleoide de cuyo sólido de revolución está dado por:

$$V = 2\pi \int_0^R v r \, dr$$

e introduciendo el valor de v dado en (5):

$$V = \frac{2\pi}{2L\eta} \int_0^R (R^2 - r^2) r \, dr = \frac{\pi\Delta P R^4}{8L\eta} \quad (6)$$

como el flujo es estacionario de aquí se puede deducir que el volumen descargado en la unidad de tiempo V es:

$$V = \frac{\pi\Delta P R^4}{8L\eta} \cdot t \quad (7)$$

Todos los viscosímetros capilares están diseñados de manera que pasa a través del tubo capilar un volumen constante y lo que se hace es medir el tiempo de descarga. De modo que V, R y L son las constantes del instrumento mientras que η a una temperatura dada es una constante para cualquier líquido normal. De donde se deduce que si el instrumento de medición posee dimensiones tales que cumple con la ley de Poiseville, el producto $\Delta P \cdot t$ será comprobar si realmente el instrumento posee correctas proporciones. Inversamente una vez que el instrumento ha sido hallado correcto, una variación del valor ($\Delta P \cdot t$) prueba que el líquido no se comporta normalmente como es el caso de las soluciones coloidales.

De la ecuación (1) tenemos que:

$$F = \eta A \frac{dv}{dL}$$

y podemos representarlo como :

$$\eta = \left(\frac{F}{A} \right) / \frac{dv}{dL} = \frac{N}{m^2} \cdot s = Pa \cdot s$$

η - Viscosidad dinámica en Pa • s

$$\tau = \frac{F}{A} - \text{Tensión tangente al desplazamiento (Pa)}$$

$$\tau = \eta \cdot D$$

$$D = \frac{dv}{dL} - \text{Gradiente de velocidad de deformación de desplazamiento (s}^{-1}\text{)}$$

La unidad de la viscosidad dinámica η es el “Pascal Segundo” (Pa • s), aunque se usa con mucha frecuencia la unidad “mili Pascal segundo” (m Pa • s), la conversión entre una y otra esta dada por:

$$1 Pa \cdot s = 1000 m Pa \cdot s$$

La unidad del sistema c.g.s. que aún en muchos casos se utiliza para la viscosidad absoluta o dinámica η es el “CentiPoise” (cP) y está corresponde idénticamente a la unidad (mPa • s):

$$1 mPa \cdot s = 1cP$$

A manera de ilustración se dan a continuación valores de viscosidad absoluta en (mPa•s) de diferentes sustancias a una temperatura de 20°C.

Petroleo	0,65	Leche	10
Agua	1,0	Aceite de oliva	10 ²
Mercurio	1,5	Miel	10 ⁴
Jugo de Uvas	2-5	Alquitrán	10 ⁶
Sangre (37°C)	4-15	Bitumen	10 ⁸

La teoría de Poiseville sobre el flujo laminar en los líquidos representan desviaciones las cuales son debidas al cambio de flujo laminar el cual se torna turbulento presentandose un aparente aumento de η , con esto se tiene que las partículas de líquido no se mueven en línea recta sino que lo hacen en direcciones irregulares a medida que transcurre el tiempo.

La constante que determina el tipo de flujo no es, en este caso, el coeficiente de viscosidad sino el coeficiente de viscosidad dividido por la densidad, η/ρ , constante que recibe el nombre de **viscosidad cinemática**.

En los instrumentos capilares más usuales no siempre se cumple el equilibrio total entre la presión ejercida sobre una capa laminar y la fuerza de fricción interna, lo que ocurre realmente es que solo una parte de esta presión se utiliza para vencer la resistencia debida a la viscosidad mientras que el resto se emplea para impartirle velocidad o sea energía cinética, al líquido. De donde esa parte debe calcularse para corregir el valor calculado para η en los viscosímetros capilares. Esta corrección se debe al físico Hagenbach y se conoce como “corrección de la viscosidad debido a la energía cinética según Hagenbach”.

Cuando se aplica un esfuerzo cortante a un líquido podemos encontrar cuatro tipos de comportamientos:

a) PLACAS PLANAS PARALELAS:

Una placa se mueve, mientras otra permanece inmóvil: se obtiene una corriente laminar del líquido entre las placas. Se forman láminas que se mueven una sobre otras, de manera similar como en una pila de cartas se puede ver al momento de hacer el mismo movimiento.

b) DOS CILINDROS COAXIALES:

Uno de los cilindros se mantiene estático mientras el otro rota. El comportamiento del líquido entre los cilindros se puede entender como el deslizamiento de una pila de láminas contiguas.

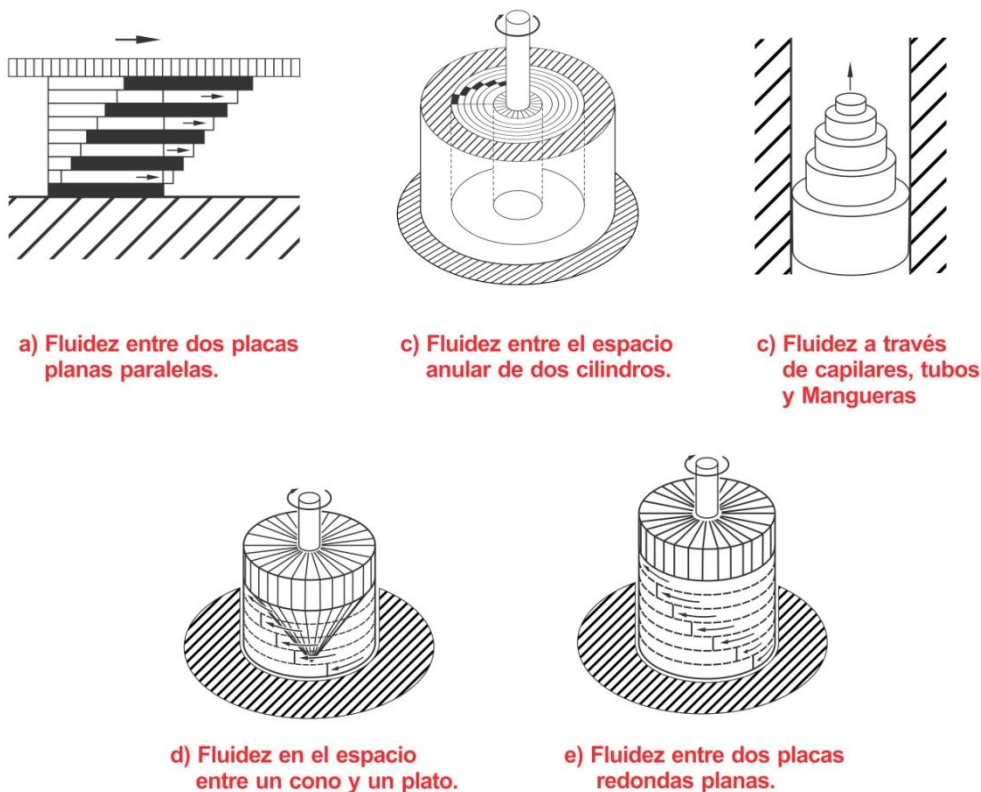


Fig. 2.- DIFERENTES TIPOS DE REPRESENTACIÓN DE LÍQUIDOS

c) CAPILARES, COPAS DE ORIFICIOS ANCHOS, MANGUERAS O TUBOS:

Si existe una diferencia de presión entre la entrada y la salida de un tubo lleno de un líquido, entonces el líquido fluye. La corriente de un líquido dentro de un tubo muestra una distribución parabólica de velocidades en ángulo recto con respecto al plano de la sección transversal del tubo. Una representación de la corriente en el tubo sería un grupo de tubos telescópicos que se mueven contiguamente. Otro tipo de corriente en el tubo se encuentra cuando éste tiene un perfil cuadrado o en copas de orificios anchos. El ancho del canal debe ser grande en comparación con la profundidad, si se desea que la corriente en el canal se pueda relacionar con las técnicas de medición de las propiedades de los líquidos.

d) ENTRE DOS LÁMINAS CIRCULARES PLANO PARALELAS O ENTRE UN CONO Y UNA LÁMINA:

En estos una de las superficies de frontera permanece estacionaria y la otra rota. Este tipo de respuesta de un líquido se puede visualizar como a un grupo de monedas que rotan en donde la moneda superior rota a un ángulo mayor que su contigua inferior y así sucesivamente.

2.- VISCOSIDAD CINEMÁTICA:

Cuando se miden líquidos newtonianos con viscosímetros capilares de vidrio del tipo "Ubbelohde" o "Cannon Fenske", se determina la viscosidad en términos de la unidad de viscosidad cinemática ν . El peso, produce aquí al igual que el esfuerzo cortante, que el líquido pase a través del capilar. La densidad del líquido es un parámetro a determinar.

La viscosidad cinemática ν y la viscosidad absoluta o dinámica η tienen la siguiente dependencia:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right] \quad (9)$$

3.- CURVAS DE VISCOSIDAD Y FLUIDEZ:

La dependencia entre el esfuerzo cortante y velocidad cortante, que describe el comportamiento fluido de un líquido se determina gráficamente en un diagrama, en donde τ está representado en la ordenada y D en abscisa. A esta representación se le llama curva de fluidez.

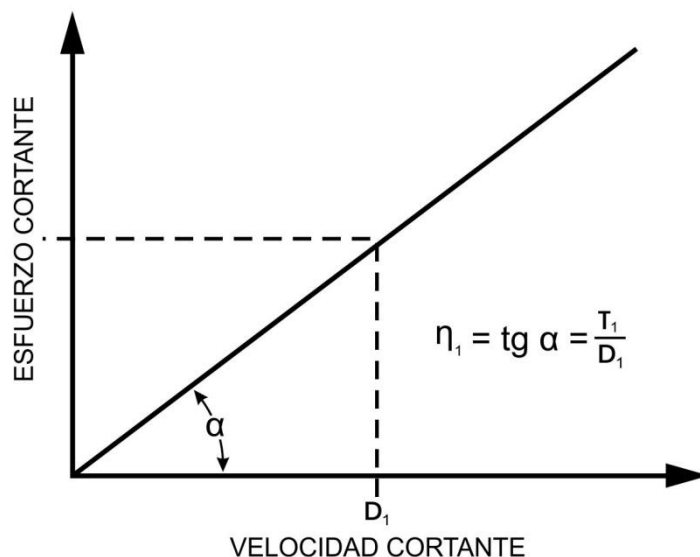


Fig. 4.- CURVA DE FLUIDEZ DE UN LÍQUIDO NEWTONIANO

Normalmente encontramos representada la variable independiente en la abscisa y la variable dependiente en la ordenada. En viscosidad normalmente se da un valor definido para la velocidad de

cizallamiento o corte y se mide la tensión de cizallamiento resultante, entonces la velocidad de corte se representa en la abscisa y la tensión de corte en la ordenada.

Se puede hacer otra representación: η como variable independiente de D . A esta representación se le llama curva de viscosidad.

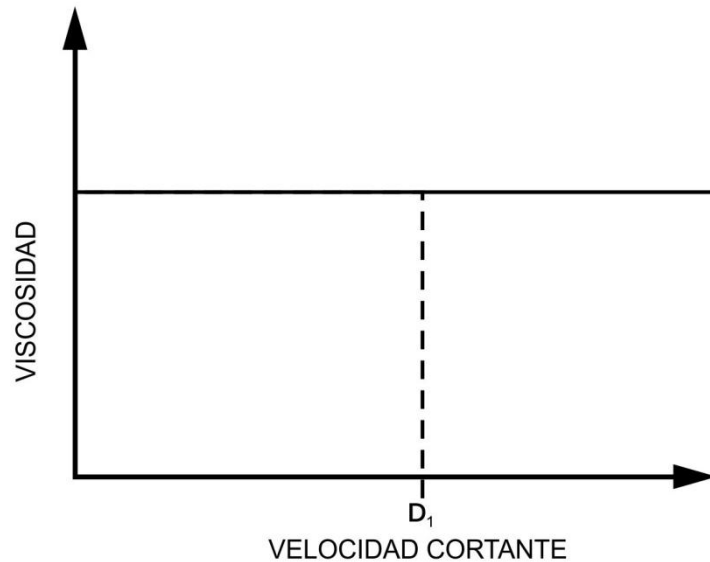


Fig. 5.- CURVA DE VISCOSIDAD EN UN LÍQUIDO NEWTONIANO

La curva de viscosidad mostrada en la figura 5 corresponde a la curva de fluidez. Estos resultados se transforman matemáticamente y permiten en un segundo paso la representación de la curva de viscosidad. Distintas curvas de fluidez tienen respectivamente su correspondiente curva de viscosidad.

4.- PARÁMETROS DE VISCOSIDAD:

La viscosidad describe el comportamiento físico de un líquido, mientras es sometido a un esfuerzo cortante, esto es la velocidad que adquiere después que es sometido a un esfuerzo cortante.

La viscosidad puede depender de cinco parámetros a saber:

$$\eta = F(S, T, P, D, t)$$

"S" Este parámetro tiene que ver con las propiedades físico-químicas de la sustancia medida.

"T" Este parámetro define la temperatura de la sustancia. La viscosidad es fuertemente dependiente de las variaciones de temperatura.

"P" El parámetro presión es efectivo sólo para altas presiones. Es por esto que en la práctica para presiones bajas no se toma en cuenta. Los líquidos al igual que los gases son compresibles para altas presiones. A través de la presión se aumenta la resistencia intermolecular. Aumentos de presión producen aumentos de viscosidad.

"D" El parámetro velocidad de cizallamiento o corte influye de manera definitiva en la viscosidad de muchos líquidos. Un aumento de la velocidad de cizallamiento puede significar el aumento o la disminución de la viscosidad.

"t" El parámetro tiempo ayuda a caracterizar el fenómeno, de algunas sustancias como las dispersiones, por el cual el tratamiento o estado anterior influye en las mediciones que se realicen. En este caso se habla de tiempo de corte o tiempo de regeneración antes de la prueba.

Substancias

1.- LÍQUIDOS NEWTONIANOS:

Newton supuso que la solución gráfica de la ecuación (8) daba como resultado una recta, que tiene una pendiente m y su punto de corte coincide con el origen de los ejes coordenados. Cada punto de la recta define un par ordenado (τ, D) . Cuando se dividen uno entre el otro se obtiene el valor de viscosidad η . Este valor se puede definir como la tag α .

Ya que la curva de fluidez para un líquido ideal es una recta, todos los cocientes del par (τ, D) , que pertenecen a esta recta son constantes, lo que significa que la viscosidad η es independiente de la velocidad de corte. Todos los líquidos que tengan este comportamiento serán entonces clasificados como líquidos newtonianos. Ejemplo: agua, aceites minerales, bitumen, soluciones de azúcar, etc.

2.- LÍQUIDOS NO NEWTONIANOS:

A todos los líquidos que no se comporten de manera que corresponda a la descripción dada por Newton se llaman "no newtonianos". Estos son en la práctica la mayoría de los líquidos que se encuentran.

CARACTERÍSTICAS DE LOS LÍQUIDOS NO NEWTONIANOS

a) Estructura viscosa: Muchos líquidos muestran una fuerte disminución de la viscosidad cuando se aumenta la velocidad cortante:

- productos farmacéuticos que son bombeados por tuberías o capilares,
- pinturas que son usadas con pistolas o pinceles para pintar diferentes superficies,

- pasta dental, crema para la piel o champú, que deben ser presionadas de tubos o sacadas de botellas.

Esto significa técnicamente que para un esfuerzo cortante o una presión dada, se conduce más material a un estado de fluidez o que se necesita menos energía para alcanzar un cierto valor de caudal. Los materiales que al aumentar la velocidad de corte reducen su viscosidad son llamados "de estructura viscosa" o pseudoplásticos. Muchas sustancias técnicas y comerciales como emulsiones, suspensiones o dispersiones pertenecen a este grupo. Algunas aclaratorias de este efecto de estructuras viscosas son:

Muchos fluidos que están considerados como homogéneos, están constituidos por componentes diversos: partículas de formas irregulares o gotas de un líquido, que están dispersas en otro líquido. Existen soluciones de polímeros con ramificaciones y/o entrelazamientos que producen largas cadena de moléculas. En reposo estas sustancias mantienen en una gran medida un estado muy desordenado, por esto, tienen una gran resistencia contra cualquier forzamiento a la fluidez, esto es, una viscosidad muy alta.

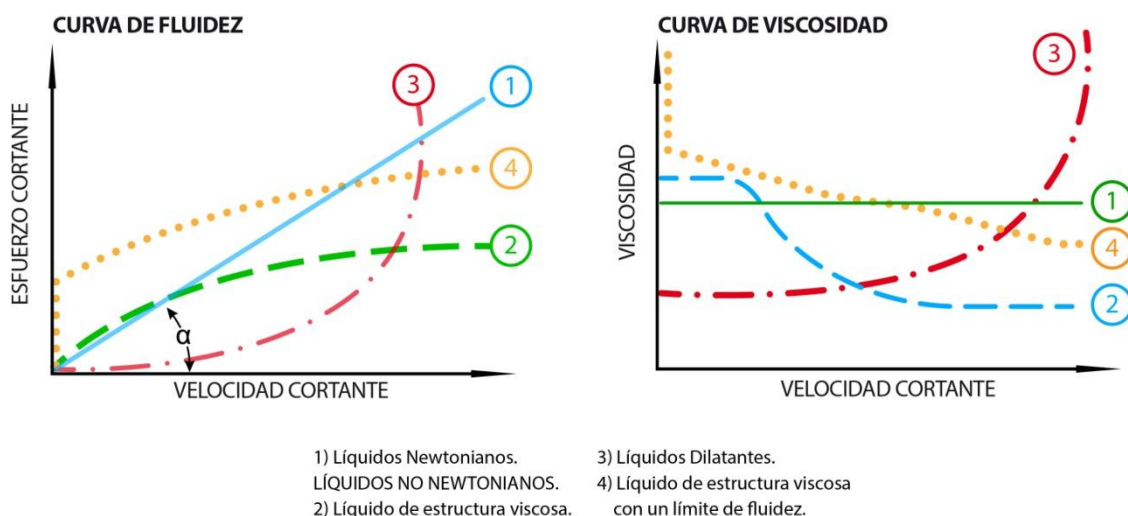
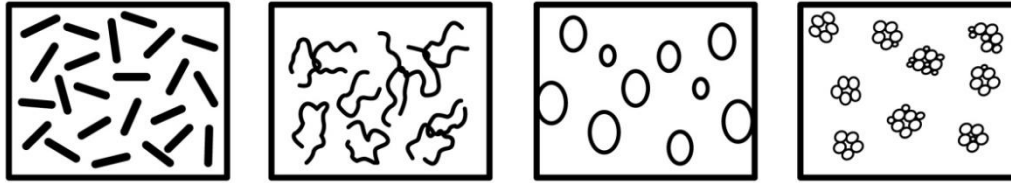
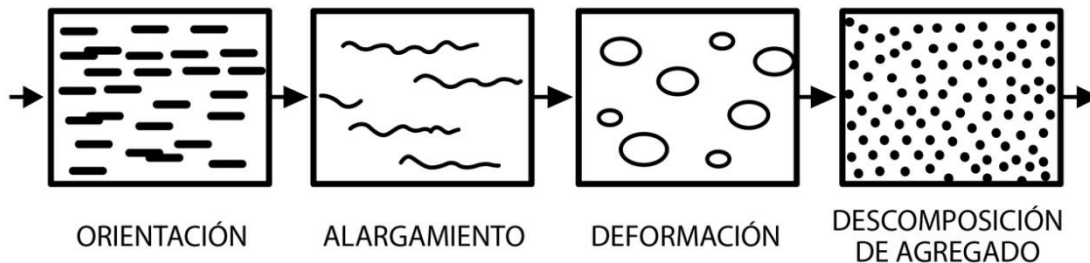


Fig. 6.- DIFERENTES TIPOS DE COMPORTAMIENTOS PARA FLUIDOS MÁS FRECUENTES

1) LÍQUIDO EN REPOSO



2) LÍQUIDO EN MOVIMIENTO



**Fig. 7.- DISPERSIONES EN ESTADO DE REPOSO Y FLUIDEZ
DENTRO DE UN TUBO**

Con el aumento de la velocidad cortante las partículas contenidas en el líquido se orientan en la dirección de la fluidez. Algunas cadenas de moléculas de materiales sintéticos fundidos o en una solución se desenredan, se alargan y se orientan en la dirección de movimiento. A través de esta orientación las partículas o parte de ellas pueden moverse con mayor facilidad, lo que resulta en una disminución de la resistencia interna y por lo tanto de la viscosidad.

Existen muchos líquidos en los cuales el efecto de disminución de la viscosidad es reversible, en efecto los líquidos recobran el valor de viscosidad que tenían, cuando el cizallamiento es reducido o nulo. Las moléculas vuelven a su estado desordenado, entrelazado, gotas que se habían deformado recobran su forma esférica y algunos agregados vuelven a su situación original.

- I.- PRIMER RANGO NEWTONIANO, LIMITE SUPERIOR DE VISCOSIDAD η_1 , EL CUAL ES CONSTANTE A BAJAS VELOCIDADES CORTANTES.
- II.- EN ESTE RANGO DE VELOCIDAD CORTANTE SE DISMINUYE EL VALOR DE LA VISCOSIDAD COMO CONSECUENCIA DE UNA ORIENTACIÓN MOLECULAR O DE LAS PARTÍCULAS.
- III.- SEGUNDO RANGO NEWTONIANO, LIMITE BAJO DE VISCOSIDAD η_2 QUE NO SE SOBREPASA AUNQUE SE AUMENTE LA VELOCIDAD CORTANTE.

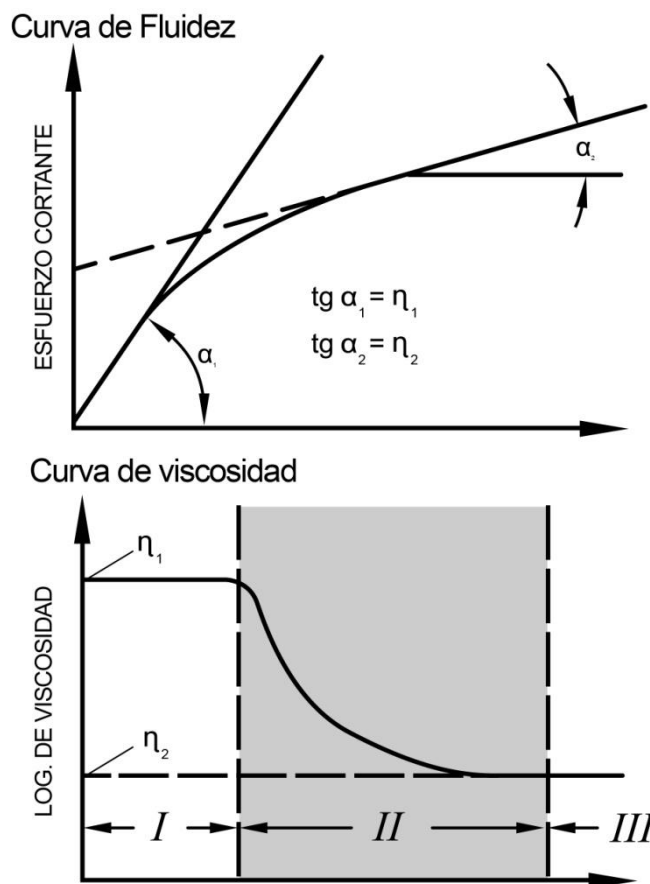


Fig. 8.- DEPENDENCIA DE LA VISCOSIDAD DE UN LÍQUIDO DE ESTRUCTURA VISCOSA CON LA VELOCIDAD DE CIZALLAMIENTO

Los efectos llamados de disminución de la viscosidad de los líquidos de estructura viscosa, son solo apreciables cuando se cubre un rango que va desde muy bajos a muy altos valores de velocidad cortante.

A bajas velocidades cortantes el movimiento molecular toma un cierto orden, lo que se traduce en una baja resistencia. A muy bajas velocidades cortantes los líquidos de estructura viscosa se comportan de manera similar a los líquidos newtonianos, que tienen un valor de viscosidad constante η_1 independiente de la velocidad cortante.

Posteriormente se sigue con un rango, en donde la orientación de las moléculas, partículas, gotas, etc.; debido al cizallamiento produce una disminución de la resistencia interna y el valor de viscosidad desciende fuertemente hasta alcanzar finalmente un valor constante η_2 independiente de la velocidad cortante. Aumentos mayores de la velocidad de corte no producen disminución de la

viscosidad, ya que las moléculas o partículas alcanzaron su máximo nivel de orientación. En el rango de bajos y altos niveles de velocidad cortante, algunas veces llamados primero y segundo rango newtoniano, la viscosidad de la sustancia es más o menos independiente de la velocidad cortante. Existen apenas pequeñas variaciones que pueden ser observadas en la mediciones entre una velocidad cortante de $D = 0,01 \text{ s}^{-1}$ y $D = 0,1 \text{ s}^{-1}$.

b) Dilatantes: Al contrario de sustancias de estructura viscosa las sustancias dilatantes muestran un aumento de la viscosidad con el aumento de la velocidad cortante. A medida que se aumenta la velocidad de las placas de un PVC, el material fluye con mayor dificultad.

El comportamiento de fluidez dilatante se encuentra en suspensiones de alta viscosidad, como en los PVC. Estos materiales plásticos son mezclados en pedazos grandes con un solvente, las partículas están tan comprimidas, que ocupan todo el espacio posible en el volumen dado. Entonces sólo es necesaria una pequeña cantidad adicional del solvente para llenar los espacios entre las partículas y de esta manera darle una

Consistencia líquida. Para bajas velocidades cortantes las partículas pueden ser empujadas unas contra otras con facilidad, para altas velocidades cortantes las partículas se presionan unas a otras lo que produce un aumento de volumen de la sustancia. En esta situación el volumen ocupado por el solvente se disminuye, es decir, el espacio entre las partículas ya no está ocupado por el solvente lo que se traduce en una disminución de la proporción de la mezcla. Esto conduce a la llamada dilatación o aumento de la viscosidad del plástico.

La dilatación se encuentra con poca frecuencia en los líquidos. Puesto que este comportamiento produce complicaciones al momento de la producción, es aconsejable, reducir la dilatación con algún procedimiento adecuado.

c) Plasticidad: La plasticidad describe a las sustancias líquidas de estructura viscosa que tienen una frontera de fluidez.

Es correcto considerar a los líquidos plásticos como materiales líquidos y también sólidos. La mayoría son dispersiones, que en reposo constituyen fuerzas de cohesión intermoleculares (enlaces polares, fuerzas de *Van der Waals*). Estas fuerzas impiden en reposo un cambio de posición de elementos de volumen y dan a la sustancia un carácter de cuerpo sólido con una viscosidad casi infinita. Si las fuerzas externas son pequeñas comparadas con estas, entonces el cuerpo solo puede ser deformado elásticamente. Cuando las fuerzas externas son tan grandes que las fuerzas de cohesión pueden ser superadas, se supera el límite de fluidez, entonces se rompe la estructura del material y elementos de volumen pueden cambiar de lugar en forma irreversible y entonces el material se transforma en una sustancia líquida.

Substancias que tienen un límite de fluidez son: petróleo, grasa, pintura de labios, crema dental y chocolate. Las curvas de fluidez de los líquidos plásticos no comienzan en cero, sino que se corren a lo largo de la ordenada y entonces para τ_0 (límite de fluidez) comienzan a bajar su viscosidad.

d) Tixotropía: La tixotropía se encuentra en líquidos no newtonianos que al final del cizallamiento, sólo después de un cierto tiempo recuperan su valor de viscosidad inicial. Estos líquidos muestran en su mayoría un límite de fluidez.

Muchas dispersiones muestran paralelamente a una disminución de la viscosidad debido al cizallamiento, incluso una dependencia con el tiempo de cizallamiento debido a fuerzas de cohesión que se establecen entre las moléculas. En estado de reposo las dispersiones muestran una estructura de armazón tridimensional debida a las fuerzas de cohesión, que se denomina "Gel". En comparación con las fuerzas primarias de cohesión, como por ejemplo las que mantienen unidos los átomos a las moléculas, las fuerzas de cohesión de estas substancias son pequeñas: se rompen con facilidad cuando el cizallamiento se interrumpe por largo tiempo o cuando se agita un momento.

Cuando la red o armazón se está desintegrando la viscosidad disminuye hasta para una velocidad cortante dada, que se obtiene el valor más pequeño posible. Ese mínimo valor de viscosidad describe a la suspensión. Una substancia tixotrópica no debe fluir dependiendo solamente del tiempo de cizallamiento, sino que por definición debe reconstituir su estructura de Gel al regresar al estado de reposo (tiempo de regeneración). La transformación de Gel a suspensión y de suspensión a Gel es reproducible para suspensiones tixotrópicas.

La figura 9 describe las substancias tixotrópicas en forma gráfica: se puede observar que la curva ascendente no es idéntica a la curva descendente. La superficie de histéresis L entre ellas, define el orden de magnitud de la dependencia con el tiempo de cizallamiento, que se denomina tixotropía. La superficie tiene unidades de potencia entre volumen (cizallado). Si se multiplica esta potencia por el tiempo de cizallamiento (tiempo de ascenso y descenso), se obtiene el trabajo necesario para romper las fuerzas de cohesión de la estructura tixotrópica.

Las curvas de fluidez correspondientes a la viscosidad muestran claramente que con el aumento constante de la velocidad y del tiempo de cizallamiento, la viscosidad disminuye debido al rompimiento de la estructura de la red y al aumento de orientación de las moléculas. Disminuyendo la velocidad cortante en la segunda fase del experimento, la viscosidad sigue disminuyendo de su valor anterior y para el valor $D = 0$ no alcanza ya su valor original. Para la misma velocidad cortante existen dos puntos en la gráfica marcados con I y II con valores distintos de esfuerzo cortante y viscosidad. La viscosidad en el punto II es menor ya que la substancia fue sometida a un cizallamiento por un mayor tiempo. Se necesitó tiempo para pasar de $D = 0$ al punto I de allí a D_{max} y luego de nuevo al punto II.

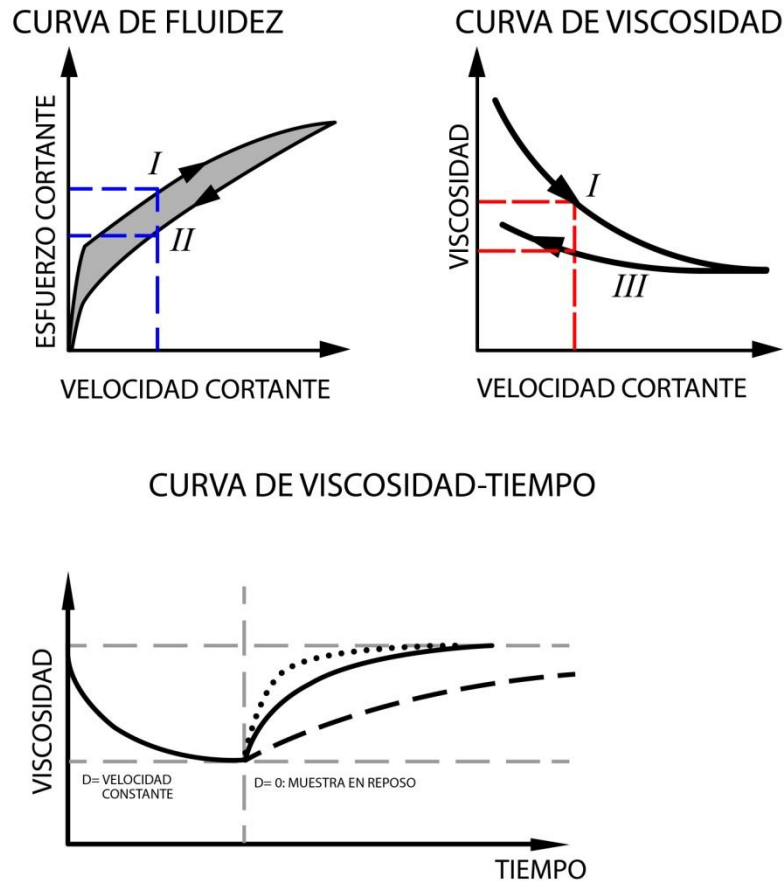


Fig. 9.- REPRESENTACIÓN GRAFICA DE LA TIXOTROPIA

La gráfica viscosidad en función de tiempo hace estas transiciones más claras: un Gel se convierte rápidamente en un coloide debido al cizallamiento. En la segunda fase se convierte nuevamente el coloide en un gel. El tiempo necesario para esta transición depende fuertemente de la condición del líquido tixotrópico y de su temperatura. La estructura tixotrópica se puede romper en segundos o minutos, pero puede durar minutos, horas y hasta meses para volver a tener la estructura original del Gel.

Debido a que se necesita un espacio de tiempo muy largo para que el coloide vuelva a su condición de Gel, técnicamente se puede conseguir una regeneración parcial (de 30 a 50%) en segundos o minutos para llevar al Gel a su valor original de viscosidad.

La tixotropía es muy importante en pigmentos, alimentos, productos cosméticos, medicinas y líquidos industriales semejantes. Como ejemplos de estos líquidos tenemos:

Se aplica algún pigmento con un pincel a una pared vertical, se rompe con el cizallamiento rápidamente su estructura tixotrópica, de manera que es más fluido y es más sencillo para pintar. Después que la pintura cubre la pared debe recobrar su estructura de Gel lo más rápido posible ya que de otra manera la pintura fluiría sobre la pared sin fijarse a ella.

Los jarabes para la tos que toman con mucha frecuencia los niños. Un medicamento de este tipo esta casi siempre constituido por una dispersión de la substancia activa mezclada en un sirope. Debido a que la substancia activa tiene una densidad mayor que el sirope este precipita hasta el fondo de la botella. Para evitar esta separación se le añaden aditivos que mantienen una mezcla tixotrópica. Durante la manufactura se colocan todos los componentes igualmente dispersados y el líquido se encuentra en su condición óptima, hasta que se llena la botella. Entonces se debe agregar el elemento que mantiene la dispersión en condición tixotrópica, tan rápido como sea posible a fin de evitar el comienzo de la sedimentación.

e) Reopexia: Líquidos reopéxicos muestran un comportamiento fluido, que presentan un aumento de la viscosidad con la duración del esfuerzo cortante. La viscosidad inicial sólo se alcanza después de un cierto tiempo. Este proceso de aumento o disminución de viscosidad que depende de la duración del esfuerzo cortante y del tiempo de reposo, es reproducible. La reopexia y la tixotropia tienen respuestas contrarias al esfuerzo cortante.

El comportamiento reopéxico se encuentra con poca frecuencia y debe tenerse cuidado al caracterizarlo, ya que transformaciones químicas de la substancia puede llevar a un diagnóstico falso.

ESCALA DE VISCOSIDAD

Esquema de Jerarquía de los Instrumentos de Medición de la Viscosidad en Líquidos

En este capítulo se aplica el esquema de jerarquía a los instrumentos de medición de la viscosidad de líquidos, se fija la secuencia de verificación de los viscosímetros e indica las incertidumbres y métodos principales de calibración.

1.- PATRONES PRIMARIOS:

El patrón primario está destinado a reproducir y conservar los valores de viscosidad de los líquidos y a transmitir esos valores a los instrumentos de medida usuales por medio de los patrones secundarios, patrones de referencia y patrones de trabajo. Las extensiones o rangos de viscosidad de los líquidos newtonianos, reproducidos por el patrón son:

de $4 \cdot 10^{-7}$ a $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}^2$ para viscosidad cinemática.

de $4 \cdot 10^{-4}$ a $10^2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ para viscosidad dinámica.

El patrón primario reproduce los valores de viscosidad con una incertidumbre de medida comprendida entre 0,03% y 0,5%, en función de la extensión de la medida de viscosidad. Estos se utilizan para verificar los patrones secundarios, por medio de líquidos que son medidos en las mismas condiciones de presión y temperatura del patrón primario.

La medición de la viscosidad por medio del patrón primario, se basa en la comparación de la viscosidad del líquido a analizar con la viscosidad del agua bidestilada recién preparada, a una temperatura de prueba de 20 °C y a una presión de 101 325 Pa. En las condiciones indicadas, se toma como valores de referencia del agua bidestilada:

Viscosidad Cinemática: $1,003\ 7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$

Viscosidad Dinámica: $1,001\ 9 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Densidad: $998,201 \text{ kg}/\text{m}^3$

NOTAS:

- la incertidumbre sobre el valor de la viscosidad del agua es igual a 0,25%, sin embargo no se ha tomado en cuenta esta incertidumbre durante la determinación de las incertidumbres especificadas en el esquema de jerarquía.
- la densidad debe ser determinada con un error que no sobrepase el 0,05%.

El patrón primario está compuesto por un juego de viscosímetros capilares a flujo libre de líquido, para las diferentes extensiones de medida, que permite medir la viscosidad del agua. La longitud de

los capilares de los viscosímetros de las dos mayores dimensiones del juego debe ser al menos igual a 400 mm y debido a la corrección por efecto de la energía cinética no debe sobrepasar 0,03% de la viscosidad medida. Los instrumentos utilizados para determinar el tiempo de flujo de los líquidos en los viscosímetros no deben tener un error mayor de 0,01% y los errores de mediciones en las lecturas no debe ser mayor del 0,1%. Así mismo, los baños termostáticos utilizados deben tener una estabilidad tal que permitan alcanzar el valor de 20 °C requerido sin desviarse más de $\pm 0,005$ °C y la diferencia entre dos puntos cualesquiera del baño no será mayor de 0,005 °C.

2.- PATRONES SECUNDARIOS:

Los patrones secundarios están destinados para transmitir la unidad desde los patrones primarios a los patrones de referencia. Su incertidumbre de medición debe estar comprendida entre 0,05% y 0,8%, en función del rango de medida. La desviación típica en la parte baja de la extensión no debe sobrepasar el 0,05%.

El patrón secundario está compuesto de un juego de viscosímetros capilares a flujo libre del líquido, que cubre una extensión de medida de $4 \cdot 10^{-7}$ a 10^{-1} m²/s. La longitud de los capilares de los viscosímetros de las dos mayores dimensiones del juego debe ser al menos igual a 400 mm, la corrección debida a la energía cinética no debe sobrepasar el 0,03% de la viscosidad medida. Los instrumentos de medición del tiempo deben tener las mismas características de los patrones primarios. Los baños termostáticos en cambio, pueden desviarse del valor de temperatura en $\pm 0,01$ °C y el gradiente de temperatura entre dos puntos cualesquiera del baño no será mayor de 0,01 °C.

3.- PATRONES DE REFERENCIA:

Como patrones de referencia se utilizan juegos de viscosímetros capilares de vidrio a flujo libre (de preferencia del tipo *Ubbelohde* de nivel suspendido con una longitud del capilar de 300 mm), así como líquidos patrones de referencia.

La incertidumbre máxima sobre la determinación de las constantes de los viscosímetros de referencia y sobre la medición de la viscosidad de los líquidos de referencia, debe estar comprendida entre 0,2 y 1%, en función del rango de medida de viscosidad de líquidos.

Los patrones de referencia son utilizados para contrastar los patrones de trabajo y los instrumentos de medida usuales de alta precisión, por comparación directa y medición directa.

4.- PATRONES DE TRABAJO:

Como patrones de trabajo se utilizan juegos de viscosímetros capilares a flujo libre del líquido (del tipo *Ubbelohde* a nivel suspendido, con una longitud del capilar de 90 a 120 mm), así como líquidos patrones de trabajo.

La incertidumbre máxima calculada para estos viscosímetros, debe estar comprendida entre 0,5 y 2,5%, y las medidas de viscosidad de los líquidos patrones de trabajo entre 0,3 y 2%, en función de la extensión de medida de viscosidad de líquidos.

Los patrones de trabajo son utilizados para contrastar o verificar los instrumentos de medida usuales por comparación directa o medición directa.

5.- INSTRUMENTOS DE MEDIDA USUALES:

Como viscosímetros de medida usuales se utilizan viscosímetros que tengan diversos principios de funcionamiento, destinados a determinar la viscosidad de los líquidos newtonianos y no newtonianos en unidades del Sistema Internacional (SI).

La verificación de los viscosímetros debe ser efectuada por medio de líquidos newtonianos y los errores máximos dependen del procedimiento de verificación, así si se determinan a través de la verificación contra líquidos patrones de referencia o de trabajo está entre 0,5 a 2% y comparándolos directamente con los patrones de trabajo el error de medida estará entre 2 a 10%.

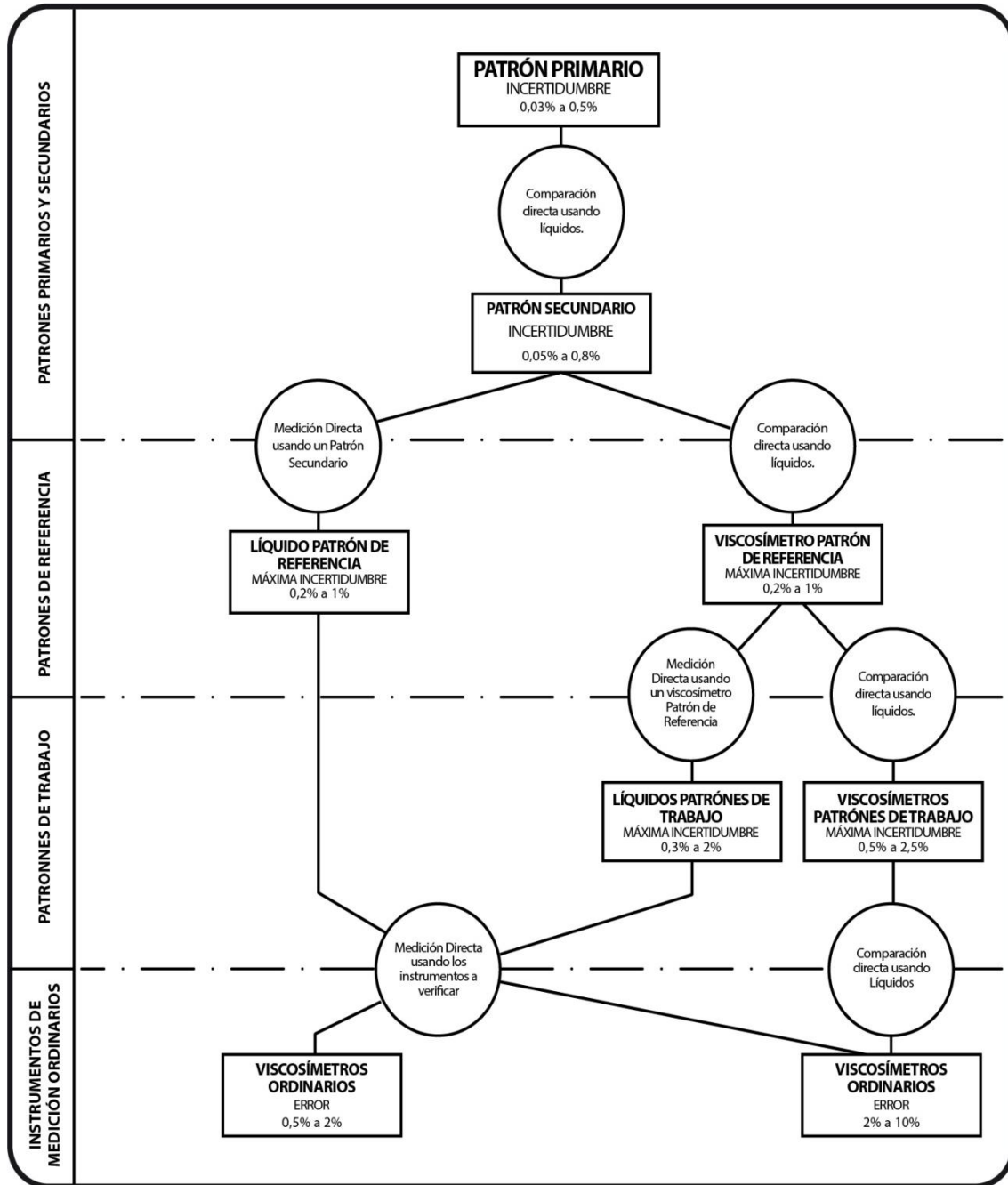


FIG. 10.- ESQUEMA DE JERARQUÍA PARA INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS DESDE $0,1 \text{ m}^2 / \text{s}^2$ O $100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

VISCOSÍMETROS DE ROTACIÓN

Principio de Funcionamiento

El principio de funcionamiento de los viscosímetros rotacionales relacionados con cilindros coaxiales y sistemas de cono en plato, permite la construcción de equipos muy versátiles para la medición de viscosidad absoluta. Los viscosímetros que se ofrecen en el mercado varían mucho en tecnología y precio.

Se puede observar fácilmente que los sistemas de cilindros coaxiales se basan en el modelo de Newton de placas plano-paralelas, en donde las láminas están adosadas al cilindro externo e interno. El líquido que se encuentra en el espacio anular está sometido a un cizallamiento definido que produce un flujo laminar. Esto permite la caracterización del problema por medio de la teoría ya estudiada.

Existen dos configuraciones básicas:

a.- DADO EL ESFUERZO CORTANTE:

Se da un torque en el eje de los cilindros y con esto un esfuerzo cortante en el cilindro interno mientras el externo permanece en reposo. La viscosidad del líquido que es sometido al esfuerzo cortante permite alcanzar solo una determinada frecuencia ν , que es lo que se mide en este caso.

b.- DADA LA VELOCIDAD CORTANTE:

Un cilindro (interno o externo) rota a una cierta frecuencia, esto hace que el líquido cizallado produzca un esfuerzo que se traduce en un torque τ , que es la magnitud medida. La mayoría de los viscosímetros rotacionales fabricados funcionan bajo este principio de medición. Existen dos versiones que se estudiarán detalladamente.

Sistema Searle:

El cilindro interno llamado también rotor o cuerpo de rotación, rota con una frecuencia fija o variable de manera programada. El cilindro externo, también llamado vicker de medición se mantiene en reposo. El cilindro interno hace que el líquido entre el espacio anular fluya. La resistencia interna del líquido es proporcional a la dependencia de la viscosidad con el torque.

El elemento de medición para el torque es usualmente un resorte de acero, que gira y está ubicado entre el motor y el eje del cilindro interno. El ángulo de rotación del sistema (resorte y cilindro) es una medida directa de la viscosidad del líquido que es medido.

Los viscosímetros rotacionales manufacturados de forma comercial son en su mayoría del tipo de Searle. Una razón para esto es que, a objeto de mantener la temperatura este sistema de medición ofrece ventajas y además permite medir viscosidades desde muy baja hasta muy altas.

El principio de funcionamiento de los viscosímetros de rotación tipo Searle, tiene algunas restricciones al momento de medir viscosidades muy bajas a velocidades cortantes altas, debido a que en esta situación se producen fuerzas en los elementos de volumen que perturban el flujo laminar y llegan a producir turbulencias. De allí que este tipo de sistemas no se utilice para el estudio de líquidos con viscosidades inferiores a 3 mPa·s

Sistema de Couette:

El cilindro externo rota con una frecuencia definida y lleva al líquido, contenido en el espacio anular entre los cilindros, a fluir. La resistencia del líquido contra el cizallamiento se traduce en un torque M sobre el cilindro interno proporcional a la viscosidad. El cilindro interno girará al igual que el cilindro externo si no es impedido de hacerlo. El torque en el cilindro interno se mide, con lo que se determina la fuerza de compensación necesaria para mantener el cilindro interno en reposo.

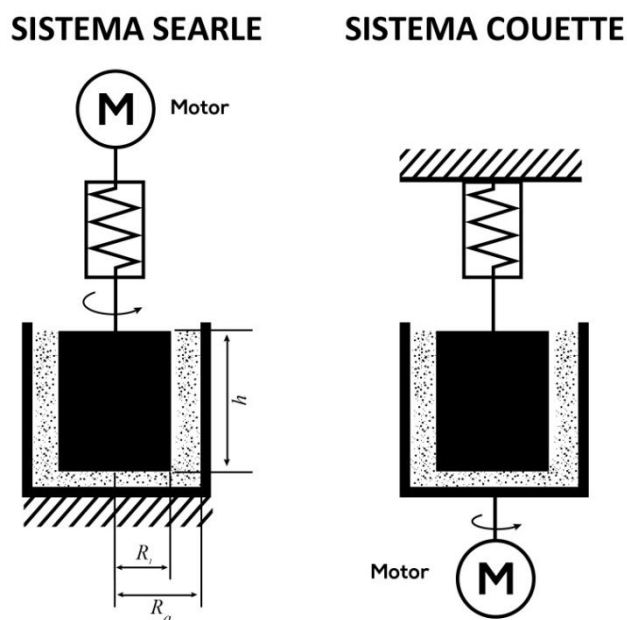


Fig. 11.- COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA SEARLE Y EL SISTEMA COUETTE

El sistema de *Couette* no permite la formación de remolinos y turbulencias como consecuencia de la fuerza centrífuga sobre elementos de volumen del líquido. Gracias a que el flujo laminar se mantiene aún para altas frecuencias y viscosidades bajas, los viscosímetros basados en este principio se extiende por debajo de 0,5 mPa·s en su rango de medición.

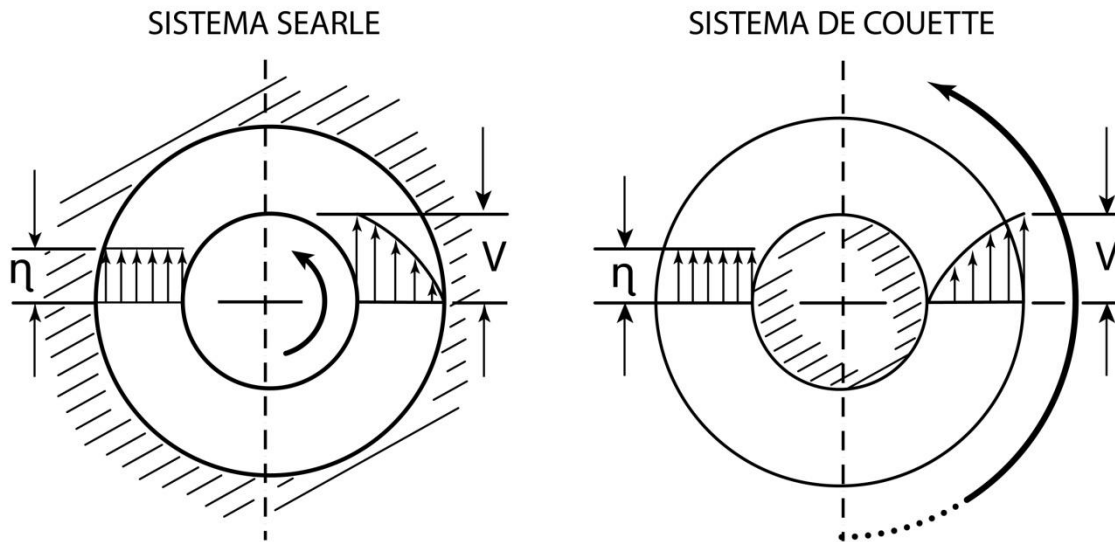


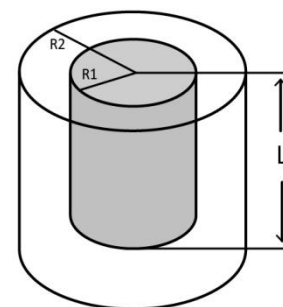
Fig. 12.- PERFIL DE VELOCIDAD DE CORTE Y VISCOSIDAD EN LOS SISTEMAS SEARLE Y COUETTE

Ecuaciones

PARA VISCOSIMETROS DE ROTACIÓN.

En el espacio circular que se encuentra entre los cilindros se coloca el líquido cuya viscosidad se desea determinar. Se aplica un torque o momento flector al cilindro interior que hace que el mismo comience a moverse produciendo una velocidad angular constante. Si se conoce el valor del torque aplicado como las dimensiones del instrumento y la velocidad angular, puede determinarse la viscosidad del líquido.

Si tenemos que la profundidad del líquido contenido entre los dos cilindros del instrumento es L , el radio del cilindro interior es R_1 y el radio del cilindro exterior es R_2 . La fuerza F que se ejerce tangencialmente por el líquido sobre la superficie del cilindro interior estará distribuido sobre un área.



$$A = 2\pi R_1 L$$

Esta fuerza produce un torque:

$$t_{or} = R_1 \cdot F$$

De donde:

$$F = \frac{t_{or}}{R_1}$$

La velocidad v se relaciona con la velocidad angular w por:

$$v = w \cdot R_1$$

El grosor de la capa líquida es $R_2 - R_1$ donde utilizando la ecuación (1) :

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dL}$$

$$F = \frac{t_{or}}{R_1} = \frac{\eta(2\pi R_1 L)(w R_1)}{(R_2 - R_1)}$$

$$\eta = \frac{t_{or}(R_2 - R_1)}{2\pi w R_1^3 L} \quad (9)$$

Todas las cantidades del miembro derecho de la ecuación (9) son perfectamente medibles y a partir de los mismos se puede determinar la viscosidad.

- El torque depende del modelo del viscosímetro.
- La velocidad se selecciona en dependencia del rango que se quiera medir.
- Los demás parámetros (R_1 , R_2 , L) determinan una constante que depende de la geometría de los cilindros formados por el recipiente que contienen la muestra y el cilindro que rota.

Entonces la ecuación se transforma en: $\eta = \frac{t_{or}}{w} \cdot K$ K – es una constante que depende del

Sistema de medición.

Ejemplo: En las especificaciones del viscosímetro RVDV-I+ utilizando una aguja RV-3 a 2 R.P.M el viscosímetro tiene un rango de viscosidad a plena escala de :

$$\text{Rango} = T_k \cdot S.M.C. \cdot \frac{10000}{\text{RPM}}$$

$$\text{Rango} = 1 \cdot 10 \cdot \frac{10000}{2}$$

$$\text{Rango} = 50\,000 \text{ cP} -$$

T_k- es el torque constante que para el modelo

RVDV-I+ es 1.

S.M.C- constante que depende del tipo de aguja utilizado (Spindle) que para el 3 es igual a 10.

CAPITULO 4

VISCOSÍMETROS CAPILARES

Principio de Funcionamiento

El sistema de medición de la viscosidad usando viscosímetros capilares es el más antiguo y el más usado en la determinación de viscosidades de aceites. En este caso se deja fluir el líquido a través de un capilar. De las dimensiones del capilar (radio y longitud) y un volumen dado a una presión constante se puede determinar la viscosidad con la ayuda de la ley de *Hagen-Poiseuille*. En la práctica para muchos viscosímetros capilares, se necesita solo hacer una medición del tiempo para hacer la determinación de la viscosidad, ya que todas las magnitudes involucradas permanecen invariables y se pueden resumir en una constante del instrumento.

LA LEY DE HAGEN-POISEUILLE Y LA CORRECCIÓN DE HAGENBACH

La ley de *Hagen-Poiseuille* establece para una corriente laminar de un líquido en un capilar que el valor de viscosidad viene dado por:

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8 \cdot V \cdot l} \quad (15)$$

Donde: R = es el radio del capilar

Δp = la diferencia de presión

t = tiempo de circulación del volumen V

l = longitud del capilar

Si se resume en la ecuación anterior todas las magnitudes que permanecen constantes, entonces se puede escribir:

$$\eta = c_1 \cdot \Delta p \cdot t \quad (16)$$

$$\text{Donde: } c_1 = \pi \cdot R^4 / 8 \cdot V \cdot l$$

Si el líquido fluye solo debido a su peso sin la presencia de una presión externa, entonces la diferencia de presión es $\Delta p = g \cdot h \cdot \rho$, donde:

g= es la aceleración de la gravedad en el lugar

h= es el valor medio de la diferencia de alturas del viscosímetro (presión)

ρ = es la densidad de la substancia

Si se supone que la diferencia de alturas de viscosímetro es independiente del líquido y por lo tanto constante, entonces se puede introducir el valor de la aceleración de gravedad g y la diferencia de alturas h en la constante del viscosímetro c_1 luego:

$$\eta = c_1 \cdot g \cdot h \cdot \rho \cdot t = k \cdot \rho \cdot t \quad (17)$$

$$\text{Donde: } k = c_1 \cdot g \cdot h$$

Si en la ecuación (17) se divide entre la densidad ρ y se llama a esto:

$$\eta/\rho = \nu \text{ viscosidad cinemática}$$

Entonces la ley de *Hagen-Poiseuille* se sintetiza en:

$$\nu = k \cdot t \quad (18)$$

Esto significa que la determinación de la viscosidad se realiza tomando mediciones de tiempo. La constante del viscosímetro se expresa en unidades de mm^2/s^2 , que debe determinarse usando un líquido de valor de viscosidad conocido.

Para viscosidades muy bajas se producen caídas de la presión Δp en la entrada y en la salida del capilar. Estas caídas de presión, tienen su origen en un aumento de la energía cinética, se toma en cuenta en una corrección de la ley de *Hagen-Poiseuille*, llamada la corrección de *Hagenbach*,

$$\nu = k \cdot t - B/t \quad (19)$$

En el término B/t , $B = 100 m \cdot V / 8 \cdot \pi \cdot l$, donde k está dado en unidades mm^2/s . La constante m es la llamada factor de corrección de *Hagenbach*, y depende de la forma como termina el capilar, por ejemplo para un capilar con una terminación plana $m = 1,12$.

La corrección de *Hagenbach* será pequeña en tanto la relación entre la longitud del capilar y el volumen l/V sea grande. Es útil escribir la corrección como una corrección en tiempo, esto es:

$$\nu = k (t - B/kt) \quad (20)$$

El término B/kt es una diferencia de tiempo en segundos s , que debe ser restada del tiempo de circulación del líquido.

Viscosímetro de Nivel Suspendido

La utilización de este principio de medición le permitió a *Ubbelohde*, construir un viscosímetro que llevó a la viscosimetría capilar a las primeras determinaciones de viscosidad con mucha exactitud

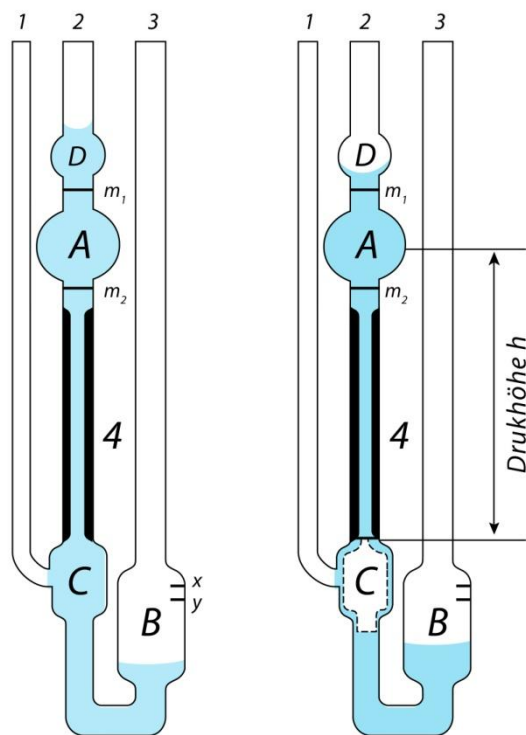


Fig. 13.- VISCOSÍMETROS DE NIVEL SUSPENDIDO O UBBELOHDE

Si se observa al viscosímetro, se notará que el viscosímetro consta de tres tubos 1, 2 y 3, en donde el tubo 3 sirve como tubo de llenado. La ampliación B se debe llenar hasta que el líquido este entre las marcas x-y. El tubo 2 es el tubo principal del viscosímetro y consta de una esfera cóncava A, cuyo volumen está limitado por las marcas m_1 y m_2 , luego se tiene el capilar de medición 4 que termina en la esfera C. El complemento más importante lo constituye, el tubo 1, ya que conecta a la esfera C a la presión atmosférica.

Los niveles del líquido en B y C se igualan en altura gracias al tubo 1. El líquido que viene del capilar de medición fluye de forma laminar en las paredes de la esfera C (nivel Suspendido). Por medio del establecimiento del nivel suspendido, se obtiene que la presión h se mantiene constante y exacta independiente de la cantidad de llenado.

La preparación para la medición con este viscosímetro se realiza de la siguiente manera: al alcanzar el viscosímetro la temperatura deseada, se llena el viscosímetro con el líquido a través del tubo 3,

teniendo cuidado de dejar el nivel entre las marcas x-y, se tapa el tubo 1 y se succiona el líquido por el tubo 2, manteniendo el tubo 3 libre, hasta alcanzar la esfera D. Luego se libera el tubo 1 y se forma el nivel suspendido.

La medición se realiza determinando el tiempo que dura en fluir el volumen de líquido entre las marcas de medición. La repetición de la medición se realiza con mucha comodidad.

El nivel suspendido se forma de una manera tal, que la adherencia al capilar (relacionada con la tensión superficial) en la esfera A es de la misma magnitud (pero contraria) a la que se establece en el nivel suspendido. Entonces el tiempo de circulación será independiente de la magnitud de la tensión superficial.

Viscosímetro *Cannon-Fenske*

El viscosímetro *Cannon-Fenske* es un viscosímetro muy popular. Consta de dos tubos, en el tubo izquierdo se encuentran dos prolongaciones esféricas a y d, de las cuales la inferior, en donde se encuentra ubicado el volumen de medición, que es limitado por las marcas M_1 y M_2 . El capilar de medición está ubicado en forma oblicua y termina en una prolongación que conduce a una esfera b que se prolonga hasta llegar al otro tubo que está sometido a la presión atmosférica del sitio. Al colocar el tubo capilar de medición c en forma oblicua las esferas d, a y b se presentan en forma vertical, sin embargo la desviaciones que se pueden encontrar debido a esta colocación es muy pequeña.

El llenado de este tipo de viscosímetros se realiza girando el viscosímetro 180° de su posición de medición. El tubo que contiene las esferas d y a, se introduce en el recipiente donde se encuentra el líquido a ensayar. Se llenará de líquido suficiente para llegar lo más exactamente posible a la marca M_2 , luego se gira con precaución el viscosímetro y se espera hasta que el líquido fluya por el capilar de medición c hasta alcanzar la esfera b. Cuando se alcanza la temperatura de medición, se succiona el líquido hasta la esfera d, se deja que la muestra fluya por su propio peso y se mide el tiempo que necesita el líquido para caer de la marca M_1 a la marca M_2 .

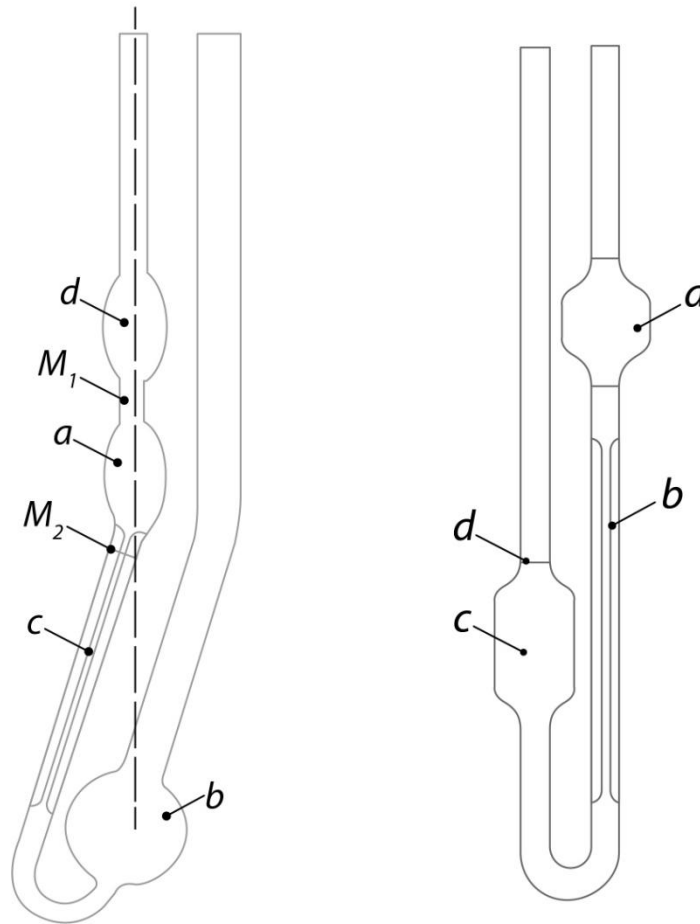


Fig. 14.- VISCOSÍMETROS *CANNON-FENSKE* Y VISCOSÍMETRO EN U DE ACUERDO A LA *BRITISH STANDARD*

La ventaja principal del viscosímetro *Cannon-Fenske* radica en la forma simple de su llenado. Además el viscosímetro no es muy frágil y es fácil de limpiar. Tiene una exactitud de medición bastante buena.

Desventajas: la dependencia de la presión con la temperatura,. Situación que se traduce en el cambio del volumen de líquido de llenado, que sin embargo puede ser considerado en una corrección. Además, se presenta una fuerte dependencia con la tensión superficial.

Viscosímetro U de la British Standard

Es un viscosímetro construido en forma de U. En el tubo derecho se encuentran, el volumen de medición limitado por marcas y el capilar de medición b. El tubo izquierdo tiene un volumen c para el líquido a bajo nivel. Sobre el volumen c se encuentra una marca d, hasta donde se debe llenar el viscosímetro a la temperatura de prueba. De esta manera se elimina el problema de la dependencia de la presión con la temperatura.

Para realizar la medición se llena el viscosímetro con el líquido de prueba hasta la marca superior a y luego se deja fluir. Se mide el tiempo que tarda entre las dos marcas.

Los ensanches a y c son cilíndricos y tiene el mismo diámetro y los extremos del tubo capilar son cónicos. Por esta construcción la dependencia con la tensión superficial es pequeña. El viscosímetro es muy fácil de limpiar y resistente gracias a su construcción.

El llenado del viscosímetro debe hacerse con una pipeta lo que se hace un tanto incómodo. Además, cuando se necesita medir a varias temperaturas debe ajustarse el volumen del líquido, hacer correcciones o simplemente hacer otro llenado.

Viscosímetros para Líquidos Opacos

Los viscosímetros descritos anteriormente están diseñados para la determinación de la viscosidad de líquidos transparentes. Para los líquidos opacos existen dos versiones:

- *Cannon-Fenske*,
- Viscosímetros U de la British Standard.

Una característica de ambos es que el volumen de medición está en la parte inferior del viscosímetro. El líquido fluye a través del capilar de medición sin haberlo humedecido antes.

Los viscosímetros *Cannon-Fenske* tienen dos volúmenes de medición, con este arreglo se pueden hacer dos mediciones seguidas. Con estos resultados se puede determinar si existen desviaciones del comportamiento newtoniano del líquido de prueba. El viscosímetro en forma de U de la BS, tiene sólo un volumen de medición.

El llenado se realiza de igual manera a los viscosímetros ya descritos. El viscosímetro *Cannon-Fenske* se voltea y se succiona hasta que el líquido de prueba alcance la marca c. Se deja que el líquido fluya hasta antes de la marca F y se detiene colocando, un corcho por ejemplo, en uno de los extremos de

los tubos. De allí se espera que el viscosímetro alcance la temperatura de prueba, y se saca el corcho. Se mide entonces el tiempo que tarda el líquido en cruzar cada una de las marcas de medición.

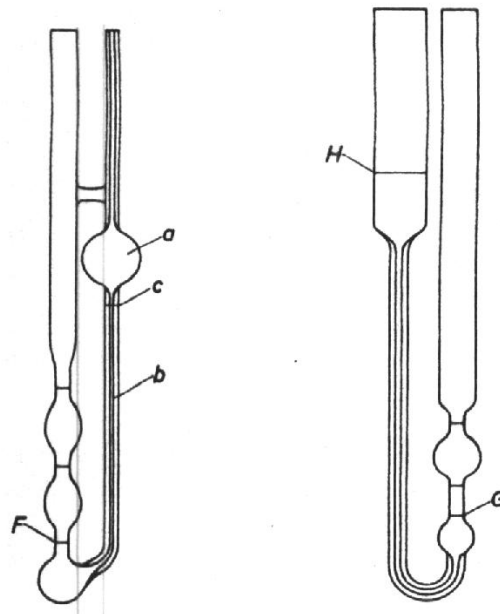


Fig. 15.- VISCOSÍMETROS *CANNON-FENSKE* Y VISCOSÍMETRO EN U DE ACUERDO A LA BRITISH STANDARD PARA LÍQUIDOS OPACOS.

El viscosímetro U tiene dos marcas de llenado H y G, entre las cuales debe estar el líquido de prueba antes de la medición. Al cerrar uno de los tubos se impide que el líquido alcance la marca G. Para repetir alguna medición se debe comenzar el proceso desde la limpieza y nuevo llenado del viscosímetro.

Ambos viscosímetro sirven para determinar la viscosidad de líquidos tan opacos, que a veces no es posible distinguir el menisco.

Una desventaja de estos viscosímetros, es que para repetir la medición, los mismos deben ser lavados y llenados nuevamente.

VISCOSIMETROS DE BOLA

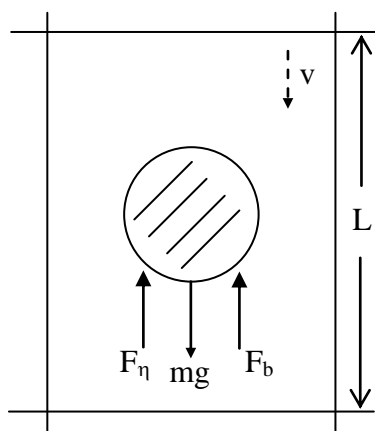
PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Otro método utilizado para determinar la viscosidad es el de caída de una esfera a través de un fluido, la cual experimenta una fuerza de fricción, lo cual permite calcular fácilmente el valor de la viscosidad. La utilización de la forma esférica hace que los cálculos se simplifiquen. La base teórica de este método es conocida como la **ley de Stokes**.

Según lo calculado por Stokes la fuerza de fricción ejercida por el líquido sobre una esfera está dada por la relación:

$$F = 6\pi\eta r v$$

donde η es la viscosidad del líquido, r el radio de la esfera y v la velocidad relativa de la esfera en el líquido.



El peso será: $F_p = mg$

$$F_p = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g$$

La fuerza de empuje será:

$$F_e = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_0 \cdot g$$

Como la fuerza neta (ΔF) ejercida sobre la esfera hacia abajo es igual al producto de su masa por su aceleración, la aceleración inicial es:

$$\Delta F = F_p - F_e = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g - \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_0 \cdot g$$

$$a_0 = \frac{\Delta F}{m} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_0)}{m} = \frac{\frac{m}{\rho} g(\rho - \rho_0)}{m} = \frac{g(\rho - \rho_0)}{\rho}$$

$$a_0 = g \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho}$$

Como resultado de esta aceleración, la esfera adquiere una velocidad hacia abajo y por consiguiente experimenta una fuerza retardante que está dada por la Ley de Stokes. A medida que la velocidad aumenta la fuerza retardante aumenta en proporción casi directa y finalmente se alcanza una velocidad tal que la fuerza hacia abajo y la fuerza retardante se igualan. La esfera entonces comienza a moverse con una velocidad constante denominada velocidad terminal. Esta velocidad puede calcularse haciendo la fuerza hacia abajo igual a la fuerza hacia arriba:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta r v$$

$$v = \frac{2 r^2 g(\rho - \rho_0)}{9 \eta}$$

midiendo el tiempo que demora en caer la esfera la distancia L (a partir del momento que la velocidad es constante), y conociendo r, g, ρ y ρ_0 se puede calcular la viscosidad del líquido.

DENSIDAD

Las magnitudes que definen el estado termodinámico de una sustancia homogénea (fase) son su temperatura T , presión p y volumen específico v :

$$v \equiv \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (21)$$

Donde V es el volumen y m la masa de la sustancia. El valor inverso del volumen específico v es la densidad ρ . La unidad del sistema internacional para v y ρ son respectivamente m^3/kg y kg/m^3 . Otras unidades de densidad utilizadas son: g/cm^3 y kg/dm^3 .

El volumen específico depende de la temperatura y la presión, y las funciones:

$$v = v(T, p) \quad \text{o} \quad p = p(T, v)$$

Se denominan ecuaciones de estado térmico de una sustancia homogénea.

Mediciones de Densidad

Las tablas de la densidad del agua en función de la temperatura, sirven como valores de referencia para casi todas las determinaciones de densidad. Estas tablas están basadas en determinaciones hidrostáticas de gran exactitud (incertidumbre relativa de medición de 10^{-6}), así como en determinaciones del coeficiente de expansión térmica del agua.

La densidad en estas tablas se diferencian entre sí en pocos g/cm^3 . Sin embargo se está trabajando para la unificación en una tabla específica. Los estudios que se hacen tratan de determinar la influencia en la densidad del agua de sus propiedades isotópicas y del aire disuelto, a objeto de que sean considerados.

La densidad de líquidos se determina con sistemas que son calibrados con agua o conectados eslabonadamente a la densidad del agua.

Medios de Medición de la Densidad de Líquidos

Entre los medios de medición más comúnmente usados para la determinación de la densidad de líquidos se tienen:

DENSÍMETROS (AERÓMETROS O HIDRÓMETROS):

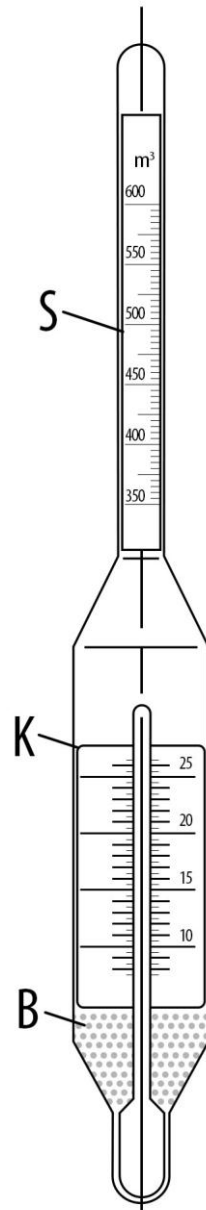
La medición de la densidad con un densímetro se fundamenta en el principio de Arquímedes “un sólido sumergido parcialmente en un líquido recibe una fuerza de empuje igual al peso del volumen del líquido desplazado por él”.

Los densímetros son cuerpos flotantes de vidrio que de acuerdo a la fig. 16 indican el valor de la densidad en una escala, dependiendo de la profundidad a la que se encuentran sumergidos. A veces contienen un termómetro introducido en el propio cuerpo del aerómetro.

Para realizar la medición se llena un cilindro transparente de menos de 50 mm de diámetro interno, con el líquido de ensayo. Luego se lleva a la temperatura a la cual se debe hacer la determinación. El líquido debe presentarse libre de burbujas. El densímetro limpio, se toma con precaución por el vástago y luego se sumerge cuidadosamente en el líquido, no más de 5 mm por encima del valor esperado de densidad del líquido, ya que el líquido adherido al vástago es más pesado y la indicación no concordaría. Cuando el aerómetro alcanza su estado de equilibrio, se lee, para líquidos transparentes en el plano del líquido y para líquidos opacos en el borde superior del abultamiento del líquido que se forma. Así mismo se determina la temperatura.

Los aerómetros para líquidos opacos, que deben leerse en el borde superior del vástago, traen inscrita la indicación "leer arriba". Los aerómetros que no tengan esa indicación están calibrados para medir en la superficie del líquido.

Los valores de los escalones en las escalas de los densímetros, están ubicados entre 0,2 y 2 kg/cm³. La incertidumbre de medición de aerómetros verificados (en algún organismo autorizado y bajo alguna norma) sin tabla de corrección, es igual a la apreciación del instrumento y con tabla de corrección aproximadamente igual a la incertidumbre dada por la lectura del observador.



**Fig. 16.- AERÓMETRO CON TERMÓMETRO INCORPORADO,
S=VÁSTAGO, K=CUERPO, B=PLOMO PARA EL BALANCEO Y EQUILIBRIO DEL INSTRUMENTO**

EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES.

Métodos de cálculo:

Se determina la media aritmética de las mediciones:

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

Donde:

- \tilde{d} - Valor de la densidad media.
- d_i - Valor de la densidad medida.
- n - número de mediciones.

Frecuentemente la temperatura del líquido que se mide se diferencia de la temperatura a la que el densímetro o areómetro fue graduado, por lo que es necesario introducir una corrección de temperatura.

Los densímetros y areómetros se encuentran graduados a la temperatura de 20 °C, excepto los densímetros para agua de mar que es 17.5°C y los areómetros para cola cuya temperatura de graduación es de 75°C.

Si la temperatura del líquido a medir es mayor que la temperatura a la que fue graduado el vidrio del densímetro o areómetro, se expande, su volumen aumenta, aumentando la fuerza de empuje, lo que trae como consecuencia que disminuya la profundidad de inmersión del densímetro o areómetro, dando como resultado que la lectura sea mayor que la real y la corrección con signo negativo; si la temperatura es menor que la graduación, la corrección es con signo positivo.

Esta corrección se efectúa mediante la siguiente forma:

$$\Delta\rho = \beta(t_0 - t)\rho$$

Donde:

β - coeficiente de dilatación cúbico del vidrio.

t_0 - temperatura de graduación ($^{\circ}\text{C}$).

t - temperatura de medición en ($^{\circ}\text{C}$)

ρ - densidad en kg/m^3 ó g/cm^3

$\Delta\rho$ - diferencia de densidad que se suma o resta, según el caso, a la lectura del densímetro o areómetro.

CLASIFICACIÓN DE LOS DENSÍMETROS Y AREÓMETROS

Los densímetros y areómetros se clasifican como se establece las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Densímetros

Tipo	Intervalo de medición		Error máximo permisible g/cm^3
	Desde	Hasta	
De uso general	0,600 0	2,000 0	0,000 1 0,000 2 0,000 5 0,001 0,002 0,005 0,01 0,02
Para acumuladores	1,100	1,400	0,005 0,002 0,01
Para derivados del petróleo	0,610 0	1,070 0	0,000 5 0,001 0,002 0,01
Para agua de mar	1,000	1,040 0	0,000 2 0,000 5 0,001
Para ácidos	1,000	1,840 0	0,000 2 0,001
Para orines (Urodensímetros)	1,000	1,060	0,001 0,002
Para leche (Lactodensímetros)	1,015	1,200	0,0005 0,001

Tabla 2. Areómetros

Tipo	Intervalo de medición		Error máximo permitido
	Desde	Hasta	
Sacarómetro	0	90 % m/m	0,1 % m/m 0,2 % m/m 0,5 % m/m 1,0 % m/m
Alcoholímetro	0	100 % v/v	0,1 % v/v 0,2 % v/v 0,5 % v/v 1,0 % v/v
Colímetros	0	56 % m/m	0,5 % m/m 1,0 % m/m
Lactómetros	0	40 % m/m	0,5 % m/m

Tanto para los densímetros como para los areómetros, su intervalo de medición esta compuesto por diferentes sub-intervalos que componen el juego de densímetros o areómetros.

PICNÓMETROS:

Los picnómetros son recipientes que en su mayoría tienen la forma dada en la figura n°17, y se utilizan para determinar la densidad de los líquidos. Su volumen se certifica con mucha exactitud y por métodos gravimétricos (pesas), se determina la masa contenida en el volumen certificado y se aplica la relación.

$$\rho = \frac{\text{masa de liquido}}{\text{volumen del pignómetro}}$$

Por lo general se utiliza una balanza de valor de división igual a 0,1 mg, y se obtiene una alta exactitud.

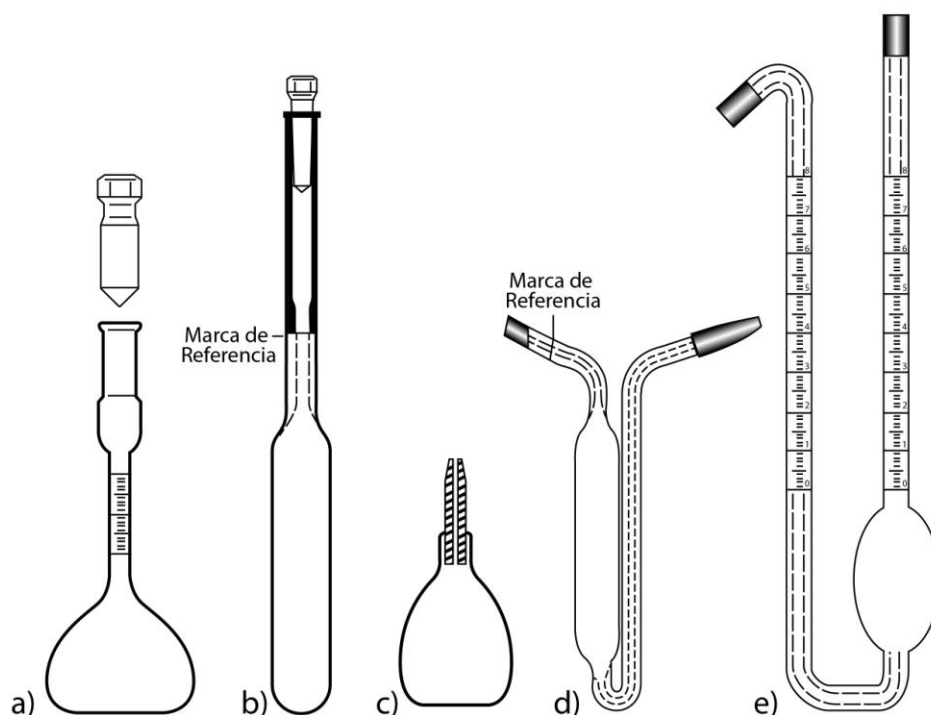


Fig. 17.- TIPOS DE PICNÓMETROS

**a) De acuerdo a Reischauer, b) de Bingham, c) de Gay-Lussac,
d) de Sprengel, e) de Lipkin**

Los picnómetros contruidos de acuerdo a *Reischauer* y *Bingham* tienen una marca de referencia o una escala corta en la garganta para delimitar el volumen del líquido. Para ajustar el volumen exacto, es decir, para colocar el menisco en la marca de referencia, se usa una pipeta fina parecida a las inyectoras médicas, para inyectar o sacar líquido. Luego el capilar debe ser cuidadosamente secado (por ejemplo con papel de filtro).

Los picnómetros de acuerdo a *Gay-Lussac* y a *Hubbard*, se llenan totalmente con el líquido a ensayar, el líquido sobrante que sale por el orificio se aparta. Luego son colocados en el sistema termostático a la temperatura de prueba.

Los picnómetros contruidos de acuerdo a *Sprengel* se llenan succionando el líquido de prueba. El volumen puede por una parte, ser el que ocupa hasta la marca de medición o el que ocupa hasta llegar a un extremo del capilar.

El picnómetro de acuerdo a *Lipkin* se llena a través del capilar, colocando el capilar curvado en el envase que contiene el líquido a ensayar y succionando. Se debe tener mucho cuidado de que el líquido no tenga burbujas.

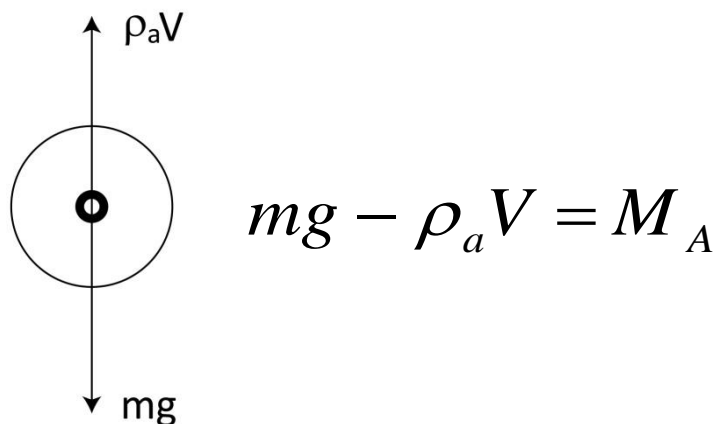
MÉTODO HIDROSTÁTICO:

El principio de empuje se basa en el principio de Arquímedes, que establece que un cuerpo sumergido en un medio (líquido o gas) pierde tanto peso, como volumen desplazado de fluido. Este método es el más exacto y en general muy apropiado para líquidos que van desde los 10 g hasta 1 kg.

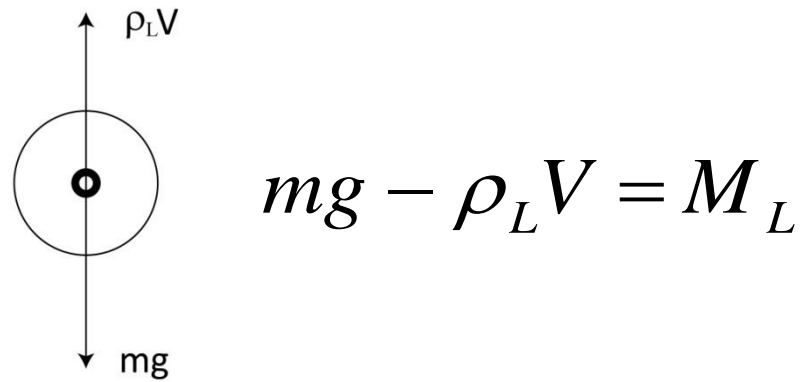
Usando el método de empuje, se sumerge un cuerpo (colgado adecuadamente) de volumen conocido en el líquido de prueba, y de acuerdo a la lectura de la balanza se puede determinar la densidad del líquido. El material del cuerpo puede ser vidrio del mismo tipo del que se usa para termómetros o vidrio de cuarzo, ya que estos materiales permiten mantener el volumen dado con un bajo coeficiente de expansión térmica. Se pueden utilizar también alambres de platino-iridio de un diámetro de 0,1 a 0,2 mm, que va colgado de un gancho en el brazo de una balanza graduada en unidades de densidad. Si el cuerpo sumergido cuelga de un soporte universal se usan balanzas de funcionamiento automático, y en estos casos se puede tener inclusive sistemas para mantener con exactitud la temperatura de ensayo.

Si se tiene que: M_A es la masa del cuerpo a sumergir (en el aire), M_L es la indicación de la balanza luego de sumergir el cuerpo en el líquido y ρ_A es la densidad del aire, la densidad del líquido es:

- 1) Pesaje en el aire



2) Pesaje sumergido en el líquido



$$M_A - M_L = (mg - \rho_a V) - (mg - \rho_L V) = \Delta m$$

$$mg - \rho_a V - mg + \rho_L V = \Delta m$$

$$\rho_L = \frac{\Delta m + \rho_a V}{V} = \frac{\Delta m}{V} + \rho_a$$

$$\rho_a = \frac{M_A - M_L}{V} + \rho_a \quad (24)$$

Determinación de la densidad de cuerpos sólidos.

El cuerpo es pesado primero en el aire y después en agua destilada. Asumiendo que la densidad del aire en ambas pesadas es la misma, la densidad del cuerpo está dada por:

$$\rho_T = \frac{(M_A \cdot \rho_W - M_L \cdot \rho_a)}{M_A - M_L}$$

Donde:

- ρ_T - Densidad del cuerpo
- M_A - Valor de la pesada del cuerpo en el aire
- M_L - Valor de la pesada del cuerpo en el agua
- ρ_W - Densidad del agua
- ρ_a - Densidad del aire, generalmente 0,012 g/cm³

COMPROBACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL PICNÓMETRO.

1. La capacidad del picnómetro se determina a través del método gravimétrico con ayuda de la balanza.
2. Las determinaciones de la masa que se realiza para comprobar la capacidad del picnómetro, se efectuaran con un error que no excede en 0,25 del error máximo permisible del picnómetro que se comprueba.
3. Se llena el picnómetro con agua destilada hasta más arriba del trazo de la capacidad nominal o hasta el borde superior del cuello, en dependencia del tipo de picnómetro y se introduce en el termostato hasta casi el borde superior del cuello, manteniéndose en el baño de agua por espacios de 20 a 30 minutos. Para que el tapón adquiera la temperatura del baño, el mismo se coloca dentro de un recipiente vacío y pesado y se introduce en el termostato.
4. El control del nivel del liquido, se realiza manteniendo el picnómetro en el termostato y procediendo del siguiente modo:
 - En el caso de los pignómetros con termómetros cuya capacidad se limita por el tapón y que poseen una ranura en el tapón y un orificio en el cuello, se coloca el tapón a la altura del orificio y después se mueve hacia la izquierda o hacia la derecha, apretándolo suavemente contra el cuello del pignómetro. Las gotas de agua que se encuentran en el borde superior del cuello o en el tapón, se eliminan con papel de filtro.

- En los picnómetros con tapón atravesado por un capilar y en los del tubo capilar lateral, la capacidad se limita por el borde superior del cuello y el tapón, procurando no tocar los bordes del orificio capilar para no absorber agua.
 - En los picnómetros con trazos, que puede encontrarse grabado en el cuello o en el tubo capilar lateral, el extremo inferior del menisco del líquido quedará tangente al borde superior del trazo.
5. Se controla la temperatura del termostato y se anota
 6. Se extrae el picnómetro del baño y se seca rápidamente el agua que se adhiere a sus paredes exteriores evitando tocarlo con las manos
 7. La capacidad del picnómetro a 20°C en centímetros cúbicos es numéricamente igual a la masa en gramos de agua destilada contenida en el mismo, lo cual se calcula por la fórmula siguiente

$$V_{20} = M + A$$

Donde:

M – masa de agua que contiene el picnómetro, a la temperatura de comprobación (g)

A – coeficiente de corrección que tiene en cuenta la dilatación del vidrio y la variación del volumen del agua a la temperatura de comprobación (ver anexo A).

8. La comprobación se realiza dos veces y de ser posible por diferentes personas. Si la diferencia entre las dos mediciones es mayor que la mitad del error permisible, se repite la comprobación.
9. Se calcula el error absoluto (E) como la diferencia entre la media aritmética del resultado de las dos mediciones (V_{20}) y la capacidad nominal (V_n) del picnómetro.

Tabla 2. Errores máximos permisibles de los picnómetros

Capacidad nominal cm ³	Error máximo permisible
5	± 0,005
10	± 0,006
25	± 0,007
50	± 0,010
100	± 0,015
150	± 0,020.
200	± 0,025
250	± 0,030

Ejemplo de la comprobación de la capacidad de un picnómetro

Capacidad nominal: 25 cm³

Tipo de vidrio: Borosilicato con coeficiente de dilatación igual a 0,000 01

Se determina la masa de agua destilada (M) correspondiente a la capacidad nominal del picnómetro; la cual es igual a 24,923 6 g.

La temperatura del baño de agua en la cual se ajustó el nivel de líquido en el picnómetro es igual a 21,5 °C.

La temperatura del local es igual a 21,8 °C.

El coeficiente de corrección (A) hallado en la tabla correspondiente del Anexo para la capacidad de 25 cm³ y a la temperatura de 21,5 °C es igual a 0,078 2 g. Sustituyendo en la formula:

$$V_{20} = M + A = 24,923\ 6 + 0,078\ 2 = 25,001\ 8\ \text{g (cm}^3\text{)}$$

En la segunda comprobación, efectuada del mismo modo, se obtiene el valor

$$V_{20} = 25,003\ \text{g (cm}^3\text{)}$$

El promedio de ambas determinaciones es igual a:

$$\bar{V} = 25,0024\ \text{g (cm}^3\text{)}$$

El error E hallado es:

$$E = 25,002\ 4 - 25 = 0,002\ 4\ \text{g (cm}^3\text{)}$$

El error máximo permisible según la tabla 2 es de ± 0,007 cm³ por lo que el error del picnómetro está dentro de los límites permisibles y se declara apto para el uso.

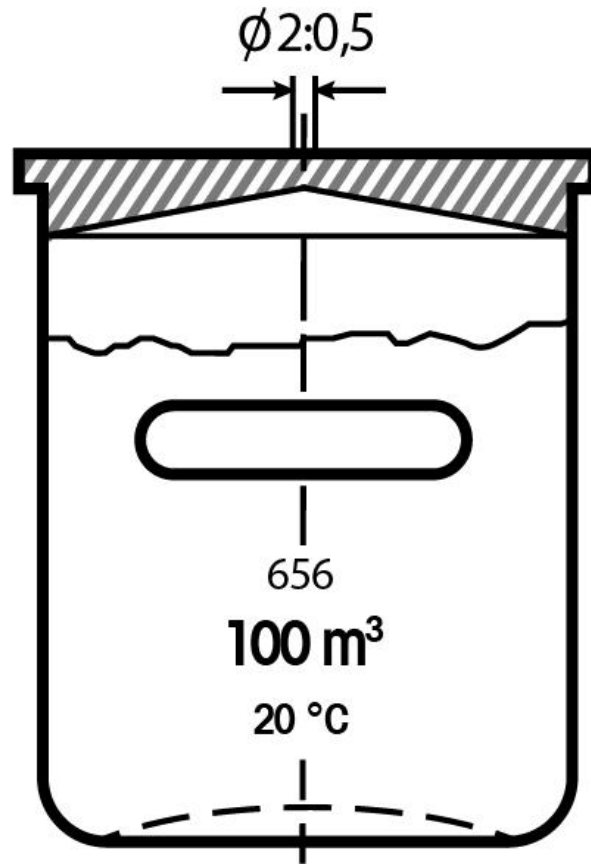


Fig. 19.- PICNÓMETRO DE METAL

PRACTICAS

1.- Calibración de Viscosímetro Capilar utilizando Aceite Patrón Certificado

- a.- **Preparación de la muestra patrón:** Los patrones de baja viscosidad deben ser filtrados con un filtro de porosidad entre 2 y 4 (10... 10 mm).
- b.- **Escogencia del viscosímetro capilar:** El diámetro del capilar debe ser tal que la corrección de *Hagenbach* no sobrepase los límites del error relativo con el que se realiza la calibración. Esto en general se logra con un tiempo de prueba mayor de 200 s.
- c.- **Limpieza de viscosímetro:** Es recomendable usar para la primera limpieza una mezcla de H₂O₂ al 15% y un 15% de HCl. Finalmente se debe limpiar con un solvente suave.
- d.- **Llenado del viscosímetro:** Para el llenado del viscosímetro se deben seguir cuidadosamente las indicaciones del fabricante para cada tipo.
- e.- **Ambientación de la muestra a la temperatura de prueba:** Se deja la muestra dentro del baño durante 15 minutos. El termostato debe mantener la temperatura de prueba $\pm 0,05$ °C.
- f.- **Medición del tiempo de escurrido:** Se debe medir con un cronómetro con un error no mayor de 0,17%. Se hacen cuatro mediciones como mínimo.
- g.- **Determinación de la constante del viscosímetro:** La constante del viscosímetro se determina usando la formula:

$$K = \frac{v}{(t - \mathcal{G})}$$

Donde:

v: valor de la viscosidad del patrón.

t: tiempo de circulación de la muestra entre las indicaciones de medición.

\mathcal{G} : Corrección de *Hagenbach* (ver anexo)

nota: Se debe conocer el valor de la aceleración de gravedad del lugar donde se realiza la calibración.

Determinación de la constante del viscosímetro

Viscosímetro N°

Aceite Patrón N°
Visc. Certif.:
Vigencia:

Temperatura de Ensayo:

Termómetro:
Marca:
Modelo:
Apreciación
Vigencia Cal.:

Tiempos:
t ₁ :
t ₂ :
t ₃ :
t ₄ :

Cronómetro:
Marca:
Apreciación:
Vigencia Cal.:

:

K=

Calibrado por:
Fecha de Calibración:
Vigencia:

2.- Determinación de la Viscosidad de un Aceite con un Viscosímetro Certificado:

Aceite N°

Viscosímetro Patrón N°
Constante:
Vigencia:

Temperatura de Ensayo:

Termómetro:
Marca:
Modelo:
Apreciación
Vigencia Cal.:

Tiempos:
t ₁ :
t ₂ :
t ₃ :
t ₄ :

Cronómetro:
Marca:
Apreciación:
Vigencia Cal.:

:

$v =$

Calibrado por:
Fecha de Calibración:
Vigencia:

3.- Calibración de un Densímetro ó Hidrómetro:

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Características del Instrumento
Denominación:
Marca:
Serial:
Rango:
Apreciación:

Características del Patrón
Denominación:
Marca:
Serial:
Rango:
Apreciación:

Soluciones Utilizadas:
1.-
2.-
3.-
4.-

Temperatura de Ensayo:
Unidades:

LP1	LI1

LI2	LP2

LP3	LI3

LI _m	LP _m	C	EMP

Fecha de Calibración:	Calibrado por:
Vigencia:	Revisado por: