

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Rosario
Departamento de Ingeniería Química

FENÓMENOS DE TRANSPORTE

TRABAJO PRACTICO: “VISCOSIDAD”

OBJETIVO: En este práctico se determinará la viscosidad de diferentes fluidos newtonianos con los viscosímetros de caída de la esfera, Stormer, Saybolt, Engler y Cannon-Fenske (viscosímetro capilar de vidrio) para luego comparar resultados y analizar los posibles errores.

INTRODUCCIÓN

Como ya se ha definido en este curso, la viscosidad es el factor de proporcionalidad entre la densidad de flujo de cantidad de movimiento y el gradiente de velocidad, y viene expresado según la ley de Newton, de la siguiente manera:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy}$$

Las unidades de la viscosidad en el c.g.s. son:

$$[\mu] = \frac{\text{gr}}{\text{cm} \cdot \text{seg}} \text{ ó poise}$$

También se ha definido la viscosidad cinemática, que es la relación entre la viscosidad (que también llamaremos “viscosidad absoluta”) y la densidad, y se representa con la letra griega ν como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Las unidades de la viscosidad cinemática en el sistema c.g.s. son:

$$[\nu] = \frac{\text{cm}^2}{\text{seg}} \text{ ó stokes (st)}$$

Aquellos fluidos cuya viscosidad es independiente de la densidad de flujo de cantidad de movimiento (es decir, que si se grafica el gradiente de velocidad versus la densidad de flujo, se obtiene una recta que pasa por el origen de coordenadas) se llaman *fluidos newtonianos*. En contraposición, los que no se comportan de esta manera, se denominan *fluidos no newtonianos*.

Determinación de viscosidades

Los equipos con que se determina la viscosidad de un fluido se denominan viscosímetros y se pueden dividir en dos categorías:

- a) viscosímetros para obtener viscosidades absolutas
- b) viscosímetros para obtener viscosidades cinemáticas

Los primeros se basan en la resistencia que ofrece el fluido al movimiento cuando una superficie sólida se mueve en su seno. Como ejemplo de estos viscosímetros tenemos los de caída de la esfera, de Codatte-Ratsahek, de plato y cono, de Stormer, etcétera.

Los viscosímetros que determinan viscosidades cinemáticas se basan en el tiempo que requiere un determinado volumen de fluido en pasar libremente a través de un orificio normalizado, por ejemplo, los viscosímetros de Saybolt, Saybolt Furol, Engler, etcétera.

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

1) Viscosímetro de Stormer:

Este viscosímetro consta de dos cilindros concéntricos siendo el interior móvil y el exterior fijo (ver figura 1), colocándose el fluido cuya viscosidad se quiere determinar en el espacio comprendido entre estos.

El cilindro interior se puede hacer girar por medio de un hilo enrollado en la polea superior y en cuyo extremo lleva un peso. Se puede deducir que, para este equipo, la viscosidad se expresa en función del par necesario para hacer girar el cilindro interior a Ω_0 rps a partir de la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{P_n}{4 \cdot \Omega_0 \cdot L \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right)$$

siendo:

- P_n : par necesario
- L : longitud del cilindro interior
- Ω_0 : número de rps
- r_1 : radio del cilindro exterior
- r_2 : radio del cilindro interior

El par necesario se puede calcular conociendo el peso que se colocó en el extremo del hilo y el radio de la polea.

2) Viscosímetro de caída de la esfera (de Poiseuille):

Este equipo es un simple tubo de vidrio o plástico (ver figura 2) que se llena con el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y permite obtener la velocidad límite que alcanza la esfera de un material determinado (acero, vidrio, etcétera), que se deja caer en su seno.

Como se sabe, la fórmula que da la viscosidad del fluido en función de la velocidad límite, es la siguiente, llamada ecuación de Stokes:

$$\mu = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot (\rho_s - \rho_L) \cdot \frac{g}{v_1}$$

siendo:

- ρ_s : densidad de la esfera
- ρ_L : densidad del líquido

- r: radio de la esfera
- v_1 : velocidad límite alcanzada por la esfera

Esta ecuación es válida siempre y cuando la esfera caiga en régimen laminar y el diámetro de ésta sea pequeño comparado con el diámetro del tubo. Se considera que el régimen es laminar cuando el número de Reynolds definido por: $Re = \frac{\rho_L \cdot v_1 \cdot d}{\mu}$ sea menor a 0,1. Siendo d , en la ecuación anterior el diámetro de la esfera.

Faxen modifica el resultado obtenido mediante la expresión anterior para tener en cuenta los efectos perturbadores que pueda tener la pared del tubo de la siguiente manera:

$$\mu_F = F \cdot \mu_S$$

siendo:

- μ_S : viscosidad según Stokes
- μ_F : viscosidad corregida según Faxen

El factor de Faxen (F) está dado por:

$$F = 1 - 2,104 \cdot \frac{d}{D} + 2,09 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^3 - 0,905 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^5$$

siendo:

- d: diámetro de la esfera
- D: diámetro del tubo

3) Viscosímetro de Saybolt:

Este equipo consiste en un recipiente (ver figura 4) destinado a contener el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y que tiene en su parte inferior un orificio de diámetro normalizado. Este recipiente se halla a su vez dentro de otro que le sirve de baño calefactor, para poder determinar viscosidades a distintas temperaturas.

Este viscosímetro posee un mechero para calefacción solidario al equipo.

Una clase especial de viscosímetro Saybolt es el denominado de *Saybolt – Furol*, que tiene idénticos principios de funcionamiento pero su orificio tiene un diámetro mayor y sirve para fluidos cuyas viscosidades son altas (desde 480 cp en adelante). La denominación “Furol” proviene de la contracción de las palabras “Fuel and Road Oil”.

4) Viscosímetro de Engler:

El principio de funcionamiento de este equipo es igual al de los viscosímetros Saybolt (ver figura 5).

Las diferencias residen en las formas de obturar los orificios normalizados y en que el viscosímetro de Engler no dispone de mecheros para calefacción incorporados, sino que la misma debe realizarse por algún medio externo.

Como ya fue mencionado, en los viscosímetros de Saybolt y Engler, se determinan viscosidades cinemáticas, que se obtienen midiendo el tiempo de efusión de 60ml de fluido a través de un orificio normalizado que se recogen en un balón aforado y previamente calibrado.

Los resultados de viscosidad cinemática obtenidos se expresan en base al tiempo de efusión en: Segundos Saybolt Universal o Segundos Engler Universal.

Estos resultados se pueden relacionar con la viscosidad cinemática en **centistokes** mediante la siguiente expresión, en la que θ representa el tiempo de efusión:

$$\nu = A \cdot \theta - \frac{B}{\theta} \quad [cst]$$

Las constantes A y B para ambos viscosímetros se expresan en la siguiente tabla:

	A	B
Saybolt	0,2200	180,00
Engler	0,5023	91,83

5) Viscosímetro capilar de vidrio:

Los viscosímetros capilares de vidrio están diseñados para dejar pasar a través del capilar un volumen constante de líquido mediante la aplicación de una fuerza reproducible.

Esta fuerza es provista por la presión que ejerce la carga hidrostática debido a los diferentes niveles de las superficies líquidas en el mismo viscosímetro.

El tiempo durante el cual el líquido fluye, es por consiguiente, además de la corrección por energía cinética, proporcional a la razón, entre la viscosidad absoluta y la densidad, esta razón es por definición la viscosidad cinemática de un líquido.

Se requiere un control exacto de la temperatura y el tiempo de flujo en el uso de este método.

La viscosidad cinemática de un líquido se determina experimentalmente usando la siguiente ecuación:

$$\nu = C \cdot t$$

siendo:

- ν : viscosidad cinemática del líquido en cst
- C: constante del viscosímetro
- t: tiempo de flujo en segundos

El valor de la constante C se determina mediante el uso de líquidos de viscosidades conocidas o mediante el uso de tablas apropiadas para el viscosímetro en cuestión.

En nuestro caso, esta constante ya sido determinada y equivale a 2,5

En este tipo de viscosímetros se podrán determinar viscosidades a diferentes temperaturas requiriéndose un baño termostatzado en caso de querer realizar la experiencia a una temperatura diferente a la ambiente. En nuestro caso, sólo lo haremos a temperatura ambiente.

Además se requiere un soporte que permita que el viscosímetro pueda ser asegurado en una posición vertical.

TÉCNICA OPERATORIA

1) Viscosímetro de Stormer:

En este equipo se determinan viscosidades de muestras a temperatura ambiente ya que carece de baño calefactor.

Antes de colocar el fluido en el viscosímetro se debe limpiar este con un solvente adecuado (alcohol, acetato de etilo, tolueno, etcétera). Una vez armado, se llena con la muestra el espacio comprendido entre los dos cilindros, hasta sobrepasar ligeramente el borde superior del cilindro interior, enrasándolo luego con una pipeta. Luego se arrolla el hilo en la polea y se sujeta una pesa de más de 30 gramos al mismo. Se coloca el viscosímetro en un lugar elevado y se deja caer el peso. Luego de algunas vueltas del cilindro interior (se alcanza el estado estacionario) se controla el tiempo que necesitó la pesa para caer una cierta distancia.

A partir de la longitud recorrida (L_r), el diámetro del cilindro interno (D_i) y el tiempo medido (t) se calcula el número de revoluciones por segundo (Ω_0).

$$\Omega_0 = \frac{L_r}{\pi \cdot D_i \cdot t}$$

Se deberán realizar determinaciones de una misma muestra con diferentes pesos, y además, se deberán efectuar como mínimo tres medidas de tiempo en cada determinación.

En la siguiente tabla podrán expresarse los resultados:

Fluido:				
Temperatura de trabajo:				
Determinación	Peso (gramos)	Tiempo (seg)	Ω_0 (rps)	μ (poise)
1				
2				

Puede que los valores difieran ligeramente de los tomados con otros viscosímetros, esto se debe a que la fórmula que da la viscosidad en función del par no tiene en cuenta la resistencia que ofrece la base del cilindro al fluido.

2) Viscosímetro de caída de la esfera:

En este equipo se obtiene la viscosidad de un fluido midiendo la velocidad límite de caída de una esfera en el seno del mismo. Esta velocidad se medirá entre los dos aforos del equipo. La densidad de la esfera se deberá determinar con mucha exactitud, por cualquier método conocido. Se harán mediciones con distintas esferas y luego se compararán los resultados.

En la siguiente tabla podrán expresarse los resultados:

Fluido:							
Temperatura de trabajo:							
$\rho_{\text{fluido}} =$							
D (Diámetro del tubo) =							
Determinación	Radio esfera (r)	ρ_{esfera}	Velocidad (v_1)	Nº Re	μ_{Stokes}	F	μ_{Faxen}
1							
2							
3							

3) Viscosímetro de Saybolt

En estos dos equipos se mide el tiempo de efusión de 60 ml de muestra a través de un orificio calibrado. El viscosímetro Saybolt Universal sirve para líquidos que tengan entre 32 y 900 segundos de efusión (fuera de esos extremos se observan viscosidades erróneas).

Antes de comenzar a trabajar con este equipo debe ser limpiado totalmente con solvente adecuado y luego secado con una corriente de aire. Además, debe tenerse la precaución de que el orificio esté libre de obstrucciones. Una vez limpio, se tapa el recipiente con el corcho y se llena con la muestra hasta superar el nivel del rebosadero.

Con un termómetro se agita el líquido hasta que éste alcance la temperatura a la cual se quiere determinar la viscosidad. En caso de que la temperatura del fluido sea muy diferente a la cual se quiere realizar la experiencia, se puede precalentar en un baño maría por separado y luego trasladar al viscosímetro. Antes de colocar la muestra en el equipo debe ser filtrada por medio de un tamiz de 200 mallas dispuesto al efecto.

Para hacer la medición se debe mantener la temperatura del líquido constante durante 1 minuto por menos, siempre agitando. Una vez que se estabilizó la temperatura, se saca el termómetro y con una pipeta se elimina el aceite residual del rebosadero, quedando aforado de esta manera. Se coloca luego el baloncito de 60 ml bajo el viscosímetro, se saca el corcho y se dispara el cronómetro al mismo tiempo, deteniéndolo cuando el nivel del líquido en el balón llegue al aforo. Se repite la medición por lo menos otra vez a la misma temperatura y se toma el tiempo medio.

Se deberán realizar mediciones a tres temperaturas diferentes. Además, para cada temperatura de trabajo, se determinará la densidad del fluido empleado con objeto de obtener viscosidades absolutas

Se anotan los valores y se grafican éstos, según la planilla adjunta:

Fluido:					
Determinación	Temperatura	Tiempo	v (cst)	ρ fluido	μ
1					
2					
n					

4) Viscosímetro de Engler

La técnica operatoria no presenta diferencias con respecto a la explicada para el viscosímetro anterior. Los resultados podrán expresarse en la siguiente planilla:

Fluido:					
Determinación	Temperatura	Tiempo	v (cst)	ρ fluido	μ
1					
2					
n					

5) Viscosímetro capilar de vidrio

A continuación se detallan los pasos a seguir para la determinación de viscosidades de líquidos mediante el uso de este tipo de equipos:

- Selección del viscosímetro: Seleccionar un viscosímetro de un tamaño adecuado a la viscosidad aproximada del líquido. Existen tablas que permiten realizar esta tarea de manera satisfactoria.
- Preparación de la muestra: Mezclar la muestra mediante agitación y pasarla a través de un disco filtrante de vidrio sinterizado o a través de un tamiz de malla 200 en un recipiente de vidrio.
- Llenado del viscosímetro: (ver figura 6). Invertir el instrumento y aplicar succión sobre la rama **G** del viscosímetro, sumergiendo la rama **A** en la muestra líquida. Enrasar el nivel de líquido sobre la marca **E**. Tapar la rama **A** y volver el viscosímetro a su posición normal vertical.
- Medición del flujo: (ver figura 6). Ubicar el viscosímetro sobre el soporte e insertarlo en el baño de temperatura constante. Asegurar que se encuentre en posición vertical mediante una pequeña plomada. Una vez hecho esto, dejar que la temperatura se estabilice durante 10 minutos. Aplicar succión sobre la rama **A** y enrasar el nivel de líquido sobre la marca **C**. Medir el tiempo de efusión necesario para que el líquido fluya libremente desde la marca **C** a la marca **E**.

Realizar cinco determinaciones, y a partir de la viscosidad cinemática calculada y de la densidad del fluido problema calcular la viscosidad absoluta. Expresar los resultados en la siguiente planilla:

Fluido: GLICERINA			
Temperatura=			
ρ fluido=			
Determinación	Tiempo	v (cst)	μ
1			
2			
3			
4			
5			

Debido a que resulta difícil encontrar valores correspondientes a la viscosidad de la glicerina en manuales se incluye la siguiente correlación a fin de comparar con los valores que resultan de la experiencia.

$$\mu_{\text{glicerina}} = 4,289 \times 10^{-12} \cdot e^{\frac{7786,1}{T}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{seg}} \right]$$

Siendo T la temperatura absoluta a la que se desea determinar la viscosidad.

CONCLUSIONES

- Comparar los resultados obtenidos para un mismo fluido a igual temperatura con diferentes viscosímetros.
- Analizar si los valores experimentales resultan lógicos y compararlos, si se dispone de información, con valores teóricos.
- Realizar un análisis detallado acerca de los errores que pudieran haberse cometido en cada una de las determinaciones.
- Con los datos propios y de otras comisiones obtenidos de los viscosímetros de Engler y Saybolt graficar viscosidad versus temperatura para el fluido en cuestión. A partir de dicha gráfica, ajustar, de ser posible, los resultados a una función. De esta manera podemos disponer de una correlación empírica que relaciona la viscosidad del fluido con la temperatura.

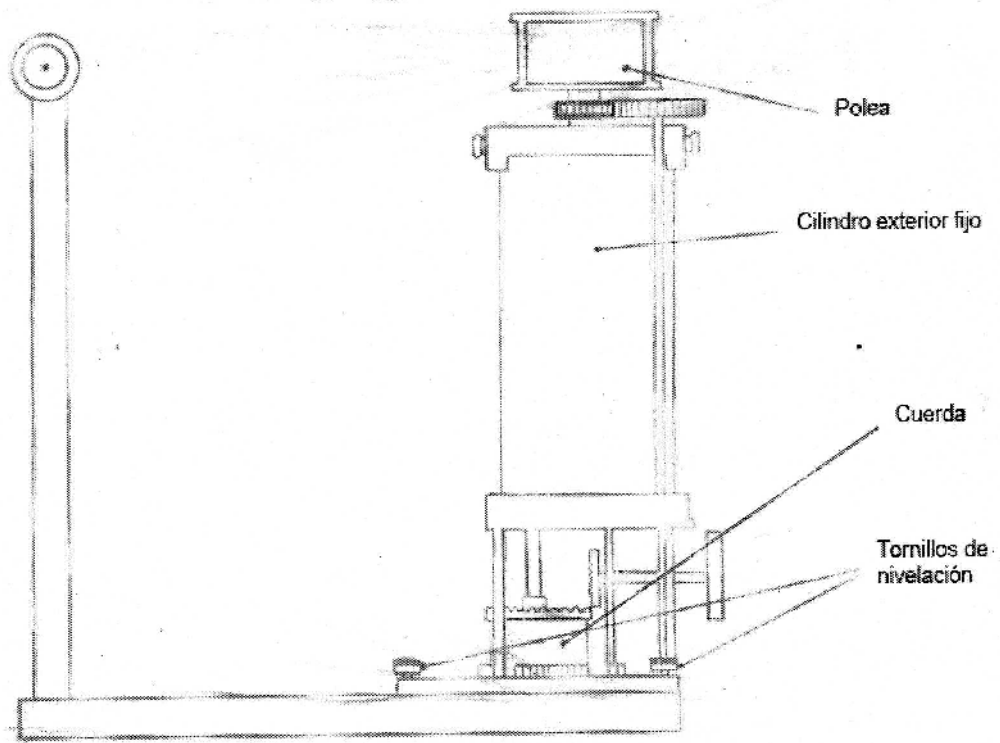


Figura 1: Viscosímetro de Stormer

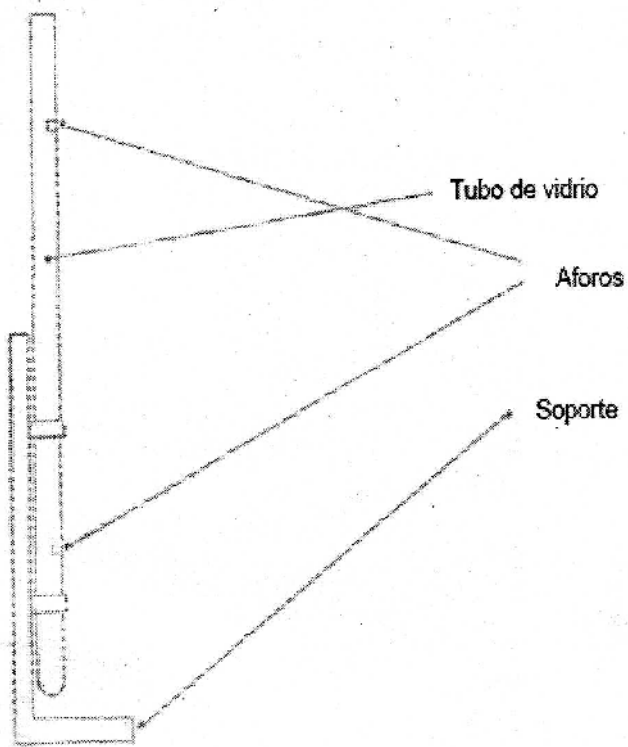


Figura 2: Viscosímetro de Caída de la Esfera

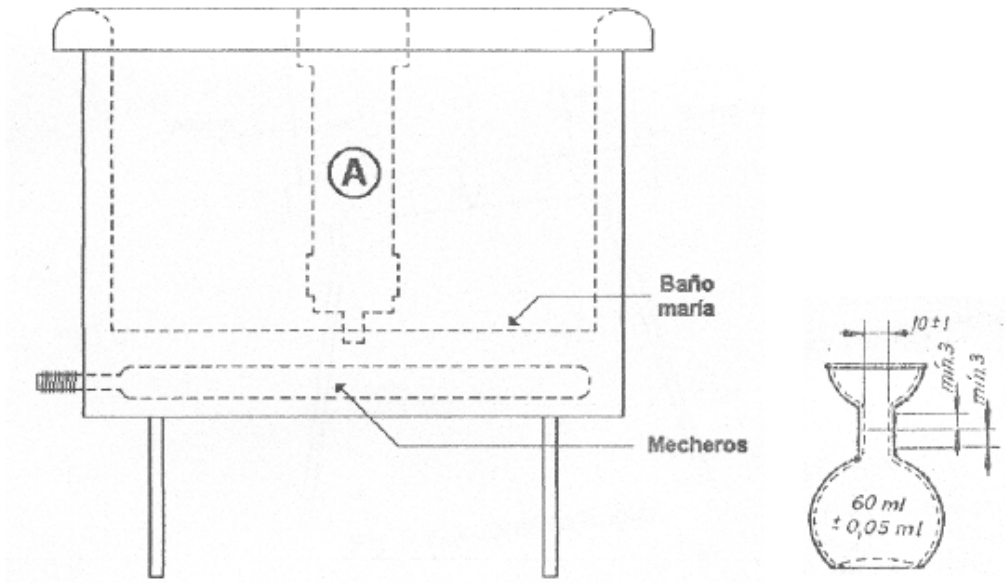


Figura 3: Viscosímetro de Saybolt

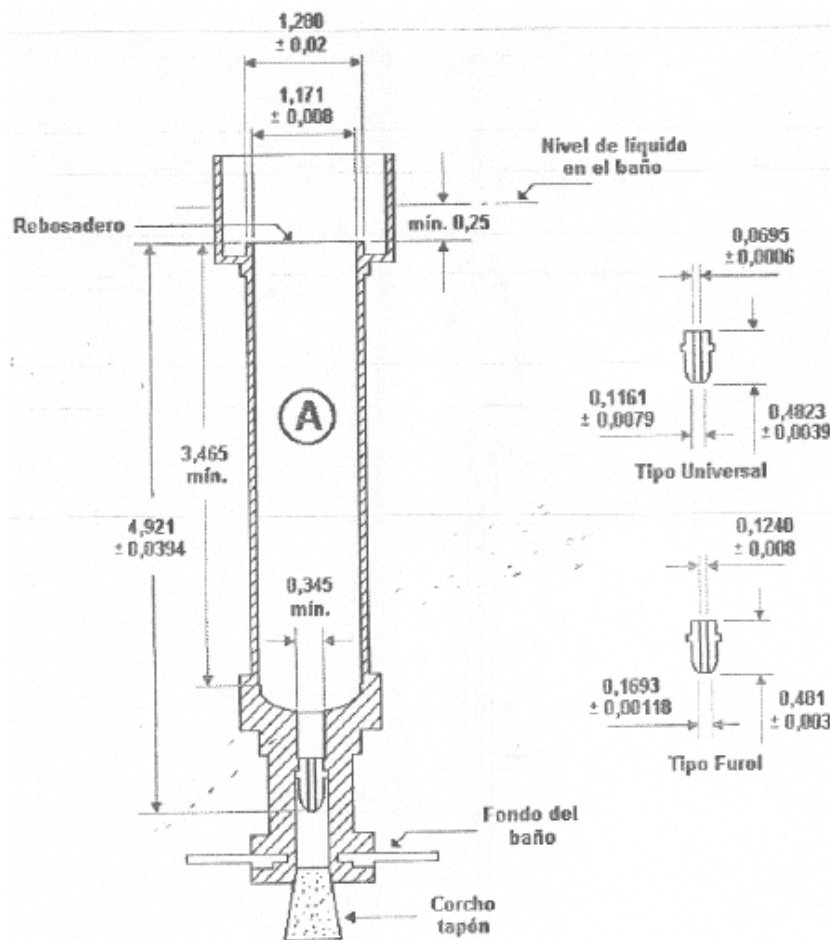


Figura 4: Detalle del viscosímetro de Saybolt

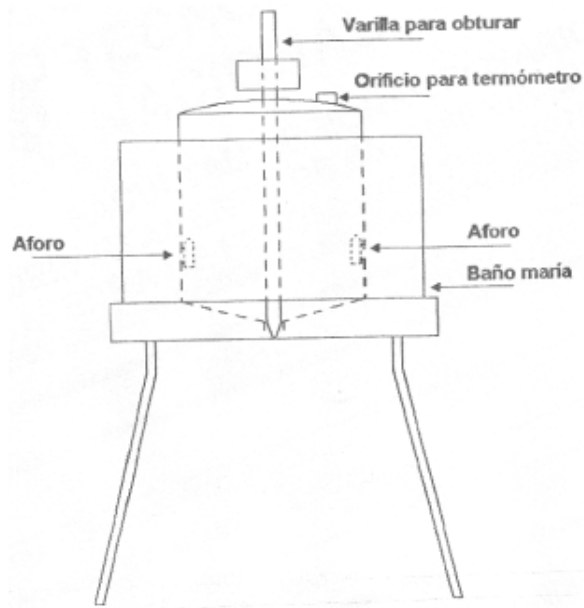


Figura 5: Viscosímetro de Engler

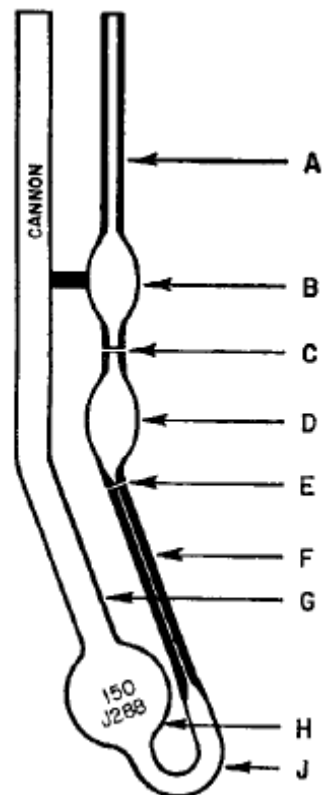


Figura 6: Viscosímetro de Cannon-Fenske para líquidos transparentes