



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



ACADEMIA DE OPERACIONES UNITARIAS

MANUAL DE PRÁCTICAS DEL
LABORATORIO DE FUNDAMENTOS DE FENOMENOS DE TRANSPORTE

PRACTICA No. III

DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE FLUIDOS

CONTENIDO

1. OBJETIVO
2. CONSIDERACIONES TEORICAS
3. EQUIPO Y ACCESORIOS UTILIZADOS
4. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN
5. TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES
6. SECUENCIA DE CÁLCULOS
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS
8. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES
9. BIBLIOGRAFÍA

Elaboraron: M. en C. Benjamín Marcos Marín Santibáñez, M. en C. Francisco Rodríguez Gonzalez, Ing. Martha Elena García Ruíz.

1. OBJETIVO

El objetivo de esta práctica es obtener el comportamiento en flujo o reológico de dos fluidos a través de sus curvas de flujo, utilizando un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos y determinar sus viscosidades de corte de estos fluidos.

2. CONSIDERACIONES TEORICAS

Desde el punto de vista teórico, para determinar de la viscosidad de un fluido es necesario establecer relaciones entre las variables dinámicas (como el esfuerzo de corte) y variables cinemáticas (como la rapidez de corte). En este tipo de ecuaciones, en las cuales existe una proporcionalidad de las variables antes mencionadas, son llamadas *ecuaciones constitutivas* y dictan el comportamiento de los fluidos en flujo.

Por otro lado, la representación grafica del esfuerzo de corte vs. la rapidez de corte o de deformación (gradiente de velocidad) es llamada *curva de flujo* y ésta es una herramienta de gran utilidad, ya que aporta información acerca del tipo de comportamiento del fluido en flujo. En general, los fluidos se pueden clasificar empleando la *ley de Newton* de la viscosidad, dada por,

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad (1)$$

donde μ es la viscosidad del fluido. La ecuación (1) es el ejemplo más sencillo de una ecuación constitutiva y describe el comportamiento bajo flujo de un conjunto de fluidos que son llamados *newtonianos*. La principal característica de este tipo de fluidos es que su viscosidad de corte es constante, es decir, la razón del esfuerzo de corte y la rapidez de corte o de deformación es constante. La curva de flujo de este fluido es una línea recta de pendiente μ , como se muestra en la figura 1.

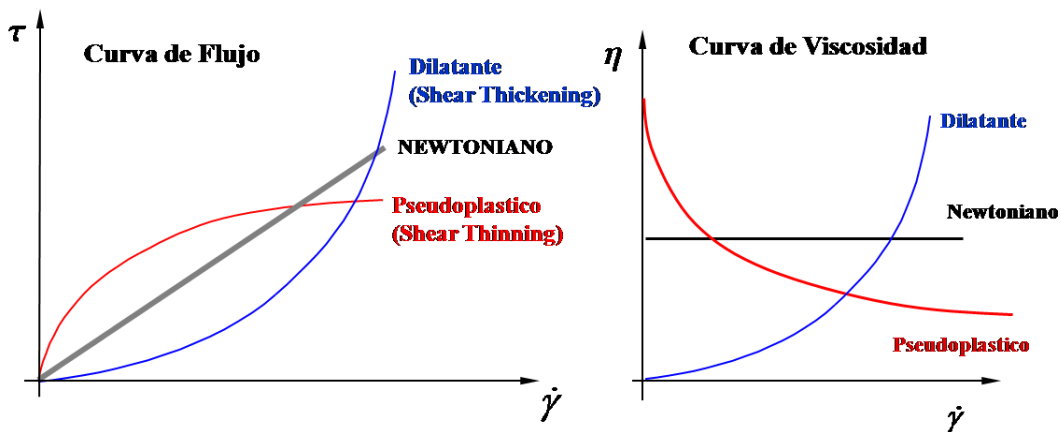


Figura 1. Diferentes comportamientos reológicos que pueden exhibir los fluidos bajo flujo.

Por otro lado, si el fluido que se está caracterizando reológicamente no obedece la ley de Newton, entonces, se dice que el fluido es *no newtoniano*. En el caso de los fluidos no newtonianos su viscosidad de corte varía con la rapidez de corte, como es el caso de los

fluidos adelgazantes o pseudoplásticos y los espesantes o dilatantes. Un fluido adelgazante es aquel cuya viscosidad de corte disminuye cuando la rapidez de corte aumenta, mientras que para un espesante su viscosidad aumenta con el incremento de la razón de corte.

El comportamiento en flujo de los fluidos antes mencionados se puede describir utilizando un modelo fenomenológico llamado de ley de potencias o modelo de Ostwald-De Waele dado por la siguiente expresión:

$$\tau = m\dot{\gamma}^n . \quad (2)$$

donde m es el índice de consistencia con unidades de Pas^n y n es el índice de ley de potencias, el cual representa la pendiente de la curva del esfuerzo y la rapidez de corte en escala logarítmica. La clasificación de los fluidos utilizando este modelo se realiza con el valor que n puede tomar. Si $n=1$ entonces la ecuación (2) se reduce a la ley de Newton de la viscosidad dada por la ecuación (1), donde m es igual a la viscosidad del fluido. Luego, para $n<1$ el tipo de fluido que describe el modelo es el adelgazante o pseudoplástico. Finalmente, para $n>1$ el modelo describe el comportamiento del fluido espesante o dilatante.

3. EQUIPO Y ACCESORIOS UTILIZADOS

3.1 Materiales (Fluidos).

Para el desarrollo de esta práctica se emplearán dos fluidos diferentes, un aceite de transmisión de la marca Quaker State SAE 140 y un shampoo de la marca Vanart color verde. La temperatura a la cual se llevarán a cabo los experimentos será de 20 °C.

3.2 Equipo (Viscosímetro).

Se utilizará un viscosímetro rotacional de la marca Anton-Paar modelo RheoLab QC (Figura 2a) y la geometría de cilindros concéntricos (Figura 2b y c) para determinar el esfuerzo y la rapidez de corte necesarios para construir la curva de flujo de cada uno de los fluidos. Este tipo de viscosímetro es empleado en los departamentos de control de calidad de industria cosméticas, de pinturas, de alimentos, etc. Los viscosímetros se clasifican en dos categorías: de esfuerzo controlado y de rapidez controlada. El viscosímetro RheoLab QC es del primer tipo y se puede operar de manera manual o automática usando la conexión a una computadora y el software RheoPlus.

La geometría de flujo que se utilizará consiste de dos cilindros concéntricos, cuyos radios son 0.003899 m y 0.0042 m, respectivamente. La longitud de medición de los

cilindros es 0.060019 m y la geometría es identificada con las siglas CC39, donde el último número indica el radio del cilindro interno. El control de temperatura se realizará con un baño de recirculación de agua marca Julabo.



Figura 2. a) Viscosímetro rotacional marca Anton-Paar, b) geometrías de flujo: cilindros concéntricos y paletas. c) copas para depositar el fluido a caracterizar en el viscosímetro.

4. PROCEDIMIENTO

A continuación se presenta el procedimiento que se debe de seguir para llevar a cabo los experimentos de flujo en el viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos.

NOTA: ES RECOMENDABLE QUE ANTES DE INICIAR SU SESION VERIFIQUE EL BUEN ESTADO DEL VISCOSIMETRO, DEL RECIRCULADOR DE AGUA, DE LAS GEOMETRIAS DE FLUJO Y DE LA COMPUTADORA, ASI COMO LA LIMPIEZA DE LA MESA DE TRABAJO.

1. Encienda la computadora e inicie la sesión de USUARIO y el software para el manejo del viscosímetro identificado con el icono RHEO PLUS.
2. Encienda el baño de temperatura en el siguiente orden: botón frontal inferior, botón frontal superior y el botón de inicio del panel frontal superior. Fije la temperatura de experimentación en 20 °C, o la temperatura que usted desee, presionado el botón con la letra T y ajustando la temperatura con las flechas del panel de control. NOTA: Revise antes de iniciar el nivel de agua del baño y si es necesario coloque más agua en el contenedor.
3. Encienda el viscosímetro rotacional con el botón que está situado en la parte posterior del motor. Espere unos minutos (aprox. 5 min) hasta que se termine de cargar la configuración del viscosímetro.
4. Tome la copa que le corresponde al cilindro CC39, la cual está identificada con las mismas siglas en la parte inferior y llénela con el fluido (aceite de transmisión o shampoo)

hasta la marca o aforo interno (esta marca indica el volumen de fluido requerido para llenar la geometría de flujo). Coloque la copa en la base que se encuentra en la parte inferior de la cámara de calentamiento girándola en el sentido de las manecillas del reloj e introduzca delicadamente el cilindro interno sin dejarlo caer por completo en el fluido. Esto evita que entre aire en el fluido y que se dañe la base de la copa externa.

5. Deslice hacia arriba el cople del reómetro y coloque la geometría en la cámara de calentamiento, asegurándose de que ésta quede bien sujeta girando la base en el sentido contrario a las manecillas del reloj hasta que usted escuche un click. Guíe la geometría hacia el cople hasta el tope y deslice el cople hacia abajo para asegurar el cilindro interno.

NOTA: Escuchará un bip del equipo para avisarle que la geometría fue detectada.

6. Espere 10 min. para asegurar que el fluido alcance la temperatura de experimentación. Durante este tiempo programe la prueba de flujo para cada uno de los fluidos eligiendo la plantilla respectiva, ya sea la plantilla llamada ACEITE QUAKER STATE y SHAMPOO. Para elegir las plantillas, en el software siga la siguiente secuencia FILE→OPEN y cambie el tipo de archivo que desea abrir por aquellos que digan WORKBOOK TEMPLATE (*.ort). Elija la plantilla que usted desee para llevar a cabo el experimento con el viscosímetro.

NOTA: Una vez que usted ha obtenido la curva de flujo del fluido guarde sus resultados con otro nombre como se sugiere en el punto 9 y proceda a abrir la plantilla para el otro fluido usando el procedimiento anterior. No es necesario que usted modifique las condiciones de operación del reómetro, pero si usted desea hacerlo lo puede realizar con toda libertad, siempre y cuando se tenga en mente los valores máximos de operación del equipo.

7. Una vez que obtuvo la curva de flujo del fluido, es recomendable que repita sin cambiar de muestra la prueba nuevamente para que usted verifique la reproducibilidad de la curva de flujo.

8. Cuando cambie de fluido, asegúrese de lavar la copa y el cilindro con jabón líquido y una esponja colocados en la tarja. Nunca utilice una fibra ya que rallara la superficie de la geometría. Límpiela con alcohol o acetona antes de colocar el siguiente fluido a caracterizar o cuando usted finalice su sesión de trabajo. Deje completamente limpio la mesa de trabajo y en su lugar todos los materiales que utilizó para realizar la práctica.

9. Cuando finaliza con una prueba o su experimentación y desea guardar sus resultados, es necesario que guarde los cambios en el archivo de trabajo (workbook), hágalo utilizando el menú del software creando una carpeta con su nombre y apellido dentro del directorio de RheoPlus.

10. Para apagar el viscosímetro asegúrese de retirar la geometría de flujo y deslizar hacia abajo el cople. Retire la copa girándola en el sentido de las manecillas del reloj. Luego apague el viscosímetro con el interruptor colocado en la parte trasera del motor y apague el recirculador de agua en el sentido inverso al que usó para iniciarlo (véase paso 4). Coloque las geometrías en sus estuches correspondientes y guárdelas en el cajón del escritorio de

maestros. Finalmente, apague la computadora y desconecte todos los equipos de las tomas de corriente eléctrica, **siempre y cuando usted sea el último en utilizar el equipo.**

5. TABLA DE DATOS EXPERIMENTALES

La siguiente tabla sugiere una manera de presentar los datos experimentales del esfuerzo y rapidez de corte, donde τ es el esfuerzo de corte, $\dot{\gamma}_1$ y $\dot{\gamma}_2$ son los valores de la rapidez de corte para dos corridas experimentales del el fluido en cuestión y $\dot{\gamma}_{prom}$ es el valor promedio de la rapidez de corte en las corridas realizadas para el fluido. Por su parte, μ_1 y μ_2 son las respectivas viscosidades calculadas a partir de la ley de newton y μ_{prom} es el valor promedio de esas viscosidades.

τ (Pa)	$\dot{\gamma}_1$ (1/s)	$\dot{\gamma}_2$ (1/s)	$\dot{\gamma}_{prom}$ (1/s)	μ_1 (Pa s)	μ_2 (Pa s)	μ_{prom} (Pa s)

6. SECUENCIA DE CALCULOS

6.1 Cálculo de la viscosidad

Los datos de viscosidad de corte se determinarán de la ley de Newton y se colocaran en la tabla de datos. Estos datos se utilizarán para construir las gráficas del esfuerzo de corte vs. rapidez de corte (figura 3) y de la viscosidad de corte vs. rapidez de corte para cada fluido (figura 4). Las gráficas antes mencionadas se representarán en las escalas lineal y logarítmica, lo cual dependerá del tipo de fluido.

6.2 Ajuste por mínimos cuadrados

Una vez que se han graficado los datos experimentales, como se muestra en las figuras 3 y 4, el alumno identificará la región donde el fluido tiene un comportamiento newtoniano, utilizando la ley de Newton. Posteriormente, llevará a cabo un ajuste usando el método de mínimos cuadrados para obtener un valor único de la viscosidad de corte.

En el caso de los fluidos no newtonianos, el alumno deberá inspeccionar la curva de flujo para ubicar los intervalos de rapidez de corte donde el fluido exhibe diferentes comportamiento de flujo ayudándose de la ley de Newton y del modelo de ley de potencias. En el caso de que el fluido muestre un comportamiento newtoniano, se debe realizar un ajuste con el método de mínimos cuadrados para obtener el valor de viscosidad en dicha región. En las otras regiones de flujo el alumno llevará a cabo un ajuste por mínimos

cuadrados del esfuerzo como función de la rapidez de corte en escala logarítmica y de acuerdo con el valor del índice de ley de potencias dirá que tipo de fluido se caracterizó.

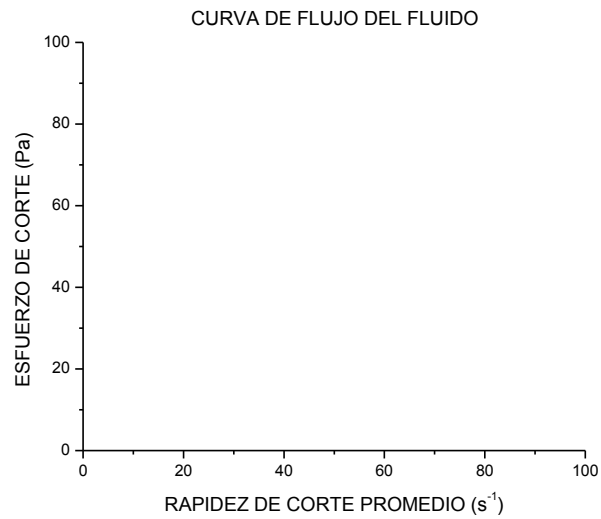


Figura 3. Construcción de la curva de flujo graficando el esfuerzo de corte vs. la rapidez de corte promedio.

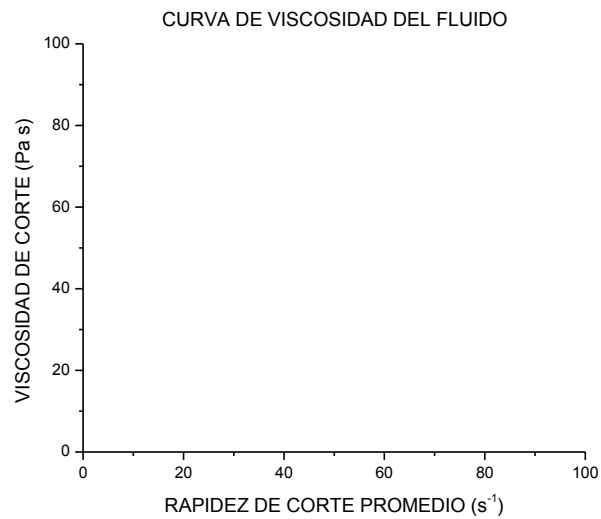


Figura 4. Construcción de la curva de viscosidad del fluido graficando la viscosidad de corte contra la rapidez de corte promedio.

Las expresiones para el ajuste por mínimos cuadrados a una ecuación lineal del tipo $y = kx + b$ son las siguientes:

$$k = \frac{N \sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum(x_i y_i)}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

donde N es el número de datos y el subíndice i toma valores desde 1 hasta N . En las ecuaciones, x y y son la rapidez de corte y el esfuerzo de corte, respectivamente.

7. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

El alumno discutirá los resultados que obtenga en la sección de cálculos, tomando en cuenta los modelos presentados arriba. Determinará el comportamiento en flujo que exhiben los fluidos con ayuda de la curva de flujo y de viscosidad. En el caso de los fluidos no newtonianos, el alumno identificará y discutirá los diferentes comportamientos en flujo. Además, el alumno reportará un valor único de la viscosidad a partir de los ajustes hechos por mínimos cuadrados.

8. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

9. BIBLIOGRAFIA

1. Baird D.C. *Experimentación: Una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. Edit. Pearson (1991)
2. Macosko, C.W. *Rheology: Principles, measurements and applications*. Wiley-VCH Inc. USA, .1993
3. Carreau P.J., De Kee D.C.R., Chhabra R.P. *Rheology of polymeric systems*, Hanser publishers, New York, (1997).
4. Morrison F. *Understanding rheology*. Oxford University Press, New York (2001).
5. Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E. N., *Transport Phenomena*, 2a Ed., John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 2002.
6. Pérez González J., Vega Acosta Montalban L. *Fundamentos de Reología en Tendencias actuales de la física*, Edit. Hernández Chávez O.L., Pacheco Quintanilla M.E., Santillán Zerón M. Edit. Instituto Politécnico Nacional, Capítulo 14, págs. 211-239 México (2008).