

Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette)



A. F. Méndez-Sánchez¹, L. Pérez-Trejo¹, A. M. Paniagua Mercado^{1,2}

¹Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, Edif. 9 Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Lindavista, C.P. 07738, México Distrito Federal.

²Centro de Asimilación Tecnológica-FESC, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán, Edo. de México

E-mail: leopt@esfm.ipn.mx, aptypo@hotmail.com

(Recibido el 17 de Diciembre de 2009; aceptado el 22 de Enero de 2010)

Resumen

En los cursos elementales de física de fluidos, teóricos y de laboratorio, a nivel licenciatura e ingeniería, se estudia el tema de viscosidad haciendo referencia únicamente a los fluidos newtonianos. Sin embargo, el creciente empleo de fluidos no newtonianos, obliga a incluir el estudio de este tipo de fluidos. Por lo que conducir experiencias que permitan al estudiante distinguir entre los fluidos newtonianos y no newtonianos ampliará su conocimiento general en este tema. El objetivo de este trabajo es dar una herramienta didáctica para diferenciar entre fluidos newtonianos y no newtonianos a partir de las curvas de flujo. Además, se presentan detalles para la construcción de un viscosímetro de cilindros concéntricos (de Couette) de bajo costo, el cual puede ser fabricado por los mismos estudiantes. Finalmente, se muestran los resultados de la caracterización viscosa de dos fluidos comerciales usando el viscosímetro construido.

Palabras clave: Fluidos no newtonianos, curva de flujo, viscosidad, viscosímetro de cilindros concéntricos.

Abstract

Newtonian viscosity is studied in the theoretical and laboratory courses of physics of fluids in natural sciences and engineering. Because of the increasing use of Non-Newtonian fluids is necessary to include them in these courses. To driving experiences that enable to the students to distinguish between Newtonian and non-Newtonian fluids will allow to improve their knowledge about fluids. The purpose of this work is to give a didactic tool to differentiate between Newtonian and Non-Newtonian fluids by using their flow curves. In addition, the details of a concentric cylinders viscometer (Couette Viscometer) construction of low cost are shown, the which one can be manufactured by the students. Finally, the characterization of two commercial fluids is included.

Keywords: Non-Newtonian fluids, flow curve, viscosity, concentric cylinders viscometer.

PACS: 83.50.Ax, I01.50.Pa, 83.60.Fg, 83.85.Jn

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la viscosidad de los líquidos en los cursos de física del nivel superior, se limita a diferenciar principalmente entre flujo laminar y turbulento, así como a presentar los perfiles de velocidad generados bajo ciertas condiciones particulares considerando la idea newtoniana, donde la viscosidad es una constante que depende principalmente de la temperatura y en mucho menor medida de la presión [1, 2].

Por otra parte, en los cursos de laboratorio solo se estudia experimentalmente el comportamiento viscoso de los líquidos en función de la temperatura y el estudiante se queda con la idea de que la viscosidad de un fluido solo cambia con ésta. No obstante, en la actualidad el estudio de la viscosidad se ha visto muy diversificado debido principalmente al comportamiento heterogéneo de los

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 4, No. 1, Jan. 2010

fluidos que se emplean a nivel industrial, tales como las pinturas, suspensiones, emulsiones, polímeros fundidos, entre otros. En donde la naturaleza química de éstos, ya sea por la presencia de partículas coloidales, macromoléculas o agregados al fluido base, muestra que la viscosidad depende de las condiciones de flujo y de la velocidad con que estos fluidos se mueven, alejando totalmente la idea clásica de una viscosidad newtoniana. Este tipo de fluidos han sido clasificados como fluidos no newtonianos.

Un estudio completo del comportamiento viscoso de los fluidos, que permita mostrar las diferencias entre newtonianos y no newtonianos resulta algunas veces irrealizable en los laboratorios de enseñanza, debido principalmente a los costos elevados de los equipos comerciales (viscosímetros y reómetros). Por este motivo, el presente trabajo ilustra como construir un viscosímetro

<http://www.journal.lapen.org.mx>

A. F. Méndez-Sánchez, L. Pérez-Trejo y A. M. Paniagua Mercado de cilindros concéntricos de bajo costo, para determinar el comportamiento viscoso que exhiben los fluidos newtonianos y los no newtonianos, el cual puede ser construido por los mismos estudiantes permitiendo desarrollar su creatividad así como sus habilidades experimentales.

El desarrollo del dispositivo se realiza en una simplificación teórica basada en el viscosímetro de Couette, diseño existente en la literatura [3]. Los fluidos utilizados en este trabajo son de uso comercial y de fácil adquisición. La física y la matemática involucrada empleada en el presente análisis, se consideran adecuadas para los cursos de nivel medio superior y superior de los primeros semestres en física e ingenierías. Del mismo modo, este trabajo pretende conducir experiencias que permitan al estudiante distinguir entre fluidos newtonianos y no newtonianos, introduciéndolo de manera general a los cursos avanzados de mecánica de fluidos y de reología.

II. TEORÍA

El comportamiento de los fluidos bajo la acción de fuerzas aplicadas es tema de estudio de la mecánica de fluidos. Sin embargo, el estudio del comportamiento viscoso de los fluidos pertenece al campo de la reología, que es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales [4].

Antes que todo, es importante conocer los conceptos de esfuerzo y deformación para los fluidos viscosos. Para ello considere la figura 1, que muestra una situación de flujo cortante simple. Aquí se tiene un líquido entre dos placas separadas una distancia L . La placa superior se mueve a una velocidad constante v debido a la acción de una fuerza F .

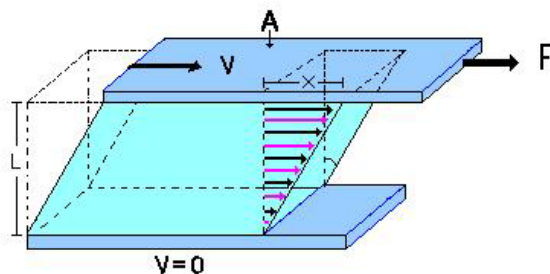


FIGURA 1. Diagrama de un fluido en flujo cortante simple.

En este caso, el esfuerzo de corte τ que ejerce la placa superior al líquido está definido por:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Donde A es el área de la placa superior en la cual se aplica la fuerza. Las unidades del esfuerzo en el Sistema Internacional (SI) son los *Pascales* ó N/m^2 . Asimismo, la deformación que se genera en el fluido está expresada por:

$$\gamma = \frac{x}{L} \quad (2)$$

Donde x es el desplazamiento del material y L es el espaciamiento entre la placa superior y la inferior. Note que este caso es idéntico a la deformación elástica por corte que sufre un material sólido, en cuyo caso, la deformación es finita y se mantiene constante hasta que se retira la fuerza o equivalentemente el esfuerzo. Sin embargo, para los fluidos no ocurre así, ya que esta deformación se incrementa paulatinamente hasta que se remueve la fuerza. Por ello, es que en los fluidos es más útil el concepto de rapidez de deformación, que representa a la variación de la deformación respecto del tiempo, esto es,

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (3)$$

Las unidades de la rapidez de deformación son s^{-1} . Si la distancia L se mantiene constante, se tiene,

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{L} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{L} v \quad (4)$$

Donde v es la velocidad de la placa superior.

En los sólidos, el módulo de corte es una propiedad característica del material que representa la resistencia a ser deformado y se expresa como la razón entre el esfuerzo de corte y la deformación unitaria. Para los fluidos, de manera similar, existe una propiedad característica que representa la resistencia a fluir, esta propiedad es la viscosidad η y se define como la razón entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación, es decir,

$$\eta \equiv \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

Las unidades de la viscosidad en el SI son *Pas*. Así, para conocer el comportamiento viscoso de un líquido es necesario determinar el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación. Estas cantidades dependen del área de contacto, de la fuerza necesaria para mover la placa superior a una velocidad constante v y del espaciamiento entre las placas. En este análisis se considera que se mantienen las mismas condiciones termodinámicas de presión, volumen y temperatura.

Al gráfico del esfuerzo de corte y la rapidez de deformación se le conoce como curva de flujo o reograma. La figura 2 ejemplifica las curvas de flujo típicas que permiten mostrar algunas diferencias entre los fluidos newtonianos y los no newtonianos. Es de mencionar, que la pendiente de estas curvas representa el comportamiento viscoso en función de la rapidez de deformación. Por ejemplo, para el caso del fluido newtoniano es evidente que la viscosidad es constante e independiente de la

rapidez de deformación. Sin embargo, para el fluido no newtoniano adelgazante (también conocido como pseudoplástico), la viscosidad (la pendiente de la curva) disminuye al incrementarse la rapidez de deformación. El caso contrario se presenta en el fluido dilatante (conocido como plástico), cuya viscosidad se incrementa al aumentar la rapidez de deformación. El fluido de Bingham, se considera no newtoniano por el hecho de necesitar un esfuerzo crítico para empezar a fluir, seguido de un comportamiento newtoniano.

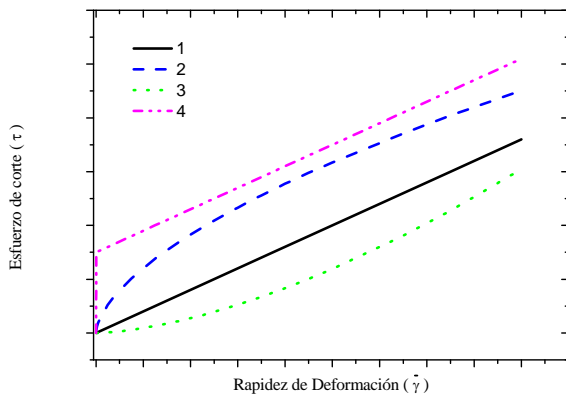


FIGURA 2. Representación de curvas de flujo para diferentes fluidos. 1) Fluido newtoniano, 2) Fluido no newtoniano adelgazante, 3) Fluido no newtoniano dilatante, 4) Fluido de Bingham.

A. Fluidos newtonianos

En el caso en que la relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación es lineal, se dice que el fluido es newtoniano, en cualquier otro caso se dice que el fluido es no newtoniano. A la relación matemática que existe entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación se le denomina ecuación constitutiva. Por lo tanto, la ecuación constitutiva para el fluido newtoniano está expresada por,

$$\tau = \mu \dot{\gamma} . \quad (6)$$

Al sustituir esta ecuación constitutiva en la ecuación de viscosidad (ecuación 5), se obtiene que la viscosidad η es una constante igual a μ , por lo que cuando se habla de la viscosidad μ (lo cual ocurre comúnmente en los textos de hidrodinámica) se está haciendo referencia a un fluido newtoniano.

B. Fluidos no newtonianos

Para fluidos no newtonianos, por ejemplo el adelgazante o el dilatante que se representan en la figura 2, la ecuación constitutiva que los describe es el modelo de ley de potencia, expresado por la siguiente ecuación:

$$\tau = k \dot{\gamma}^n . \quad (7)$$

Donde k y n son constantes. Cuando $n < 1$ este modelo corresponde a fluidos adelgazantes, mientras que si $n > 1$ este modelo se refiere a los fluidos dilatantes. El comportamiento en flujo de fluidos como las soluciones poliméricas, algunas pinturas, suspensiones y polímeros fundidos puede ser representado por este modelo, por ello es muy útil en la industria ya que se emplea para modificar las variables de procesamiento.

Al sustituir el modelo de ley de potencia en la definición de viscosidad (ecuación 5), se obtiene que ésta depende explícitamente de la rapidez de deformación de la manera siguiente,

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} . \quad (8)$$

En este caso, la viscosidad disminuye o aumenta en función de la rapidez de deformación dependiendo si el fluido es adelgazante o dilatante. Existen otras ecuaciones constitutivas como la que describe a un fluido de Bingham (curva 4 en figura 2), la cual está dada por la siguiente expresión,

$$\tau = \tau_o + \mu_o \dot{\gamma} . \quad (9)$$

En este caso, τ_o representa un esfuerzo de umbral crítico para que el fluido empiece a fluir. Una vez iniciado el flujo, el comportamiento es característico de un fluido newtoniano. Aquí la viscosidad es infinita ($\eta = \infty$) para $\tau < \tau_o$, y constante ($\eta = \mu_o$) para $\tau > \tau_o$.

El comportamiento viscoso de los fluidos no newtonianos es mucho más complejo de lo que se ha descrito hasta ahora. Por ejemplo, se pueden encontrar fluidos cuya viscosidad a valores de rapidez de deformación relativamente bajas (en algunos casos $\dot{\gamma} \leq 1$), puede considerarse constante e independiente de la rapidez de deformación, es decir, muestra un comportamiento newtoniano. Para valores de rapidez de corte intermedios ($1 \leq \dot{\gamma}$), presentan un comportamiento altamente no newtoniano caracterizado por el modelo de ley de potencias (o algún otro modelo). Para valores de rapidez de deformación relativamente altos ($1 \ll \dot{\gamma}$), el comportamiento vuelve a ser newtoniano. Un modelo generalizado es el de Carreau-Yasuda [5], que tiene gran flexibilidad para involucrar todo este tipo de comportamientos y se expresa con la siguiente ecuación:

$$\eta = (\eta_o - \eta_\infty) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{n}} + \eta_\infty . \quad (10)$$

Este modelo consta de cinco parámetros, η_o corresponde a la viscosidad newtoniana a valores de rapidez de deformación bajos, η_∞ es la viscosidad newtoniana para valores de rapidez de deformación altos, λ es una constante de tiempo, n corresponde al parámetro del modelo de ley de potencias y a es una constante adimensional. En la figura 3, se grafica esta ecuación con

A. F. Méndez-Sánchez, L. Pérez-Trejo y A. M. Paniagua Mercado
 parámetros arbitrarios con la finalidad de ilustrar este modelo.

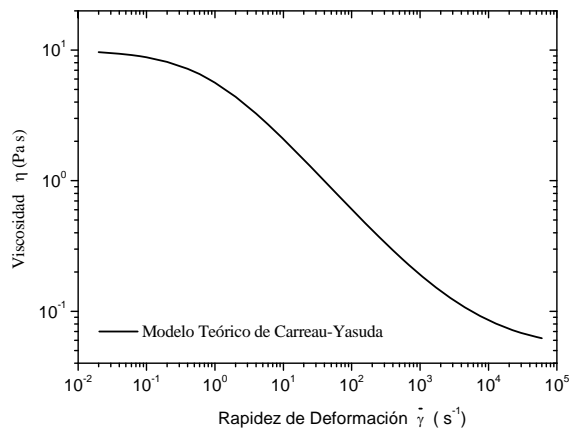


FIGURA 3. Representación del comportamiento viscoso de un fluido no newtoniano empleando el modelo de Carreau-Yasuda con $\eta_0 = 10\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_\infty = 0.05\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\lambda = 1.2\text{s}$, $a = 0.8$, $n = 0.4$.

La determinación total del comportamiento viscoso de los fluidos no newtonianos de manera experimental es complicada, puesto que es necesario hacer mediciones en un amplio intervalo de valores de rapidez de deformación (o de esfuerzo de corte). Usualmente se utilizan diferentes equipos (viscosímetros de cono y plato, plato y plato, cilindros concéntricos o de capilar), los cuales hoy en día están diseñados para abarcar un intervalo muy amplio de mediciones. Sin embargo, su costo es muy alto y generalmente no se cuentan con los recursos suficientes para adquirir este tipo de equipos tan sofisticados. No obstante, como se verá en la siguiente sección, es posible que los estudiantes construyan un viscosímetro de cilindros concéntricos económico comparado con el costo de los equipos comerciales y con el cual es posible obtener excelentes resultados para entender y mostrar un panorama del comportamiento viscoso de los fluidos no newtonianos, particularmente en un intervalo de valores de rapidez de deformación bajos e intermedios.

III. VISCOSÍMETRO DE CILINDROS CONCÉNTRICOS

Como se mencionó en la sección anterior, para determinar si el fluido es newtoniano o no, es necesario obtener la curva de flujo y encontrar la relación que existe entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación. Entonces, es importante determinar estas expresiones para el viscosímetro de cilindros concéntricos, ya que éstas varían en función de la geometría del aparato que se utiliza para la caracterización del fluido [6].

El flujo de un fluido en el viscosímetro de cilindros concéntricos es una situación de corte simple como el ilustrado en la sección 2. En este caso el cilindro interno, también llamado vástago, se mueve a una velocidad angular constante Ω , mientras que el cilindro externo,

llamado comúnmente copa, se encuentra en reposo (ver figura 4), entre ellos se encuentra el fluido a caracterizar. El movimiento del cilindro interno se produce por la torca M ejercida por la masa m colocada en el portapesas que desciende por la acción de la gravedad.

Las constantes geométricas que componen a este viscosímetro de cilindros son: R_2 y L_a , el radio interno del cilindro exterior y su altura respectivamente; R_1 es el radio externo del cilindro interior de altura l ; r es el radio de la polea donde se enrolla la cuerda que une al portapesas; r_b es el radio del cilindro del portapesas de altura h ; m es la masa total del portapesas; L_b es la distancia de la copa del viscosímetro al centro de la polea de radio r_a .

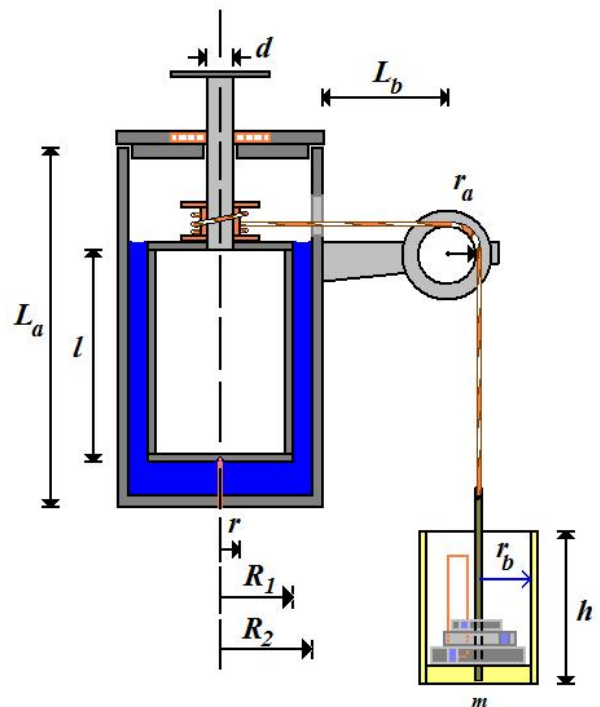


FIGURA 4. Diagrama esquemático que ilustra el viscosímetro de cilindros concéntricos.

Para determinar la rapidez de deformación en este sistema se requiere conocer la velocidad tangencial del cilindro de radio R_1 en función de la velocidad del portapesas. En este caso, la velocidad tangencial a la que se mueve el cilindro interno es $v = \Omega R_1$. La velocidad angular está relacionada con la velocidad tangencial v_r de la polea de radio r mediante: $v_r = \Omega r$ y esta velocidad tangencial, es precisamente la velocidad con que desciende el portapesas. La cual se puede determinar a partir de conocer la altura h del portapesas y el tiempo t que tarda en atravesar una fotocelda, es decir, $v_r = h/t$. Entonces, la velocidad tangencial del cilindro puede expresarse como,

$$v = \Omega R_1 = \frac{v_r}{r} R_1 = \frac{h R_1}{r t} \quad (11)$$

Además, como el espaciamiento entre los cilindros interno y externo es $L=R_2-R_1$, la ecuación (4) de la rapidez de deformación toma la forma,

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{L} = \frac{hR_1}{r(R_2 - R_1)t}. \quad (12)$$

Por otra parte, para obtener la expresión del esfuerzo de corte se considera el torque M que experimenta el cilindro interno, esto es, $M=FRl$ donde F es la fuerza sobre la superficie lateral de este cilindro. Sin embargo, dicho torque es generado por la tensión T de la cuerda sobre la polea de radio r , esto es, $M=Tr$. Despreciando la masa y la fricción de la polea de radio r_a , se puede considerar que la tensión en la cuerda es igual al peso del portapesas ($T=mg$), por lo que la fuerza que se aplica sobre la superficie del cilindro interno es igual a,

$$F = \frac{M}{R_1} = \frac{Tr}{R_1} = \frac{mgr}{R_1}. \quad (13)$$

Tomando en cuenta que el área de contacto del fluido con la superficie móvil es la superficie del cilindro interno, la cual está dada por $A=2\pi R_1 l$ y sustituyendo la expresión de la fuerza en la definición del esfuerzo de corte (ecuación 1), se tiene finalmente,

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{mgr}{2\pi R_1^2 l}. \quad (14)$$

Hasta aquí, se tienen las expresiones del esfuerzo (Ec. 14) y la rapidez de deformación (Ec. 12) para determinar la curva de flujo empleando un viscosímetro de cilindros concéntricos. Por completez, a partir de la ecuación (5), la expresión de la viscosidad para el flujo de un fluido en el viscosímetro de cilindros concéntricos es,

$$\eta = \frac{mgr^2(R_2 - R_1)t}{2\pi R_1^3 lh}. \quad (15)$$

Es de mencionar que para obtener unas expresiones mejor aproximadas, como ocurre en los cursos avanzados de mecánica del medio continuo y reología, es necesario realizar algunas suposiciones, tales como: el flujo es isotérmico, estacionario y laminar, la velocidad del fluido es solo en la dirección angular, se desprecian efectos de gravedad. Además, es necesario conocer las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía. Sin embargo, como el propósito de este trabajo consiste en dar una herramienta para diferenciar entre fluidos newtonianos y no newtonianos, consideramos que la obtención de estas expresiones para estudiantes en los cursos básicos es adecuada. Un análisis detallado de como obtener expresiones mejor aproximadas, condiciones geométricas recomendables y las posibles fuentes de error pueden

encontrarse en [5] y [7]. Aunque cabe aclarar que en esta bibliografía se supone conocida la velocidad angular y el torque. A diferencia de nuestro caso, en donde estas cantidades son explícitamente determinadas.

IV. EXPERIMENTACIÓN

Esta sección está dividida en dos partes, la primera se refiere a los materiales de construcción del viscosímetro de cilindros concéntricos y la segunda parte se centra en la metodología de la caracterización de dos fluidos comerciales empleando el viscosímetro construido.

A. Construcción del viscosímetro de cilindros concéntricos

Para la construcción del viscosímetro se emplearon diversos materiales. A partir del diagrama presentado en la figura 4, los cilindros interno y externo, las tapas y las poleas fueron construidos de aluminio por la facilidad del maquinado (ver figura 5).



FIGURA 5. Partes componentes del dispositivo construido.

También se empleó un balero o rodamiento comercial automotriz de 0.006m de diámetro interno, el cual se localiza en la tapa de la copa del viscosímetro para disminuir la fricción y permitir una mejor estabilidad de rotación. La cuerda utilizada fue de cáñamo de 1.3m de longitud, que por su resistencia y reducida elongación bajo tensión permite disminuir los errores introducidos por la misma. El portapesas empleado fue construido con una barra de latón comercial de 0.003m de diámetro, al cual se le fijó una base de nylon maquinable. La cubierta exterior se realizó a partir de un tubo de pvc de 0.041m de diámetro externo, tiene una ranura rectangular de 0.0185m de ancho por 0.101m de alto, para permitir un mejor asentamiento de las pesas. El viscosímetro fue fijado en un soporte vertical mediante un brazo de sujeción, como se muestra en la figura 6.

La velocidad del portapesas fue determinada midiendo el tiempo en que éste recorre la distancia h utilizando un sistema de fotoceldas acoplado a un cronómetro digital

A. F. Méndez-Sánchez, L. Pérez-Trejo y A. M. Paniagua Mercado marca Phywe. No obstante, estas velocidades pueden determinarse si se mide el tiempo que tarda en recorrer el portapesas una distancia conocida con la ayuda de un cronómetro manual, lo cual bajaría aún más el costo del dispositivo experimental.



FIGURA 6. Montaje del viscosímetro de cilindros concéntricos.

Las dimensiones de las componentes del viscosímetro construido se enlistan en la tabla I.

TABLA I. Dimensiones del viscosímetro construido.

Cantidad	Longitud(m)
R_1	0.0239
R_2	0.0312
r	0.0078
r_a	0.0157
r_b	0.0205
l	0.1187
L_a	0.14
L_b	0.039
d	0.006
h	0.119

B. Experimentos empleando el viscosímetro de cilindros concéntricos.

Los fluidos estudiados fueron glicerina marca Reproquifin PQF como fluido newtoniano (aunque también puede emplearse un aceite vegetal o sintético) y un shampoo de uso doméstico como fluido no newtoniano. El procedimiento fue el siguiente: se vertió una cantidad de fluido en la copa del viscosímetro de tal forma que al introducir el cilindro interno la longitud l estuviera totalmente cubierta. Posteriormente, se enrolló la cuerda en la polea de radio r hasta que el portapesas quedó por debajo de la polea de radio r_a . La fotocelda se colocó aproximadamente 1m por debajo de la polea. Esto con el fin de asegurarse que el portapesas alcance una velocidad terminal. Se dejó descender libremente el portapesas y se registró el tiempo que tarda en recorrer la distancia h al pasar por la fotocelda. Se incrementó la masa en el

portapesas y se repitió el procedimiento descrito. Con las ecuaciones (12) y (14), se calcularon los valores de rapidez de deformación y esfuerzo, respectivamente, para generar la curva de flujo.

V. RESULTADOS

Los experimentos con la glicerina se llevaron a cabo a una temperatura ambiente de $T=19^\circ\text{C}$, temperatura que fue medida después de cada dato experimental. Los datos obtenidos se presentan en la tabla II.

TABLA II. Datos experimentales obtenidos para la glicerina utilizando el viscosímetro.

$\dot{\gamma} (\text{s}^{-1})$	$\tau(\text{Pa})$	$\eta(\text{Pa s})$
10.131	20.462	2.019
12.068	24.069	1.994
15.259	31.284	2.014
17.572	34.891	1.985
20.925	42.106	2.012
24.823	49.321	1.986
26.286	52.928	2.013
27.799	56.535	2.033
29.180	60.143	2.061
30.332	63.750	2.101
33.778	70.965	2.100
36.696	74.522	2.030

En la figura 7, se muestra la curva de flujo obtenida para este fluido. Se puede ver que la relación que existe entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación es lineal en todo el intervalo que se presenta, lo que indica que este fluido tiene un comportamiento newtoniano y puede representarse por la ecuación (6). Comparando la ecuación constitutiva (ecuación 6) con la ecuación de ajuste de los datos experimentales, se tiene que la viscosidad para este fluido es igual a $\eta=2.100\text{Pas}$, este valor se comparó con el de $\eta=2.13\text{Pas}$ obtenido empleando un viscosímetro comercial marca Brookfield Modelo LVTDV-II. Teniendo una diferencia porcentual no mayor al 2%.

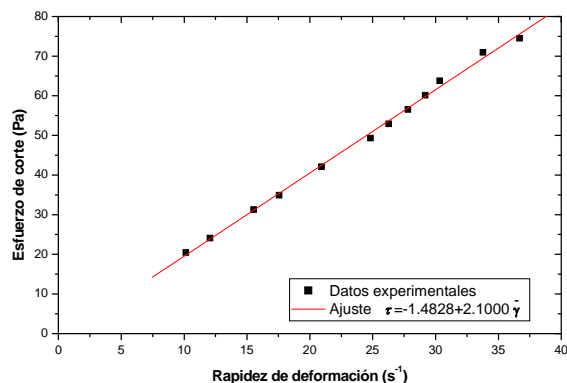


FIGURA 7. Curva de flujo para la glicerina. $T=19^\circ\text{C}$.

De estos valores se puede afirmar que el dispositivo experimental construido arroja resultados aceptables. Asimismo, la figura 8 muestra el comportamiento viscoso de la glicerina en función de la rapidez de deformación, que al ser un fluido newtoniano, su viscosidad se mantiene aproximadamente constante.

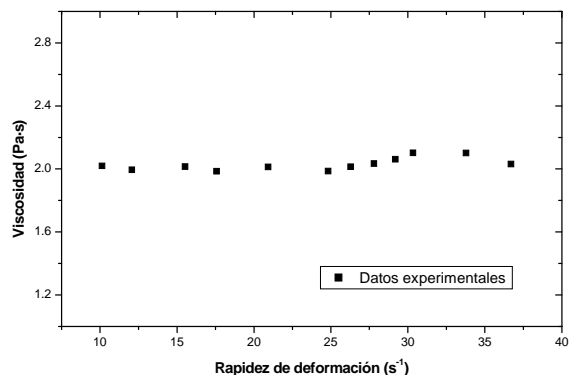


FIGURA 8. Viscosidad en función de la rapidez de deformación para la glicerina. $T=19^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado, los resultados experimentales del esfuerzo de corte y de la rapidez de deformación obtenidos con el shampoo a una temperatura ambiente del laboratorio de $T=22^{\circ}\text{C}$, son presentados en la tabla III.

TABLA III. Valores experimentales obtenidos para el shampoo utilizando el viscosímetro.

$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$\tau \text{ (Pa)}$	$\eta \text{ (Pa s)}$
0.624	23.22	37.211
0.700	27.14	38.771
0.792	31.07	39.229
0.830	34.99	42.156
1.17	42.85	36.623
1.31	48.73	37.198
1.70	62.47	36.747
2.26	78.18	34.592
2.70	89.95	33.31
3.77	105.65	28.02
4.61	109.58	23.77
8.92	113.5	12.72
23.20	121.36	5.23
24.70	125.28	5.07
41.35	131.17	3.17
83.49	137.06	1.64
97.19	142.95	1.47
99.97	142.95	1.42
136.07	150.8	1.10
138.75	150.8	1.08

La figura 9 muestra la curva de flujo del shampoo a partir de los datos presentados en la tabla III. El comportamiento observado en este fluido es claramente no newtoniano. Dado que la relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación es no lineal.

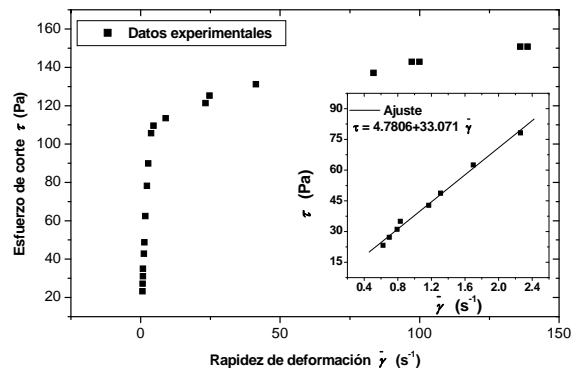


FIGURA 9. Curva de flujo obtenida del shampoo. En el recuadro se muestra el comportamiento newtoniano a baja rapidez de deformación. $T=22^{\circ}\text{C}$.

Asimismo, en la figura 10 se puede apreciar que la viscosidad disminuye en función de la rapidez de deformación, lo cual refleja un comportamiento adelgazante.

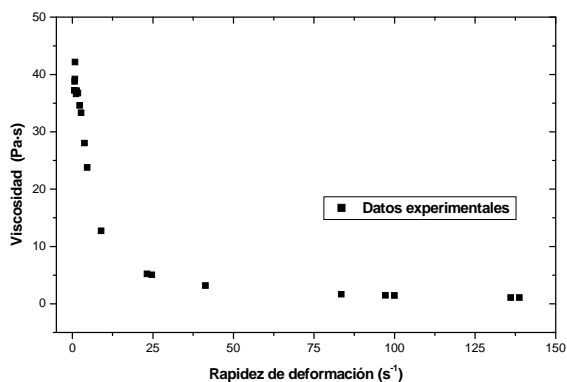


FIGURA 10. Curva de viscosidad en función de la rapidez de deformación obtenida para el shampoo. $T=22^{\circ}\text{C}$.

Para dar una idea de lo complejo que puede ser el comportamiento viscoso de un fluido no newtoniano, se analizó con detalle la curva de flujo del shampoo (fig. 9). Aparentemente, el gráfico muestra un comportamiento del tipo de fluido de Bingham. Sin embargo, existen dos regiones: una primera para valores de rapidez de deformación menores a $\dot{\gamma} < 2.26 \text{ s}^{-1}$, en donde se observa una tendencia lineal como se indica en el recuadro insertado en la misma gráfica de la figura 9. En esta región el comportamiento corresponde al de un fluido newtoniano descartando con ello que el shampoo se comporte como un fluido de Bingham. Haciendo un ajuste lineal en esta región se obtiene un valor de $\eta_0=33.07 \text{ Pa s}$ para la

A. F. Méndez-Sánchez, L. Pérez-Trejo y A. M. Paniagua Mercado viscosidad newtoniana. En la segunda región, para valores de rapidez de deformación de $\dot{\gamma} > 2.26s^{-1}$, los puntos experimentales muestran un comportamiento no newtoniano adelgazante, ver figura 11. Por lo tanto, esta región se ajustó empleando el modelo de ley de potencias (ec. 7) y los valores obtenidos fueron $n=0.1062$ y $k=88.2795 Pa/(s^{-1})^n$. En este caso, la dependencia de la viscosidad con la rapidez de deformación toma la forma: $\eta=88.279 \dot{\gamma}^{-0.8938}$.

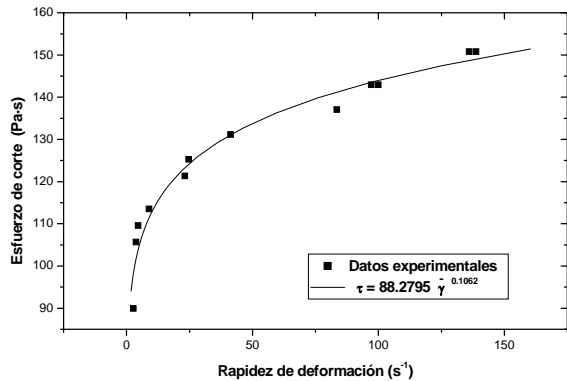


FIGURA 11. Curva de flujo de la región altamente adelgazante. Se incluye el ajuste a un modelo de ley de potencias. $T=22^{\circ}C$.

La figura 12 presenta la gráfica de la viscosidad como función de la rapidez de deformación en escala logarítmica. En esta gráfica es posible ver la meseta de comportamiento newtoniano con viscosidad η_0 para valores de rapidez de deformación menores a $2.26s^{-1}$ y la correspondiente disminución de viscosidad al incrementarse la rapidez de deformación. Es de destacar, que usualmente no es posible obtener esta primera región de la curva con un dispositivo tan simple como el nuestro. Sin embargo, con el debido cuidado y la paciencia necesaria es posible elucidar este tipo de comportamiento lo cual contribuye al mejor entendimiento de los fluidos no newtonianos.

Finalmente, se aplicó el modelo de Carreau-Yasuda (ecuación 9) al conjunto de todos los datos experimentales mediante un ajuste de mínimos cuadrados no lineales empleando el software Origin^{MR}, el cual utiliza el algoritmo de Levenberg-Maquard. En este caso, los valores iniciales para realizar el ajuste fueron $\eta_{\infty}=0$, $\lambda=0.3125s$ (λ corresponde al inverso del valor de rapidez de deformación en donde termina η_0), $a=2$ (es un valor típico para soluciones jabonosas [5]), $n=0.1062$, y $\eta_0=33.07Pas$ (corresponden a los parámetros calculados anteriormente). Los valores resultantes a partir del ajuste fueron: $\lambda=0.3248s$, $a=2.95$, $n=0.0097$ y $\eta_0=38.97Pas$. En la figura 12 también se incluye este ajuste. Es de mencionar que aunque este tipo de ajustes no lineales corresponden a cursos avanzados de licenciatura, éste se incluye para mostrar que con las simplificaciones propuestas en el viscosímetro se obtienen resultados aceptables.

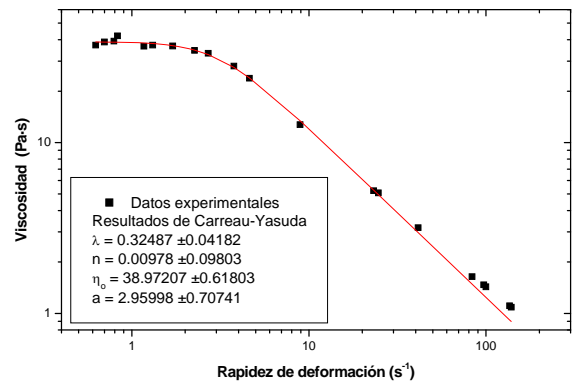


FIGURA 12. Curva de viscosidad contra la rapidez de deformación en representación logarítmica. La línea continua corresponde al ajuste del modelo de Carreau-Yasuda. $T=22^{\circ}C$.

Como puede verse, la construcción del dispositivo, permitirá a los estudiantes desarrollar destrezas experimentales así como su creatividad, ya que este aparato puede ser construido a partir de materiales de desecho. Además, el alumno podrá experimentar con diferentes fluidos viscosos convirtiendo así al viscosímetro en una herramienta cognoscitiva, que permitirá al estudiante desarrollar argumentos físicos para discernir bajo una situación más compleja como son los fluidos no newtonianos.

VI. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son:

Se analizaron las diferencias entre los fluidos newtonianos y los no newtonianos y se explicó como distinguirlos a partir de las curvas de flujo.

Se presentaron los detalles para la construcción de un viscosímetro de cilindros concéntricos y se obtuvieron sus expresiones de esfuerzo y rapidez de deformación.

Se analizó el comportamiento de dos fluidos de uso comercial con ayuda del dispositivo construido, a saber, glicerina y shampoo. A partir de las curvas de flujo y de viscosidad se determinó que la glicerina es un fluido newtoniano y que el shampoo es un fluido no newtoniano adelgazante. En el caso de la glicerina se determinó una viscosidad que presentó una diferencia del 2% con respecto al valor obtenido usando un viscosímetro comercial, lo que permitió mostrar que el viscosímetro construido proporciona resultados aceptables a nivel educativo. Además, se aplicó un modelo no lineal que describe el carácter no newtoniano del shampoo.

Este trabajo muestra la metodología para la construcción de un dispositivo que permitirá desarrollar habilidades experimentales del alumno. Además, con la caracterización viscosa de los fluidos no newtonianos, el alumno estará expuesto a una situación más compleja que le permitirá analizar el comportamiento de los fluidos y su clasificación, ampliando su panorama experimental e interesándolo en el área de la reología y la dinámica de fluidos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores Méndez Sánchez y Pérez Trejo son becarios COFAA y EDD del IPN.

REFERENCIAS

[1] Resnick, R., Halliday, D. y Krane K. S., *Física, Vol. 1*, (CECSA, 5ª edición, México, 2004).
[2] Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D. y Freedman, R. A., *Física Universitaria Vol. 1*, (Pearson Educación, 11ª Edición, México, 2004).

[3] Sears, F. W., Zemansky, M. W., *Física General*, (Addison Wesley, 5ª Edición, España, 1981).
[4] Scottblair, G. W., *Elementary Rheology*, (Academic Press London and New York, 1ª Edición, Gran Bretaña, 1969).
[5] Bird, B. R., Armstrong, R. C., Hassager O., *Dynamics of Polymeric Liquids, vol 1*, (John Wiley & Sons, 2ª Edición, Estados Unidos de América, 1987).
[6] Walters, K., *Rheometry*, (John Wiley & Sons, 1ª Edición, Gran Bretaña, 1975).
[7] Macosko, C. W., *Rheology Principles, Measurements, and Applications*, (Wiley-VCH, 1ª Edición, Estados Unidos de América, 1994).