

Comportamiento reológico de un fluido

Alejandro Regalado Méndez * & Octavio Antonio Noriega Ramos **

Resumen

Comportamiento reológico de un fluido. El aprendizaje integral de la mecánica de fluidos requiere de una implementación experimental que complemente al carácter abstracto de dicha disciplina. Los primeros encuentros prácticos de esta asignatura suelen ser confusos para el estudiante y llegan a obstaculizar la consolidación del conocimiento perseguido. La desinformación y mala operación del usuario incluso provoca perjuicios al equipo involucrado. El objetivo del presente trabajo es que los lectores logren identificar el comportamiento reológico de un fluido cotidiano mediante una metodología adecuada, la cual es expuesta. Finalmente, para que el conocimiento sea más representativo, se presenta un caso de estudio sobre una salsa catsup comercial, encontrándola como un fluido pseudoplástico y tixotrópico. Se utilizó un viscosímetro Brookfield DV-II+ Programmable. Los parámetros reológicos para la muestra son el índice de consistencia de 2.19322 Pa*s y el índice de comportamiento del fluido de 0.29087 obtenidos a partir del "spindle" 4.

Palabras clave: Brookfield, catsup, fluidos, Reología.

Abstract

Rheological behavior of a fluid. The integral understanding of the fluids mechanics needs an experimental implementation that complements the abstract character of the above mentioned discipline. The first practical encounters of this subject are usually confusing for the student and hinder the success of the pursued knowledge. The inexperience and bad operation of the user causes damage the involved equipment. The objective of this text is that the readers can identify the rheological behavior of household fluids through suitable methodology. Finally, so that the knowledge is more representative, a case of study appears on commercial ketchup, finding it like a pseudoplastic fluid and thixotropic. A Brookfield DV-II+ Programmable viscometer was used. Rheological parameters for the sample are consistency index of 2.19322 Pa*s and flow behavior index of 0.29087 obtained from "spindle" 4.

Key words: Brookfield, fluids, ketchup, Rheology.

Résumé

Comportement rhéologique d'un fluide. L'apprentissage intégral de la mécanique des fluides requiert d'implémentations expérimentales qui complètent le caractère abstrait de cette discipline. Les premiers contacts pratiques avec le sujet sont habituellement source de confusion pour l'étudiant et empêchent l'obtention satisfaisante de la connaissance recherchée. Parfois, le manque d'expérience et le mauvais usage peuvent endommager les instruments utilisés. L'objectif du texte est que les lecteurs identifient le comportement rhéologique d'un fluide quotidien par le biais d'une méthodologie convenable, qui est exposée. Enfin, afin d'obtenir des connaissances plus représentatives, un cas d'étude est développé avec une sauce ketchup commerciale, trouvant celle-ci similaire à un fluide pseudo-plastique et thixotropique. Un viscosimètre Brookfield DV-II+ Programmable a été utilisé. Les paramètres rhéologiques de l'échantillon sont l'indice de consistance de 2.19322 Pa*s, l'indice de comportement de 0.29087 obtenus à partir du "spindle" 4.

Mots clefs : Brookfield, fluides, ketchup, Rhéologie.

* Instituto de Industrias, Universidad del Mar, Ciudad Universitaria, campus Puerto Ángel, 70902, Oaxaca, México.
Correo electrónico: alejandroregalao@hotmail.com

** División de Estudios de Postgrado, Universidad del Mar, Ciudad Universitaria, campus Puerto Ángel, 70902, Oaxaca, México.
Correo electrónico: octanoram@hotmail.com

Introducción

La mecánica de fluidos, como área de estudio, se ha desarrollado conforme a la comprensión de las leyes de la mecánica y termodinámica. Sus diversas aplicaciones experimentales han culminado en la caracterización de diversos fluidos, convirtiendo tales pruebas en indicadores de su origen, uso y calidad dentro del sector industrial (Barnes 2000).

La reología es una disciplina científica que se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia (Bird *et al.* 2002). Su objetivo está restringido a la observación del comportamiento de materiales sometidos a deformaciones muy sencillas, desarrollando posteriormente un modelo matemático que permita obtener las propiedades reológicas del material. Ejemplos cotidianos de interés para la reología se encuentran la mayonesa, yogurt, pinturas, asfalto, sangre y muchos más (Chhabra 2007).

Un fluido es capaz de fluir debido a las fuerzas de cohesión en sus moléculas y suele deformarse continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante. La viscosidad μ es una propiedad de transporte, ya que cuantifica la

conductividad de cantidad de movimiento a través de un medio conductivo o fluido. Se interpreta como la resistencia que ofrecen los fluidos a ser deformados cuando son sometidos a un esfuerzo (Barnes 2000).

La clasificación de fluidos (Fig. 1) está dada por las diferentes características reológicas que pueden ser descritas a través del uso de un viscosímetro (McClements 1999). Existen viscosímetros rotacionales, como el viscosímetro de Brookfield, donde su elemento rotatorio sirve la doble finalidad de agitar la muestra y medir su viscosidad (Anónimo 2009).

Los fluidos newtonianos poseen una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado (τ) y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) resultante (Bloomer 2000). Lo anterior, indica una viscosidad (μ) constante a diferentes velocidades de corte; cuando no presentan tal característica, entonces se denominan fluidos no newtonianos y acorde a su dependencia con el tiempo se identifican como reopéctico o tixotrópico (McClements 1999). De acuerdo a Shames (1995) y Chhabra (2007) los principales modelos matemáticos para los fluidos son descritos en la Tabla I.

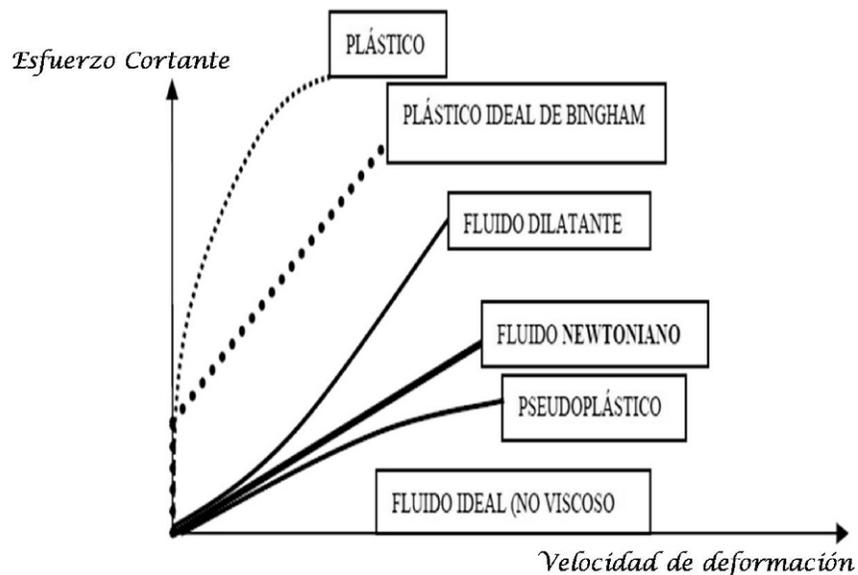


Figura 1. Clasificación de fluidos.

El objetivo del presente trabajo es que los lectores identifiquen el comportamiento reológico de un fluido cotidiano mediante una metodología adecuada para la operación de un viscosímetro rotacional y obtengan así mediciones reológicas óptimas que lleven a la interpretación de algún modelo matemático expuesto.

Tabla I. Principales modelos matemáticos para fluidos. Esfuerzo cortante (τ), velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), índice de consistencia (k) e índice de comportamiento del fluido (n).

Tipo de Fluido	Ecuación
Fluido ideal de Bingham	1)
Ley de Newton	2)
Ley de Ostwald	3)

Material y métodos

Dentro de los materiales a utilizarse están el shampoo, jabón, cremas, catsup y aceites; asimismo, se usaron vasos de precipitado para el depósito de la muestra y espátulas para su transporte y manipulación.

Determinación de propiedades reológicas

Como primer paso se debe de registrar las condiciones climáticas donde se realizará la prueba. Una vez contando con el viscosímetro de Brookfield®, la Figura 2 indica el procedimiento general a seguir.

A) Montaje y calibración

- A1. Se arma el viscosímetro Brookfield con sus correspondientes accesorios (Fig. 3).
- A2. Se estabiliza el equipo auxiliándose de los soportes hasta lograr que la burbuja de nivel se sitúe en el centro del visor superior.

B) Inserción del "spindle"

- B1. Se reconocen los "spindles" acorde al

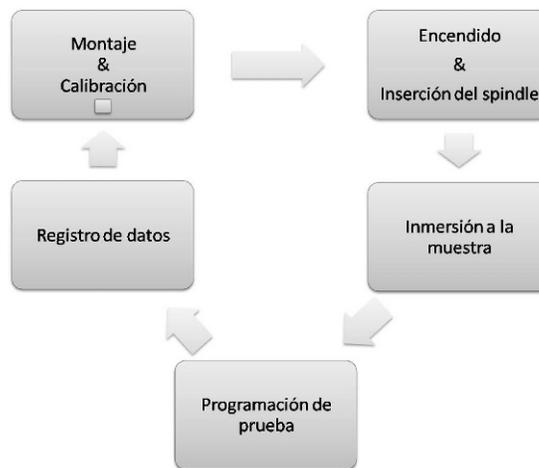


Figura 2. Procedimiento de operación.

número de identificación registrado en su eje y se recomienda una gradual utilización.

Nota: Al colocar y retirar algún "spindle" es conveniente posicionarse a una altura adecuada que permita sostenerlo firmemente con una mano y enroscarlo con la otra; evitando así ejercer presión y daños sobre el eje rotatorio.

- B2. Al encender el viscosímetro mostrará la siguiente leyenda "Remove any spindle/Press any key". Obedecer la leyenda.
- B3. Una vez realizado lo señalado en B2, el equipo realiza el procedimiento "Autozeroing". Es conveniente llevarlo a cabo cada vez que se encienda el equipo o se cambie de "spindle".
- B4. Finalmente se solicitará la reinscripción del "spindle" al viscosímetro.

C) Inmersión a la muestra

- C1. Se introduce el "spindle" hasta cubrir la ranura que el eje del mismo posee como indicador de nivel auxiliándonos de la perilla que ajusta la altura del viscosímetro de Brookfield. Se recomienda realizarlo lentamente con el fin de evitar la formación de una capa de aire alrededor del "spindle", la cual puede interferir con las mediciones.
- C2. Verificar que la ubicación del "spindle"



Figura 3. Viscosímetro Brookfield.

y el “guardleg” sean al centro de la muestra. Esta consideración evita ejercer presión con el contenedor, salvaguardando así la integridad del viscosímetro de Brookfield®.

C3. Se confirma que la burbuja de nivel se mantenga al centro del visor.

D) Programación de prueba

La información desplegada en el tablero de control del viscosímetro de Brookfield será como en la Tabla II.

D1. Registrar la temperatura de la muestra y verificar que coincida con la del laboratorio. En este instante, el resto de las variables en pantalla debe ser cero, indicando que el motor no está aún en marcha.

D2. Se presiona la tecla “Options” y con las flechas de desplazamiento localizamos el modo “Time to stop” y se presiona “Enter”. Asignamos el tiempo de duración de la prueba.

D3. Realizado D2, seleccionamos la velocidad angular inmediatamente. La gama disponible va desde 0 a 100 RPM y

se recomienda, al igual que con los “spindles”, una selección que permita ir aumentando gradualmente en la subsecuentes pruebas.

E) Registro de datos

E1. Para visualizar la información disponible de μ , T, SS, SR, %, Ω , t, basta presionar la tecla “Select Display” repetidamente durante la ejecución de la prueba.

E2. Se recomienda la elaboración de una tabla que incluya las variables señaladas para el registro de sus valores a lo largo de la prueba.

E3. Realizar el primer registro de los datos después de transcurrido un tiempo que permita descartar influencias sobre el equilibrio térmico y la homogeneidad en la agitación de la muestra.

E4. El registro de los datos posteriores debe realizarse a intervalos iguales de tiempo, obteniendo así, un comportamiento promedio reológico de la muestra.

E5. Al finalizar la prueba, con la tecla “Esc” nos remontamos a la pantalla inicial

- desplegada en E1.
- E6. Se programa una siguiente prueba de misma duración a una superior velocidad angular.
- E7. Al finalizar con el compendio de velocidades seleccionadas procedemos a apagar el equipo para retirar el “spindle” hasta ahora utilizado.
- E8. Proseguir del mismo modo desarrollado hasta ahora con el resto de “spindles”.

La necesidad de realizar así este procedimiento parte de que se desconocen las propiedades reológicas de la muestra. Por lo tanto, se recurre al método de prueba y error con respecto a los “spindles” para una posterior disertación de los resultados obtenidos con cada uno.

Análisis de datos

Los datos son registrados y analizados por medio de cualquier software disponible y capaz de realizar cálculos como promedio, regresiones matemáticas y gráficas incorporando líneas de tendencia.

Caso de estudio

Para ser más significativo el conocimiento y hacer práctica de la metodología antes señalada empleamos como muestra problema

Tabla II. Información desplegada en el tablero de control del viscosímetro de Brookfield®.

Variable	Descripción
T	Temperatura (°C)
t	Tiempo (s)
	Viscosidad (mPa s)
	Velocidad angular (RPM)
SS	Esfuerzo cortante N/m^2
SR	Velocidad de deformación s^{-1}
%	Torque (Adimensional)

salsa catsup marca Del Monte® en su presentación de 220 g. Fue depositada auxiliándose de una espátula convencional de acero inoxidable en vasos de precipitado KIMAX® de 0.1 l. Las condiciones de temperatura dentro del laboratorio y de la muestra fueron de 22°C.

El equipo utilizado fue un viscosímetro de Brookfield® DV-II+ Programmable con una serie de “spindles” 3, 4, 5, 6 y 7. La instalación del equipo es acorde al inciso A), B) y C) de la metodología descrita. Acorde a lo requerido en D2 la duración asignada a la prueba fue de 15 min. El orden de las velocidades angulares seleccionadas es 0.5, 1.5, 3, 6, 12, 30, 60, 100 RPM para cada “spindle”, las cuales son solicitadas en D3 y cumpliendo el procedimiento E8. Los pasos E3 y E4 referente al registro de datos se llevaron a cabo, realizando el primer registro a los 2 min de haber iniciado la prueba y posteriormente se continuó a los 4, 6, 8, 10, 12 y 14.5 min. Para las demás pruebas a diferentes velocidades angulares y con el resto de “spindles” se procedió acorde a lo descrito desde E5 hasta E8. El software utilizado para el análisis de datos fue Origin 8.0®.

Resultados y discusión

En la Figura 4 quedan mostrados los valores obtenidos de SS y SR a partir del viscosímetro de Brookfield y sus diferentes “spindles” para la catsup marca Del Monte®. En el caso del “spindle” 3, la pantalla inmediatamente marcó un mensaje de error y la lectura de las variables fue imposible. Lo anterior denota incompatibilidad del “spindle” para la muestra, por lo que fue descartado para análisis posteriores.

Los “spindles” 6 y 7 no pueden considerarse como indicados en la medición de las pruebas reológicas para esta muestra debido a que el porcentaje de torque debe situarse entre 10% y 100% por indicaciones del propio manual del viscosímetro Brookfield® DV-II+ Programmable. En el “spindle” 7 el porcentaje máximo de torque es de 9.04%,

mientras que en el "spindle" 6 oscila entre 7.02% y 22.63%. Comparando la Figura 4 y 1 se observa que la salsa catsup es un fluido no newtoniano tipo Ostwald, el cual queda representado por medio de la ecuación 3 (ver Tabla I).

Para encontrar los valores del índice de consistencia (k) y el índice de comportamiento del fluido (n) se aplica una línea de tendencia potencial; o en su defecto, se linealiza la ecuación 3 (ver Tabla I), quedando de la siguiente forma:

$$\log \tau = \log k + n \log \dot{\gamma}$$

Se confirma con la Figura 5 que el fluido es pseudoplástico (McClements 1999). En la Tabla III se muestran los resultados del ajuste potencial para los "spindles" 4 y 5 realizado en Origin 8.0 con un intervalo de confianza de 99% y el cálculo se realizó a 200 iteraciones. En la Figura 6 se muestran los ajustes potenciales de la Tabla III para los "spindles" 4 y 5 de acuerdo con la ley de Ostwald.

Los valores de los coeficientes de

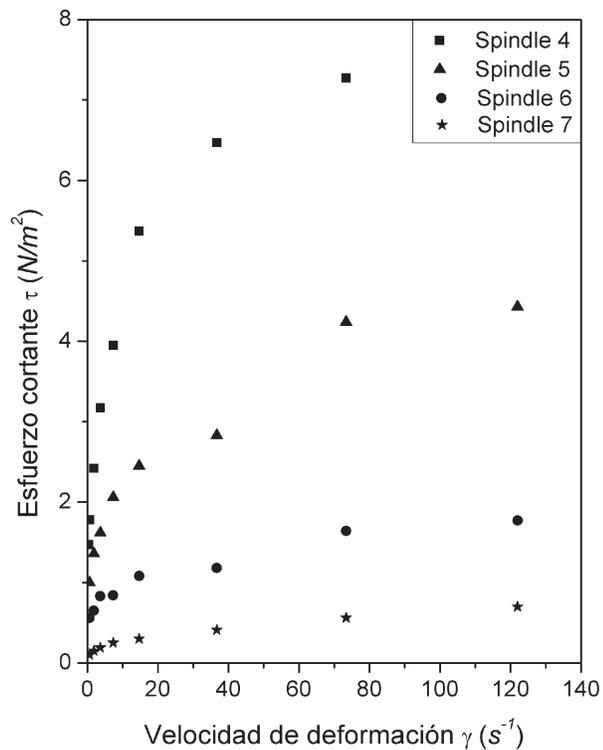


Figura 4. Comportamiento de la muestra a diferentes "spindles".

correlación (r^2) permiten considerar al "spindle" 4 como el que brinda el mejor ajuste potencial al tipo del fluido. El índice de comportamiento del fluido (n) es muy similar a los reportados por Sahin & Ozdemir (2004). De acuerdo con McClements (1999) al observarse el comportamiento de la viscosidad con el tiempo confirmamos que es un fluido tixotrópico (Fig. 7). Bayod *et al.* (2007) asevera que la viscosidad puede ser un parámetro importante en la calidad de los productos, teniendo una relación directa con los costos involucrados en su procesamiento, y por consiguiente, de venta.

Conclusión

Tabla III. Parámetros reológicos de la salsa catsup. Índice de correlación (r^2) índice de consistencia (k) e índice de comportamiento del fluido (n).

Parámetro	"Spindle"			
	4		5	
r^2	0.98056		0.97749	
k	2.19322	0.14477	1.11537	0.09245
n	0.29087	0.01946	0.29146	0.02104

La metodología propuesta en este trabajo resulta adecuada, ya que auxilia al usuario para la correcta operación del viscosímetro Brookfield y la comprensión de los aspectos teóricos de la reología. También se confirma con la serie de resultados expuestos que la salsa catsup analizada es un fluido no newtoniano de tipo pseudoplástico y tixotrópico. Los coeficientes de correlación permiten definir la elección del "spindle" adecuado, siendo los parámetros reológicos óptimos para esta muestra los brindados por el "spindle" 4.

Agradecimientos

A la Universidad del Mar campus Puerto Ángel ya que en sus instalaciones fue posible el desarrollo de esta investigación. Al colega

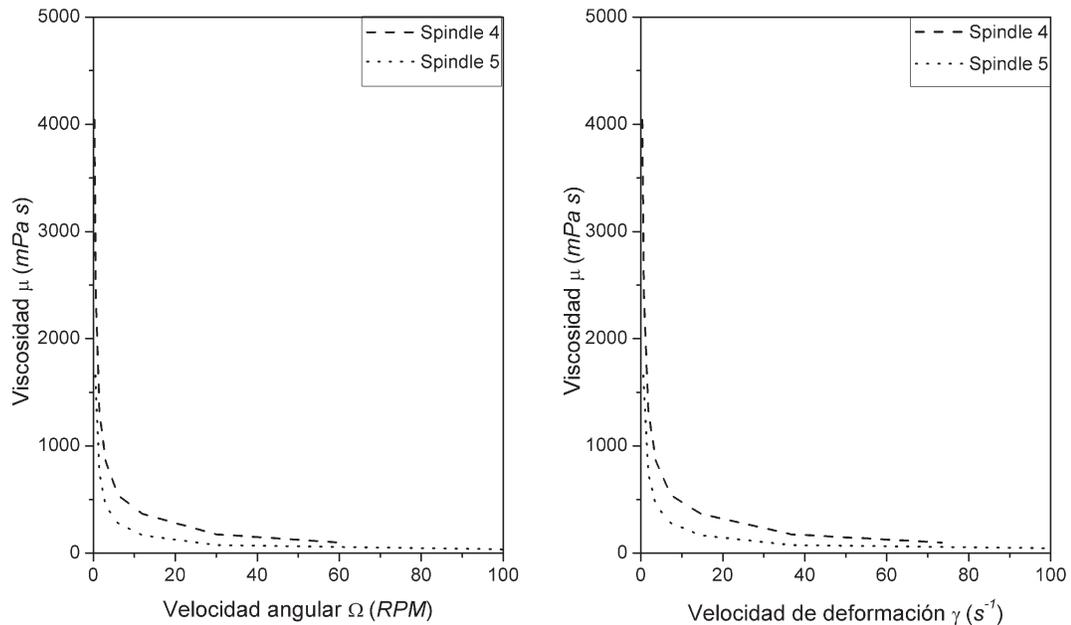


Figura 5. Determinación de fluido seudoplástico.

Aitor Aizpuru por el apoyo en la traducción al inglés y francés. A tres árbitros anónimos por su revisión y comentarios al respecto.

Referencias

Anónimo. 2009. Brookfield DV-II+ Programmable viscometer operating instructions. Brookfield Engineering. Consultado el 15 de enero de 2009 en: www.brookfieldengineering.com/download/files/DV2P_prog_Manual.pdf

Barnes, H.A. 2000. A handbook of elementary Rheology. University of Wales Press, Aberystwyth, 200 pp.
 Bayod, E., E.W. Pilman & E. Tornberg. 2007. Rheological and structural characterization of tomato paste and its influence on the quality of ketchup. LWT (41):1289-1300.
 Bird, R.B., W.E. Stewart & E.N. Lightfoot. 2002. Transport phenomena. 2a ed., John Wiley & Sons, 895 pp.
 Bloomer, J.J. 2000. Practical fluid mechanics for engineering applications. Marcel Dekker Inc, Pennsylvania, 392 pp.

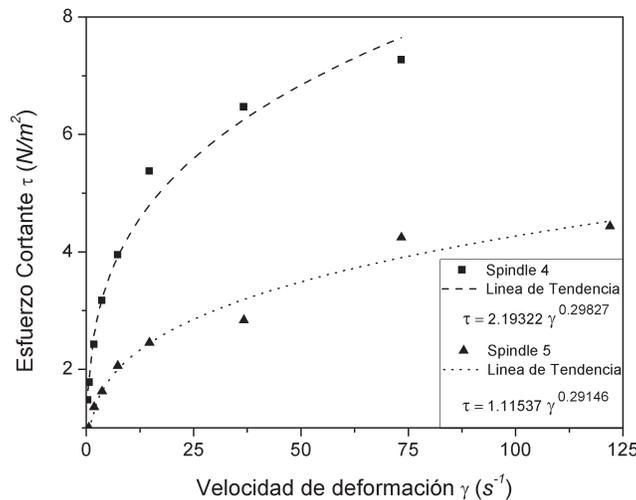


Figura 6. Curvas de perfiles de esfuerzo cortante ajustados por el método potencial.

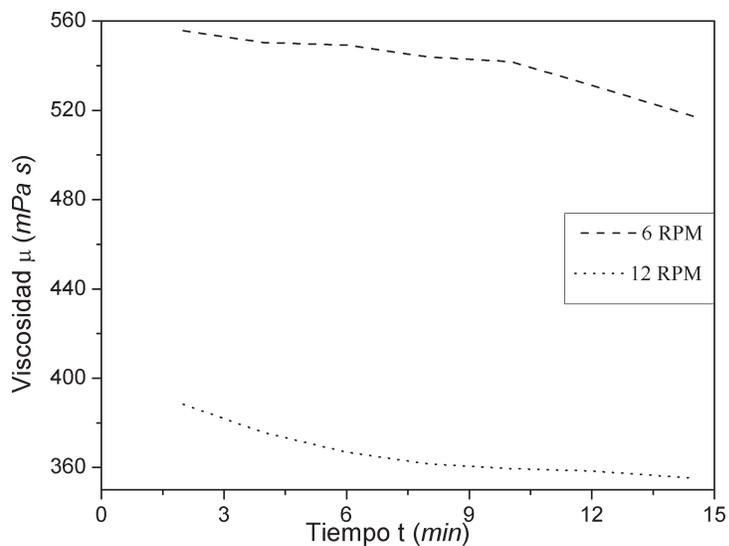


Figura 7. Determinación de fluido tixotrópico.

Chhabra, R.P. 2007. Bubbles, drops and particles in non-newtonian fluids. 2a ed., Taylor & Francis, Kanpur, India, 586 pp.

McClements, D.J. 1999. Food emulsions: principles, practices and techniques. CRC Press. Florida, 356 pp.

Sahin, H. & F. Ozdemir. 2004. Effect of some hydrocolloids on the rheological properties of different formulated ketchups. Food Hydrocolloids (18):1015-1022.

Shames, I.H. 1995. Mecánica de fluidos. McGraw-Hill. 3a ed., Colombia, 829 pp.

Recibido: 20 de enero de 2009.

Aceptado: 24 de junio de 2009.