Modelado de la viscosidad aparente de un petróleo crudo de 11°API con comportamiento no newtoniano

Modeling of apparent viscosity of a 11° API crude oil with non-Newtonian behavior

Héctor Laurencio Alfonso^{1*} Amauris Gilbert Hernández² Yoalbys Retirado Mediaceja²

Recibido 17 de diciembre de 2015, aceptado 3 de octubre de 2016

Received: December 17, 2015 Accepted: October 3, 2016

RESUMEN

La técnica más utilizada en el trasiego de crudos pesados para lograr valores adecuados de viscosidad radica en el calentamiento del fluido, mediante la que se mejoran sus propiedades de flujo. En este trabajo se expone el comportamiento de flujo y la influencia que ejerce la temperatura sobre las propiedades reológicas de un petróleo crudo pesado de 11° API. A partir del estudio reológico se demostró que el petróleo mantiene un comportamiento pseudoplástico para variación de temperatura de 29 a 69,8 °C. Para este caso se observa que la temperatura no provocó cambios significativos en el índice de flujo, manteniendo un valor promedio de 0,925, aunque sí en el índice de consistencia másica y la viscosidad aparente, los que disminuyeron al aumentar esta. Para el intervalo de temperatura estudiado se obtiene el modelo de la viscosidad aparente en función de los parámetros reológicos, influenciados por la temperatura, variable de gran utilidad al definir el valor adecuado de la viscosidad aparente para variaciones de la temperatura durante el tratamiento y transporte del combustible.

Palabras clave: Petróleo pesado, modelo reológico, índice de consistencia másica, temperatura, viscosidad aparente.

ABSTRACT

The most commonly used in the transfer of heavy oil to achieve adequate viscosity values technique is fluid heating, whereby its flow properties are improved. In this paper, the flow behavior and the influence of temperature on the rheological properties of a heavy crude oil of 11° API are exposed. From the rheological study, it showed that oil remains a pseudoplastic behavior to temperature variation of 29 to 69,8 °C. For this case the temperature observed no significant change in flow rate while maintaining an average value of 0,925, although the consistency mass index and apparent viscosity, which decreased with increasing it. For the temperature range studied model the apparent viscosity as a function of the rheological parameters influenced by temperature, useful to define the appropriate value of the apparent viscosity to temperature variations during treatment and transport is obtained fuel.

Keywords: Heavy oil, rheological model, consistency mass index, temperature, viscosity apparent.

¹ Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas. Universidad Técnica de Cotopaxi. Avenida Simón Rodríguez s/n. Barrio El Ejido Sector San Felipe. Latacunga - Ecuador. E-mail: hector.laurencio@utc.edu.ec, hectorluis5680@gmail.com

² Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Avenida Calixto García Iñiguez N° 15 entre Avenida 7 de diciembre y calle Reynaldo Lafita Rueda, Reparto Caribe, Moa. Holguín, Cuba. E-mail: aghernandez@ismm.edu.cu; yretirado@ismm.edu.cu

* Autor de correspondencia.

INTRODUCCIÓN

El transporte de crudos pesados es una de las mayores dificultades que enfrentan las industrias en la actualidad, considerándose como crudos pesados aquellos cuya densidad se encuentra entre 934 y 1.000 kg/m³ (22,3 - 10,1 ° API) y su viscosidad es elevada, llegando a alcanzar hasta 100.000 cSt; los que contienen altas concentraciones de asfaltenos, resinas y parafinas [7].

En la selección y optimización operacional de los sistemas de transporte de estos combustibles, se asume una viscosidad constante y no se tiene en cuenta su modelo reológico, desconociéndose el comportamiento de la viscosidad del petróleo con relación a las variables gradiente de velocidad y la temperatura, que son significativas sobre la viscosidad de los fluidos no newtonianos tratados mediante calentamiento [6].

El avance tecnológico en la industria del petróleo se debe en buena medida a las herramientas y metodologías provistas por la física. En particular, los estudios reológicos se pueden considerar como los más conocidos y eficaces para estudiar los petróleos parafínicos y asfálticos altamente viscosos [9]. Se destacan en la actualidad los avances en las aplicaciones del campo eléctrico y magnético en la reducción de la viscosidad de estos petróleos [3 y 10].

La magnitud de los parámetros reológicos no es una propiedad invariante del fluido, ya que existen valores que dependen de la dinámica de deformación [11].

De los resultados encontrados en la revisión bibliográfica [1, 7 y 12], se puede plantear que en la práctica no se cuenta con los parámetros del modelo que relaciona la temperatura y el gradiente de velocidad con la viscosidad, según el comportamiento reológico de petróleo pesado, debido a que cada fluido tiene características particulares de comportamiento estructural.

En tal sentido se encuentran investigaciones que presentan las correlaciones estadísticas para la estimación de parámetros reológicos a partir de parámetros químicos, para dos asfaltos colombianos y un asfalto venezolano [5]. Se obtienen correlaciones que muestran la función

del índice reológico, estimado a partir del índice de inestabilidad coloidal y el índice de sulfóxidos, con un grado de correlación de 83,81%. Si bien las correlaciones obtenidas son consideradas con un grado de ajuste significativo, este resultado no se puede aplicar a otros fluidos.

Las propiedades reológicas del asfalto y de los petróleos pesados asfálticos dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las que varían de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo; en este caso el cambio estructural es afectado por la influencia de la temperatura y la granulometría controlada, lo que muestra la relación entre la composición química y la viscosidad [8].

El efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de fluidos no newtonianos ha sido estudiado por varios autores [7 y 13]. En los reogramas obtenidos se describe que la temperatura no influye significativamente en el índice de flujo, pero sí sobre el índice de consistencia másica, para el caso de los fluidos pseudoplásticos. Resultados similares plantean la referencia de como el efecto de la temperatura puede influir sobre los parámetros reológicos del fluido [6].

Un efecto novedoso con resultados sobre estas propiedades es reportado mediante la aplicación del tratamiento ultrasónico de un crudo pesado, mostrando resultados similares al efecto de la temperatura [2].

En resultados de caracterización reológica avanzada de petróleos y betunes, se resalta la importancia de realizar los estudios particularizados a cada fluido, debido a la naturaleza específica de comportamiento interespecial de sus partículas [4]. De estos efectos se da la significatividad de realizar el estudio reológico al petróleo objeto de investigación, donde se obtendrán las correlaciones reales de su comportamiento, aplicables al ser transportado por sistemas de tuberías.

ANÁLISIS TEÓRICO

En el caso de fluidos similares al petróleo pesado, se han realizado investigaciones donde se ha demostrado que manifiestan un comportamiento pseudoplástico [4], descrito por la curva b de la Figura 1.

Figura 1. Curvas de flujo típica: (a) Newtonianos; (b) Seudoplásticos; (c) Dilatantes; (d) Plástico ideal (Bingham); (e) Plástico real.

Fuente: [6].

Modelo reológico del fluido

El modelo de ley de potencia de Ostwald de Waele (Ec. 1) puede modelar fluidos pseudoplásticos, en este caso las viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). Su curva de flujo se describe por el modelo cuando el índice de flujo, que caracteriza la ley, es menor que la unidad [6].

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (1)$$

Donde:

n : índice de flujo; (adimensional).

K : índice de consistencia; (Pa·s).

$\frac{dv}{dy}$: gradiente de velocidad; (s^{-1}).

Para los líquidos pseudoplásticos y dilatantes el gradiente de velocidad en la tubería se puede expresar en función de la velocidad media del fluido (v) y del índice de flujo (n), mediante la ecuación (2) [5].

$$\frac{dv}{dy} = \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{8 \cdot v}{D} \right) \quad (2)$$

Donde:

D : diámetro de la tubería; (m).

v : velocidad del fluido en la tubería; (m/s).

Comportamiento de la viscosidad aparente

En función del modelo ecuación (1), en el caso de fluidos pseudoplásticos, la viscosidad aparente queda expresada mediante la ecuación (3).

$$\mu_a = K \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1} \quad (3)$$

Una vez obtenidos los parámetros del modelo n y K , sustituyendo en la ecuación (3), se trazan las curvas características de la viscosidad aparente contra el gradiente de velocidad para cada temperatura, determinándose la forma típica de la relación entre la viscosidad aparente y el gradiente de velocidad según las propiedades reológicas del petróleo. La correlación del grado de influencia de la temperatura sobre el índice de consistencia másica (K), se recomienda ajustar según los datos experimentales mediante la ecuación de Andrade (ecuación (4)).

$$y = c \cdot e^{B/t} \quad (4)$$

Donde:

y : constituye la variable K , en función de los datos correlacionados.

C y B : coeficientes de ajuste que dependen del tipo de fluido.

t : temperatura; ($^{\circ}C$).

Características del petróleo

Se estudió la muestras de petróleo crudo pesado de 11° API, para el que el número de corridas experimentales se determina en correspondencia con lo planteado en la literatura [1, 2, y 6] y los valores prefijados por el viscosímetro; tomándose nueve niveles del gradiente de velocidad y cinco niveles de temperatura, para tres réplicas de cada experimento, tomadas desde la temperatura bajo las condiciones ambientales, hasta la temperatura máxima recomendada para operaciones de bombeo [6]. Las especificaciones del crudo en estudio están dadas en la Tabla 1.

Según las especificaciones de la Tabla 1, se puede observar que se está en presencia de un petróleo crudo con alto contenido de azufre y asfaltenos, incidiendo este último de forma significativa en el comportamiento de flujo ante las variaciones de la temperatura, debido al cambio estructural y la granulometría controlada [8].

Tabla 1. Especificaciones del crudo en estudio.

Nº	Parámetros	U/M	Valor
1	Viscosidad a 50 °C	mm ² /s	650
2	Azufre total (m/m)	%	7,5
3	Temperatura de inflamación	°C	34
4	Temperatura de fluidez	°C	15
5	Carbón conradson (m/m)	%	14
6	Densidad a 15 °C	g/cm ³	0,9924
7	Gravedad a 15 °C	°API	11
8	Valor calórico neto	kcal/kg	9100
9	Agua por destilación (v/v)	%	2,0
10	Sedimentos por extracción (m/m)	%	0,15
11	Cenizas (m/m)	%	0,1
12	Asfaltenos (m/m)	%	18
13	Vanadio	ppm	150
14	Sodio	ppm	150
15	Aluminio + silicio	ppm	80

Características del viscosímetro empleado

En el estudio reológico del combustible se determinó la relación del esfuerzo de corte (τ) en función del gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$), mediante el uso del viscosímetro rotacional HAAKE VT550 (Figura 2). El gradiente de velocidad se experimentó desde 4,5 a 268 1/s, para los niveles de temperatura de 29; 38,6; 50,2; 57,4 y 69,8 °C, en correspondencia con las temperaturas y condiciones más frecuentes de su transporte por tuberías.

El control de temperatura se obtuvo con la utilización de un termostato de 0,5 °C de precisión.

Figura 2. Viscosímetro rotacional HAAKE VT550.

Para la experimentación se introduce en el interior de la copa la muestra del combustible, la que debe ser representativa de lo que se quiere analizar, así como garantizar un volumen suficiente para cubrir totalmente el sensor, necesitándose aproximadamente 80 ml.

Los datos experimentales se ajustaron según el método de regresión para obtener los parámetros del modelo matemático que relaciona el esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad. Los parámetros, índice de flujo e índice de consistencia másica, se obtuvieron ajustando las curvas de flujo al modelo de ley de potencia de Ostwald de Waele (ecuación (1)).

Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos.

Nº	Gradiente de velocidad $\dot{\gamma}$ (1/s)	Esfuerzo de corte, τ (Pa)				
		Valores de temperatura, t (°C)				
		29 °C	38,6 °C	50,2 °C	57,4 °C	69,8 °C
1	4,5	51,8	29,04	13,13	8,12	5,12
2	7,5	88,9	41,91	19,82	15,54	9,73
3	13	143	71,8	28,71	23,36	16,63
4	21	209,1	115,1	55,87	37,43	25,52
5	41	423,9	213,4	99,95	69,26	46,35
6	58	547,6	294,5	118,6	96,01	64,24
7	97	—	483,1	220,6	153,8	112,2
8	162	—	—	354,6	235,9	154,7
9	268	—	—	546,3	393,5	244,4

RESULTADOS

A partir del estudio reológico, se obtuvieron los resultados reflejados en la Tabla 2, en la misma se recoge la dependencia entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad para las temperaturas experimentadas; la Figura 3 representa dicha relación, donde puede observarse la forma de curva característica de un fluido pseudoplástico.

Mediante la representación gráfica de los datos experimentales para el esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad, se trazaron las curvas de flujo (Figura 3), las mismas permiten realizar el ajuste de los datos mostrados en la Tabla 2.

Figura 3. Curvas de flujo del petróleo pesado en función de la temperatura.

En la Figura 3 se observa que para el rango de temperaturas desde 29 hasta 70 °C, el petróleo pesado mostró el mejor ajuste para el modelo de fluido pseudoplástico, corroborándose lo planteado por otras investigaciones [6]. El comportamiento manifestado, está caracterizado por los parámetros reológicos, índice de consistencia másica (K) e índice de flujo (n). En cuanto a los parámetros reológicos, fue posible identificar la tendencia respecto a la dependencia de cada factor con la temperatura, atribuidos a la transformación de la granulometría controlada de las partículas y su variabilidad ante la temperatura, según se manifiesta por otros investigadores [8]. Los modelos ajustados para cada temperatura se exponen en la Tabla 3.

A partir de los modelos ajustados en la Tabla 4, se resumen los parámetros reológicos identificado

Tabla 3. Correlaciones de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

Temperatura	Modelo ajustado
29 °C	$\tau_{x,y} = 13,55 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,917}$
38,6 °C	$\tau_{x,y} = 6,89 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,926}$
50,2 °C	$\tau_{x,y} = 3,097 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,926}$
57,4 °C	$\tau_{x,y} = 2,22 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,925}$
69,8 °C	$\tau_{x,y} = 1,46 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,926}$

para cada temperatura y los coeficientes de correlación obtenidos para cada ajuste del modelo reológico.

Tabla 4. Parámetros reológicos obtenidos y coeficiente de correlación múltiple.

Factor	Temperatura (°C)				
	29	38,6	50,2	57,4	69,8
K (Pa·s)	13,55	6,89	3,097	2,22	1,46
n (adim.)	0,917	0,926	0,926	0,925	0,929
R ²	0,997	0,999	0,997	0,998	0,997

El coeficiente de correlación múltiple (R²) en todos los casos fue superior a 0,996; por lo que se considera satisfactorio el ajuste de los modelos a los datos experimentales, indicativo de que se experimenta un fluido estable, en correspondencia con los resultados obtenidos en investigaciones similares a la temática [2 y 5].

Con el empleo de los resultados mostrados en la Tabla 4 y sustituyéndolos en la ecuación (3), se graficó el comportamiento de la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad (Figura 4).

Figura 4. Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

Los resultados obtenidos posibilitan visualizar el grado de variabilidad de la viscosidad aparente ante variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad, observándose en todo caso como el comportamiento no newtoniano del tipo seudoplástico se manifiesta con el descenso de la viscosidad aparente al aumentar la velocidad.

Se resalta que la viscosidad aparente del petróleo pesado disminuye de forma potencial con el aumento de la temperatura, para los menores valores del gradiente de velocidad se manifiesta un mayor cambio de la viscosidad, lo que coincide con lo planteado por la literatura [2 y 5], asociado a cambios de estructuración en el comportamiento de las partículas dispersas en el combustible.

Al aumentar la temperatura, se observó que los valores del índice de consistencia másica disminuyeron (Figura 5), comportamiento similar a los resultados obtenidos por [7]. El índice de flujo mostró variaciones poco significativas, con el valor promedio de 0,925; corroborándose lo planteado por [13].

Figura 5. Comportamiento de K en función de la temperatura.

Realizando el ajuste del comportamiento del índice de consistencia másica (K) a la ley exponencial, se obtuvo la correlación en función de la temperatura (ecuación (4)) con un coeficiente de correlación múltiple de 0,97.

$$K = 59,86 \cdot e^{(-0,056 \cdot t)} \quad (5)$$

La función obtenida posibilita simular el comportamiento del índice de consistencia másica (K) al variar la temperatura (t), teniendo como recomendación que la misma es válida solo para las condiciones experimentales en la que fue ajustada.

El resultado obtenido (ecuación (5)) permitió establecer el comportamiento de la viscosidad aparente, a partir de las variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad.

Al sustituir la ecuación (5) y ecuación (2) en la ecuación (3), e incorporando los parámetros reológicos ajustados, se obtuvo el modelo (ecuación (6)) que describe el comportamiento de la viscosidad aparente del petróleo pesado estudiado, para variaciones de la temperatura y el gradiente de velocidad; siendo estas las variables con mayor incidencia en los cambios de la viscosidad aparente para un fluido seudoplástico [8].

$$\mu_a = \frac{59,86}{e^{0,056 \cdot t}} \cdot \left(\frac{8,16 \cdot v}{D} \right)^{-0,075} \quad (6)$$

Mediante el modelo anterior, es posible definir la viscosidad aparente del petróleo pesado durante su transporte por tuberías; relacionado con la correcta predicción de la viscosidad al ser un fluido no newtoniano. Su aplicación puede incidir en la correcta descripción del consumo energético de las instalaciones, al conocerse el comportamiento del fluido ante variaciones de la temperatura, la velocidad y el diámetro de la tubería.

CONCLUSIONES

Se han obtenido los parámetros del modelo que describe el comportamiento del petróleo pesado, ajustándose para todos los casos a un fluido seudoplástico.

Se comprobó que al incrementar la temperatura en el petróleo crudo pesado, la viscosidad aparente y por

ende el índice de consistencia másica disminuyen significativamente, pudiendo relacionarse este comportamiento con disminución de la viscosidad del medio dispersante y el debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura, en correspondencia con lo planteado por la literatura [4, 6 y 8].

Se demostró con los resultados experimentales, que la variación de la temperatura no provocó cambios significativos en el índice de flujo, manteniéndose con un valor promedio de 0,925.

Se obtuvieron los modelos que relacionan, el índice de consistencia másica y la viscosidad aparente con la temperatura para el intervalo de 29 a 70 °C, dicho comportamiento se puede describir mediante las siguientes ecuaciones.

$$K = 59,86 \cdot e^{(-0,056 \cdot t)}$$

$$\mu_a = \frac{59,86}{e^{0,056 \cdot t}} \cdot \left(\frac{8,16 \cdot v}{D} \right)^{-0,075}$$

Con el empleo de los modelos obtenidos, se brinda un aporte en la obtención de la temperatura racional del petróleo crudo pesado para el transporte por tuberías, pudiendo generalizarse mediante nuevas experimentaciones con otros petróleos.

REFERENCIAS

- [1] A. Díaz y J. Falcón. "Estudio reológico de emulsiones de petróleo crudo en agua". Tecnología Química. Vol. 24 N° 1, pp. 13-16. 2004. ISSN: 2224-6185
- [2] C. Díaz, R. Martínez, E. Patiño y R. Barrero. "Estudio experimental sobre la eficiencia de un tratamiento de ultrasonido en un sistema de flujo continuo para la reducción de viscosidad de crudo pesado". Revista ION, Vol. 26 N° 2, pp. 47-63, 2013. ISSN: 0120-100X
- [3] C. Liang, "Experimental study of the effect of magnetic treatment on crude oil in a pipeline". Oil & Gas Storage Transport, Vol. 9 N° 1, 1990.
- [4] F. Araya. "Caracterización reológica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile". Ingeniería y Construcción, Vol. 27 N° 3, pp. 198-210, 2012. ISSN: Obtenido de www.scielo.cl
- [5] F. Puello, D. Afanasjeva y M. Álvarez. "Correlaciones estadísticas para la estimación de propiedades reológicas de asfaltos en estado original y envejecido". Revista ION, Vol. 26, N° 1, pp. 73-84, 2013. ISSN: 0120-100X
- [6] H. Laurencio. "Método para la determinación de parámetros racionales de transporte de petróleo crudo por tuberías conductoras". Tesis de Doctorado. Moa, Holguín, Cuba, 11 de julio de 2012.
- [7] H. Laurencio e Y. Delgado. "Comportamiento reológico de la emulsión de petróleo pesado". Ingeniare, Revista Chilena de ingeniería. Volumen 16, Número 2, pp. 244-250, abril-junio, 2008.
- [8] J. Cárdenas y E. Fonseca. "Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad temperatura". Revista EIA. Vol. 64 N° 3, pp. 125-137. 2009. URL www.scielo.org.co/scielo.php?sci=arttex.
- [9] M. Khatib. "The development of poiseuille flow of a Pseudoplastic fluid", The Arabian Journal for Science and Engineering. Vol. 31 N° 1. January, 2006. URL: www.sciencedirect.com/science
- [10] M. Szymula, W. Januz and J. Jablonski, "Electrochemical Properties of Asphaltene Particles in Aqueous Solutions". Dispersion Science and Technology. Vol. 21 N° 6, pp. 34-47. 2000.
- [11] O. Bustamate y G. Aguilera. "Una aproximación a la modelación del esfuerzo de cedencia en suspensiones minerales". Mining Engineering, Vol. 72, N° 2, pp. 13-26, 2005. www.redalyc.org/articulo.oaid=496140602.
- [12] P. Maruska y B. Rao. "Reologic and Technology of Fuel". Fuel Science and Technology. Vol. 5 N° 2, pp. 119-168. 1987.
- [13] R. Andrade, R. Torres, E. Montes, O. Pérez, L. Restan y R. Peña. "Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de pulpa de Níspero". Revista de la Facultad de Agronomía. Vol. 26 N° 4, pp. 599-612. 2009. URL: www.scielo.org.ve