

Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado

Héctor Laurencio Alfonso¹
Yodelkis Delgado Drubey¹

hlaurencio@ismm.edu.cu
ydelgado@ismm.edu.cu

Resumen

Por su alta viscosidad, el trasiego de crudos pesados requiere de técnicas especiales que mejoren sus propiedades de flujo; una de estas técnicas consiste en formular emulsiones para obtener petróleos más ligeros y fluidos. Se investigó la influencia que ejerce la temperatura sobre las propiedades reológicas de una emulsión de petróleo de 15^o API, semejante en proporciones a la Orimulsión®. Se encontró que la emulsión ensayada es pseudoplástica y en ella la variación de temperatura no provocó cambios significativos en el índice de flujo, aunque sí en la viscosidad aparente y el índice de consistencia, los que disminuyeron al aumentar ésta. Para los valores de temperatura de 15, 25 y 35 °C se obtuvieron los modelos que relacionan este parámetro con la viscosidad aparente y con el índice de consistencia másica, lo cual es de gran utilidad para definir la energía de transporte necesaria para este tipo de emulsión.

Palabras clave

Reología, petróleo pesado, emulsiones, transporte de crudo.

Temperature influences in the reological properties of the weighed petroleum emulsion

Abstract

Because of its viscosity, heavy petroleum transportation requires special techniques that improve the flow properties; the formulation of emulsions is a technique that allows to obtain lighter and more fluid petroleum. It was investigated the influence of the temperature on reological properties of a 15^o API petroleum emulsion, similar in proportions to the Orimulsión®. It was found that in the researched emulsion, with pseudoplastic behaviour, the variation of temperature causes no significant changes in the flow index, but for the apparent viscosity and the consistency index, which diminished with the increase of the first one. For the experienced temperature interval (15, 25 and 35 °C) were obtained the models that relate temperature with apparent viscosity and with the mass consistence index both allow to define the necessary transport energy for this type of emulsion.

Key words

Reology, heavy petroleum, emulsions, petroleum transport

INTRODUCCIÓN

El transporte de crudos pesados es una de las dificultades que enfrenta la industria actualmente. Se consideran 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; por lo regular contienen altas concentraciones de asfaltenos, resinas y parafinas. Por su alta viscosidad requieren de técnicas especiales que mejoren sus propiedades de flujo para el trasiego.

Entre las técnicas utilizadas para aligerar el crudo pesado están el calentamiento y la dilución; sin embargo, en la actualidad la variante más económica consiste en emulsionar el petróleo crudo en agua, tecnología de la que hacen uso países como Canadá, Japón, Italia e Inglaterra. El producto emulsionado más conocido en el mercado es la Orimulsión®, combustible que contiene 70 % de bitúmen y 30 % de agua.

En Cuba, para disminuir la viscosidad de los crudos pesados se emplean solamente métodos basados en el calentamiento y la dilución con diesel, lo que resulta económicamente no viable y apunta a la necesidad de introducir métodos de menor costo, como la emulsión.

Las emulsiones son dispersiones de un líquido, normalmente formado de microsferas, en otro no miscible (dispersante). Existen emulsiones de aceite en agua, conocidas también como emulsiones directas, y de agua en aceite (inversa). En este trabajo se hace referencia al primer tipo (Figura 1).

El comportamiento reológico de las emulsiones guarda estrecha relación con la estructura que forman las gotas de petróleo en el agua (Romo, 1998). Por ello, en la actualidad, el conocimiento acerca del comportamiento no newtoniano de determinados fluidos contribuye sustancialmente a la solución de una gran variedad de problemas en las industrias modernas que operan con crudos pesados.

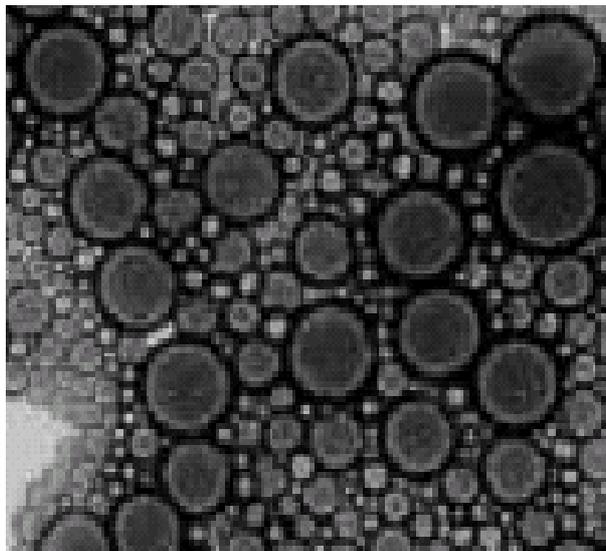


Figura 1. Estructura de la emulsión directa de petróleo pesado.

En la literatura consultada, no se han encontrado modelos que expongan el grado de influencia de variaciones de la temperatura en las propiedades reológicas de las emulsiones no newtonianas de petróleo pesado (15 °API). Vita *et al.* (2001) reportan estabilidades hasta de nueve meses para las emulsiones que contienen aproximadamente de 28 a 30 % de agua, y de alrededor de tres meses para aquellas con 24 a 25 % de agua. La estabilidad de la emulsión mejora al agregar agentes tensoactivos, o sea, sustancias cuyas moléculas están constituidas por una parte apolar (lipofílica) y una polar (hidrofílica). Esta propiedad hace que se ubiquen en la interfase aceite-agua formando una capa monomolecular que disminuye considerablemente la tensión superficial.

En cuanto a la viscosidad, se ha demostrado que existe una distribución de tamaño de gota óptimo, por lo que el diámetro medio de la gota debe estar entre valores de 10 a 30 micras, y su distribución (n), conocida como distribución Rosin-Rammler (Grosso, 1999), entre 0,5 y 1,8. De esta manera se obtiene una emulsión del tipo aceite-agua con viscosidad cercana a la del agua a pesar de la alta concentración de aceite pesado, que además puede ser atomizada, incluso a temperatura ambiente.

El tamaño y distribución óptimos de la partícula dispersa proporciona también emulsiones estables por largos periodos (Nehal *et al.*, 1999).

El comportamiento reológico de las emulsiones es más complicado que el de las suspensiones de sólido en líquido ya que las partículas dispersas en las emulsiones son deformables por naturaleza (Pal & Masliyah, 1990). Por ejemplo, a bajas concentraciones de la fase dispersa, las suspensiones de partículas esféricas rígidas presentan un comportamiento newtoniano mientras que en las emulsiones, al estar constituidas por partículas deformables, la viscosidad disminuye al incrementar el esfuerzo de corte.

Según Caldiño y Salgado (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada funciones reológicas de las mezclas para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos. Por otra parte, Placencia y Martínez (2000) realizan, a nivel piloto, pruebas de formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua y pruebas de reología a diferentes temperaturas, tiempo de almacenamiento y concentraciones de tensoactivo, y determinan el proceso óptimo para la formación de la emulsión según las propiedades reológicas obtenidas.

Esta investigación tuvo como objetivo estudiar el comportamiento reológico de una emulsión de petróleo pesado (15 °API) con vista a obtener la correlación entre las propiedades reológicas y la temperatura, y en función de esta última conocer la viscosidad. Los valores de viscosidad de las emulsiones son requeridos para el diseño, selección y operación del equipo involucrado en su preparación, bombeo y almacenamiento.

MATERIAL Y MÉTODO

Se ensayó una emulsión de petróleo pesado en agua (15 °API) compuesta por 70 % de petróleo, 29 % de agua y 1 % de tensoactivo. Las especificaciones del crudo en estudio están dadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del crudo en estudio

Indicadores	U/M	Especificaciones
Pto de inflamación	° C	67 Min.
Densidad (ρ)	Kg/m ³	982 Máx.
Densidad (API)	°API	15
Valor calórico	kcal/kg	9 600 Min.
Azufre	%	3,5 Máx.
Carbón Conradson	%	17 Máx.
Asfaltenos	%	13 Máx.

Se realizaron, a escala de laboratorio, 9 experimentos con tres réplicas cada uno para valores de temperatura de 15, 25 y 35 °C. El valor de la temperatura se controló con un termostato de +/- 0,5 °C de precisión. Con un reómetro de tubo capilar, de diámetro 0,006 m, se realizaron las pruebas de flujo para diferentes caudales (desde 0 hasta 0,002 m³/s). A partir del cálculo de los esfuerzos de corte (τ) y gradientes de velocidad (γ) se obtuvieron las curvas de flujo (reogramas). 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. Ajustando las curvas de flujo al modelo de ley de potencia de Ostwald de Waele (ecuación 1) se obtuvieron los coeficientes del modelo.

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

Donde:

n : índice de flujo ($n < 1$) para fluidos pseudoplásticos.

K : índice de consistencia másica.

$\left(\frac{dv}{dy} \right)$: Gradiente de velocidad.

En función del modelo (ecuación 1), la viscosidad aparente queda expresada mediante la ecuación 2.

$$\mu_a = K \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1} \quad (2)$$

Una vez obtenidos los parámetros reológicos n y K , sustituyendo en la ecuación 2, 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 de la emulsión. Para obtener el grado de influencia de la temperatura sobre la viscosidad se empleó la ecuación de Andrade (ecuación 3).

$$\mu_a = C \cdot e^{B \cdot t} \quad (3)$$

Donde:

C : Viscosidad infinita.

B : Coeficiente que depende del tipo de fluido.

t : Temperatura en °C.

RESULTADOS

La Figura 2 representa gráficamente la relación entre el gradiente de velocidad y el esfuerzo de corte para cada valor de temperatura, donde puede observarse la forma característica de la curva de un fluido pseudoplástico.

Los modelos ajustados de de la ecuación 1 con los correspondientes valores de n y K para cada temperature se exponent en la Tabla 2. Los resultados evidencian (Tabla 3) que a mayores valores de temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, permaneciendo casi constantes los de índice de flujo, con un valor promedio de 0,64.

El coeficiente de correlación múltiple (R^2) en todos los casos fue superior a 0,980, lo que puede considerarse como satisfactorio e indicativo de que el modelo explica la variabilidad del esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad.

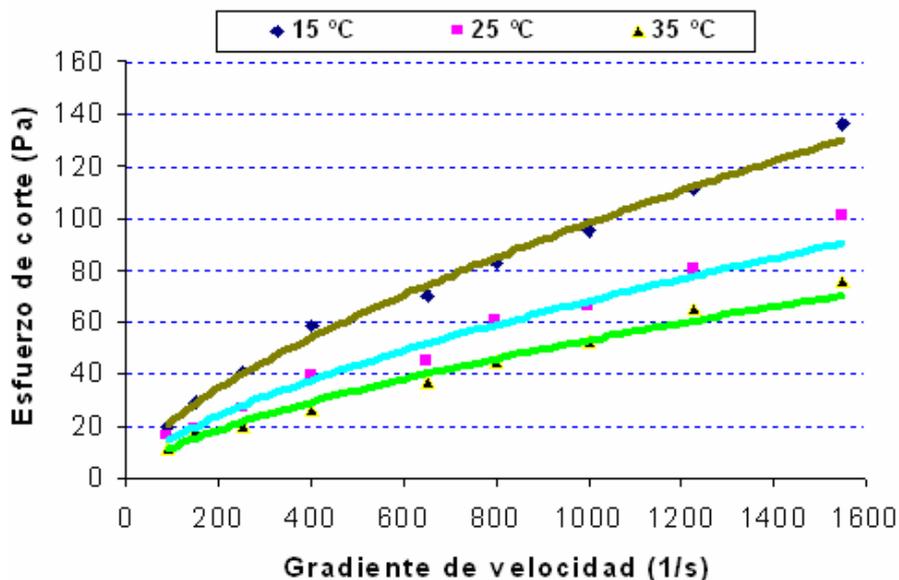


Figura 2. Reograma de la emulsión.

Tabla 2. Correlaciones de esfuerzo de corte vs gradiente de velocidad.

Temperatura	15 °C	25 °C	35 °C
Modelo	$\tau_{x,y} = 1,134 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,646}$	$\tau_{x,y} = 0,819 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,640}$	$\tau_{x,y} = 0,626 \cdot \left(\frac{dv_x}{dy}\right)^{0,643}$

Tabla 3. Parámetros reológicos de la emulsión

Parámetros	Temperatura °C		
	15 °C	25 °C	35 °C
$K(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1,134	0,819	0,626
$n(\text{adim})$	0,646	0,640	0,643
R^2	0,998	0,981	0,982

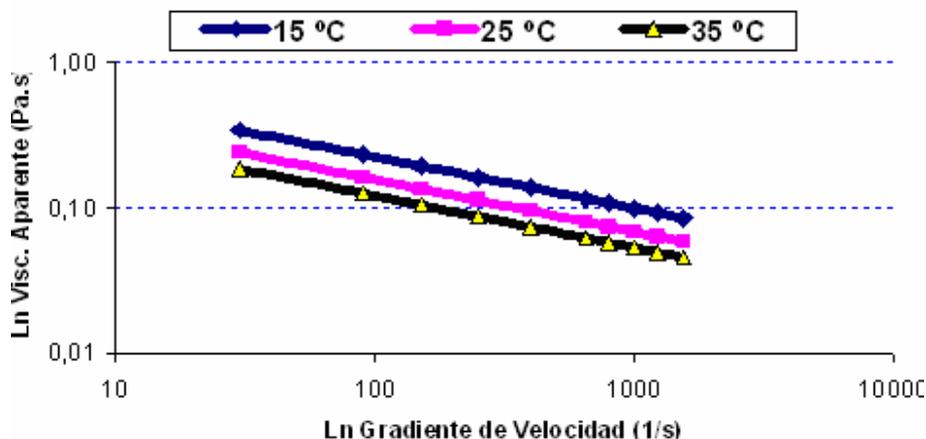


Figura 3. Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

La viscosidad aparente disminuye (Figura 3) con el aumento del gradiente de velocidad para las tres temperaturas estudiadas (15, 25 y 35 °C), lo que permite obtener la correlación entre viscosidad aparente y temperatura (Figura 4). En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Según Garcell (1998) tal disminución se debe, fundamentalmente, a dos efectos:

- a. Disminución de la viscosidad del medio dispersante.
- b. Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

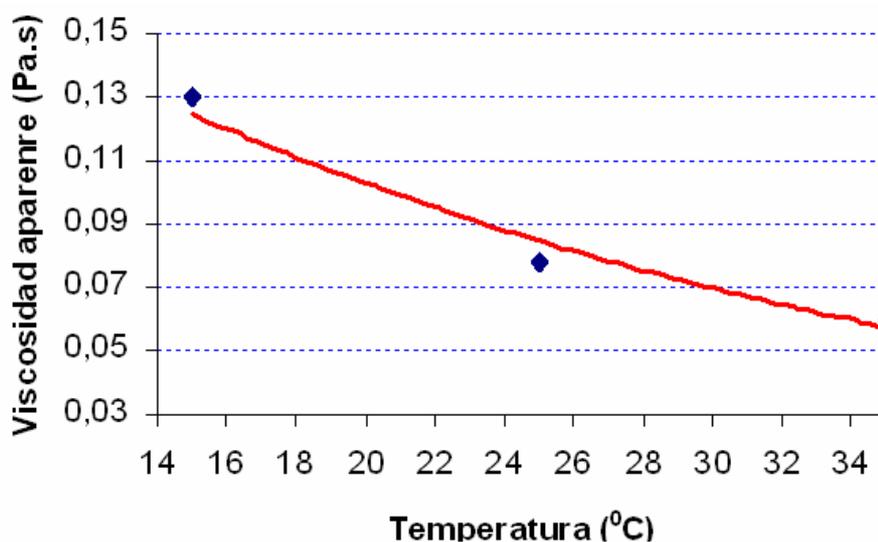


Figura 4. Comportamiento de la viscosidad aparente en función de la temperatura.

Al obtener los valores de tendencia de los puntos observados y realizar el ajuste a la ley exponencial, se obtuvo una probabilidad de 0,96 lo que indica el grado de aproximación de los datos experimentales al modelo expresado mediante la ecuación (4), obtenido a partir de la ecuación (3).

$$\mu_a = 0,22 \cdot \exp(-0,0389 \cdot t) \quad (4)$$

La función obtenida simula el comportamiento de la viscosidad aparente del fluido al variar la temperatura, con la limitante de que es válida sólo en el rango de temperaturas de 15 a 35 °C. De la curva que describe el comportamiento del índice de consistencia másica respecto a la temperatura (Figura 5) se obtuvo el modelo que relaciona ambas variables (ecuación 5).

$$K = 1,8 \cdot \exp(-0,031 \cdot t) \quad (5)$$

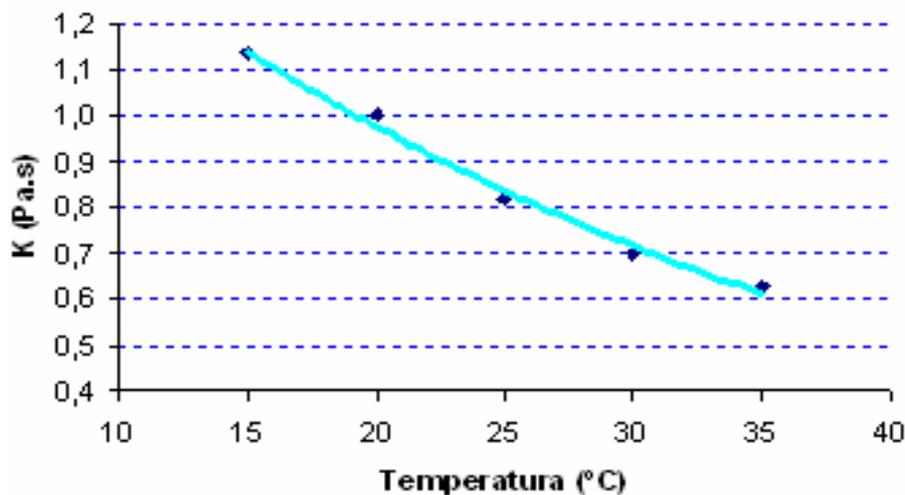


Figura 5. Comportamiento del índice de consistencia másica en función de la temperatura.

La mayor influencia de la temperatura se ha reflejado en el índice de consistencia másica, siendo proporcional a la viscosidad de la mezcla; además, para valores de temperatura

diferentes se puede determinar mediante el modelo obtenido en la ecuación (5) el valor de la variable (K) con una probabilidad del 98,8 %.

Las ecuaciones obtenidas para las condiciones experimentales del presente trabajo son sólo válidas para emulsiones formuladas con un 70 % en peso de petróleo, 29 % de agua y 1 % de tensoactivo, a temperaturas en el rango de 15–35 °C. Estos resultados permiten definir la energía necesaria para el transporte de este tipo de emulsión y sirven de punto de partida para nuevos estudios relacionados con la aplicación de emulsiones de petróleo pesado como vía de mejoramiento de las propiedades de transporte, lo que permitirá la correcta selección y evaluación de los sistemas de bombeo e incidir en la disminución del consumo energético en las instalaciones.

CONCLUSIONES

- Se comprobó que al incrementar la temperatura de la emulsión disminuye la viscosidad aparente y por ende el índice de consistencia, no ocurriendo lo mismo con el índice de flujo, sobre el cual la variación de la temperatura no provocó cambios significativos, manteniéndose su valor entre 0,646 y 0,640.
- De acuerdo con los reogramas, la emulsión de petróleo estudiada tiene un comportamiento pseudoplástico.
- Se obtuvieron los modelos que relacionan, respectivamente, la viscosidad aparente y el índice de consistencia másica con la temperatura, para el intervalo de 15 a 35 °C:

$$\mu_a = 0,22 \cdot \exp(-0,0389 \cdot t)$$

$$K = 1,8 \cdot \exp(-0,031 \cdot t)$$

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALDIÑO, V. & SALGADO, I. 2004. Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris. VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. Morelos, México. (Memorias) 2, 90-22.
- GARCELL, L. 1998. Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions. *J. Colloid Interface*. 205 :470-475.
- GROSSO, J. 1999. Method of Produce Low Viscosity Stable Crude Oil Emulsion, Patente US5863301.
- ROSABAL, J. & GARCELL, L. 1988. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. Tomo I. Pueblo y Educación, La Habana.
- ROMO, L. 1998. Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua. Petroecuador-ESPE. Informe Convenio 96058.
- NEHAL, A.; AMAL, N.; NAEL, Z. & HUSSEIN, K. 1999. Stability and Rheology of Heavy Crude Oil-in-Water Emulsion Stabilized by an Anionic-Nonionic Surfactant Mixture. *Petroleum Science and Technology*. 17(5-6): 553-576.
- PAL, R. & MASLIYAH, J. 1990. Rheology of Oil in Water Emulsions with Added Solids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 68: 24-28.
- PLACENCIA, A. & MARTÍNEZ, D. 2000. Formulación de Emulsiones de Petróleo Pesado en Agua a Nivel Piloto y Estudio de las Pérdidas Friccionales en Tubería. Informe Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico petroecuador, Quito – Ecuador.
- VITA, M.; ALEJANDRO, M.; ARRIOLA, M.; SÁNCHEZ, M.; MANZANARES, E.; ROMO, C. & YERI, R. 2001. Nueva tecnología para la emulsificación de residuales del petróleo en agua. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Boletín IIE*: 131-135, mayo-junio.