

Moistening factor effect on the determination of viscosities for crude oil-solvent mixtures

Laurent Urdaneta, Karina Martínez, José González, Jorge Alaña, Carlos Rincón y César García

Escuela de Ingeniería Química, División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. cgarcia @luz.edu.ve

Abstract

An exhaustive research study about the rheological behavior of the mixtures is developed through the experimental incorporation of the moistening factor, which had been considered as a constant in previous investigations. A model of rotational flow is developed in cylindrical coordinates joined to the viscometers measurements and to the fluid distribution in the measurement region, which lets predict the crude oil viscosity in a more accurate way, analyzing as well the viscosity behavior of different crude oil mixtures at various temperatures and concentrations. Three different viscometers were used at the same mixture, concentration and temperature conditions for each of the measurements made: Brookfield, Ostwald and Cole-Parmer. It was concluded that the moistening factor increases with the angular speed but it decreases with the temperature for crude oil mixtures. Apparent viscosity values, similar to the ones gotten experimentally, were obtained by using the calibration parameters of the instrument Effective Length and Moistening Factor and following the theoretical model adapted to the Couette geometry. The relative average error was 14%. All of the samples showed a non-newtonian rheological behavior, specifically a pseudoplastic type. The crude oil viscosity can be reduced with an increase in temperature and in the amount of solvent.

Key words: Moistening factor, reduction of viscosity, rotational viscosimeter, viscosity.

Efecto del factor humectante en la determinación de viscosidades para mezclas crudo-solvente

Resumen

En esta investigación se desarrolla un estudio exhaustivo del comportamiento reológico de mezclas crudo-solvente incorporando experimentalmente el factor humectante, el cual ha sido considerado como constante en investigaciones previas. Se desarrolla un modelo de flujo rotacional en coordenadas cilíndricas acoplado a las mediciones de viscosímetros y a la distribución del fluido en la región de medición, que permite predecir la viscosidad del crudo de una manera más precisa, analizando el comportamiento de la viscosidad de las mezclas a diferentes temperaturas y concentraciones. Se utilizaron tres diferentes viscosímetros: Brookfield, Ostwald y Cole-Parmer, empleando las mismas condiciones de mezcla, concentración y temperatura para todas las mediciones realizadas. Se concluyó que el factor humectante aumenta con el incremento de la velocidad angular y que disminuye con el aumento de la temperatura. Utilizando los parámetros resultantes de la calibración del viscosímetro Longitud efectiva L_e y Factor humectante λ y siguiendo el modelo teórico adaptado a la geometría Couette se obtienen valores de viscosidad aparente aproximados a los obtenidos experimentalmente. El error relativo promedio es de 14%. Todas las muestras, indican un comportamiento reológico no newtoniano-pseudoplástico. La viscosidad del crudo puede reducirse mediante aumento de temperatura y aumento de la cantidad de solvente.

Palabras clave: Factor humectante, reducción de viscosidad, viscosímetro rotacional, viscosidad.

Introducción

El transporte de soluciones y suspensiones líquidas es un caso común en la Industria Química, Petrolera y Petroquímica y para poder diseñar el mecanismo de transporte más idóneo de un determinado fluido, se requiere conocer su carácter reológico, por lo que se han dedicado esfuerzos experimentales de laboratorio, para predecir el comportamiento reológico de los fluidos en los medios de transporte.

La viscosidad representa una herramienta valiosa para la caracterización de un determinado fluido o mezcla de fluidos. Cuando se trata de sustancias puras, es más fácil determinar sus propiedades reológicas que cuando se tienen mezclas multifásicas y multicomponentes, donde intervienen numerosos factores como la interacción molecular. Para el caso particular del crudo, no existe una ecuación estandarizada que se ajuste a todos los casos prácticos.

Se ha tratado de establecer una ecuación general para los diferentes tipos de crudo pero hasta ahora no ha sido posible, por lo que se hace necesario un estudio sobre el comportamiento reológico del crudo con el fin de establecer un modelo teórico que sea capaz de predecir la viscosidad a diferentes condiciones de temperatura y composición, minimizando errores de calibración y a la vez eliminando aproximaciones [1].

Hasta ahora se han propuesto modelos generalizados para la predicción de viscosidad, pero el problema se presenta cuando muchos de estos son basados en ciertas consideraciones que deriven en errores al realizar dicha predicción. Por esto se presenta la necesidad de estimar adecuadamente ciertos parámetros como lo es el factor humectante, que en estudios previos ha sido considerado constante. El factor humectante conforme a la definición, describe la diferencia de la superficie libre del fluido en rotación respecto a la posición estática, con variaciones para fluidos newtonianos y no newtonianos [2].

En este estudio es imperante el efecto del grado de concentración y la temperatura de la mezcla, así como también la configuración del viscosímetro utilizado. En general, la viscosidad aparente definida como la relación entre el esfuerzo viscoso y la velocidad de deformación muestra dependencia con los parámetros reológicos,

las variables de flujo rotacional, los valores de mezcla crudo-solvente y las condiciones operacionales de presión y temperatura.

A pesar del esfuerzo de muchos investigadores en proponer un modelo generalizado para la predicción de viscosidades en crudos se han presentado errores en la estimación de la misma. Dicho error se traduce en aproximadamente 20% de desviación de la medición a temperatura ambiental para crudos con viscosidades mayores de 100000 cP, los cuales resultan en pérdidas económicas ocasionadas por un mal diseño del sistema de transporte del fluido en cuestión [3].

Con el fin de disminuir estos errores y realizar una predicción mucho más acertada, se estudió el comportamiento de la viscosidad aparente del crudo, determinando a partir de calibraciones el factor humectante, a fin de poder establecer un modelo teórico capaz de predecir la viscosidad de una manera más precisa, a partir de las mediciones básicas de todo viscosímetro rotacional [4].

Una vez ajustada una correlación entre los datos de reología y el comportamiento del fluido, el procedimiento puede entonces revertirse, de tal manera que la data reológica podría ser usada para predecir el comportamiento del fluido.

Esta investigación está delimitada a realizarse utilizando mezclas entre un fluido muy viscoso como lo es el crudo proveniente de Campo Boscán y diferentes solventes como el kerosén, la nafta y el benceno, a diferentes concentraciones y temperaturas, para entonces obtener la data reológica a partir de tres diferentes viscosímetros como lo son: Brookfield, Ostwald y Cole-Parmer.

Parte Experimental

Para llevar a cabo el estudio se utilizaron los siguientes equipos de medición que se encuentran en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Petroleras de la Universidad del Zulia (INPELUZ). Entre los más importantes se encuentra el viscosímetro rotacional Dial Brookfield, modelo HBT, el cual dispone de 6 vástagos cuyos diámetros oscilan entre 14.62 y 56.26 mm. El contenedor de la muestra consiste en un beaker de 600 mL y 83 mm de diámetro interno. El viscosímetro mide el torque requerido para hacer rotar un elemento inmerso en el fluido (vástago ó

cilindro interno) o lo que es lo mismo, para superar la resistencia viscosa al movimiento inducido. El vástago es manejado por un motor sincrónico a través de un resorte calibrado; la deflexión de este resorte es indicada por un apuntador dial rojo y es proporcional a la viscosidad del fluido. El motor permite seleccionar 8 velocidades distintas (100, 50, 20, 10, 5, 2.5, 1 y 0.5 rpm). Para un material de una viscosidad dada, la resistencia será mayor a medida que el tamaño del vástago y la velocidad de rotación aumenten. Para el modelo HBT, el torque del resorte es equivalente a 57496 dina*cm. Para convertir la lectura del dial a cP se multiplica este valor por el factor correspondiente al vástago y a la velocidad de rotación [5, 6].

Para efectos de comparación, se dispuso de otros viscosímetros como el Cole Parmer, el cual es también un viscosímetro rotacional digital y el Ostwald que consiste en un tubo capilar en forma de U y se encuentra disponible para varios factores obtenidos al ser calibrado. A través de este último se obtiene la viscosidad cinemática del crudo, cuyo principio de medición se basa en la Norma ASTM D-446 e ISO 3105, esto es el tiempo en el que el fluido fluye de un punto a otro a través de un capilar [7, 8]. Para los ensayos a diferentes temperaturas se utilizó un baño de aceite con circulación y control de calentamiento. Se utilizaron también varios hidrómetros para determinar la gravedad API de las muestras de crudo y las mezclas de éste con los solventes, por medio del método del hidrómetro según la Norma ASTM D-287 así como también utensilios de vidrio como vasos de 600 mL, cilindros graduados de 50, 100 y 250 mL, varillas de vidrio, termómetros, espátulas, etc.

Las muestras de crudo fueron proporcionadas por la Fundación Laboratorio de Servicios Técnicos Petroleros del INPELUZ, a donde usualmente llegan provenientes del Campo Boscán para la realización de ciertas pruebas convencionales, tales como: gravedad API, contenido de agua y sedimentos (% A y 5), etc. Las muestras de los solventes utilizados como Kerosén, Nafta liviana y Benceno fueron también proporcionadas por esta institución para la preparación de mezclas de Crudo Boscán.

Como fluido de calibración se utilizó el Fluido 5000 estándar de Calibración Brookfield su-

ministrado por los proveedores del instrumento que es una especie de aceite lubricante utilizado para la calibración del viscosímetro, fluido newtoniano de viscosidades conocidas en el rango de temperaturas bajo estudio, con el cual se puede evaluar el factor humectante λ y la longitud efectiva de líquido en la región anular L_e . Los parámetros λ y L_e se incorporan en el modelo teórico conjuntamente con las mediciones operacionales del viscosímetro para el análisis reológico del fluido problema-mezcla de crudo/solvente

Procedimiento:

Los pasos a seguir para la obtención de los datos experimentales fueron los siguientes:

1. Calibración del viscosímetro Brookfield con su respectivo fluido de calibración.
2. Medición de viscosidad de cada uno de los solventes: Kerosén, Nafta liviana y Benceno.
3. Medición de viscosidad del crudo a 25°C, 40°C y 70°C con los viscosímetros Brookfield, Cole-Parmer y Ostwald.
4. Obtención de las diferentes mezclas crudo-solvente a 60%, 70% y 80% v/v en solución.
5. Medición de la gravedad API del crudo, del solvente y las mezclas a cada una de las concentraciones.
6. Medición de viscosidad aparente de dichas mezclas a 25°C, 40°C y 70°C con los viscosímetros Brookfield, Cole-Parmer y Ostwald.

Resultados y Discusión

Análisis de la naturaleza viscosa de las muestras

En las Figuras 1-3, se ilustra la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación para las mezclas crudo-kerosén, crudo-nafta liviana y crudo-benceno, de 20% de solvente v/v y rango de temperaturas de 25, 40 y 70°C, respectivamente. Del análisis de las figuras, se destaca el comportamiento no-lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación a bajos valores del esfuerzo cortante, mientras la relación se proyecta lineal a altos valores de esfuerzo; por su parte, el incremento de la temperatura genera disminución en los valores del esfuerzo cortante

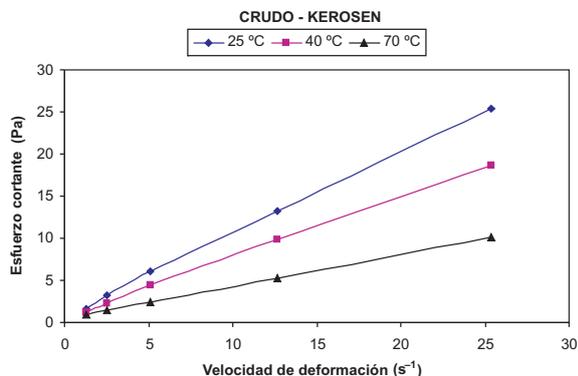


Figura 1. Comportamiento viscoso de la mezcla crudo-kerosén (20% solvente v/v).

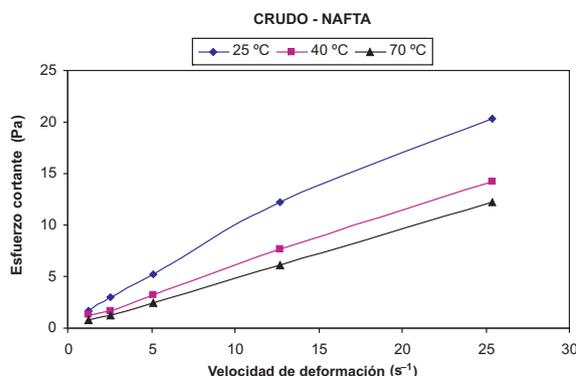


Figura 2. Comportamiento viscoso de la mezcla crudo-nafta liviana (20% solvente v/v).

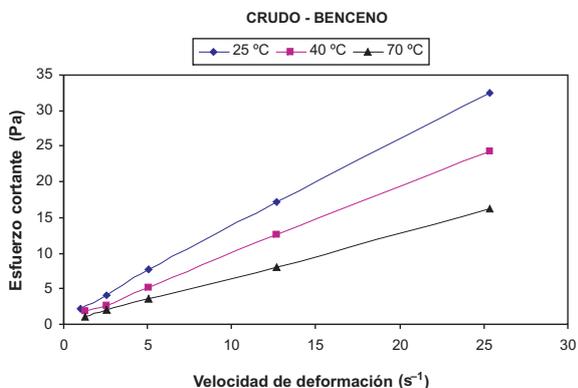


Figura 3. Comportamiento viscoso de la mezcla crudo-benceno (20% solvente v/v).

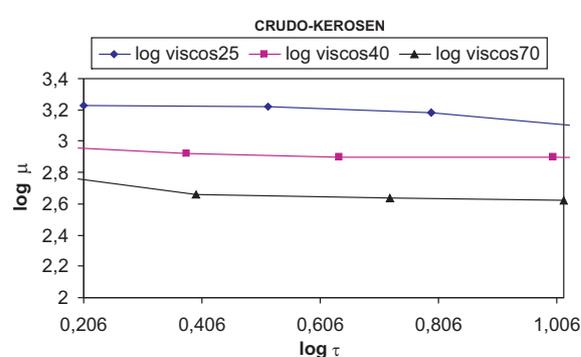


Figura 4. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-kerosén (20% solvente v/v).

con la consecuente disminución de las viscosidades aparentes de las mezclas crudo-solvente.

En las Figuras 4 a la 12 se observa el comportamiento de las mezclas al representar gráficamente la viscosidad aparente μ_a versus el esfuerzo cortante τ_w . Se puede notar el comportamiento no newtoniano específicamente pseudo-plástico para todas las mezclas al mostrar una disminución de la viscosidad con el incremento del esfuerzo cortante. Este resultado reproduce el comportamiento obtenido experimentalmente. Además puede observarse una notable disminución en la viscosidad con el aumento de la Temperatura. Obviamente, los efectos combinados de incremento del solvente y del incremento de la temperatura, reducen la viscosidad aparente de la mezcla y desfavorecen el comportamiento pseudoplástico de la misma; sin embargo, el carácter pseudoplástico se conserva en todo el rango de mezcla y temperatura.

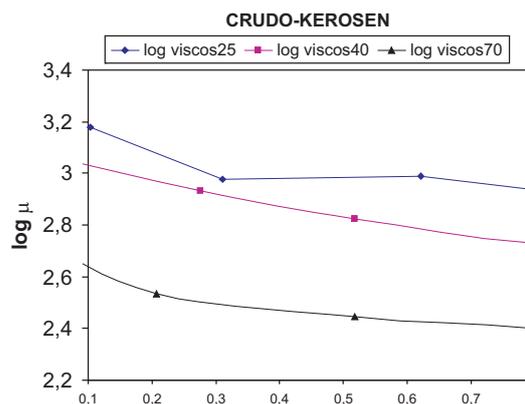


Figura 5. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-kerosén (30% solvente v/v).

Las variables reológicas de esfuerzo de corte y de la velocidad de deformación se relacionaron a través del Modelo de Ellis como ecuación constitutiva de la mezcla crudo-solvente [4]. Así,

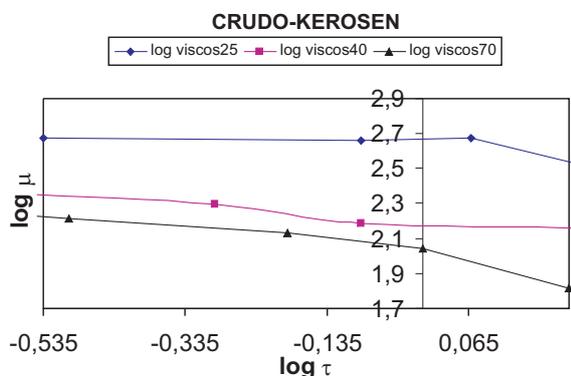


Figura 6. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-kerosén (40% solvente v/v).

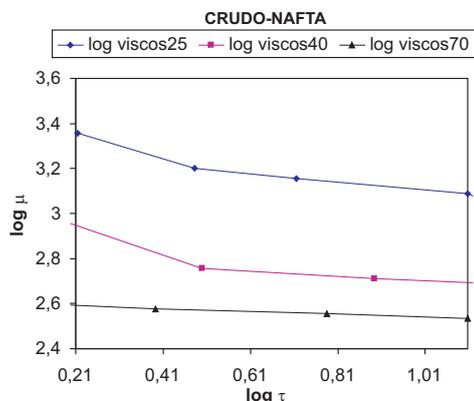


Figura 7. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-nafta (20% solvente v/v).

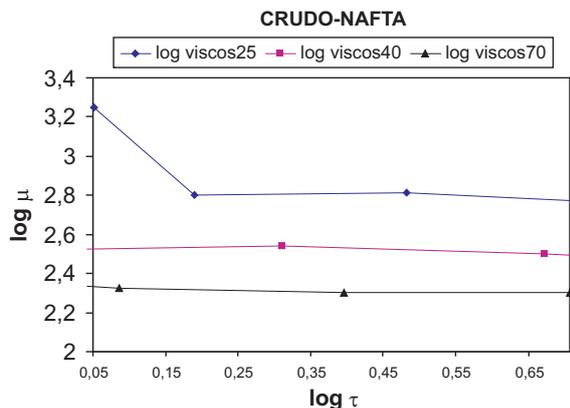


Figura 8. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-nafta (30% solvente v/v).

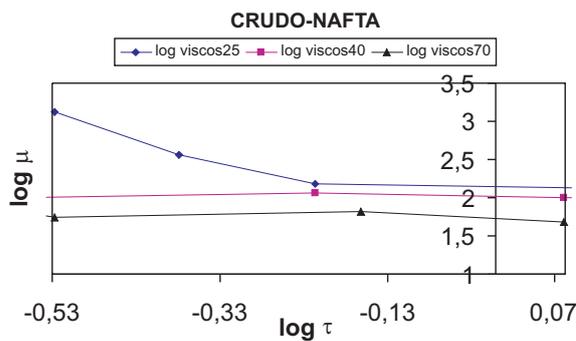


Figura 9. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-nafta (40% solvente v/v).

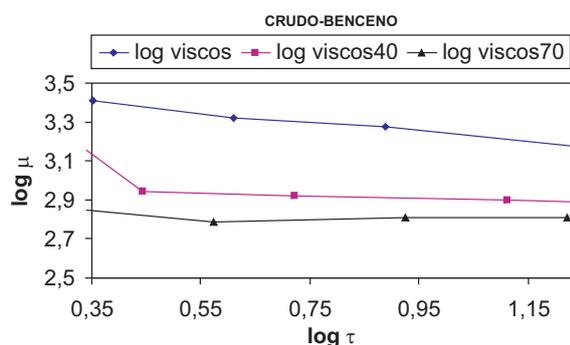


Figura 10. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-benceno (20% solvente v/v).

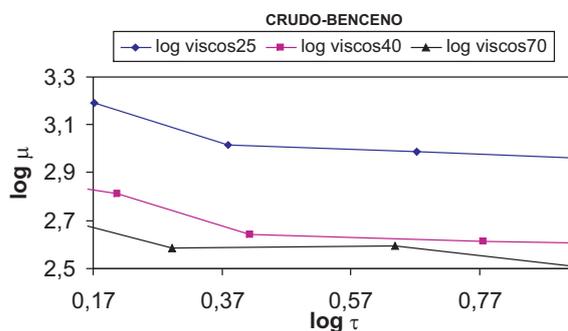


Figura 11. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-benceno (30% solvente v/v).

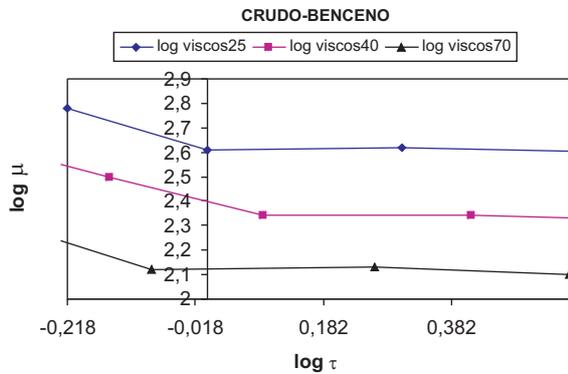


Figura 12. Comportamiento de la viscosidad aparente versus el esfuerzo cortante para la mezcla crudo-benceno (40% solvente v/v).

para la mezcla crudo-kerosén (20% v/v) a 25°C, los datos reológicos se resumen por la ecuación:

$$\tau_w = \frac{1}{0,96 - 0,35\tau_w^{-0,95}} \left(-\frac{dv_\theta}{dr} \right)_{r=R_1}$$

Análisis comparativo para la obtención del mejor valor de factor humectante que reproduzca la viscosidad experimental

El análisis teórico de las ecuaciones del flujo para el establecimiento de la relación funcional entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación referida al viscosímetro rotacional, reside en la sucesiva aplicabilidad de las ecuaciones de continuidad, ecuación de Cauchy y del balance integral de masa del fluido en coordenadas cilíndricas. De esta manera las ecuaciones resultantes se resumen así [9, 10]:

Factor humectante, λ,

$$\lambda = -\int_{R_1}^{R_2} r v_\theta^2 dr \tag{1}$$

Velocidad de deformación

$$-\frac{dv_\theta}{dr} \Big|_{r=R_1} = \frac{3\lambda}{\omega R_1^4} + 2\tau_{w1} \frac{d\omega}{d\tau_{w1}} - \frac{3}{2} \omega \tag{2}$$

Esfuerzo cortante, τ_{w1},

$$\tau_{w1} = \frac{\tau_z}{2\pi R_1^2 L_e} \tag{3}$$

Viscosidad aparente, μ_a,

$$\mu_a = \frac{\tau_{w1}}{\left(\frac{dv_\theta}{dr} \right)_{r=R_1}} \tag{4}$$

donde, λ es el factor humectante, m⁴/s²; R₁, R₂ radios de cilindros coaxiales, m; ω velocidad angular, s⁻¹; τ_{w1} esfuerzo cortante a la superficie externa del cilindro interno, Pa; L_e longitud efectiva, m; τ_z torque axial, dina.cm; μ_a viscosidad aparente, cp; $-\frac{dv_\theta}{dr} \Big|_{r=R_1}$ velocidad de deformación, s⁻¹.

A partir de los parámetros Longitud efectiva L_e y Factor humectante λ de la calibración

Los parámetros de longitud efectiva L_e y factor humectante λ se obtienen a través de la calibración del viscosímetro, para lo cual se cuenta con la data experimental de velocidad angular y torque axial (ω, τ) tomados a partir del Fluido 5000 estándar de Calibración Brookfield. El valor de L_e fue de 1.5 cm. Siguiendo el procedimiento para la caracterización de un fluido viscoso se obtiene la viscosidad aparente para cada una de las muestras evaluadas.

Por otra parte, al comparar los resultados de viscosidad obtenidos experimentalmente con los obtenidos a través de este procedimiento (utilizando los parámetros de calibración L_e y λ) se observa un error absoluto promedio de aproximadamente 14%, el cual es considerablemente bajo dados los altos márgenes de error que comúnmente se presentan en este tipo de mediciones. En la Figura 13 se presenta una gráfica de puntos cruzados entre los resultados experimentales y los estimados, se puede apreciar este margen de error.

A partir del factor humectante teórico # 1 y la Longitud efectiva L_e optimizada

El parámetro factor humectante λ se obtiene a través de la ec. (5) desarrollada a partir del perfil de velocidad para un fluido newtoniano y de la definición del factor λ. La longitud efectiva L_e se optimiza a través de la ec. (6) desarrollada para un fluido dado por el Modelo de Ellis para determinar la velocidad angular del cilindro interior si se conoce el torque axial ejercido sobre el cilindro

exterior. El valor resultante de dicha optimización fue de 1 cm. De la misma manera se siguió el procedimiento para la caracterización de un fluido viscoso a través del cual se obtiene la viscosidad aparente para cada una de las muestras.

$$\lambda = \frac{R_1^4 w_1^2 [4R_2^4 (LnR_1 - LnR_2) + 2R_2^2 (R_2^2 - R_1^2) + 1 / 4(R_2^2 - R_1^4)]}{(R_2^2 - R_1^2)} \tag{5}$$

$$w = A \left(\frac{\mathfrak{S}}{4\pi R_2^2 L} \right) \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right] + \frac{B}{2\alpha} \left(\frac{\mathfrak{S}}{4\pi R_2^2 L} \right)^\alpha \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{2\alpha} \right] \tag{6}$$

Al comparar los valores de viscosidad obtenidos experimentalmente con los estimados a partir de estos parámetros (L_e optimizada y λ teórico # 1) se obtiene un error absoluto promedio de aproximadamente 35%, el cual resultó ser mayor al error que arrojaron las estimaciones realizadas a partir de los parámetros obtenidos de la calibración del viscosímetro. En la Figura 14 se presenta una gráfica de puntos cruzados entre los resultados experimentales y los estimados donde se podrá apreciar el incremento del error, además se puede observar cómo la gran mayoría de las viscosidades son subestimadas (por debajo de la línea de 45°).

A partir del factor humectante λ de la calibración y la Longitud efectiva L_e optimizada

El factor humectante se obtuvo de la calibración del viscosímetro y la Longitud efectiva fue optimizada a partir de la ec. (6), en la cual fueron sustituidos 8 datos de velocidad angular y torque obtenidos experimentalmente con el fluido de calibración a fin de que ésta arrojara el mejor valor de L_e (1 cm); igualmente se procedió a calcular la viscosidad aparente a través del procedimiento convencional para todas las muestras.

Una vez estimadas las viscosidades con el valor optimizado de L_e y el λ de la calibración se compararon éstas con las obtenidas experimentalmente y se calculó el error absoluto total que resultó en un 70% aproximadamente, el cual es aún mayor que el error reportado previamente tanto al combinar los valores de factor humectante y L_e obtenidos a partir de la calibración como al combinar los valores del factor humec-

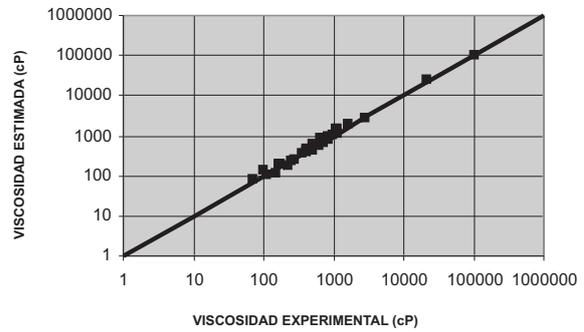


Figura 13. Puntos Cruzados (Viscosidad estimada utilizando los parámetros de calibración L_e y λ).

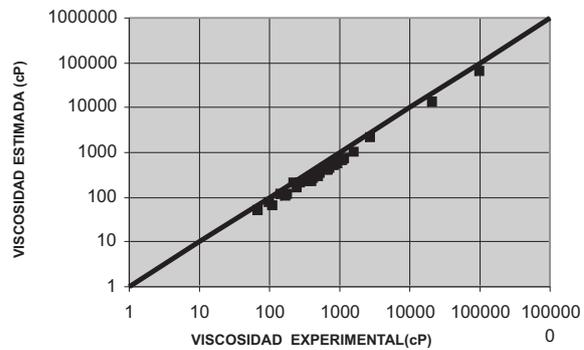


Figura 14. Puntos Cruzados (Viscosidad estimada utilizando los parámetros L_e optimizada y λ teórico).

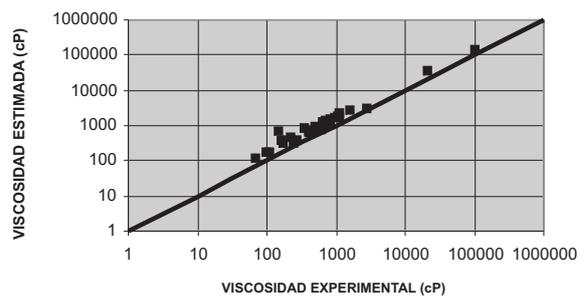


Figura 15. Puntos Cruzados (Viscosidad estimada utilizando los parámetros L_e optimizada y λ de la calibración).

tante teórico # 1 y la L_e optimizada. La Figura 15 es la gráfica de puntos cruzados entre los resultados experimentales y los estimados al utilizar en conjunto el λ de la calibración y la L_e optimizada. Además del incremento del error es evidente

como a diferencia del caso anterior la totalidad de las viscosidades son sobreestimadas (por encima de la línea de 45°).

A partir del factor humectante teórico # 2 y la Longitud efectiva L_e optimizada

El denominado factor humectante teórico # 2 se obtiene a través de la definición del factor λ y de la ec. (7), la cual fue desarrollada suponiendo que el perfil de velocidad para un fluido newtoniano está dado por el producto entre la velocidad angular y la posición radial. La longitud efectiva L_e se obtiene por optimización a través de la ec. (6). Se llevó a cabo el procedimiento para la caracterización de un fluido viscoso para la obtención del valor de la viscosidad aparente para cada una de las mezclas.

$$\lambda = \frac{\omega^2(R_1^4 - R_2^4)}{4} \quad (7)$$

Se realizó la comparación entre la viscosidad experimental y la viscosidad estimada a partir de la L_e optimizada y el λ teórico # 2 y se obtuvo un error absoluto promedio alrededor del 83%, el cual es aún mayor que todos los reportados anteriormente. La Figura 16 presenta la gráfica de puntos cruzados entre los resultados experimentales y los estimados donde se podrá apreciar el mayor error obtenido, por lo que se puede afirmar en base a los datos recolectados que este es el procedimiento menos indicado para la estimación de viscosidad. La totalidad de las viscosidades son subestimadas. La diferencia entre los valores de viscosidad experimental y estimada, es atribuible al factor humectante dado por la ecuación 7 que supone un perfil lineal de velocidad para el fluido en rotación, que genera mayores valores de la velocidad de deformación y así menores valores de la viscosidad estimada.

Conclusiones

Del análisis de los resultados, se derivan las siguientes conclusiones:

1. El modelo teórico de Couette con los parámetros de calibración del viscosímetro rotacional, longitud efectiva (L_e) y factor humectante (λ) genera valores de viscosidad aparente aproximados a los obtenidos experi-

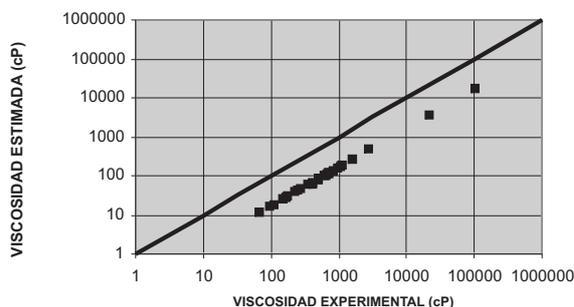


Figura 16. Puntos Cruzados (Viscosidad estimada utilizando los parámetros L_e optimizada y λ teórico # 2).

mentalmente con un error absoluto promedio del 14%.

2. El factor humectante muestra variación frente a las condiciones de calibración del viscosímetro, aumenta con el incremento de la velocidad angular y disminuye con el aumento de la temperatura para las mezclas crudo-solvente.
3. Las mezclas de Crudo Boscán y solventes estudiadas mostraron un comportamiento reológico del tipo no-newtoniano pseudo-plástico, al observarse que la viscosidad aparente disminuye con el incremento del esfuerzo cortante.
4. El carácter pseudoplástico de las mezclas crudo Boscán-solvente resulta favorecido con el aumento de la concentración de crudo, no así con el aumento de la temperatura. Al incrementar la concentración de crudo, se incrementa el esfuerzo cortante, mientras el incremento de temperatura reduce la viscosidad aparente de la mezcla.

Referencias Bibliográficas

1. Fang W. y Lei Q.: "Generalized Correlation for predicting the kinematic viscosity of liquid petroleum fractions". Fluid Phase Equilibria Journal, Vol. 166, No. 1 (1999) 125-139.
2. Gutiérrez E. y García C.: "Modelo Generalizado de Couette-Efectos Térmicos". Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 4, Nos. 1 y 2 (1981).
3. Rodríguez C.: "Predicción de viscosidad de mezclas de crudo provenientes del Campo Urdaneta Oeste". Trabajo Especial de Grado.

- Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. 2004.
4. Urdaneta L.: "Efecto del factor humectante en la determinación de viscosidades para mezclas crudo-solvente". Trabajo de Grado. División de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. 2005.
 5. Brookfield Engineering Laboratories, Inc.: "More Solutions to Sticky Problems". Guía de Usuario del Viscosímetro Brookfield.
 6. Brookfield Dial Viscometer. "Operating instructions". Manual No. M/85-150-N898.
 7. ASTM Standard. "Standard Specifications and operating Instructions for glass Capillary Kinematic Viscometers". D446-93.
 8. ISO Standards. "Glass Capillary Kinematic Viscometers-Specifications and Test Methods". ISO 3105.
 9. García C.: "Fenómenos de Transporte de Fluidos Puramente Viscosos". Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, 2001.
 10. Rincón Y., García C., Sarmiento C., Rincón C. y Mata F.: "Predicción de las ecuaciones constitutivas para suspensiones de carbón-agua". Ciencia, Vol. 11, No. 1 (2003) 77-86.

Recibido el 26 de Febrero de 2007

En forma revisada el 14 de Abril de 2008