

Estudio de coeficientes reológicos de un crudo extrapesado mezclado con un biorreductor de viscosidad

Rheological coefficient Study of an extra heavy crude oil dosage with a viscosity bioreducer

Edgardo-Jonathan Suárez-Domínguez^I, Rigoberto Manuel-Rivera^{II}, Allan-Uriel Coronel-Santillán^{II}, Arturo Palacio-Pérez^{III}, Elena Izquierdo-Kulich^{IV}

I. Mexican Institute of Complex Systems. Tamaulipas, México

II. Geo Estratos S.A. de CV. Tamaulipas, México

III. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería. México, D.F., México

IV. Universidad de la Habana. Facultad de Química. La Habana, Cuba

Correo electrónico: jsd@mics.edu.mx

Recibido: 2 de enero de 2015

Aceptado: 28 de abril de 2015

Resumen

En este trabajo se realizó un análisis de los coeficientes de ajuste reológicos determinados a partir del comportamiento de los esfuerzos de corte en un amplio rango de gradientes de velocidad aplicados a un crudo de viscosidad mayor de 40000 cP a 25 °C. Los ensayos se llevaron a cabo para diversas temperaturas y concentraciones de un reductor de viscosidad. Se encontró que a temperaturas menores de 25 °C este crudo extrapesado tiene comportamiento No-Newtoniano de tipo pseudo-plástico, asociado

a los menores esfuerzos de corte requerido. Esto último también se obtiene a bajas temperaturas pero añadiendo el biorreductor de viscosidad (BRV), mostrando su efecto al disminuir los esfuerzos cortantes requeridos para movilizar al hidrocarburo.

Palabras claves: reología de crudo, petróleo extrapesado, biorreductor de viscosidad.

Abstract

An analysis of rheological adjustment coefficients is here presented, based on the experimental determination of the shear stress for a wide range of velocity gradients, applied to extra heavy oil crude with a viscosity up to 40000 cP at 25 °C. A series of tests were performed for various temperatures and concentration values of a viscosity reducer. It was found that at temperatures below 25 °C the crude behavior is non-Newtonian, of the shear thinning type,

while at temperatures above 30 °C behavior tends to be Newtonian, associated to the lower shear stresses required. This latter behavior is achieved at low temperatures too, when adding the viscosity reducer, showing the positive effect of this additive (BRV), which decreases the shear stress required to set the oil crude in motion.

Key words: crude oil rheology, extra heavy oil, viscosity bioreducer.

Introducción

Actualmente en la región norte de México se encuentran en explotación un número significativo de pozos de petróleo pesado [1] donde la alta viscosidad característica de este tipo de crudo genera problemas operacionales, entre los que se pueden señalar la precipitación de asfaltenos en la pared de los ductos y la alta potencia de bombeo requerida, lo cual eleva significativamente los costos de producción [2] y la probabilidad de fallas.

Se han desarrollado diferentes técnicas para mejorar la factibilidad económica de este tipo de operación, como la inyección de gas para generar un flujo bifásico que tiene asociada una menor caída de presión por fricción, la elevación de temperatura para la disminución de la viscosidad [3] y el empleo de agentes químicos reductores de viscosidad (mejoradores de flujo).

La viscosidad es una propiedad de transporte de los fluidos que es muy difícil de estimar mediante modelos teóricos, sobre todo cuando se trata de mezclas complejas, como es el caso de los crudos [4], siendo en ocasiones mejor preparar fluidos modélicos [5, 6]. En este caso la caracterización reológica se realiza a través de modelos empíricos, los cuales se ajustan mediante técnicas estadísticas a los datos experimentales observados y generalmente relacionado con sus componentes y fases presentadas [7, 8]. La estimación del comportamiento de esta propiedad adquiere especial importancia cuando se emplean agentes reductores de viscosidad ya que generalmente se ve modificada [9, 10], o cuando se emplean emulsiones para mejorar el transporte donde la emulsión tienen un comportamiento reológico muy distinto al del mismo crudo sólo [11]; también es esencial cuando se realiza el diseño de monitoreo de oleoductos [12] y es vital para poder determinar las condiciones de operación [13] y por ende para lograr que económicamente resulte más factibles.

En este contexto, es importante señalar que cada crudo tiene un comportamiento reológico específico, por lo que no ha sido posible obtener modelos generales que sean apropiados a todas las situaciones que se puedan presentar.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento reológico de un crudo pesado de la región norte de México, en función de la temperatura y la concentración de un agente reductor de viscosidad de origen biológico.

Métodos y Materiales

Modelo teórico

La alta viscosidad de los crudos pesados implica que en la mayoría de los casos prácticos el régimen de flujo característico sea de tipo laminar, donde la caída de presión por fricción en el ducto es inversamente proporcional a la viscosidad. En muchos casos el comportamiento reológico de estos fluidos depende del tipo de flujo y el gradiente de velocidad. Debido a esta característica no-Newtoniana, la caracterización reológica se lleva a cabo a través de la viscosidad aparente η , donde el modelo más frecuentemente utilizado es el exponencial [14], ecuación 1:

$$\eta = K(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

Donde

K ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-n}$) es la consistencia $\dot{\gamma}$ (s^{-1}) es el gradiente de velocidad, y n es el orden del flujo. Los valores de K y n , que son los parámetros de este modelo, se determinan experimentalmente.

La constante K es una medida de la consistencia del fluido, que se puede interpretar como una medida de su resistencia a la deformación, y es un parámetro que depende de la temperatura y la composición de la mezcla. El orden de flujo es indicativo de la desviación respecto al comportamiento newtoniano del fluido, y se suele relacionar con las interacciones moleculares y el ordenamiento espacial de las macro moléculas entre las capas del fluido, donde este ordenamiento espacial puede o no favorecer el movimiento del fluido.

En el caso bajo estudio el objetivo fundamental consistió en determinar cómo y n se relacionan con la temperatura y la composición de un agente reductor de viscosidad tomando en cuenta que en el caso de los fluidos Newtonianos el orden del flujo es igual a cero y la viscosidad aparente es igual a la viscosidad propia del fluido. Se establece como hipótesis que la consistencia se expresa a través de la suma de dos funciones que dependen de la temperatura y la concentración.

Para asumir las funciones del modelo se tomaron en cuenta dos aspectos fundamentales. El primero considera que los modelos teóricos desarrollados para líquidos puros predicen que existe una dependencia de la viscosidad μ (Pa.s) y la temperatura T del tipo (ecuación 2):

$$\mu(T) = C_1 \exp\left(\frac{C_2}{T}\right) \quad (2)$$

El segundo aspecto fue establecido a priori y considera que existe una dependencia exponencial entre la viscosidad de un fluido Newtoniano y la concentración B del mejorador de flujo:

$$\mu(T) = A_1 \exp(-A_2 B) \quad (3)$$

En las ecuaciones 2 y 3 las constantes C_1 , C_2 , A y B dependen de las características del fluido y se obtienen al ajustar la ecuación con los resultados experimentales. Se determinan a partir de los resultados experimentales obtenidos.

A partir de estas consideraciones se establece como hipótesis que la consistencia K puede describirse a partir de una función del tipo:

$$K = C_1 \exp(-C_2 B) + C_3 \exp\left(\frac{C_4}{T}\right) + C_5 \quad (4)$$

Para el ajuste del modelo dado por la ecuación 4 se requiere utilizar técnicas estadísticas de regresión no lineal a partir de las cuales se determina su validez.

En el caso del orden de flujo, la complejidad de los fenómenos involucrados hace imposible establecer un modelo a priori, por lo que se emplean técnicas de regresión lineal para el ajuste de modelos estadísticos a partir de las observaciones experimentales.

Metodología

A partir de una muestra proveniente de la zona norte de México, se determinó la gravedad específica API (*American Petroleum Institute*) considerando la norma ASTM D1298, el contenido de agua emulsionada con la norma ASTM D96, el contenido de agua libre con la norma ASTM D4007, el contenido de asfaltenos de acuerdo con la norma ASTM D6560, el contenido de parafinas mediante el método de Burguer, la viscosidad

de acuerdo con la norma ASTM D2196, y el pH del agua contenida en la muestra de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-008.

Se formaron grupos por triplicado de muestras, dosificando 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000 ppm de un reductor de viscosidad denominado BRV, una formulación a base de compuestos obtenidos de aceites vegetales [15]. Las mezclas se homogenizaron manualmente por agitación continua aproximadamente a razón de 70 rpm durante 5 minutos, moviendo en todos los sentidos el crudo.

Una vez homogeneizadas las muestras, se realizaron ensayos empleando un reómetro marca *Anton Paar* modelo MCR-302 a temperatura controlada de 15, 30, 60 y 90 °C, utilizando un intervalo de gradientes de velocidad desde 0.001 s^{-1} hasta 289 s^{-1} , y en un sistema de medición de placas paralelas, colocando 10 g de muestra sobre el plato inferior estático.

Resultados y Discusión

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos a nivel laboratorio del crudo utilizado en esta investigación.

Tabla 1. Caracterización general del crudo

Gravedad específica API	Densidad (g/cm^3)	% (V/V) sedimentos	% (V/V) Agua	% (V/V) aceite	Viscosidad cP	Temperatura °C
$10,3 \pm 0,1$	$0,998 \pm 0,002$	< 0,1	< 0,1	$99,9 \pm 0,1$	$44,539 \pm 006$	$25,0 \pm 0,1$

A partir de los resultados experimentales y el programa STATGRAPHICS, se ajustó el modelo de consistencia representado por la ecuación 5 mediante la técnica de regresión no lineal Marquard, encontrándose como resultado:

$$K = 0,9954 \exp(-0,9063B) + 8,4686 \exp\left(\frac{25,6072}{T}\right) - 12,8967 \quad (5)$$

El valor de coeficiente de correlación r^2 es de 97,4583, indicando una correlación estadística significativa entre la variable dependiente y las independientes, con un error estándar de 0,7244, por lo que el modelo es aceptado. Esto es menos notorio a valores de temperatura bajas.

En las figuras 1 y 2 se muestran los comportamientos experimentales y predichos de la constante de consistencia, así como el comportamiento predicho vs observado experimentalmente. El valor de K experimental se calcula a partir de los datos obtenidos con el reómetro (esfuerzo cortante, rapidez de deformación y viscosidad).

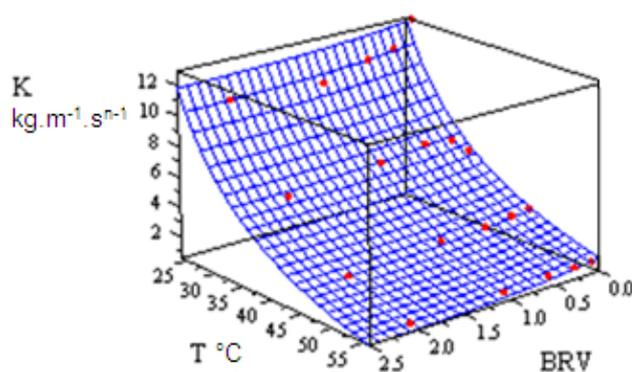


Fig. 1. Comportamiento experimental (puntos) y comportamiento predicho (ecuación 5, línea), BRV en fracción en volumen

En la figura 1 se observa que los resultados experimentales se encuentran en la misma región espacial que los resultados teóricos; el valor del coeficiente de consistencia disminuye con la temperatura, y decrece con la concentración de BRV, especialmente a bajas temperaturas; a temperaturas del orden de 40 °C o más, el cambio de K es poco sensible a la concentración del reductor de viscosidad. Este resultado concuerda con las observaciones experimentales en el sentido de que el crudo tiende a disminuir su viscosidad con el aumento de la temperatura, y a mayor concentración de aditivo, habiendo un compromiso entre ambos.

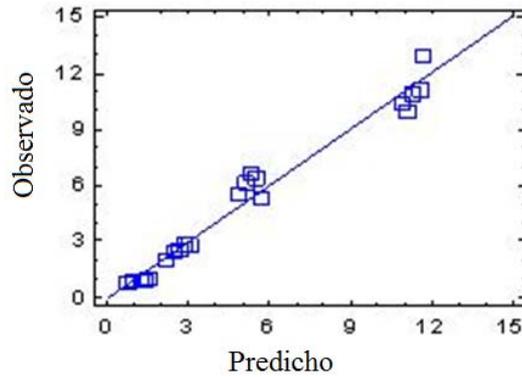


Fig. 2. Comportamiento del coeficiente de consistencia predicho vs observado (experimental).

La consistencia de la mezcla crudo-BRV se encuentra en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{n-1}$

En la figura 2 se muestran los valores predichos del coeficiente de consistencia con los obtenidos a partir de los datos experimentales mediante el reómetro. Las desviaciones de los puntos con respecto a esta línea se debe a las limitaciones propias del modelo, ya que pueden ocurrir procesos que influyan sobre la consistencia que no se conocen o se comprenden del todo y además a que el modelo es fundamentalmente empírico, sin considerar de forma explícita los procesos de interacciones moleculares que tienen lugar en el sistema que influyen sobre su reología.

Para analizar la influencia de la temperatura y la concentración de BRV sobre el orden de flujo, se aplicó la técnica estadística de análisis multivariable, obteniéndose como resultado:

$$n = 0,816645 - 0,00652474 B + 0,00249039 T \tag{6}$$

El test ANOVA es una prueba estadística estándar a través de la cual se establece si existe dependencia estadística entre dos variables en base a la suma de los cuadrados de los residuos, y los grados de libertad. En este caso se obtuvo un coeficiente de correlación de 48,3773 %. El valor de p (que representa la probabilidad estadística) en la tabla ANOVA es menor que 0,01, lo que indica una relación estadísticamente significativa entre la variable dependiente y las independientes. Los valores de los coeficientes ajustados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados del ajuste del modelo para el orden de flujo

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T
constante	0,8166	0,0272	29,9396
B	- 0,0065	0,0099	- 0,6590
T	0,0024	0,0006	3,9366

En la figura 3 se presenta la variación del coeficiente n con respecto a la temperatura, resultando claro que tiene una tendencia de aumento con la temperatura, lo cual en este caso indica que mientras más aumenta esta variable, el valor del orden de flujo tiende a 1, es decir, se aproxima más al comportamiento Newtoniano.

Los resultados experimentales del coeficiente n y los predichos por el modelo se muestran en la figura 4 las discrepancias son menores del 10 %.

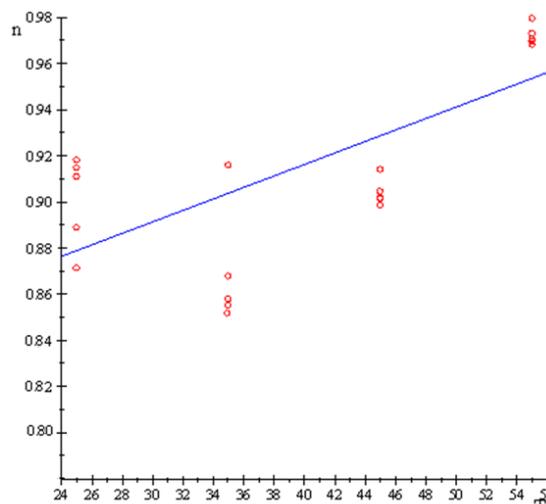


Fig. 3. Resultados predichos (línea) y experimentales (puntos) con respecto a la temperatura

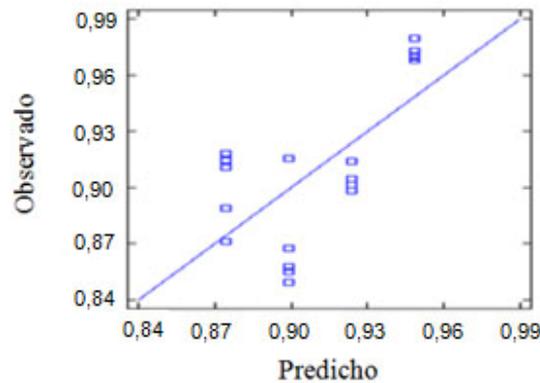


Fig. 4. Comportamiento predicho vs observado experimentalmente para el orden de flujo n

La viscosidad del flujo es directamente proporcional a la consistencia, de la tal forma que esta se relaciona con el rozamiento entre las capas del fluido en el régimen laminar y con la transferencia del momento a nivel molecular. Los resultados experimentales indican que el incremento de la temperatura disminuye significativamente la viscosidad aparente, lo cual corresponde con el comportamiento de esta propiedad en los líquidos. Por otra parte, la disminución de la consistencia con respecto a la concentración de BRV, especialmente a baja temperatura, puede atribuirse a la influencia de este compuesto sobre la fase asfáltica presente en los crudos extrapesados y que se encuentran como los principales responsables de su alta viscosidad [7]. En este sentido, el grado de dispersión de los asfaltenos y la estabilidad de la solución coloidal formada por los agregados de asfaltenos y los hidrocarburos se incrementan con la concentración de BRV, una situación similar a la que ocurre en los sistemas coloidales cuando se añaden agentes que incrementan la estabilidad de la dispersión [15]. Resultados similares se han presentado en capas de asfaltenos que han sido estabilizadas con este mismo compuesto, manifestándose en una homogenización de dicha fase [9].

En relación con el orden de flujo, se obtuvo que el parámetro que tiene un efecto mayor es el de la temperatura (se encuentra un incremento de n con respecto a la temperatura para valores menores que 1), siendo menor el efecto de la concentración de BRV. Este comportamiento puede ser explicado en el sentido de que las fluctuaciones a nivel microscópico de las moléculas, en donde a mayor temperatura existe una aleatoriedad mayor y menor interacción entre ellas, contrario a bajas temperaturas.

Conclusiones

Se estudió el comportamiento reológico de un crudo pesado del norte de México, en función de la temperatura y de un agente reductor de viscosidad, observándose características No-Newtonianas que se describieron mediante el modelo potencial de viscosidad aparente. Se propuso un modelo no lineal para describir una dependencia exponencial de la consistencia con respecto a la temperatura y la concentración del mejorador de flujo, respectivamente, cuyos parámetros fueron ajustados mediante técnicas de regresión no lineal.

También se obtuvo un modelo, mediante una técnica estadística de análisis multivariable, que indicó que el orden de flujo se incrementa con la temperatura, tal como se sucedió en los resultados experimentales. Aunque el carácter estadístico de los modelos obtenidos les confiere como limitación que estos solo son válidos para el crudo analizado y el mejorador de flujo estudiado, pueden emplearse para realizar ajustes operacionales en el proceso de extracción y transporte de este crudo.

En este trabajo se encontró que el biorreductor de viscosidad utilizado influye predominantemente en la consistencia, y en menor medida en el orden de flujo, mientras que la mayor influencia de la temperatura está en el orden de flujo. De esta manera, como la consistencia depende de la concentración de BRV, entonces éste influye sobre la viscosidad aparente y en el comportamiento reológico del crudo

Escribir usando El estilo Texto, tecla F2

Referencias

- García F, Haoulo M. Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Aire-Agua en Tuberías Horizontales y Ligeramente Inclinadas. *Información Tecnológica*. 2009;20(3):3-12. ISSN 0718-0764.
- Mandhane, J, Gregory G, Aziz K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*. 1974;1(4):537-53. ISSN 1743-3533.
- Mukherjee H, Brill J. Pressure drop correlations for inclined two-phase flow. *Journal of energy resources technology*. 1985;107(4):549-54. ISSN 0195-0738.
- Xiao J, Shoham O, Brill J. A comprehensive mechanistic model for two-phase flow in pipelines: University of Tulsa; 1990.
- Doron P, Granica D, Barnea D. Slurry flow in horizontal pipes—experimental and modeling. *International Journal of Multiphase Flow*. 1987;13(4):535-47. ISSN 0301-9322.
- Taitel Y, Dukler A. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*. 1976;22(1):47-55. ISSN 1547-5905.
- Ruzicka MC. On bubbles rising in line. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000;26(1141-1181). ISSN 0301-9322.

8. Chen R, Dong PF, Xu J, et al. Controllable microfluidic production of gas-in-oil-in-water emulsions for hollow microspheres with thin polymer shells. *Lab on a Chip*. 2012;12(20):3858-60. ISSN 1473-0197.
9. Baz Rodríguez S, Ramírez Muñoz J, Soria A, et al. Hydrodynamic Interaction of Two Spherical Bubbles Rising In-Line: A Semi-Analytical Approach. *Chemical Engineering Communications*. 2014;201(5):674-87. ISSN 0098-6445.
10. Baz Rodríguez S, Ramírez Muñoz J, Soria A. In-line interaction between two spherical particles due to a laminar wake effect. *International Journal of Multiphase Flow*. 2012;39:240-4. ISSN 0301-9322.