

# Modelo reológico para mezclas fluidas de carbón mineral

Henry Leal<sup>1</sup>, Pragedes Paredes<sup>1</sup> y César García<sup>2</sup>

<sup>1</sup>División de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela.

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería de Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.

Recibido: 07-02-2016.

Aceptado: 04-04-2017.

## Resumen

La determinación correcta de la viscosidad de mezclas líquido – sólido es importante para su correcta utilización, actualmente no se conocen correlaciones empíricas que permitan determinar de manera precisa la viscosidad de dichas mezclas, por lo que el presente trabajo planteó desarrollar un modelo reológico para la determinación de la viscosidad de mezclas carbón mineral- agua, carbón mineral – kerosene, carbón mineral - fuel oil y carbón mineral - nafta mediante la fluidización de lechos de partículas sólidas. Para la fluidización se utilizó un lecho de carbón mineral de diferentes granulometrías variando la velocidad de flujo para observar la altura del lecho y caídas de presión a la velocidad dada. Una vez obtenidos estos datos, se procedió a determinar el esfuerzo cortante para cada caída de presión y posteriormente con la ecuación de Rabinowitsch se determinaron las velocidades de deformación para cada caudal, y de esta manera se realizó la clasificación de los fluidos, obteniéndose que el comportamiento reológico de la mezcla fluida es no newtoniano pseudoplástico. Se plantearon las ecuaciones constitutivas y las gráficas del factor de fricción vs. el Número de Reynolds.

**Palabras Clave:** Carbón mineral, agente fluidizante, viscosidad

## Rheological model for fluid mixtures of mineral coal

### Abstract

The correct determination of the viscosity of liquid-solid mixtures is important for its appropriate use. Currently, empirical correlations to determine the viscosity of such mixtures accurately are not known, so this paper aims to develop a rheological model for the determination of the viscosity of coal-water, coal-kerosene, coal-fuel oil and coal – gasoline mixtures by fluidization of solid particle beds. Fluidization was used for a mineral coal bed of different particle sizes by varying the flow rate to observe the bed's height and pressure drops at a given speed. Once these data were obtained, shear stress was determined for each pressure drop and later on, strain rates were determined for each flow by using Rabinowitsch equation, classifying fluids in this way, and finding out that the rheological behavior of the fluid mixture is pseudoplastic Newtonian. Constitutive equations were posed and the graphs for the friction factor vs. Reynolds number were made.

**Key Words:** Mineral coal, fluidizing agent, viscosity

## Introducción

La demanda de energía está estrechamente relacionada con el crecimiento económico y los estándares de vida. Actualmente, la demanda mundial de energía está incrementándose a una tasa promedio de 2%. Este incremento ha de continuar, y por tanto, el consumo de energía será el doble de 1995 en el 2030 y el triple en el 2050. Cobran fuerza, en este escenario, fuentes energéticas tales como la biomasa y la energía nuclear. La participación del carbón se proyecta cercana al 40% para el año 2100(1).

Venezuela cuenta con grandes reservas de carbón mineral de excelentes propiedades caloríficas que pudieran formar parte de la estrategia energética en la producción de energía eléctrica. Obviamente, las posibilidades de conversión a mezclas fluidas del carbón, en razón del transporte y almacenamiento, incrementa el valor energético de este combustible, la viscosidad será determinante para el diseño de facilidades de transporte.

El dimensionamiento en los sistemas de transporte de mezclas no homogéneas causa un inconveniente en los sistemas convencionales de medición de la viscosidad debido a que el sólido precipita y no puede mantenerse en el seno del líquido ocasionando un alto nivel de error de medición. En los sistemas fluidizados se logra mantener las partículas en el seno del líquido permitiendo determinar la viscosidad en mezclas fluidas de carbón mineral utilizando un modelo teórico derivado de las ecuaciones de continuidad y de movimiento, ya que actualmente no se cuenta con ecuaciones empíricas para determinar correctamente dicha viscosidad.

La presente investigación se plantea como objetivo general desarrollar un modelo reológico para la determinación de la viscosidad en mezclas fluidas de carbón mineral. Para cumplir con este objetivo se realizará el proceso de fluidización utilizando un lecho de carbón mineral con tamaños de partículas: -10+16, -16+30 y -30+40 Mesh y como agentes fluidizantes agua, kerosene, fuel oil y nafta, variando la velocidad de flujo para observar la altura del lecho y caídas de presión a la velocidad dada. Una vez obtenidos estos datos, se procederá a determinar el esfuerzo cortante para cada caída de presión y posteriormente con la ecuación de Rabinowitsch se calcularán las velocidades de deformación para cada caudal, y de esta manera se podrá realizar la clasificación de los fluidos. Se plantearán las ecuaciones constitutivas y se realizará la gráfica del factor de fricción vs. el Número de Reynolds.

## Metodología

La preparación del carbón se hace según la norma ASTM D-346-90 (Estándar Practice for Collection and Preparation of Coke Samples for Laboratory Analysis). El carbón se tritura en un molino Sew Eumodrive D732 Bruche de 50 Hz. Las pruebas de fluidización se realizarán usando carbón mineral proveniente de la mina Paso Diablo de la región del Guasare, ubicada en Santa Cruz de Mara – Estado Zulia.

Las propiedades físicas de la mezcla, necesarias para la determinación de las condiciones mínimas de fluidización, y la posterior caracterización viscosa de las mismas son:

- i. Gente fluidizante: Densidad, viscosidad absoluta.
- ii. Sólido a fluidizar: Densidad, porosidad y diámetro promedio.

La unidad de fluidización es utilizada para determinar las condiciones operacionales de transporte de carbón mineral, constituida por: un tanque almacenador de agente fluidizante, un soporte del lecho, una sección cilíndrica de altura 75 cm y 5 cm de diámetro, además de las mangueras de conexión a la bomba, el rotámetro y el manómetro diferencial.

El proceso experimental consistirá en medir los parámetros de caudal y caída de presión de flujo con la finalidad de predecir las condiciones mínimas de fluidización tanto experimental como teórica, tomando en cuenta las variables: granulometría de la partícula sólida, altura del lecho, geometría de la columna (altura/ diámetro) y la porosidad del lecho en función de la velocidad del agente fluidizante líquido, y de esta manera realizar la caracterización viscosa de las mezclas carbón mineral – agente fluidizante.

Dependiendo de la naturaleza viscosa y de las condiciones operacionales la ecuación constitutiva de las mezclas carbón mineral - agentes fluidizante puede ser expresada por el Modelo de Ostwald De Waele o por el Modelo de Ellis.

## **Resultados y Discusiones**

### **Análisis de resultados reológicos como agente fluidizante Agua.**

Para realizar la caracterización de la mezcla, se tomaron las caídas de presión, alturas del lecho del proceso de fluidización para determinar el esfuerzo viscoso, observándose un aumento del mismo a medida que aumenta el caudal de flujo. Luego se determinó la velocidad de deformación observándose un aumento, ya que según la ecuación de Rabinowitsch utilizada, la velocidad de deformación es directamente proporcional al esfuerzo viscoso y al caudal, es decir, a medida que aumenta alguno de los dos términos aumenta la velocidad de deformación. En cuanto a la viscosidad absoluta esta disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación correspondiente, efecto causado porque la viscosidad absoluta es directamente proporcional al esfuerzo viscoso e inversamente proporcional a la velocidad de deformación. Una manera de clasificar el fluido es graficando el reograma entre la viscosidad aparente y la velocidad de deformación del modelo de potencia,  $\log(\mu_a)$  vs.  $\log(-dv_z/dr)$ , donde  $\mu_a$  disminuye con el aumento de la velocidad de deformación, por lo tanto, si la viscosidad absoluta disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación el fluido puede clasificarse como no – newtoniano pseudoplástico, característica deseable en las mezclas carbón – agua (Roh et al). (1995) (17). Las tres mezclas de carbón mineral – agua presentaron un comportamiento no newtoniano pseudoplástico, este resultado ha sido observado por Oztoprak. (2006)(4) en mezclas carbón mineral - agua, representado por el modelo de potencia y la ecuación de Ellis como ecuaciones constitutivas.

Una forma de generalizar la clasificación del fluido es calculando el coeficiente de consistencia y el coeficiente de viscosidad del mismo mediante el modelo de potencia, resultando 0,7389 y 134,65 para la mezcla fluida -10+16, 0,5036 y 82,3 para la mezcla fluida -16+30 y 0,616 y 45.57 para la mezcla fluida -30+40 respectivamente, donde plantea que si  $n$  es menor que la unidad se está en presencia de un fluido no newtoniano pseudoplástico, corroborando lo planteado por García y col. (18).

Realizando una comparación de la caracterización viscosa de las mezclas carbón mineral – agua para los diferentes tamaños de partículas -10+16, -16+30 y -30+40 se puede observar que la viscosidad absoluta disminuye a medida que disminuye el tamaño de partícula del sólido, resultado que concuerda con los obtenidos por Joves (2006) (19) para el sistema fluidizado carbón mineral – agua, esta disminución de la viscosidad se debe a que al disminuir el tamaño de partículas los valores de porosidad son mayores y por lo tanto la concentración del carbón en la mezcla disminuye por unidad de área disminuyendo entonces la viscosidad(6).

### **Análisis de resultados reológicos como agente fluidizante Kerosene**

Se tomaron las caídas de presión, alturas del lecho del proceso de fluidización para determinar el esfuerzo viscoso, observándose un aumento del mismo a medida que aumenta el caudal de flujo. Luego se determinó la velocidad de deformación observándose un aumento, ya que según la ecuación de Ra-

binowitsch utilizada, la velocidad de deformación es directamente proporcional al esfuerzo viscoso y al caudal, es decir, a medida que aumenta alguno de los dos términos aumenta la velocidad de deformación. En cuanto a la viscosidad absoluta esta disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación correspondiente, efecto causado porque la viscosidad absoluta es directamente proporcional al esfuerzo viscoso e inversamente proporcional a la velocidad de deformación. Una manera de clasificar el fluido es graficando el reograma entre la viscosidad aparente y la velocidad de deformación del modelo de potencia,  $\log(\mu_a)$  vs.  $\log(-dvz/dr)$ , donde  $\mu_a$  disminuye con el aumento de la velocidad de deformación, por lo tanto, si la viscosidad absoluta disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación el fluido puede clasificarse como no – newtoniano pseudoplástico, característica deseable en las mezclas carbón – agua (Roh et al. 1995) (17). Las tres mezclas de carbón mineral – agua presentaron un comportamiento no newtoniano pseudoplástico, representado por el modelo de potencia y la ecuación de Ellis como ecuaciones constitutivas.

Una forma de generalizar la clasificación del fluido es calculando el coeficiente de consistencia y el coeficiente de viscosidad del mismo mediante el modelo de potencia, resultando 0,4812 y 104,04 para la mezcla fluida -10+16, 0,5789 y 72,48 para la mezcla fluida -16+30 y 0,1314 y 43,46 para la mezcla fluida -30+40 respectivamente, donde plantea que si  $n$  es menor que la unidad se está en presencia de un fluido no newtoniano pseudoplástico, corroborando lo planteado por García y col. (18).

Realizando una comparación de la caracterización viscosa de las mezclas carbón mineral – kerosene para los diferentes tamaños de partículas -10+16, -16+30 y -30+40 se puede observar que la viscosidad absoluta disminuyen a medida que disminuye el tamaño de partícula del sólido, para el sistema fluidizado carbón mineral – agua, esta disminución de la viscosidad se debe a que al disminuir el tamaño de partículas los valores de porosidad son mayores y por lo tanto la concentración del carbón en la mezcla disminuye por unidad de área disminuyendo entonces la viscosidad (6).

#### **Análisis de resultados reológicos como agente fluidizante Nafta**

Para realizar la caracterización de la mezcla fluida carbón mineral-Nafta con tamaño de partícula -10+16, -16+30 y -30+40, se tomaron las caídas de presión, alturas del lecho del proceso de fluidización para determinar el esfuerzo viscoso, observándose un aumento del esfuerzo viscoso a medida que aumenta el caudal de flujo. La velocidad de deformación se determina con el mejor ajuste del comportamiento de estas figuras. Una vez obtenida esta ecuación se introduce en la ecuación diferencial de Rabinowitsch y se calcula la velocidad de deformación para cada caudal García (18); para luego determinar la viscosidad absoluta. Observándose en los tres sistemas estudiados un aumento en la velocidad de deformación y una disminución en la viscosidad absoluta, clasificándose el fluido como no – newtoniano pseudoplástico, característico de esta mezclas planteado por Ghassemzadah (20).

A partir del reograma entre la viscosidad aparente y la velocidad de deformación del modelo de potencia, se obtiene el coeficiente de consistencia ( $n$ ) y el coeficiente de viscosidad ( $m$ ), resultando 0,625 y 6,683439 para la mezcla fluida -10+16, 0,086 y 0,74302 para la mezcla fluida -16+30 y 0,102 y 0,61235039 para la mezcla fluida -30+40 respectivamente, donde plantea que si  $n$  es menor que la unidad se está en presencia de un fluido no newtoniano pseudoplástico, corroborando lo planteado por García y col. (18).

#### **Análisis de resultados reológicos como agente fluidizante Fuel oil**

Para realizar la caracterización de la mezcla fluida carbón mineral-Fuel oil con tamaño de partícula -10+16, -16+30 y -30+40, se tomaron las caídas de presión, alturas del lecho del proceso de fluidización para determinar el esfuerzo viscoso, observándose un aumento del esfuerzo viscoso a medida que aumenta el caudal de flujo. La velocidad de deformación se determina con el mejor ajuste del comportamiento de estas figuras. Una vez obtenida esta ecuación se introduce en la ecuación diferencial de

Rabinowitsch y se calcula la velocidad de deformación para cada caudal García (18); para luego determinar la viscosidad absoluta. Observándose en los tres sistemas estudiados un aumento en la velocidad de deformación y una disminución en la viscosidad absoluta, clasificándose el fluido como no – newtoniano pseudoplástico, característico de esta mezclas planteado por Ghassemzadah (20). A partir del reograma entre la viscosidad aparente y la velocidad de deformación del modelo de potencia, se obtiene el coeficiente de consistencia ( $n$ ) y el coeficiente de viscosidad ( $m$ ), resultando 0,196 y 1,807174 para la mezcla fluida -10+16, 0,190 y 1,6106 para la mezcla fluida -16+30 y 0,086 y 0,4508167 para la mezcla fluida -30+40 respectivamente, donde plantea que si  $n$  es menor que la unidad se está en presencia de un fluido no newtoniano pseudoplástico, corroborando lo planteado por García y col. (18).

### **Ecuaciones Constitutivas para las mezclas carbón mineral – agente fluidizante**

A continuación se muestran las ecuaciones constitutivas para el modelo de Ostwald DeWaele o potencia para mezcla fluida carbón mineral –agente fluidizante

-Tamaño de partícula -10+16 como agente fluidizante agua

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 134,64 \left( \frac{-dvz}{dr} \right)^{0,74}$$

-Tamaño de partícula -16+30 como agente fluidizante agua

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 82,3 \left( \frac{-dvz}{dr} \right)^{0,50}$$

-Tamaño de partícula -30+40 como agente fluidizante agua

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 43,1 \left( \frac{-dvz}{dr} \right)^{0,56}$$

-Tamaño de partícula -10+16 como agente fluidizante Kerosene

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 103,91 \left( \frac{-dvz}{dr} \right)^{0,48}$$

-Tamaño de partícula -16+30 como agente fluidizante Kerosene

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 72,27 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,58}$$

-Tamaño de partícula -30+40 como agente fluidizante Kerosene

Modelo de Ostwald DeWaele:

$$\tau_{rz} = 43,47 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,13}$$

-Tamaño de partícula -10+16 como agente fluidizante Nafta

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 334,02 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,66}$$

-Tamaño de partícula -16+30 como agente fluidizante Nafta

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 39,31 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,082}$$

-Tamaño de partícula -30+40 como agente fluidizante Nafta

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 44,71 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,11}$$

-Tamaño de partícula -10+16 como agente fluidizante Fuel oil

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 89,48 \left( - \frac{dv_z}{dr} \right)^{0,19}$$

-Tamaño de partícula -16+30 como agente fluidizante Fuel oil

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 84,83 \left( - \frac{dv_z}{dr} \right)^{0,28}$$

-Tamaño de partícula -30+40 como agente fluidizante Fuel oil

Modelo de Ostwald DeWaele

$$\tau_{rz} = 134,72 \left( - \frac{dv_z}{dr} \right)^{0,21}$$

## Conclusiones

Las velocidades mínimas y terminales de fluidización disminuye en las mezclas fluidas carbón mineral – agente fluidizante al disminuir el tamaño de partícula

Las concentraciones volumétricas de las mezclas fluidas de carbón mineral – agente fluidizante en el punto de velocidad mínima de fluidización disminuye al disminuir el tamaño de partícula.

Las viscosidades de las mezclas fluidas carbón mineral – agente fluidizante disminuyen a medida que aumenta el esfuerzo cortante presentando un comportamiento no newtoniano pseudoplástico.

## Referencias Bibliográficas

- 1.El mercado mundial del carbón, Disponible en: <http://www.catamutun.com/produccion/carbon/mundo.html>.
2. PDVSA-INTEVEP, Museo Geológico Virtual de Venezuela, Modulo Minerales de Venezuela (1997).
3. Llorente M., Geología del carbón y del petróleo, Geología 1999-200.
4. Oztoprack A. F., Investigation of the rheological properties of Cayirhan coal – water mixtures (2006).
5. Practica N°19, La Granulometría, Disponible en: [http://www.construaprende.com/Lab/19/Prac19\\_2.html](http://www.construaprende.com/Lab/19/Prac19_2.html).

6. Davidson J. F., Harrison, D., Fluidization, Academic Press, London and New York, (1971), 26-61; 261-290.
7. Rhodes M., Introduction to particle technology New York (1998).
8. Woo-Teca K., Dong-Hyun K., Yung-Phil K., Characterization of heavy oil Fly ash, Generated from a power plant, Korea (2003), Disponible en: <http://azom.com/details.asp?articleid=2003>.
9. Cal Chen Corporation, Fluidized bed characteristics, Che435 (2000), Disponible en: <http://www.csupomona.edu.odf.html>.
10. Chase G. G., Fluidization of solids with liquid water, Che1014, Disponible en: [http://www.engr.pitt.edu/chemical/lab\\_manual/fluidizationofsolids.pdf](http://www.engr.pitt.edu/chemical/lab_manual/fluidizationofsolids.pdf).
11. Quinceno C., Flujo de un fluido real, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Disponible en: <http://www.hidraulica.unalmed.edu.co/PARH/materias/fluidos/quinceno/cap3.html>.
12. Mott R., Mecánica de Fluidos Aplicada, Editorial Prentice-Hall, Cuarta Edición, Disponible en: [http://www.construaprende.com/lab/10/prac10\\_1.html](http://www.construaprende.com/lab/10/prac10_1.html).
13. Ferrer Bracho J. L., Mecanismo de transferencia de momento de lechos fluidizados de base cónica, (1995), 11-30.
14. Ocaña Muller, P. Conceptos Fundamentales de Mecánica de fluidos (1997).
15. Toda M., Kuriyama M., Konna H., Honma T., The influence of particle size distribution of coal on the fluidity of coal-water mixtures, Powder Technology, 55, (1988), 241-245.
16. Shah et al, Low viscosity stable mixtures of coal and fuel oil containing alcohol. Patent No. 4453947. U.S.A. (1984).
17. Roh N., Shin D., Kim D., Kim J., Rheological behaviour of coal – water mixtures. Effect of surfactants and temperature, Fuel. Vol. 74, (1995), 1313 – 1318.
18. García, C. Análisis Tensorial Aplicado a Fenómenos de Transporte, Primera Edición (2000).
19. Joves, V. Caracterización viscosa de mezclas carbón mineral – agua y cenizas volantes – agua mediante la fluidización en medio acuoso, Universidad del Zulia, Venezuela, (2006).
20. Ghassemzadah M. R., Cari S., Rheological studies of coal-oil mixtures, Wayne State University, Detroit, Michigan (1980).