

## Caracterización viscosa de mezclas de carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua mediante fluidización en medio acuoso

*César García\**  
*Karina Martínez\*\**  
*Vanesa Joves\*\*\**  
*José González\*\*\*\**  
*Freddy Andarcia\*\*\*\*\**

---

### RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se determinó la caracterización viscosa de mezclas carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua a partir de la fluidización de lechos de partículas sólidas con agua como agente fluidizante. Se estudió la fluidización en dos lechos, uno cuyas partículas sólidas corresponden al carbón mineral con tamaños de partículas  $-10+16$ ,  $-16+80$  y  $-80+115$  y el otro de cenizas volantes con tamaños de partículas  $-16+80$ ,  $-80+115$  y  $-115+325$ , variando la velocidad del flujo, observando la altura

Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.

\* Prof. División de Postgrado. [cgarcia@luz.edu.ve](mailto:cgarcia@luz.edu.ve).

\*\* Profa. Escuela de Ingeniería Química. [karinaisabelmartinez@hotmail.com](mailto:karinaisabelmartinez@hotmail.com).

\*\*\* Estudiante de Maestría. División de Postgrado. [jovesvanesa@latinmail.com](mailto:jovesvanesa@latinmail.com).

\*\*\*\* Prof. Escuela de Ingeniería Química. [amorosogonzalez@yahoo.com](mailto:amorosogonzalez@yahoo.com).

\*\*\*\*\* Estudiante. Escuela de Ingeniería Química. [fjan\\_f1@hotmail.com](mailto:fjan_f1@hotmail.com).

RECIBIDO: 07-02-11 /// ACEPTADO: 09-03-11

del lecho y caídas de presión del agua a la velocidad dada. Los valores de fluidización se relacionaron a través del modelo de flujo de Rabinowitsch para determinar la velocidad de deformación en la caracterización de las mezclas, que presentaron un comportamiento no-newtoniano pseudoplástico. Las ecuaciones constitutivas de las mezclas carbón-agua y cenizas volantes-agua para cada rango de partículas se expresaron por los modelos de Ostwald De Waele y Ellis. Las viscosidades aparentes de las mezclas carbón-agua para la fracción pulverizada de carbón se ubicaron entre 230 cp y 67235 cp, mientras para las mezclas cenizas volantes-agua resultaron entre 86 cp y 1432 cp.

PALABRAS CLAVE: Fluidización, carbón-agua, cenizas volantes-agua, carácter viscoso.

## *The Viscous Characterization of Mineral Coal-Water and Oil Fly Ash-Water Mixtures through Fluidization in an Aqueous Medium*

---

### ABSTRACT

This study determined the viscous characterization of mineral coal-water and oil fly ash-water mixtures based on the fluidization of solid particle beds using water as the fluidizing agent. Fluidization in two beds was studied, one whose solid particles correspond to mineral coal, with particle sizes of  $-10+16$ ,  $-16+80$  and  $-80+115$ , and the other of oil fly ash, with of particle sizes of  $-16+80$ ,  $-80+115$  and  $-115+325$ , varying the flow velocity, observing the height of the bed and water pressure drops at the given velocity. Fluidization data were related using the Rabinowitsch flow model to determine deformation rate in characterizing the mixtures, which evidenced non-Newtonian, pseudo plastic behavior. Constitutive equations for the mineral coal and oil fly ash mixtures for each range of particles were expressed by the Ostwald De Waele and Ellis models. The apparent viscosities of coal-water mixtures for the pulverized coal fraction were between 230 cp and 67235 cp, while the oil fly ash-water mixtures were between 86 cp and 1432 cp.

KEY WORDS: Fluidization, coal-water, oil fly ash-water, viscous character.

## Introducción

La declinación de las reservas probadas de petróleo a nivel mundial ha dirigido las investigaciones hacia la generación de un combustible líquido a partir del carbón mineral en mezcla con agua, metanol, fuel oil, entre otros (Ekman A. & Ekman J., 1984; Gilmartin, 1981; Heaton *et al.*, 1987; Rakitsky & Prieto, 1985). Sin embargo, para que el combustible carbón-agua sea comercialmente aceptable a escala de combustión se requiere facilidad de transportación a los sitios de combustión, posibilidad de largo almacenamiento y que mantenga una composición uniforme con consistentes propiedades reológicas sobre un periodo de tiempo.

El costo del transporte del combustible carbón-agua está directamente relacionado con la resistencia al flujo del combustible carbón-agua, debido a los efectos friccionales por la viscosidad aparente del mismo. Abundantes estudios acerca del comportamiento reológico de la mezcla carbón-agua indican un fluido de naturaleza pseudoplástica, o plástico de Bingham, según el surfactante utilizado (Funk J.E., 1981; Altaweel *et al.*, 1985; Woskoboenko *et al.*, 1988).

Obviamente las mezclas carbón-agua no forman suspensiones estables, lo cual hace necesario el uso de aditivos que actúen para promover la formación de una carga electrostática repulsiva sobre las partículas de carbón en el medio acuoso, generando un empaquetamiento cerrado de las partículas, lo cual confiere a la mezcla carbón-agua propiedades reológicas de un fluido pseudoplástico (Adiga *et al.*, 1988).

García *et al.* (2003) estudiaron el efecto de las variables operacionales de concentración de carbón, granulometría del carbón, concentración del aditivo y naturaleza del aditivo sobre el comportamiento reológico de la suspensión carbón-agua. El efecto de las variables operacionales sobre la viscosidad aparente de la suspensión carbón-agua se resume así: 1) aumenta con el incremento del contenido de carbón; 2) aumenta con la disminución del tamaño del grano del carbón; 3) aumenta con el incremento de la concentración del aditivo, con mayores valores para el aditivo Lipesa 725, luego Lipesa 727 y finalmente con la sal de naftaleno.

El objetivo de la presente investigación es determinar la naturaleza reológica de las suspensiones carbón-agua y cenizas volantes-agua a través de un modelo de flujo para el mecanismo de transporte por fluidización. El

carbón a utilizar es proveniente del Manto IV de la zona Paso Diablo de la región Guasare del municipio Mara del estado Zulia-Venezuela, el cual es de tipo bituminoso, de alto contenido volátil y con bajos niveles de cenizas y azufre, altamente recomendado para fines térmicos. Las cenizas volantes (*oil fly ash*) procedentes de una planta termoeléctrica ubicada en la ciudad de Maracaibo del estado Zulia-Venezuela, son residuos sólidos productos de la combustión del *fuel oil*, con alto contenido de carbono, vanadio y níquel, y poder calorífico comparable al carbón mineral (Joves, 2009).

## 1. Fundamentos teóricos del modelo

El análisis teórico de las ecuaciones de transferencia de momentum para el establecimiento de la relación funcional entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación referida al lecho fluidizado, reside en la sucesiva aplicación de las ecuaciones de continuidad, movimiento lineal o ecuación de Cauchy y del balance integral de masa del fluido en coordenadas cilíndricas y bajo las siguientes consideraciones: 1) la mezcla carbón-agua para cada condición de fluidización se asume como fluido viscoso de densidad constante; 2) la mezcla carbón-agua se comporta como un fluido puramente viscoso, esto es, el esfuerzo cortante sólo varía con la velocidad de deformación; 3) flujo en régimen estacionario, sin variación con el tiempo, uniforme e isotérmico; 4) perfil unidimensional de velocidad en la dirección axial de flujo, en coordenadas cilíndricas,  $\vec{v} = v_z \vec{e}_z$ ;  $v_r = v_\theta = 0$ .

De manera resumida, de acuerdo a las ecuaciones de transferencia de momentum y a las consideraciones anteriores, se derivan los siguientes resultados:

a) De la ecuación de continuidad,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

Se obtiene que  $\frac{\partial v_z}{\partial Z} = 0$ , esto es, no hay variación de la velocidad axial con la componente Z en el lecho fluidizado, entonces,

$$v_z = f(r); \quad v_r = v_\theta = 0 \quad (2)$$

b) De la condición de fluido puramente viscoso, resulta la componente del esfuerzo cortante,

$$\tau_{rz} = f(D_{rz}), \quad D_{rz} = \frac{1}{2} \frac{dv_z}{dr} \quad (3)$$

c) De la ecuación de movimiento lineal de Cauchy,

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} \right) = \rho \bar{g} - \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} \quad (4)$$

Se deriva la expresión para el esfuerzo cortante,

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta P}{L} \frac{r}{2} \quad (5)$$

donde,  $L$  es la longitud del lecho fluidizado,  $r$  el radio de la columna y  $\Delta P$  la caída de presión a través del lecho fluidizado.

d) Por derivación de la expresión integral del caudal se obtiene la ecuación de la velocidad de deformación en términos de las variaciones de Caudal y del Esfuerzo Cortante a la pared del lecho fluidizado,

$$Q = 2\pi \int_0^R v_z r dr \quad (6)$$

Integrando por partes la ecuación (6) e introduciendo el esfuerzo cortante, se obtiene la ecuación integral de Rabinowitsch en coordenadas cilíndricas, resulta,

$$\frac{Q\tau_w^3}{\pi R^3} = \int_0^{\tau_w} \tau_{rz}^2 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right) d\tau_{rz} \quad (7)$$

Al derivar la ecuación (7) respecto a  $\tau_w$ , se obtiene la velocidad de deformación,

$$-\frac{dv_z}{dr} \Big|_{r=R} = \frac{1}{\pi R^3} \left( 3Q + \tau_w \frac{dQ}{d\tau_w} \right) \quad (8)$$

e) Los valores de esfuerzo cortante a la pared ( $\tau_w$ ) y velocidad de deformación se correlacionan a través de las ecuaciones constitutivas de Ostwald De Waele y de Ellis por optimización de los parámetros de viscosidad y consistencia.

$$\text{Ecuaciones de Ostwald De Waele, } \tau_{rz} = m \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^n \quad (9)$$

$$\text{Ecuación de Ellis, } \tau_{rz} = \frac{1}{A + B\tau_{rz}^{\alpha-1}} \left( -\frac{dv_z}{dr} \right) \quad (10)$$

## 2. Metodología experimental

El desarrollo del proceso experimental consiste en medir los parámetros de caudal y caída de presión de flujo con la finalidad de predecir las condiciones mínimas y máximas 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-agua y cenizas volantes-agua.

La preparación del carbón y de las cenizas volantes se hace según la norma ASTM D-346-90 (*Standard Practice for Collection and Preparation of Coke Samples for Laboratory Analysis*), y el carbón es molido en un molino Sew Eumodrive D732 Bruche de 50 Hz. Las partículas de carbón y cenizas son separadas electromecánicamente, con tamices de tamaños presentados en la tabla 1.

TABLA 1. Tamices seleccionados para la distribución granulométrica del carbón mineral y cenizas volantes

Tamiz	D (mm)	D (in)
-10+16	1,190	0,0469
-16+80	0,177	0,0070
-80+115	0,125	0,0049
-115+325	0,045	0,0018

Se seleccionan tres tamaños de partículas tanto para el carbón mineral como para las cenizas volantes, se determinan sus propiedades físicas como densidad y porosidad, y se procede a realizar la fluidización de las mismas en medio acuoso. La unidad de fluidización es utilizada para determinar las condiciones operacionales de transporte de carbón mineral y de las cenizas volantes, constituida por: un tanque almacenador de agua, un soporte del lecho, una sección cilíndrica de altura 75 cm y 5 cm de diámetro, además de las conexiones a la bomba, el rotámetro y el manómetro diferencial, tal como se muestra en la figura 1.

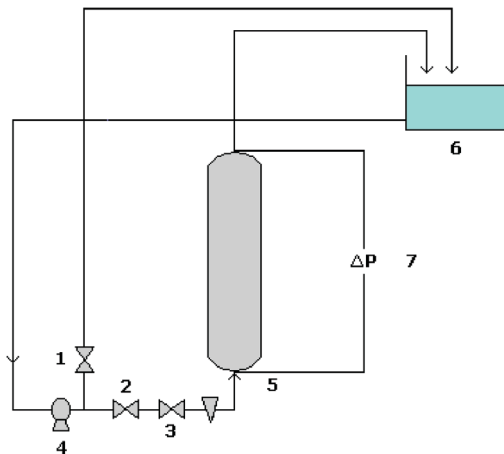


FIGURA 1. Esquema del proceso de fluidización.

A partir de los valores operacionales de caída de presión, caudal del flujo de agua, diámetro de la columna de 5 cm y altura de 75 cm, se procede a obtener los parámetros reológicos para determinar la naturaleza viscosa de las mezclas carbón mineral-agua y cenizas volantes (*oil fly ash*)-agua, de la siguiente manera: 1) se considera que la caída de presión es lineal en la sección de mediciones, entonces se divide cada caída de presión causada por cada caudal de agua entre la longitud de la columna; 2) se determina el esfuerzo cortante hacia la pared de la tubería, ya que es donde se alcanza el valor máximo; 3) con la ecuación diferencial de Rabinowitsch se determina la velocidad de deformación; 4) con los datos de esfuerzo cortante y velocidad de deformación ya obtenidos, se procede a determinar la viscosidad aparente y de esta forma observar cómo se comporta el fluido a medida que varía la velocidad de deformación:

$$\mu_a = \frac{\tau_w}{\left(-\frac{dv_z}{dr}\right)_{r=R}} \quad (11)$$

Si la viscosidad aparente disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación, el fluido es no-newtoniano pseudoplástico. Si por el contrario aumenta a medida que la velocidad de deformación aumenta, éste es no-newtoniano dilatante.

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

Para el Modelo de Ostwald De Waele:  $\tau_{rz} = m \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)^n$  (9)

Para el Modelo de Ellis:  $\tau_{rz} = \frac{1}{A + B\tau_{rz}^{\alpha-1}} \left(-\frac{dv_z}{dr}\right)$  (10)

### 3. Resultados y discusión

Los tamaños de partículas seleccionados para este estudio fueron de -10+16, -16+80 y -80+115 tamices para el carbón mineral; y de -16+80, -80+115 y -115+325 tamices para las cenizas volantes respectivamente. Las densidades obtenidas fueron de 2593,4; 1359,2; 1273,2 Kg/m<sup>3</sup> para el carbón mineral; y 2287; 1341; 1230,5 Kg/m<sup>3</sup> para las cenizas volantes; y las porosidades resultaron entre 0,29 y 0,33 para el carbón mineral y entre 0,58 y 0,67 para las cenizas volantes. Los ensayos de fluidizaciones del carbón mineral y de las cenizas volantes se realizaron para los diferentes tamaños de partículas, con una repetición de 5 por cada ensayo, utilizando agua como agente fluidizante a condiciones ambientales.

Al realizar la pruebas de fluidización para cada tamaño de partícula tanto de carbón mineral como para las cenizas volantes, se pudo observar en cada caso las diferentes etapas en el proceso, es decir, la etapa de lecho fijo, etapa de lecho prefluidizado, y etapa de lecho fluidizado, obteniéndose velocidades mínimas de fluidización y velocidades terminales de fluidización. Estas pueden ser observadas en las tablas 2 y 3, como sigue:



TABLA 2. Velocidades mínima y terminal de fluidización experimental para el carbón mineral

Tamiz	$U_{mf\text{ exp}}$ (m/s)	$U_{ft\text{ exp}}$ (m/s)	$U_{mf\text{ teórica}}$ (m/s)	$U_{ft\text{ teórica}}$ (m/s)
-10+16	0,002	0,010	2,25E-03	1,76E-02
-16+80	0,00040744	0,0028	9,92E-04	6,05E-03
-80+115	0,00035651	0,0023	5,69E-04	2,30E-03

TABLA 3. Velocidades mínima y terminal de fluidización experimental para las cenizas volantes

Tamiz	$U_{mf\text{ exp}}$ (m/s)	$U_{ft\text{ exp}}$ (m/s)	$U_{mf\text{ teórica}}$ (m/s)	$U_{ft\text{ teórica}}$ (m/s)
-16+80	0,00045837	0,0024	0,000547	0,00226
-80+115	0,00035651	0,0023	0,000418	0,00196
-115+325	0,00028011	0,0022	0,000238	0,00186

donde la velocidad mínima de fluidización teórica es determinada por la ecuación de Ergun (Foust et al., 1967),

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu v_{mf}}{d^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_f v_{mf}^2}{d} \quad (12)$$

mientras, la velocidad terminal teórica es determinada por la ecuación de Theodore-Buonjcore (García C. y Sarmiento, 1994),

$$v_t = 0,153 \frac{g^{0,714} d^{1,14} (\rho_s - \rho_f)^{0,71}}{\mu^{0,43} \rho_f^{0,29}} \quad (13)$$

Del análisis de los resultados anteriores se destacan las siguientes observaciones: 1) las velocidades mínimas de fluidización, al igual que las velocidades terminales disminuyen a medida que disminuye el tamaño de partículas; 2) las correlaciones teóricas presentan errores mínimos absolutos de 12,50% en la estimación de la velocidad mínima de fluidización, y de 0,013% en la estimación de la velocidad terminal.

Después de realizar todas las pruebas de fluidización tanto del carbón mineral y de las cenizas volantes, se procedió a realizar la caracteriza-

ción viscosa de las mezclas de carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua. Resultado del proceso de fluidización, se obtuvieron las caídas de presión del agua y alturas del lecho con las que posteriormente se determinaron las porosidades del mismo, que proporcionaron las concentraciones volumétricas para el análisis de la caracterización viscosa de las mezclas. La concentración volumétrica del material sólido es el medio acuoso a las condiciones de velocidad mínima de fluidización, se relaciona con la porosidad a través de  $C_v = 1 - \varepsilon_{mf}$ , que se muestra en la Tabla 4.

TABLA 4. Concentraciones volumétricas de carbón mineral y de cenizas volantes en el estado de mínima fluidización

Granulometría	Carbón mineral	Cenizas volantes
-10+16	66%	
-16+80	70%	31%
-80+115	66%	40%
-115+325		32%

La fluidización del carbón mineral genera bajo las condiciones de transporte, concentraciones de carbón entre 66% y 70%, mientras de las cenizas volantes entre 31% y 40%.

Al realizar la caracterización de la mezcla carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua para los diferentes tamaños de partículas seleccionados, se tomaron las caídas de presión, alturas del lecho, el proceso de fluidización, para posteriormente calcular el esfuerzo viscoso ( $\xi_w$ ), observándose un aumento y luego una disminución del mismo a medida que aumenta el caudal del flujo, esto es debido a que en el proceso de fluidización en la etapa de lecho fijo, la caída de presión aumenta, y por lo tanto el esfuerzo viscoso también, pero en la etapa de fluidización, las caídas de presión se mantienen casi constantes, pero la longitud del lecho se incrementa, lo que conlleva a una disminución del esfuerzo viscoso. Luego se determinó la velocidad de deformación observándose también un aumento. La viscosidad absoluta, por su parte, se ve que ésta disminuye, comienza a aumentar y luego disminuye, efecto causado porque la viscosidad absoluta es directamente proporcional al esfuerzo viscoso e inversamente proporcional a la velocidad de deformación (tablas 5 y 6). Una manera de clasificar el fluido es graficando el comportamiento de  $\log(\mu a)$  vs.

TABLA 5. Esfuerzo viscoso, velocidad de deformación y viscosidad absoluta para las mezclas carbón mineral-agua de tamaños de partícula -10+16, -16+80 y -80+115

Lectura	Carbón mineral -10+16			Carbón mineral -16+80			Carbón mineral -80+115		
	$\tau_w$ (lbf/ft <sup>2</sup> )	$-dv_z/dr$ (s <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (lbm/ft.s)	$\tau_w$ (lbf/ft <sup>2</sup> )	$-dv_z/dr$ (s <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (lbm/ft.s)	$\tau_w$ (lbf/ft <sup>2</sup> )	$-dv_z/dr$ (s <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (lbm/ft.s)
1	1,8217	6,71850	0,271161	0,6757	0,004	4817,0	0,265	0,005	45,18
2	1,9033	7,74198	0,245850	0,6667	0,020	1031	0,252	0,025	10,12
3	1,9577	8,98907	0,217792	0,6324	0,036	549,9	0,235	0,042	5,573
4	2,0393	11,6254	0,175419	0,6014	0,053	366,5	0,219	0,059	3,741
5	2,1208	14,3738	0,147552	0,5344	0,076	226,9	0,209	0,077	2,700
6	2,1254	14,5135	0,146447	0,5288	0,0883	191,9	0,189	0,095	1,9916
7	2,0553	12,23549	0,1679787	0,49074	0,1083	145,75	0,1689	0,1162	1,4542
8	2,0137	10,79068	0,1866222	0,44451	0,1258	113,61	0,1560	0,1321	1,1812
9	1,9485	8,829442	0,2206932	0,40895	0,1452	90,585	0,1354	0,1533	0,8828
10	1,9107	7,990642	0,2391249	0,35873	0,1663	69,395	0,1155	0,1743	0,6624
11	1,8743	7,405240	0,2531135	0,32285	0,1826	56,863	0,0881	0,1945	0,4531
12	1,8807	7,507952	0,2505072	0,28799	0,1989	46,582	0,0908	0,2059	0,4413
13	1,8696	7,369943	0,2536835	0,24537	0,2191	36,031	0,0714	0,2267	0,3152
14	1,8124	6,821876	0,2656752	0,21908	0,2343	30,077	0,0518	0,2446	0,2121
15	1,7800	6,590166	0,2701053	0,18366	0,2537	23,290	0,0408	0,2631	0,1554

TABLA 6. Esfuerzo viscoso, velocidad de deformación y viscosidad absoluta para las mezclas cenizas volantes-agua de tamaños de partícula -16+80, -80+115 y -115+325

Lectura	Cenizas volantes -16+80			Cenizas volantes -80+115			Cenizas volantes -115+325		
	$\tau_w$ (lbf/ft <sup>2</sup> )	$-dv_z/dr$ (s <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (lbm/ft.s)	$\tau_w$ (lbf/ft <sup>2</sup> )	$-dv_z/dr$ (s <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (lbm/ft.s)	$\tau_w$ (lbf/ft <sup>2</sup> )	$-dv_z/dr$ (s <sup>-1</sup> )	$\mu_a$ (lbm/ft.s)
1	0,6897	0,01817	37,95616	0,2434	0,070	3,5	0,088	0,0916	0,962
2	0,6685	0,03284	20,35728	0,2359	0,083	2,9	0,084	0,1041	0,809
3	0,6485	0,04736	13,69422	0,2223	0,097	2,3	0,080	0,1167	0,685
4	0,6207	0,06584	9,42834	0,2451	0,109	2,2	0,099	0,1306	0,760
5	0,5717	0,08371	6,82996	0,1804	0,129	1,4	0,093	0,1432	0,649
6	0,5112	0,10597	4,82413	0,1945	0,143	1,4	0,081	0,1593	0,509
7	0,4445	0,12588	3,53136	0,1789	0,157	1,1	0,057	0,1732	0,330
8	0,4302	0,14280	3,01270	0,1267	0,178	0,7	0,054	0,1887	0,288
9	0,3587	0,16632	2,15689	0,1128	0,195	0,6	0,046	0,2045	0,226
10	0,3007	0,18523	1,62338	0,1036	0,208	0,5	0,040	0,2171	0,186
11	0,2768	0,20021	1,38234	0,1091	0,220	0,5	0,034	0,2298	0,150
12	0,2541	0,21810	1,16508	0,0739	0,239	0,3	0,029	0,2454	0,120
13	0,2140	0,23494	0,91107	0,0544	0,253	0,2	0,023	0,2580	0,090
14	0,1241	0,26058	0,47642	0,0339	0,271	0,1	0,016	0,2738	0,058

$\log(-dv_z/dr)$ , entonces al observar las gráficas 2-7 se nota que  $\mu_a$  disminuye con aumento de la velocidad de deformación por lo que las mezclas carbón-agua de tamaño de partícula  $-10+16$ ,  $-16+80$  y  $-80+115$ , y las mezclas cenizas volantes-agua de tamaños de partículas  $-16+80$ ,  $-80+115$ ,  $-115+325$ , se comportan como fluidos no-newtoniano pseudoplástico.

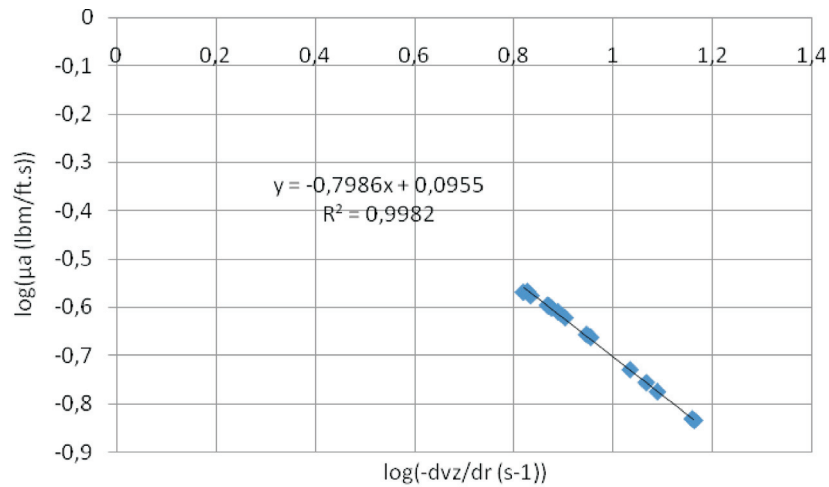


FIGURA 2.  $\log(-dv_z/dr)$  vs.  $\log(\mu_a)$  (carbón mineral  $-10+16$ ).

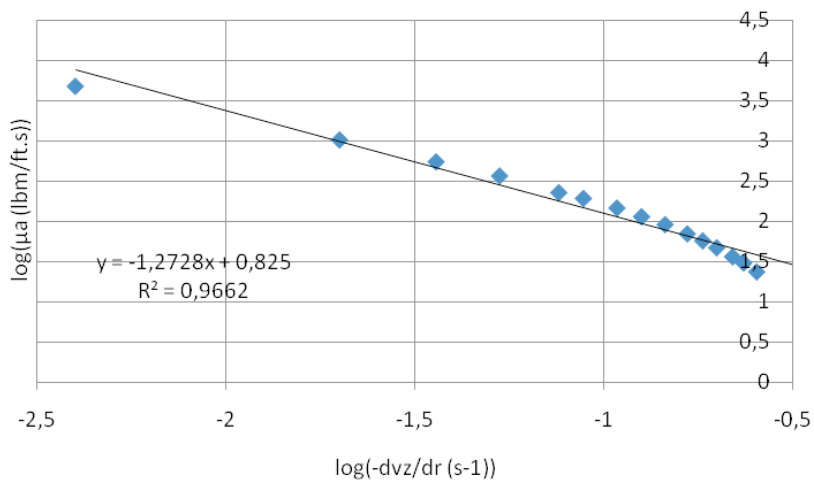


FIGURA 3.  $\log(-dv_z/dr)$  vs.  $\log(\mu_a)$  (carbón mineral  $-16+80$ ).

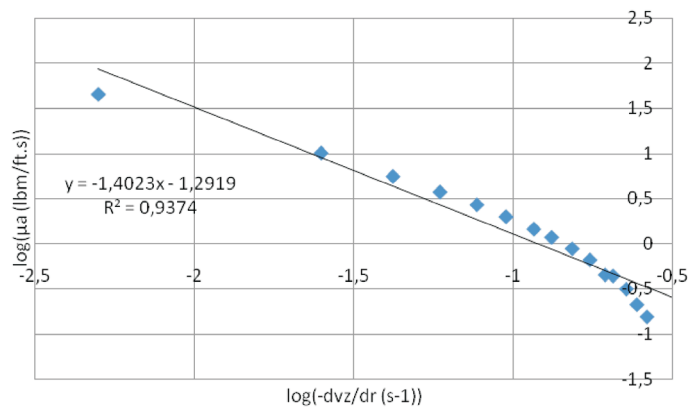


FIGURA 4.  $\log(-dv_z/dr)$  vs.  $\log(\mu_a)$  (carbón mineral -80+115).

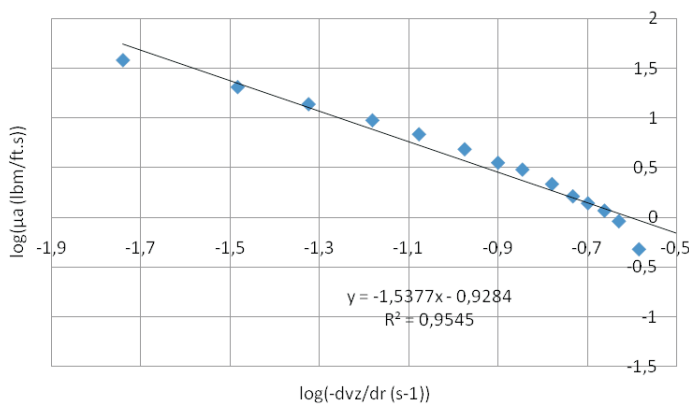


FIGURA 5.  $\log(-dv_z/dr)$  vs.  $\log(\mu_a)$  (cenizas volantes -16+80).

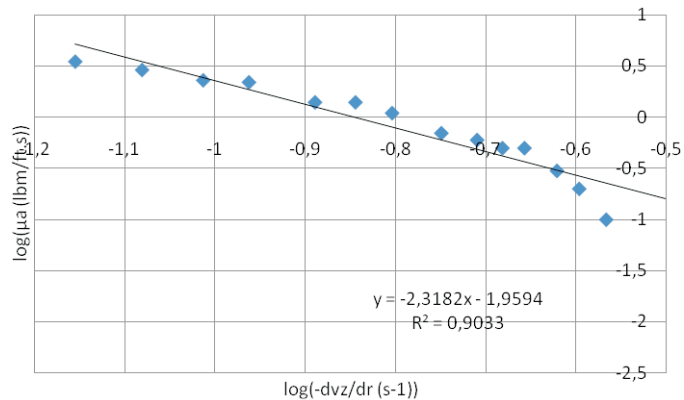


FIGURA 6.  $\log(-dv_z/dr)$  vs.  $\log(\mu_a)$  (cenizas volantes -80+115).

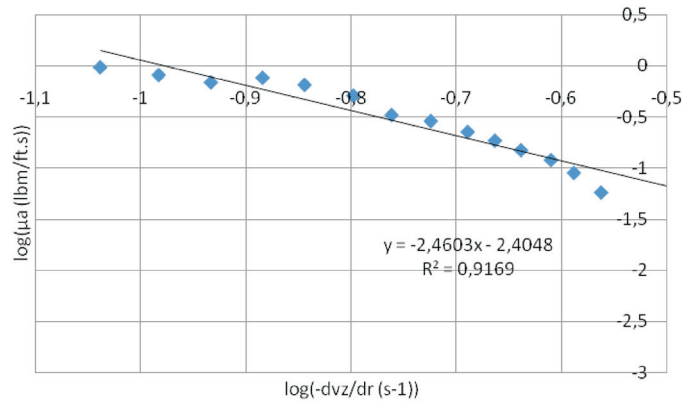


FIGURA 7. log (-dv<sub>z</sub>/dr) vs. log(μ<sub>a</sub>) (cenizas volantes -115+325).

Dependiendo de la naturaleza viscosa, tamaño de partícula y condiciones operacionales, la ecuación constitutiva de la mezcla carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua, puede ser expresada por el Modelo de Ostwald De Waele (Ec.9) o por el Modelo de Ellis (Ec. 10). El Modelo de Ostwald De Waele relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación, por medio de una ecuación de dos parámetros:

$$\tau_{rz} = m \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^n$$

donde  $m$  es el coeficiente de viscosidad,  $n$  el coeficiente de consistencia,  $n > 1$  fluido dilatante y  $n < 1$  fluido pseudoplástico,  $n = 1$  fluido newtoniano. El coeficiente de consistencia se determina del reograma viscosidad aparente-esfuerzo cortante. Las ecuaciones constitutivas para las mezclas carbón mineral-agua y cenizas-agua a diferentes tamaños de partículas se muestran en las tablas 7 y 8.

TABLA 7. Ecuaciones constitutivas para las mezclas carbón mineral-agua por el Modelo de Ostwald De Waele

Carbón mineral -10+16	Carbón mineral -16+80	Carbón mineral -80+115
$\tau_{rz} = 1,251 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,1994}$	$\tau_{rz} = 6,683 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,0597}$	$\tau_{rz} = 0,0510 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,0508}$

TABLA 8. Ecuaciones constitutivas para las mezclas cenizas-agua por el Modelo de Ostwald De Waele

Cenizas volantes -16+80	Cenizas volantes -80+115	Cenizas volantes -115+325
$\tau_{rz} = 0,118 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,0641}$	$\tau_{rz} = 0,011 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,0592}$	$\tau_{rz} = 0,0039 \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)^{0,0344}$

El Modelo de Ellis relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (Ec. 10). Para las mezclas carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua a diferentes tamaños de partículas se tiene:

TABLA 9. Ecuaciones constitutivas para las mezclas carbón mineral-agua por el Modelo de Ellis

Carbón mineral -10+16	$\tau_{rz} = \frac{1}{2,03 + 0,023\tau_{rz}^{7,04}} \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)$
Carbón mineral -16+80	$\tau_{rz} = \frac{1}{-5,04 + 0,356\tau_{rz}^{-0,978}} \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)$
Carbón mineral -80+115	$\tau_{rz} = \frac{1}{-1,08 - 0,292\tau_{rz}^{-1,012}} \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)$

TABLA 10. Ecuaciones constitutivas para las mezclas cenizas-agua por el Modelo de Ellis

Cenizas volantes -16+80	$\tau_{rz} = \frac{1}{-0,459 + 0,349\tau_{rz}^{-0,96}} \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)$
Cenizas volantes -80+115	$\tau_{rz} = \frac{1}{-0,896 + 0,305\tau_{rz}^{0,996}} \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)$
Cenizas volantes -115+325	$\tau_{rz} = \frac{1}{-1,219 + 0,161\tau_{rz}^{-1,15}} \left( -\frac{dv_z}{dr} \right)$

## Conclusiones

Del análisis de resultados del proceso de fluidización con carbón mineral y las cenizas volantes de tamaños de partículas -10+16, -16+80,



–80+115 para el primero; y –16+80, –80+115, –115+325 para el segundo y agua como agente fluidizante, se derivan las siguientes conclusiones:

1. La fluidización con agua de los materiales sólidos: carbón mineral y cenizas volantes dentro del rango de las variables operacionales resultó uniforme, con los siguientes valores de las velocidades mínimas de fluidización: 0.00114591 m/s para el carbón mineral –10+16, 0.00040744 m/s para el carbón mineral –16+80; 0,00035651 m/s para el carbón mineral –80+115; 0,00045837 m/s para las cenizas volantes –16+80, 0.00035651 m/s para las cenizas volantes –80+115 y 0,00028011 m/s para las cenizas volantes –115+325.

2. La correlación de Ergun en la estimación de la velocidad mínima de fluidización presenta errores mínimos absolutos de 12,50%, mientras la correlación de Theodore-Buonjcore en la estimación de la velocidad terminal de partícula presenta errores mínimos absolutos de 0,013%. Los valores teóricos de las velocidades mínimas de fluidización resultaron: 0,00225 m/s para el carbón mineral –10+16, 0,0028 m/s para el carbón mineral –16+80 y 0,0023 m/s para el carbón mineral –80+115; 0,000547 m/s para las cenizas volantes –16+80; 0,000418 m/s para las cenizas volantes –80+115 y 0,000238 m/s para las cenizas volantes –115+325.

3. Las mezclas carbón mineral-agua –10+16, –16+80 y –80+115 y cenizas volantes-agua –16+80, –80+115 y –115+325, presentaron un comportamiento no-newtoniano pseudoplástico, es decir, la viscosidad absoluta disminuyó a medida que aumentó la velocidad de deformación.

La ecuación constitutiva de las mezclas carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua para cada tamaño de partícula puede ser expresada por los Modelos de Ellis y de Ostwald De Waele.

4. La viscosidad aparente de las mezclas carbón mineral-agua y cenizas volantes-agua disminuye con la disminución del tamaño de partículas. Así, para la fracción granular del carbón mineral, la viscosidad de la mezcla carbón-agua muestra valores entre 217.94 cp y 403,53 cp para el rango del esfuerzo entre 1,82 y 2,13 lbf/ft<sup>2</sup>, mientras para la fracción pulverizada de carbón, la viscosidad de la mezcla presenta valores entre 231,26 cp y 67235 cp para el rango del esfuerzo entre 0,041 y 0,265 lbf/ft<sup>2</sup>. Para la mezcla cenizas volantes-agua, la fracción granular de las cenizas volantes, los valores de viscosidad se ubican entre 708.98 cp y 56475 cp para el rango del es-

fuerzo entre 0,124 y 0,689 lbf/ft<sup>2</sup>; mientras para la fracción pulverizada de las cenizas volantes, los valores de viscosidad se ubican entre 86,31 cp y 1431,61 cp para el rango del esfuerzo entre 0,016 y 0,088 lbf/ft<sup>2</sup>.

## Referencias

- Adiga K., Pithapurwala Y., Shah D. and Moudgil B. (1988). Coal Slurries in mixed liquid fuels: rheology and ignition characteristics. *Fuel Processing Technology*, 18(1):59-69.
- Altaweel A.M., Fadaly O. and Kwak J. (1985). *The effects of coal properties on the rheology and stability of coal-water slurry*. Seven International Symposium of Coal Slurry Combustion and Technology, New Orleans, Louisiana, USA.
- Ekman A. and Ekman J. (1984). *Coal-water-methanol slurries: viscometric properties and the effects on coal type*. Sixth International Symposium on Coal Slurry Combustion and Technology, 25 June, Orlando, Florida, USA.
- Foust A., Wenzel L., Clump C., Maus L. and Andersen L. (1967). *Principles of Unit Operations*. John Wiley & Sons Inc., New York, Fifth Printing, Chapter 22, pág. 449-513.
- Funk J., Coal-water slurry and methods for its preparation (1981). US Patent 4282006.
- García C. y Sarmiento C. (1994). Cálculo de Velocidades Terminales para partículas de cualquier esfericidad. *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, 17(3):175-183.
- García C., Rincon Y., Sarmiento C., Rincon C. y Mata F. (2003). Predicción de las ecuaciones constitutivas para suspensiones de carbón-agua, *Ciencia*, 2(1):77-86.
- Gilmartin B. (1981). The rheology of a three component system coal-water-fuel oil emulsions. PhD Dissertation, Adelphi University.
- Heaton H., Lippold J., Mc Hale E. and Skolnik E. (1987). *Process for controlling the viscosity and stability of a coal-water fuel slurry*, US Patent 4687490.
- Joves V. (2009). Caracterización Viscosa de Mezclas de Carbón Mineral-Agua y Cenizas Volantes-Agua mediante la fluidización en medio acuoso. Tesis de Maestría en Ingeniería Química, LUZ, Maracaibo, Venezuela, 241 páginas.
- Rakitsky W. and Prieto Mo (1985). *Method to minimize viscosity and improve stability of coal-water fuels*. US Patent 4810259.
- Woskoboenko F., Siemon S. and Creasy D. (1988). *Rheology of Victorian Brown Coal Slurries*, Chemeca 88: Australia's Bicentennial International Conference for the Process Industries, Australia.