

Predicción de las ecuaciones constitutivas para suspensiones de carbón-agua

Yolanda Rincón, César García^{1}, Carmen Sarmiento, Carlos Rincón
y Freddy Mata²*

¹*División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo.*

²*Instituto de Investigaciones Petroleras, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia,
Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela.*

Recibido: 15-06-01 Aceptado: 26-11-02

Resumen

En el presente trabajo de investigación se presenta el desarrollo matemático de un modelo de predicción del comportamiento reológico de suspensiones acuosas de carbón, considerando los efectos de las variables operacionales de concentración de carbón, granulometría del carbón, concentración del aditivo y naturaleza del aditivo. Se ensayaron suspensiones preparadas con carbón mineral proveniente del Manto IV de la región del Guasare del Estado Zulia en concentraciones entre 50% y 60%, granulometría -100+200, -200+230 y > 400; y se emplearon los aditivos 2-Naftaleno ácido sulfónico sal de sodio y los polímeros aniónicos Lipesa 725 y Lipesa 727. Los datos experimentales de velocidad angular-torque obtenidos para un Viscosímetro Brookfield modelo RVT se acoplaron a un modelo teórico de flujo rotacional para la determinación de la velocidad de deformación. El modelo fue comprobado mediante la comparación de la viscosidad experimental de la suspensión y los resultados obtenidos del modelo desarrollado.

Palabras clave: Carbón; propiedades reológicas; suspensiones; viscosidad.

Prediction of constitutive equations for coal-water slurry

Abstract

The present research work shows a mathematical model for predicting the rheological behavior of aqueous suspensions of coal. The effects of operational variables as coal concentration, size analysis of coal, additive concentration and additive nature were considered. Samples of mineral coal coming from Seam IV of Guasare Region of Zulia State were used in concentrations between 50% and 60%, particle size of -100+200, -200+230 and > 400 (mesh); and the additives were sodium salt of Alkyl 2-Naftalen Sulfonic Acid and the anionic polymers Lipesa 725 and Lipesa 727. The experimental data of angular velocity-torque obtained from a Brookfield Viscometer, were adjusted to a theoretical model of rotational flow for determining the shear rate under the different operating conditions of mixture.

Key words: Coal; rheological properties; slurry; viscosity.

* Autor para la correspondencia. E-mail: cgarcia@luz.ve

Introducción

En general, las mezclas carbón-agua no forman soluciones ni suspensiones estables, lo cual hace necesario el uso de aditivos que actúan para crear o promover la formación de una carga electrostática repulsiva sobre la partícula de carbón en el medio acuoso. La carga se genera en la interfase entre la capa de agua enlazada sobre la partícula y la capa de agua difusa que rodea a la partícula. La repulsión electrostática entre las partículas genera defloculación en aquellas de tamaño coloidal, lo cual promueve la dispersión de los granos del carbón en la mezcla acuosa (1, 2, 3). Otra acción importante que debe cumplir el aditivo es la modificación de la capa de agua enlazada al carbón para permitir un empaquetamiento cerrado de las partículas, lo cual confiere a la mezcla carbón-agua propiedades reológicas de un fluido pseudoplástico (4) Los aditivos son básicamente mezclas de surfactantes orgánicos aniónicos y electrolitos; la mayoría de los aditivos pierden su acción surfactante por encima de 60°C y a bajos valores de pH, el uso de un aditivo capaz de estabilizar una mezcla acuosa de un determinado carbón podría no ser adecuado para otro tipo de carbón (5).

Estudios acerca del comportamiento reológico de las mezclas de carbón y agua indican un fluido de tipo pseudoplástico o plástico de Bingham, según el surfactante utilizado (1, 4, 6, 7). Moudgil et al. (8), realizaron mediciones de viscosidades de suspensiones de carbón-agua al 30%, utilizando carbón previamente lavado por la técnica de flotación y molido hasta el tamiz número 200; ellos concluyeron que la viscosidad disminuye con el incremento de la concentración del aditivo surfactante ya que genera superficies hidrofóbicas en el carbón. Okuma et al. (9) estudiaron los efectos de temperatura, concentración del carbón y propiedades del solvente sobre la viscosidad de la suspensión carbón-solventes derivados de

la licuefacción del carbón, utilizando para las mediciones un viscosímetro rotacional tipo Couette. Los efectos de las propiedades del solvente sobre la viscosidad de la suspensión fueron explicados por la interacción entre el carbón y los compuestos conteniendo oxígeno en las estructuras moleculares del solvente. Tsutsumi y Yoshida (10) utilizaron un viscosímetro capilar para obtener valores de caudales y caídas de presión para diferentes suspensiones de carbón-aceites en el intervalo de temperaturas de 373 K a 653 K. Los resultados indicaron que el solvente genera un hinchamiento del carbón con incrementos en la viscosidad de la suspensión, seguidamente se produce la extracción y la aglomeración del carbón debido a la formación de puentes por los materiales coloidales y al rearrreglo entre las partículas por encima de 523 K y esto causa el aumento de la viscosidad y del comportamiento no-newtoniano.

El objetivo de la presente investigación es el desarrollo de un modelo matemático que permita determinar la naturaleza reológica de las suspensiones de carbón-agua para diseñar su mecanismo de transporte. 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.

El análisis teórico de las ecuaciones de 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, movimiento lineal o ecuación de Cauchy y del balance integral de masa del fluido en coordenadas cilíndricas y bajo las siguientes consideraciones (11-14):

i) La mezcla carbón-agua estabilizada con aditivos no presenta sedimentación y es

de densidad constante-fluido incompresible; ii) La mezcla se comporta como un fluido puramente viscoso, esto es, el esfuerzo cortante solo varía con la velocidad de deformación; iii) Flujo en régimen estacionario, sin variación con el tiempo, uniforme e isotérmico; iv) Las líneas de flujo se aproximan a círculos concéntricos sobre el plano horizontal, perpendicular al eje de rotación, esto es, la componente principal de velocidad es V_θ con $V_r = V_z = 0$.

De la ecuación de continuidad, $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{V}) = 0$, si el diseño geométrico del viscosímetro es tal que $Z \gg (R_2 - R_1)$, entonces el perfil de velocidad está dado por:

$$V_\theta = f(r), V_r = V_z = 0$$

Donde, ρ es la densidad del fluido, v el vector velocidad, V componente de la velocidad en la dirección angular, Z la posición vertical de la superficie libre del fluido, R_1 , radio interno del cilindro interno; R_2 radio interno del cilindro externo.

Las componentes del tensor velocidad de deformación, $\bar{D} = \frac{1}{2}[\nabla \bar{V} + (\nabla \bar{V})^T]$ [1]

diferentes de cero como producto del perfil de velocidad, resultan

$$D_{r\theta} = D_{\theta r} \neq 0$$
 [2]

Por la consideración de fluido puramente viscoso, esto es

$$\tau_{ij} = D_{ij} g(D_{ij})$$
 [3]

las componentes $\tau_{ij} \neq 0$, son: $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r}$ [4]

Donde, \bar{D} es el tensor deformación, ∇v el tensor transpuesto del gradiente ∇v ; τ el esfuerzo viscoso, τ_{ij} las componentes del esfuerzo, $g(D_{ij})$ la ecuación constitutiva del fluido

De la aplicabilidad de la Ecuación de Cauchy,

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} \right) = \rho \bar{g} - \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}$$
 [5]

en las direcciones r , θ y Z , se obtienen los siguientes resultados:

$$i) \frac{dZ}{dr} = \frac{V_\theta^2}{gr}$$
 [6]

que relaciona la altura de la superficie libre del fluido Z con la posición radial r en función del movimiento angular V_θ .

$$ii) \frac{d}{dr}(r^2 \tau_{r\theta}) = 0, \quad r^2 \tau_{r\theta} = R_1^2 \tau_{w1} = R_2^2 \tau_{w2}$$
 [7]

que relaciona el esfuerzo cortante con la posición radial, con los valores extremos a los radios R_1 , R_2 .

El balance de masa establece que la cantidad de fluido contenida en la región anular se conserva independiente del movimiento que puede alcanzar, esto es,

$$m_{w=0} = m_{w \neq 0}; \text{ donde } w \text{ es la velocidad angular [8]}$$

sustituyendo las respectivas expresiones

$$\rho L_0 \pi (R_2^2 - R_1^2) = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} \rho Z r dr$$
 [9]

donde, m es la masa de fluido contenida en el viscosímetro, L_0 es el nivel de llenado para $w=0$; integrando por partes la Ecuación [9] y reemplazando dz/dr por la Ecuación [6], resulta:

$$\lambda = g \left[L_0 (R_2^2 - R_1^2) - Z_2 R_2^2 + Z_1 R_1^2 \right] = - \int_{R_1}^{R_2} r V_\theta^2 dr$$
 [10]

donde Z_2 es el nivel del fluido a la superficie $r = R_2$ y Z_1 el nivel del fluido a $r = R_1$ para $w \neq 0$; λ se denomina factor de la superficie libre del fluido, λ será cero solamente para $w = 0$, $L_0 = Z_2 = Z_1 =$ longitud de llenado del fluido.

Integrando por partes la Ecuación [10] e incorporando la Ecuación [7] con el patrón

de movimiento a $r = R_1$, $V_\theta \rightarrow w_1 R_1$ y a $r = R_2$, $V_\theta \rightarrow w_2 R_2$, así se obtiene la siguiente expresión integral:

$$\frac{2\lambda}{R_1^3 \tau_{w1}^{3/2}} + \frac{w_2^2 R_2^4}{R_1^3 \tau_{w1}^{3/2}} - \frac{w_1^2 R_1}{\tau_{w1}^{3/2}} = \int_{\tau_{w1}}^{\tau_{w2}} \tau_{r\theta}^{-5/2} V_\theta \left(-\frac{dV_\theta}{dr} \right) d\tau_{r\theta} \quad [11]$$

Derivando respecto a τ_{w1} la ecuación anterior y sustituyendo $w_1 \neq 0$ y $w_2 = 0$ conforme al viscosímetro Brookfield, se obtiene la expresión diferencial de la velocidad de deformación:

$$-\frac{dV_\theta}{dr} \Big|_{r=R_1} = \frac{3\lambda}{wR_1^4} + 2\tau_{w1} \frac{dw}{d\tau_{w1}} - \frac{3}{2} w \quad [12]$$

Los valores de esfuerzo cortante τ_{w1} se relacionan con las mediciones del torque axial \mathfrak{S}_z a través de la definición:

$$\tau_{wA} = \frac{\mathfrak{S}_z}{2\tau R_1^2 L_e} \quad [13]$$

donde L_e es la longitud efectiva del nivel del líquido

Así, para la mezcla carbón-agua, los valores experimentales (w_1, \mathfrak{S}_z) conjuntamente con los parámetros de calibración (λ, L_e) permiten la determinación de la velocidad de deformación según la ecuación [12] y en consecuencia la naturaleza viscosa de la mezcla en referencia.

Metodología Experimental

La preparación del carbón se hizo según la norma ASTM D-346, molido en una trituradora de mandíbula marca Holmes, separadas las fracciones en un electrovibrador en un intervalo equivalente de 60 a 400 malla y las submuestras fueron almacenadas en argón hasta el momento de su uso; la distribución de tamaños para la fracción inferior a 400 malla fue realizada en un separador laser marca Granulometer modelo

Tabla 1
Análisis Granulométrico de la muestra de carbón

Mallas(micrones)	Porcentaje
60 (250 μ m)	10,50
100(150 μ m)	7,74
200(75 μ m)	44,75
230 (63 μ m)	6,45
400 (38 μ m)	16,16
>400(<38 μ m)	14,40

Tabla 2
Análisis Granulométrico de la muestra inferior a 400 mesh

Micrones	Porcentaje
1	1,5
1,5	2,0
2,0	3,6
3,0	5,5
5,0	7,7
6,0	12,7
8,0	18,5
12,0	31,0
16,0	46,6
24,0	72,8
32,0	90,7
36,0	100,0

715; las Tablas 1-2 reportan los resultados correspondientes. La caracterización química del carbón, esto es, análisis inmediatos, poder calorífico y análisis últimos de acuerdo a las normas ASTM [15] se muestran en las Tablas 3-4.

Las suspensiones carbón-agua se estabilizaron según la metodología experimental de Funk [1]; para un litro de solución al 50% (p/v) de carbón conteniendo 1% en peso del aditivo por peso de carbón, se pesa una

muestra de carbón, 500 gramos, base húmeda, ésta es dispersada en un volumen de agua que contiene el surfactante (5 gramos) hasta completar un litro de solución; seguidamente se utiliza un agitador marca Lightnin de velocidad variable durante 10 minutos para obtener una buena homogeneización de la mezcla. A tal efecto, se prepararon muestras de suspensión de carbón-agua-aditivo con las siguientes variables operacionales: concentración de carbón (p/v) 50% y 60%; concentración del aditivo (p/p) 0.50% y 1%; granulometría del carbón -100+200, -200+230 y >400; naturaleza del aditivo 2-naftaleno ácido sulfónico sal de sodio elaborado por Aldrich Chemical Co. y los polímeros aniónicos Lipesa 725 y Lipesa 727 suministrada por la Empresa Lipesa.

El viscosímetro utilizado es del tipo rotacional, marca Brookfield Sincro-Electronic, modelo RVT, consta básicamente de un recipiente para la muestra, un cilindro que rota a ocho velocidades (0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0 y 100 rpm) proporcionados por un inductor de precisión sincrónica tipo motor; y de un vástago conectado a un resorte previamente calibrado. La rotación del vástago sumergido en el fluido permite calcular el torque para vencer la resistencia viscosa al movimiento. Este torque produce determinada torsión del resorte la cual es registrada en una escala graduada, ésta lectura es proporcional al esfuerzo de corte para cualquier velocidad angular (16). Metodológicamente las mediciones del viscosímetro para cada muestra de la suspensión carbón-agua referidas a velocidad angular y torque axial (w , \mathfrak{S}) conjuntamente con los parámetros de calibración (λ , L_e), permiten la determinación de la velocidad de deformación por intermedio de la Ecuación [12] para la posterior identificación viscosa de la suspensión carbón-agua por los reogramas de esfuerzo cortante-velocidad de deformación y de viscosidad aparente-esfuerzo cortante.

Tabla 3
Resultados de los Análisis Inmediatos

Humedad total (% en peso)	6,41
Ceniza (% en peso)	4,10
Materia volátil (% en peso)	33,94
Carbono fijo (% en peso)	55,55
Azufre total (% en peso)	0,55
Poder calorífico (cal/g)	7920,62

Tabla 4
Resultados de los Análisis últimos (% en peso)

Carbono	85,62
Hidrógeno	5,49
Nitrógeno	0,18
Azufre total	0,59
Oxígeno	8,12

Resultados y Discusión

Para la calibración del viscosímetro rotacional en el intervalo de las mediciones reológicas se utilizó como fluido newtoniano el Fluído 60 suministrado por la Brookfield Engineering Laboratories Inc., de viscosidad absoluta 48.20 cp a 25°C. Los parámetros de calibración (L_e , λ) para el fluido newtoniano de ecuación constitutiva $\tau_{r\theta} = 2\mu D_{r\theta}$ con el patrón de flujo, $V_\theta = w.R_1$ para $r = R_1$ y $V_\theta = 0$ para $r = R_2$, resultando:

$$L_e = \frac{R_2^2 - R_1^2}{4\pi\mu w R_1^2 R_2^2} \mathfrak{S}_z \quad [14]$$

$$\lambda = \frac{R_1^4}{3} \left[\left(\frac{\tau_1}{\mu} \right) w + \frac{5}{2} w^2 - 2\tau_1 w \frac{dw}{d\tau_1} \right] \quad [15]$$

donde el esfuerzo cortante a $r = R_1$ está dado por,

$$\tau_{w1} = \frac{2\mu w R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad [16]$$

La ecuación [14] permite el cálculo de la longitud (L_e) efectiva de mojado del fluido sobre la superficie $r = R_1$, el factor λ definido por la ecuación [10] y determinado por la ecuación [15]; y del esfuerzo cortante ($\tau_1 = \tau_{wl}$) a partir de la ecuación 16. Todos estos en función de los valores de velocidad angular (w) y del torque axial (\mathfrak{T}_z) para los diferentes arreglos de vástagos, en forma y dimensiones adaptados al viscosímetro Brookfield modelo RVT. Así, de manera ilustrativa para el arreglo No. 3 de la serie RV/H (15) de diámetro $2R_1 = 34,69 \text{ mm}$ y diámetro del porta-muestra $2R_2 = 83,40 \text{ mm}$, la variación de L_e y λ con la velocidad angular se presenta en la Tabla 5.

Los resultados experimentales demuestran claramente la naturaleza pseudoplástica de la suspensión Carbón-Agua-Aditivo, esto es, la viscosidad aparente disminuye con el aumento del esfuerzo cortante, tal como se observa en la Tabla 6 para los sistemas Carbón-Agua-Naftaleno, Carbón-Agua-Lipesa 725 y Carbón-Agua-Lipesa 727 bajo las condiciones operacionales allí indicadas.

El efecto de las variables operacionales sobre las propiedades reológicas de la suspensión carbón-agua-aditivo se resume de la siguiente manera:

i) Incremento de la viscosidad aparente con aumento del contenido de carbón, esto es, las muestras con un contenido de carbón del 60% exhibieron mayores viscosidades que las muestras con 50%, en la Tabla 7 se presentan los valores particulares de viscosidad aparente a 50 RPM como velocidad comparativa en función del porcentaje de carbón y de la granulometría para el correspondiente aditivo, ii) El tamaño del grano tiene una relación directa sobre la viscosidad, a menor tamaño, mayor es la viscosidad aparente de la suspensión, y iii) En general, las suspensiones mostraron buena estabilidad con los aditivos ensayados, con los mayores valores de viscosidad para el aditivo Lipesa 725, luego Lipesa

Tabla 5
Variación de los parámetros L_e y λ

w, RPM	L_e , cm	λ , m^4/s^2
100	9,67	$2,35 \times 10^{-4}$
50	7,49	$5,87 \times 10^{-5}$
20	6,24	$9,39 \times 10^{-6}$
10	5,74	$2,35 \times 10^{-6}$
5	5,61	$5,87 \times 10^{-7}$
2,5	5,49	$1,47 \times 10^{-7}$
1	4,36	$2,35 \times 10^{-4}$
0,5	2,49	$5,87 \times 10^{-9}$

sa 727 y finalmente la sal de naftaleno, el incremento de la concentración del aditivo favorece el carácter viscoso de la suspensión. Así, para 60% de carbón de granulometría entre los tamices 100 y 200, resulta como viscosidad aparente 0,24 Pa.s a 50 RPM para 0,5% de la sal de naftaleno comparado con 0,28 Pa.s para 1% de la sal de naftaleno, de igual manera para granulometría > 400 se obtiene como viscosidad aparente 0,94 Pa.s para 0,5% de la sal de naftaleno comparado con 1,65 Pa.s para 1% de la sal de naftaleno.

Dependiendo de la naturaleza viscosa y de las condiciones operacionales la ecuación constitutiva de la suspensión carbón-agua-aditivo puede ser expresada por el Modelo de Ostwald De Wacle o por el Modelo de Ellis (16).

El modelo de Ostwald De Wacle relaciona en el reograma el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación, por una ecuación de dos parámetros así:

$$\tau_{r\theta} = m \left(-\frac{dV_\theta}{dr} \right)^n \quad [17]$$

donde, m es el coeficiente de viscosidad, n es el coeficiente de consistencia, $n > 1$ fluido dilatante, $n < 1$ fluido pseudoplástico, $n = 1$ fluido newtoniano.

Tabla 6
Relación Viscosidades Aparentes-Esfuerzos Cortantes para la mezcla Carbón-Agua-Aditivo

Carbón-Agua-Naftaleno Porcentaje de Carbón 50% Granulometría: -200 + 230 Porcentaje de Aditivo: 0,50%			Carbón-Agua-Lipesa 725 Porcentaje de Carbón: 60% Granulometría: -200 + 230 Porcentaje de Aditivo: 1%			Carbón-Agua-Lipesa 727 Porcentaje de Carbón: 60 Granulometría: -200 + 230 Porcentaje de Aditivo: 1%		
V.Angular RPM	Esfuerzo Pa	Viscosidad Pa.s	V.Angular RPM	Esfuerzo Pa	Viscosidad Pa.s	V.Angular RPM	Esfuerzo Pa	Viscosidad Pa.s
0,5	7,45	2,40	0,5	15,53	5,00	0,5	22,5	4,00
1	12,42	2,00	1	27,96	4,45	1	24,85	4,40
2,5	16,15	1,04	2,5	54,67	3,52	2,5	43,48	2,80
5	24,85	0,80	5	85,74	2,76	5	59,02	1,90
10	46,60	0,75	10	130,47	2,10	10	86,98	1,40
20	86,98	0,70	20	192,59	1,55	20	118,04	0,95
50	192,60	0,62	50	310,6	1,00	50	173,96	0,50
100	360,34	0,58	100	441,11	0,71	100	248,51	0,40

Tabla 7
Efectos de las Variables operacionales sobre la viscosidad aparente a 50 RPM

Granulometría Mallas	% Carbón	Viscosid-Naft (0,5%) Pa,s	Visc,-Lipesa 725 (0,5%) Pa,s	Visc,-Lipesa 727 (0,5%) Pa,s
-100 + 200	50	0,20	0,22	0,46
	60	0,24	0,96	0,67
-200 + 230	50	0,62	0,34	0,50
	60	1,20	1,00	0,70
> 400	50	0,62	2,43	1,16
	60	1,60	2,64	1,84

o, en el reograma viscosidad aparente-esfuerzo cortante,

$$\log \mu_a = \frac{1}{n} \log m + \left(1 - \frac{1}{n}\right) \log \tau_{r0} \quad [18]$$

donde, μ_a es la viscosidad aparente. Por su parte, el Modelo de Ellis relaciona en el reograma el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación, por una ecuación de tres parámetros así:

$$\tau_{r0} = \frac{1}{A + B\tau_{r0}^{\alpha-1}} \left(-\frac{dV_{\theta}}{dr} \right) \quad [19]$$

donde A, B, α son parámetros constantes y en el reograma la viscosidad aparente-esfuerzo cortante los parámetros A, B y α se determinan por intermedio de un ajuste por mínimos cuadrados para N mediciones:

$$AN + B \sum_{i=1}^N \tau_i^{\alpha-1} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\mu_i} \quad [20]$$

$$A \sum_{i=1}^N \tau_i^{\alpha-1} + B \sum_{i=1}^N \tau_i^{2\alpha-2} = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i^{\alpha-1}}{\mu_i} \quad [21]$$

$$A \sum_{i=1}^N \tau_i^{\alpha-2} + B \sum_{i=1}^N \tau_i^{2\alpha-3} = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i^{\alpha-2}}{\mu_i} \quad [22]$$

Sobre la base de errores totales mínimos dados por $\delta_T^2 = \sum_{i=1}^N (\mu_{i \text{ exp}} - \mu_{i \text{ calc}})^2$, la ecuación constitutiva para cada condición operacional de mezcla queda definida de acuerdo al ajuste según la ecuación [17] o por la ecuación [19]. Así, en la Figura 1 se compara la data experimental de la suspensión carbón-agua-naftaleno (60% Carbón, Granulometría de tamices entre 200 y 230 y 1.0% Aditivo) con la resultante ecuación constitutiva de Ellis,

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{0,80 - 1,09 \tau_{r\theta}^{0,43}} \left(-\frac{dV_\theta}{dr} \right) \quad [23]$$

De igual manera la Figura 2 compara la suspensión carbón-agua-Lipesa 725 en el ajuste de la data experimental (50% Carbón, Granulometría > 400 mesh y 1,0% Aditivo) con la equivalente ecuación constitutiva de Ellis,

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{0,045 + 0,087 \tau_{r\theta}^{0,81}} \left(-\frac{dV_\theta}{dr} \right) \quad [24]$$

Mientras, la Figura 3 presenta la data experimental de la suspensión Carbón-Agua-Lipesa 727 (60% Carbón, Granulometría > 400 mesh y 1,0% Aditivo) con el ajuste de la ecuación constitutiva según el modelo de Ostwald DeWaele,

$$\tau_{r\theta} = 4,38 \left(-\frac{dV_\theta}{dr} \right)^{0,50} \quad [25]$$

Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos sobre el compartimiento reológico de la

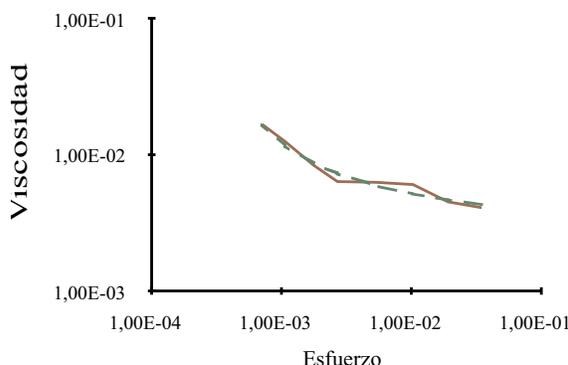


Figura 1. Viscosidad aparente vs esfuerzo Cortante para la suspensión Carbón-Agua-Naftaleno. — trazo continuo de la data experimental. --- trazo disperso ajuste mediante ecuación constitutiva.

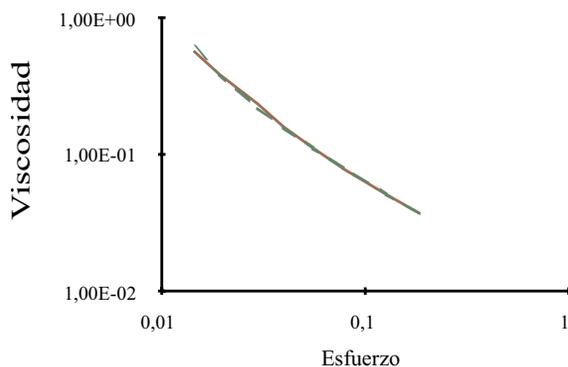


Figura 2. Viscosidad Aparente vs. Esfuerzo Cortante para la suspensión Carbón-Agua-Lipesa 725. — trazo continuo de la data experimental. --- trazo disperso ajuste mediante ecuación constitutiva.

suspensión carbón de Guasare-agua-aditivo e interpretado por el modelo teórico de flujo adaptado al viscosímetro rotacional, se derivan las siguientes conclusiones:

La suspensión carbón de Guasare-agua-aditivo sigue el patrón reológico de un fluido pseudoplástico, esto es, la viscosidad aparente disminuye con el aumento del es-

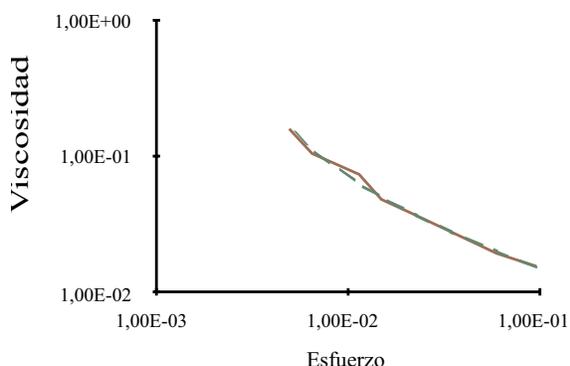


Figura 3. Viscosidad Aparente vs Esfuerzo Cortante para la suspensión Carbón-Agua-Lipesa 727. — trazo continuo data experimental. --- trazo disperso ajuste mediante ecuación constitutiva.

fuerzo cortante para todas las condiciones operacionales estudiadas, entre 50% y 60% (p/v), concentración del carbón entre 0.5% y 1% (p/p), concentración del aditivo granulometría del carbón entre 100 y 200; 200 y 230 y más de 400 malla y para los aditivos 2-Naftaleno Acido Sulfónico Sal de Sodio y los polímeros aniónicos Lipesa 725 y Lipesa 727.

El efecto de las variables operacionales sobre la viscosidad aparente de la suspensión se resume así: i) Aumenta con el incremento del contenido de carbón, ii) Aumenta con la disminución del tamaño del grano del carbón, iii) 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.

La ecuación constitutiva de la suspensión carbón de Guasare-agua-aditivo para cada condición operacional de la suspensión puede ser expresada por los Modelos de Ellis y de Ostwald De Wacle sobre la base de errores totales mínimos dados por

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^N (\mu_{i, \text{exp}} - \mu_{i, \text{calc}})^2$$

Agradecimiento

Agradecemos a la Fundación de Laboratorios Servicios Técnicos Petroleros y al Instituto de Investigaciones Petroleras de la Universidad del Zulia por facilitar sus instalaciones para la realización de las pruebas de flujo. Igualmente agradecemos al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES-LUZ) por el apoyo financiero otorgado para llevar a cabo esta investigación.

Referencias Bibliográficas

1. FUNK J.E. *Coal-water slurry and methods for its preparation*, U.S. Pat. 4.282.006, Aug. 4, p. 44, 1981.
2. SISLEY J.P. *Encyclopedia of surface-active agents*, Vol. 11, New York, Chemical Publishing Co p. 1296, 1964.
3. ADAMSON A.W. *Physical chemistry of surfaces* 3rd. Edition, John Wiley and Sons, New York (USA), p. 489, 1976.
4. ALTAWHEEL A.M., FADALY O., KWAK J.C.T. The effect of coal properties on the rheology and stability of coal-water slurry, *Seventh International Symposium of Coal Slurry Technology*, New Orleans, Louisiana, p. 15-42, 1985.
5. NELSON R.D. *Dispersing powders in liquids* Amsterdam (Elsevier), 1988.
6. OLDSHUE J.Y., *Chem Eng Prog* 95-98, 1981.
7. WOSKOBOENKO F., SIEMON S., CREASY D. *Fuel* 68: 120-124, 1989.
8. MOUDGIL B.M., MAHAJAN A., KAJIR. *Fuel Processing* 18: 97-100, 1988.
9. OKUMA O., KAJUMIRO M., YANAI S. *Fuel* 22: 75-86, 1989.
10. TSUTSUMI A., YOSHIDA K. *Fuel* 65: 906-909, 1986.
11. ROSALES J., DÍAZ F., ALVARADO D. Mediciones reológicas con el viscosímetro Brookfield: (Trabajo Especial de Grado),

- Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), p. 45-46, 1977.
12. GUTIÉRREZ E., GARCÍA C. **Rev Tec Ing** 4(1-2): p. 81-118, 1981.
 13. FONTALVO A., SÁNCHEZ A., GARCÍA C. **Rev Tec Ing** 5(2): 22-36, 1982.
 14. RINCÓN Y., GARCÍA C. Estudio de las propiedades reológicas y las condiciones de estabilización de las suspensiones de carbón en agua (Tesis de Maestría), Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 106-120, 1995.
 15. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, "Gaseous Fuels, coal and coke, atmospheric analysis", Part. 5, **Annual Book of ASTM Standards** 1992.
 16. BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES Inc., **A guide to getting more you're your Brookfield Viscometer** Massachusetts 1988.