

## Caracterización reológica de pulpas de cieno carbonatado

Rodney Martínez-Rojas  
Gabriel Hernández-Ramírez

### Resumen

Esta investigación tuvo el propósito de establecer, a partir del comportamiento reológico de plástico ideal (Bingham) de las pulpas de cieno carbonatado, la correlación entre propiedades reológicas y contenido de sólido de las mismas, con el fin de obtener un modelo para el cálculo de la viscosidad aparente de estas pulpas. Se reveló que las pulpas de cieno se comportan como un plástico ideal, ajustable al modelo de Bingham, para contenido de sólido entre 30 % y 50 %; a partir de estos valores se obtienen los parámetros reológicos de esfuerzo cortante inicial y viscosidad plástica y su relación con el comportamiento de la viscosidad aparente. Las ecuaciones que correlacionan el esfuerzo cortante y la viscosidad plástica con los porcentajes de sólidos permiten definir el modelo de viscosidad aparente para la variación del contenido de sólido.

**Palabras clave:** cieno carbonatado; comportamiento reológico; viscosidad aparente.

## Calcium carbonate slurry rheological characterization

### **Abstract**

The objective of this investigation is to establish the correlation between the rheological properties and the solids content in the calcium carbonate slurry based on the (Bingham) ideal plastic rheological patterns in order to generate a model for estimating the apparent viscosity of the slurry. The investigation results revealed that the behavior of the calcium carbonate mud slurry is similar to that of the ideal plastic adjustable to the Bingham model for a solids content between 30 and 50%. Based on these values, the rheological parameters of initial shear strength and plastic viscosity and their relation with the apparent viscosity behavior are determined. The equations correlating the shear strength and the plastic apparent viscosity with the solids percent allow defining the apparent viscosity model for changes in solids content.

**Keywords:** calcium carbonate mud; rheological behavior; apparent viscosity.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los procesos tecnológicos de las industrias química y minero metalúrgica el conocimiento del comportamiento reológico de las suspensiones de materiales es de gran utilidad para el cálculo de los equipos y conductos que las transportan. Dicho comportamiento está estrechamente relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas.

Estudios realizados en suspensiones mineras han permitido determinar que para concentraciones inferiores al 18 % en peso de sólidos las curvas de flujo exhiben un comportamiento pseudoplástico. Sin embargo, para concentraciones de alrededor de 22 % hasta 45 % en peso de sólidos la viscosidad y el comportamiento reológico adquieren propiedades plásticas, pudiendo ajustarse al modelo de Bingham, en algunos casos, o al de Bulkley-Herschel, en otros (Skelland 1970; Cerpa et al. 2001; Garcell, Díaz & Surís 1988).

Autores como Garcell, Díaz & Surís (1988); Martínez (2009); Martínez, Izquierdo & Pompa (2014) y Laurencio-Alfonso & Delgado-Drubey (2008) han abordado la falta de exactitud en los métodos de cálculo de los sistemas de transporte de pulpas al tratar como fluidos newtonianos aquellos materiales que no cumplen con la ley de la viscosidad de Newton (fluidos no newtonianos), de aquí la importancia del estudio reológico del cieno carbonatado transportado por tuberías.

El cieno es un sedimento calcáreo de color grisáceo caracterizado por su alto contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), el cual se utiliza en la industria cubana productora de níquel + cobalto para la neutralización de licores derivados del proceso de lixiviación ácida de menas lateríticas ferruginosas. Las pulpas elaboradas con el cieno carbonatado se componen de partículas finas (menos de 0,85 mm) característico de sistemas coloidales polidispersos, con cierta plasticidad (Martínez, Izquierdo & Pompa 2014), por lo que son consideradas como fluidos de viscosidad variable.

En los casos prácticos de cálculo y selección de los sistemas de transporte de estas pulpas no se incluye el estudio del comportamiento reológico de las suspensiones de cieno carbonatado, ni el modelo que describe el comportamiento de su viscosidad.

Según la composición y propiedades físicas, los fluidos pueden ser descritos por diferentes modelos reológicos desde newtonianos hasta no newtonianos. Al representar gráficamente la relación del esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad ( $\tau$  vs  $(dv/dy) = \gamma$ ), como se

muestra en la Figura 1, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.

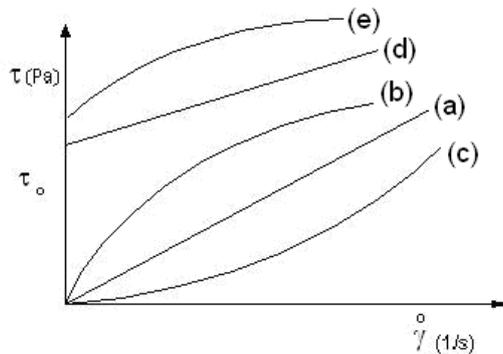


Figura 1. Curvas de flujo típicas: (a) Newtonianas; (b) Seudoplásticas; (c) Dilatantes; (d) Plástico ideal (Bingham); (e) Plástico real.

Las curvas de flujo pueden ser utilizadas, fundamentalmente, en el diseño de equipos y evaluación de instalaciones ya construidas, en el análisis de la caída de presión necesaria de un fluido no newtoniano que se mueve por una tubería de diámetro conocido para determinar si un equipo ya construido (con el fin de transportar o elaborar un material determinado) puede ser utilizado en el transporte de otro material con características diferentes y en la clasificación del comportamiento reológico de pulpas mineras.

Cuando un sólido es dispersado en un líquido, la viscosidad de la suspensión formada se incrementa. Estas pulpas bifásicas pueden exhibir un comportamiento newtoniano o no newtoniano, en dependencia de las interacciones que tiene lugar entre las partículas y el líquido, así como de la naturaleza y características de la fase sólida. Existe un número de factores que ejercen influencia sobre el comportamiento de las pulpas, tales como: tamaño y distribución de tamaño de las partículas, composición química y mineralógica del sólido, composición iónica del medio dispersante, concentración de la fase sólida, temperatura y pH.

Otros factores que influyen en el comportamiento reológico de las pulpas son establecidos por Rojas-Purón y Turro-Breffé (2003) cuando examina la interrelación entre el efecto de la concentración de sólido, el pH y la temperatura. En este estudio demuestra que las curvas de flujo de las colas para un contenido de sólidos entre el 30 % y 35 % en peso exhiben un comportamiento seudoplástico, mientras que las de mayores concentraciones pueden ajustarse al modelo reológico de los plásticos Bingham; se nota una influencia significativa del pH sobre el comportamiento reológico.

Cerpa y colaboradores (2001) realizan estudios del efecto del pH, el contenido de sólidos y el tamaño de las partículas en las curvas de flujo de suspensiones lateríticas, donde demuestran que las suspensiones lateríticas presentan variabilidad en su comportamiento reológico, en dependencia del pH del fluido. Además, en este trabajo se obtiene un aumento en la viscosidad de las suspensiones con el incremento en el contenido de sólido y la disminución del tamaño de partículas.

Por su parte, Pérez-García y colaboradores (2010), al estudiar la influencia de algunos factores como la granulometría, el pH, la temperatura y la mineralogía en el comportamiento reológico de suspensiones de lateritas, de yesos y de sulfuros de Níquel + cobalto, establecen que estas pulpas presentan características plásticas y pueden ser ajustadas a los modelos reológicos de Bingham y Burckley Herschel, debido a la presencia de partículas finas característico de sistemas coloidales. Al aumentar la temperatura se observa que los parámetros reológicos disminuyen apreciablemente, aunque nunca llegan a desaparecer las características plásticas de estas suspensiones en el rango de temperatura estudiado.

Martínez, Izquierdo & Pompa (2014) realizan un estudio preliminar de la caracterización reológica del cieno carbonatado para establecer, a partir de su comportamiento y parámetros reológicos, el modelo de pérdida de carga en régimen laminar durante su transporte por tuberías. Obtienen, además, que para concentraciones de sólido de 40 %, las pulpas de cieno mantienen un comportamiento reológico de un plástico ideal, ajustable al modelo de Bingham, mientras que a 32 % en contenido de sólido se comporta como un fluido seudoplástico. Como limitante de este trabajo se encuentra no haber concretado en un modelo la relación entre los parámetros reológicos para diferentes contenidos de sólidos y su relación con la viscosidad aparente de dicho fluido.

Esta investigación tiene como objetivo establecer, a partir del comportamiento reológico de plástico ideal (Bingham) de las pulpas de cieno carbonatado, la correlación entre las propiedades reológicas y el contenido de sólido de las mismas, que permita obtener un modelo para el cálculo y evaluación de la viscosidad aparente en dicho materiales, ya que estos valores de viscosidad son requeridos para el diseño, selección y operación de equipos involucrados en la preparación, bombeo y almacenamiento de dicho material.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron muestras de pulpas de cieno carbonatado con las características especificadas en la Tabla 1. Las mismas fueron tomadas de los tanques de preparación de pulpas con contenido de sólidos entre 30 % y 50 %.

Tabla 1. Principales características de las pulpas de cieno carbonatado durante el proceso de preparación y transporte

Indicadores	Unidad de medida	Proceso	Muestras
Densidad en pulpa	kg/m <sup>3</sup>	1 320 – 1 400	1 310 – 1 412
Densidad del sólido	kg/m <sup>3</sup>	2 410 – 2 580	2 476
Contenido de sólido	%	35 – 48	30 - 50
Temperatura	°C	28,7	27,3
Contenido de carbonato de calcio	%	≥87	85,5
pH	adimensional	8 - 9	8,4

### 2.1. Composición granulométrica

El análisis granulométrico de las pulpas de cieno carbonatado se realizó mediante cribado por vía húmeda y un analizador de partículas tipo HORIBA marca LA-910. Según lo planteado por Andreiev, Perov & Zverievich (1980) se utilizó la serie de Taylor para la selección de los tamices, los cuales están entre 20 mesh y -325 mesh. Las muestras fueron tomadas en diferentes momentos del proceso hasta obtener un compuesto representativo de las pulpas de cieno carbonatado.

### 2.2. Reología del cieno carbonatado

Se determinó la relación del esfuerzo de corte ( $\tau$ ) en función del gradiente de velocidad ( $\gamma$ ), mediante el uso del viscosímetro HAAKE. El gradiente de velocidad se varió entre 50,73 s<sup>-1</sup> y 392,56 s<sup>-1</sup>, para los niveles de concentración de sólido de 30, 35, 40, 45 y 50 %, en correspondencia con las concentraciones y condiciones más frecuentes utilizadas en la práctica.

El diseño de experimentos utilizado es el establecido en la literatura (Laurencio-Alfonso & Delgado-Drubey 2008; Martínez 2009) en el que se toman 11 valores del gradiente de velocidad y cinco niveles de concentración de sólido, para tres réplicas de cada experimento.

Los datos experimentales se ajustaron según el método de regresión (Cleveland y Devlin 1988) para obtener los parámetros del modelo

matemático que relaciona el esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad.

### 2.3. Modelo reológico del fluido

Se ha establecido (Martínez, Izquierdo & Pompa 2014) que reológicamente las pulpas de cieno carbonatado mantienen propiedades plásticas, lo que permite clasificarlas como fluidos no newtonianos con comportamiento típico de los plásticos ideales.

El modelo de Bingham establecido en la ecuación 1 (Skelland 1980; Garcell, Díaz & Surís 1988; Martínez, Izquierdo & Pompa 2014) puede modelar fluidos con un comportamiento de plásticos ideales.

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left( \frac{dv_x}{dy} \right) \quad (1)$$

Donde:

$\tau_0$  – Esfuerzo de corte inicial (Pa)

$\mu_p$  – Viscosidad plástica (Pa.s)

$\gamma = \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$  – Gradiente de velocidad (1/s).

A estos fluidos se les conoce también como plásticos Bingham, donde la viscosidad de los mismos disminuye con el incremento del gradiente de velocidad y comienzan a fluir al aplicarse un esfuerzo cortante mayor que el esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y para que comiencen a fluir.

### 2.4. Viscosidad aparente

Para los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente ( $\mu_a$ ). Relacionada a la ecuación (1), la viscosidad aparente en el caso de fluidos plásticos Bingham viene dada por la relación de la ecuación (2).

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\gamma} + \mu_p \quad (2)$$

La viscosidad aparente es utilizada en el cálculo de parámetros de transporte por tuberías de pulpas, como es el número de Reynolds en fluidos no newtonianos, lo que determina el régimen de transporte en estos sistemas.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comprensión de la reología de las pulpas de cieno carbonatado tiene uso práctico al relacionarlo con los parámetros de transporte de dicho

fluido a través de las tuberías. Por lo que la obtención de modelos experimentales, a partir de la relación de los parámetros reológico con el efecto del contenido de sólido en las pulpas, permitirá obtener un modelo que describa la viscosidad (aparente) en estos fluidos para el cálculo adecuado de sistemas de transporte por tuberías.

A partir del estudio reológico se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 2; en la misma se recoge la dependencia entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad para los contenidos de sólidos experimentados.

Tabla 2. Resultados del estudio reológico al cieno carbonatado

	<b>Gradiente de velocidad</b> $\dot{\gamma}$ (1/s)	<b>Esfuerzo de corte <math>\tau</math> (Pa)</b>				
		<b>30 %</b>	<b>35 %</b>	<b>40 %</b>	<b>45 %</b>	<b>50 %</b>
1	16,640	1,339	2,330	6,090	15,090	29,500
2	34,190	1,430	2,530	6,250	15,460	30,300
3	67,080	1,498	2,740	6,417	15,900	30,700
4	109,500	1,583	2,940	6,630	16,180	31,350
5	146,300	1,674	3,125	6,720	16,560	31,740
6	180,400	1,731	3,236	6,863	16,760	32,000
7	205,600	1,842	3,330	6,980	16,930	32,400
8	231,500	1,890	3,420	7,150	17,090	32,900
9	248,100	1,972	3,490	7,200	17,300	33,600
10	274,500	2,140	3,620	7,340	17,670	33,700
11	304,100	2,210	3,750	7,590	18,400	34,080

Con los datos experimentales se construyeron las curvas de flujo mediante el empleo de software (tabulador Microsoft Excel 2010), donde se identificaron los parámetros del modelo matemático que relaciona el esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, así como su coeficiente de correlación.

Al representar gráficamente los datos experimentales de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función de ( $\dot{\gamma}$ ), se obtienen las curvas de flujo (Figura 1).

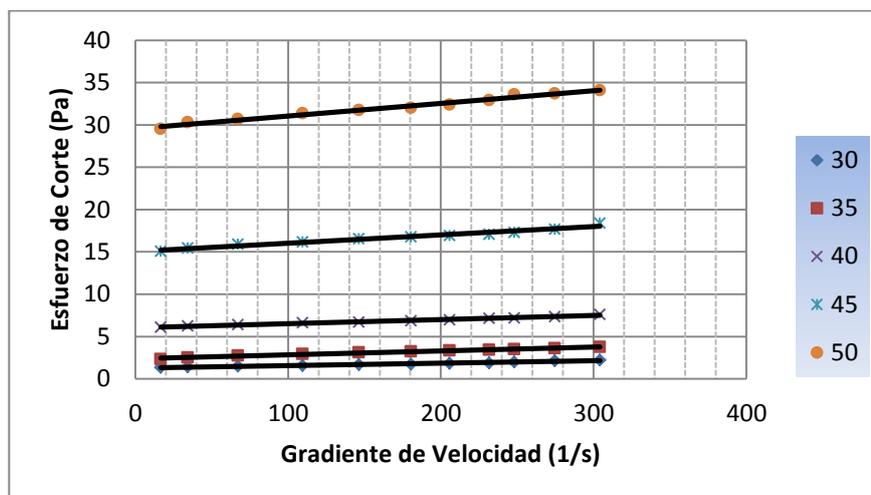


Figura 1. Curvas de flujo del cieno carbonatado en función del contenido de sólido.

En la Figura 1 se observa que para el rango de porcentaje de sólidos, desde 30 % hasta 50 %, el cieno carbonatado muestra cierto comportamiento no newtoniano correspondiente a plásticos ideales con un nivel de confianza superior al 95 % y el mejor ajuste se realiza al modelo de Bingham; aunque se observa que para contenidos de sólidos inferiores al 30 % hay una marcada tendencia a tener un comportamiento pseudoplástico o newtoniano de las pulpas de cieno carbonatado. Por lo que se corroboran algunos resultados con lo planteado por Martínez (2009) y Martínez, Izquierdo & Pompa (2014).

El comportamiento manifestado está caracterizado por los parámetros reológicos, esfuerzo de corte inicial ( $\tau_0$ ) y viscosidad plástica ( $\mu_p$ ), en dependencia del contenido de sólido en que se analiza. Los modelos ajustados para cada porcentaje de sólido, así como los valores de los parámetros reológicos e índice de regresión de los mismos, se muestran en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

Tabla 3. Correlaciones de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad

Contenido de sólido	Modelo ajustado
30 %	$\tau_{xy} = 1,2835 + 0,0029 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
35 %	$\tau_{xy} = 2,3771 + 0,0046 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
40 %	$\tau_{xy} = 6,0539 + 0,0048 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
45 %	$\tau_{xy} = 15,061 + 0,0097 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$
50 %	$\tau_{xy} = 29,553 + 0,015 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)$

En la Tabla 4, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico.

Tabla 4. Parámetros reológicos obtenidos y coeficiente de correlación múltiple

No	Parámetros	Contenido de sólido				
		30 %	35 %	40 %	45 %	50 %
1	$\tau_0$ (Pa·s)	1,2835	2,3771	6,0539	15,061	29,559
2	$\mu_p$ (adim)	0,0029	0,0046	0,0048	0,0097	0,015
3	$R^2$	0,974	0,985	0,989	0,967	0,980

El coeficiente de correlación múltiple ( $R^2$ ) en todos los casos fue superior a 0,967, por lo que se considera satisfactorio el ajuste de los modelos a los datos experimentales, lo cual indica que se experimenta un fluido estable.

Con el empleo de los resultados mostrados en la Tabla 4, y sustituyéndolos en la ecuación 2, se simuló el comportamiento de la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad (Figura 2). Los resultados obtenidos posibilitan visualizar el grado de variabilidad de la viscosidad aparente ante variaciones del contenido de sólido y el gradiente de velocidad, observándose en todo caso un comportamiento no newtoniano.

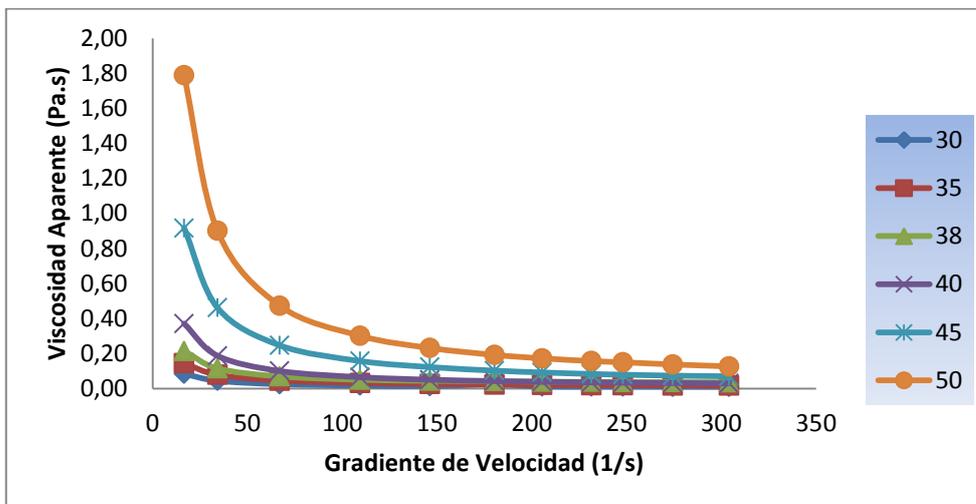


Figura 2. Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

En la Figura 2 se resalta que la viscosidad aparente del cieno carbonatado aumenta de forma significativa con el aumento del contenido de sólido. En la misma se puede apreciar que para los valores menores del gradiente de velocidad se manifiesta un mayor cambio de la viscosidad, asociado a cambios de estructuración en el comportamiento de las partículas dispersas en las pulpas de cieno.

Los resultados obtenidos justifican la necesidad de clasificar las pulpas a transportar por tuberías, a partir del comportamiento reológico de las mismas (Guache 2015), para el cálculo, proyección y evaluación de estos sistemas de transporte.

### 3.1. Influencia del contenido de sólido en las propiedades del cieno carbonatado

Al aumentar el contenido de sólido se observó que tanto los valores de esfuerzo de corte inicial como los de viscosidad plástica aumentan (Figuras 3 y 4).

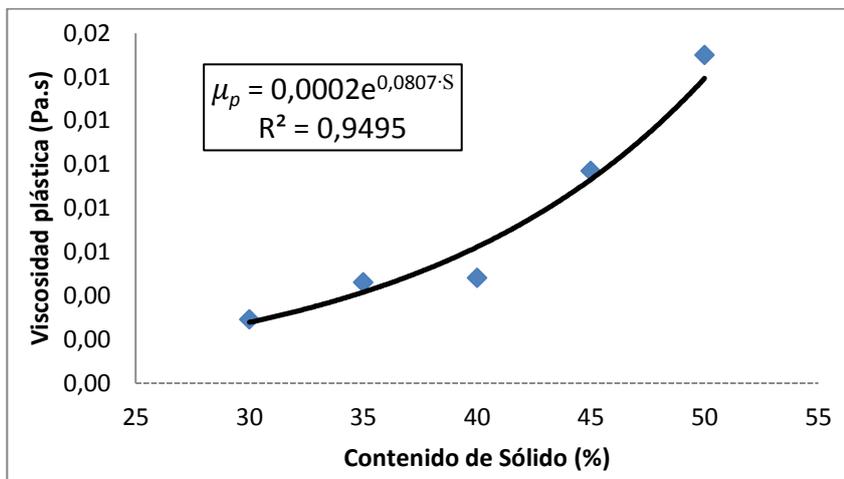


Figura 3. Comportamiento de la viscosidad plástica ( $\mu_p$ ) en función del contenido de sólido.

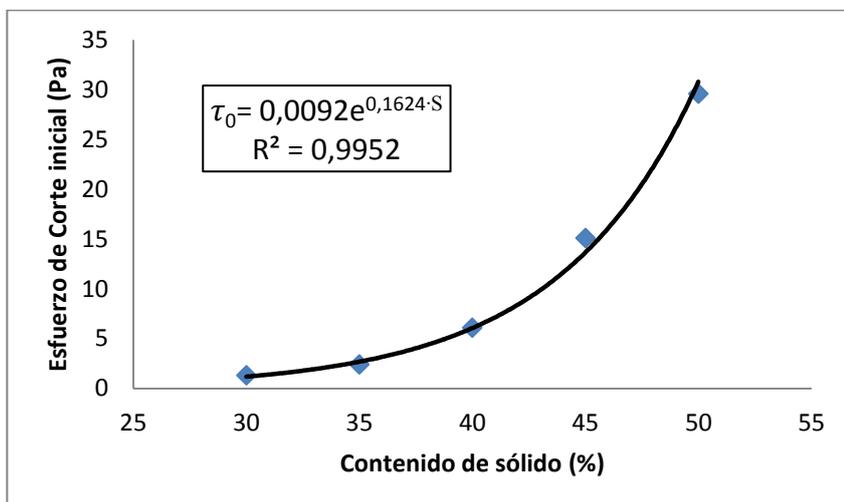


Figura 4. Comportamiento del esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ) en función del contenido de sólido.

Realizando el ajuste del comportamiento del esfuerzo de corte inicial y la viscosidad plástica a la ley exponencial se obtuvo la correlación en función del contenido de sólido (ecuaciones 3 y 4) con un coeficiente de correlación múltiple de 0,9495 y 0,9952, respectivamente. El grado de adecuación del modelo con los datos experimentales se confirma en el análisis de Fisher, donde el valor crítico fue menor que el valor calculado ( $F_{crit} < F$ ), por lo que la dispersión entre los resultados obtenidos no es significativa (Devore 2001).

$$\mu_p = 0,0002 \cdot e^{0,0807 \cdot S} \tag{3}$$

$$\tau_0 = 0,0092 \cdot e^{0,1624 \cdot S} \tag{4}$$

Los modelos obtenidos posibilitan simular el comportamiento de los parámetros reológicos esfuerzo de corte inicial y la viscosidad plástica al

variar el contenido de sólido (S), teniendo como recomendación que la misma es válida solo para las condiciones experimentales de variación del contenido de sólido entre 30 % a 50 %.

A partir de la ecuación (2) y su relación con las modelos obtenidos (3 y 4) se obtiene un modelo que describe el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la variación del contenido de sólido y el gradiente de velocidad, como se muestra en la ecuación 5.

$$\mu_a = \frac{0,0092 \cdot e^{0,1624 \cdot S}}{\gamma} + 0,0002 e^{0,0807 \cdot S} \quad (5)$$

Mediante estos resultados, es posible definir la energía necesaria para el transporte por tuberías de las pulpas de cieno carbonatado. La investigación sirve como punto de partida para nuevos estudios relacionados con la modelación y la simulación del proceso de transporte, lo que permitirá la correcta selección y evaluación de los sistemas de bombeo e incidir en la disminución del consumo energético de las instalaciones.

#### **4. CONCLUSIONES**

- Las pulpas de cieno carbonatado muestran un comportamiento no newtoniano, característico de plástico ideal, y su ajuste corresponde al modelo de Bingham para pulpas con un contenido de sólido entre un 30 % y 50 %.
- La viscosidad plástica y el esfuerzo de corte inicial aumentan al incrementar el contenido de sólido de las pulpas de cieno carbonatado. Se obtienen modelos que describen dicho comportamiento.
- Se obtiene un modelo de comportamiento de la viscosidad aparente que relacionan, el esfuerzo cortante inicial y la viscosidad plástica en función de la variación del contenido de sólido y el gradiente de velocidad para el rango de variación estudiado.

#### **5. REFERENCIAS**

- ANDREIEV, S. E.; PEROV, V. A. & ZVERIÉVICH, V. V. 1980: Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Mir, Moscú.
- CERPA *et al.* A. 2001: Efecto del pH, concentración de sólidos y tamaño de partícula en las curvas de flujo de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química XXI*(1).

- CLEVELAND, W. S. & DEVLIN, S. J. 1988: Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association* 83(403): 596-610.
- DEVORE, J. 2001: *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. International Thomson Editores, México.
- GARCELL, L.; DÍAZ, A. & SURÍS, G. 1988: *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Pueblo y Educación, La Habana.
- GUACHE, G. 2015: *Cálculo de pérdida de carga en el transporte de cieno carbonatado por tuberías*. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Cuba.
- LAURENCIO-ALFONSO, H. & DELGADO-DRUBEY, Y. 2008: Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado. *Minería y Geología* 24(2).
- MARTÍNEZ, R. 2009: Caracterización de las propiedades físico mecánicas del cieno carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tuberías. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Cuba.
- MARTÍNEZ, R.; Izquierdo, R. & Pompa, M. 2014: Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado. *Minería y Geología* 30(1): 80-94.
- PÉREZ-GARCÍA, L.; GARCELL-PUYÁNS, L.; ROJAS-PURÓN, A. L. & SIMÕES, R. 2010: Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. *Minería y Geología* 26(4): 16-35.
- SKELLAND, A. H. 1970: *Non Newtonian flow and heat transfer*. Ediciones Revolucionarias, La Habana.
- ROJAS-PURÓN, A. L. & TURRO-BREFFE, A. 2003: Composición mineralógica de las colas del proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba. *Minería y Geología* 19(3-4).

**Rodney Martínez-Rojas** [rmartinez@ismm.edu.cu](mailto:rmartinez@ismm.edu.cu)

Ing. Mecánico. Máster en Electromecánica. Profesor Asistente.  
Facultad Metalurgia y Electromecánica.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.

**Gabriel Hernández-Ramírez** [ghdezr@ismm.edu.cu](mailto:ghdezr@ismm.edu.cu)

Ing. Eléctrico. Máster en Electromecánica. Profesor Auxiliar.  
Facultad Metalurgia y Electromecánica.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba.