

## **Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado**

Rodney Martínez-Rojas  
Raúl Izquierdo-Pupo  
Murphis Pompa-Larrazabal

### **Resumen**

Las pulpas de cieno carbonatado constituyen un fluido no newtoniano. Se utilizan en la industria cubana del níquel para la neutralización de licores derivados del proceso de lixiviación ácida de menas lateríticas ferruginosas. En esta investigación se estableció, a partir del comportamiento reológico del cieno, el modelo de pérdida de carga para el transporte de este fluido en régimen laminar por tuberías. Se reveló que, para concentraciones de sólido mayor que 40 %, las pulpas de cieno se comportan como un plástico ideal, ajustable al modelo de Bingham, mientras que a 32 % es un fluido seudoplástico. El modelo obtenido constituye la base del cálculo para la selección, evaluación y racionalización del proceso de transporte por tuberías del cieno carbonatado, en relación con las propiedades físicas del mismo.

**Palabras clave:** cieno carbonatado; pérdidas de carga; reología; fluidos no newtonianos.

## Calcium carbonate mud losses during transportation in laminar flow

### Abstract

Calcium carbonate mud slurries are non-Newtonian fluids. The calcium carbonate mud is used in Cuban nickel plants for the neutralization of liquors derived from the acid leaching process of ferruginous lateritic ores. The objective of this investigation is to establish, based on the mud rheological behavior, a material loss model for the transportation of this fluid in laminar flow in pipelines. It was found that the calcium carbonate mud behaves as an ideal plastic, adjustable to the Bingham model, in concentrations of solids higher than 40% while it is a pseudoplastic fluid in concentrations of 32%. The resulting model constitutes the calculation basis for the selection, evaluation and rationalization of the calcium carbonate mud transfer through pipeline, with relation to the physical characteristics of the mud.

**Keywords:** calcium carbonate mud, load losses, rheology, non-Newtonian fluids

## 1. INTRODUCCIÓN

El cieno carbonatado (material calcáreo y grisáceo) se utiliza en la industria cubana productora de níquel y cobalto para la neutralización de licores derivados del proceso de lixiviación ácida de menas lateríticas ferruginosas.

Las pulpas elaboradas con el cieno se componen de partículas finas (menos de 0,85 mm) y se comportan como sistemas coloidales, por lo que se consideran fluidos no newtonianos, en los cuales la viscosidad es variable.

En la industria minero metalúrgica cubana, las pulpas industriales se transportan por tuberías. Estos sistemas de transporte son de gran efectividad económica y medioambiental con respecto a los demás sistemas, cuando operan en los parámetros eficientes.

Algunos estudios (Garcel 1988; Martínez 2009; Laurencio 2012) han demostrado el error que se comete en los métodos de cálculo de los sistemas de transporte de pulpas al tratar como newtonianos, fluidos que no cumplen con la ley de la viscosidad de Newton (no newtonianos), de aquí la importancia del estudio reológico del cieno carbonatado transportado por tuberías.

Las pulpas de cieno, por la variabilidad de sus propiedades físicas, limitan el uso de las ecuaciones de cálculo conocidas para la selección y evaluación de los sistemas de transporte.

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  $\dot{\gamma}^0$ ), se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos (Figura 1).

Con el estudio reológico de las pulpas de cieno es posible establecer modelos de cálculo adecuados para obtener parámetros racionales en los sistemas de transporte que se diseñen para este fin.

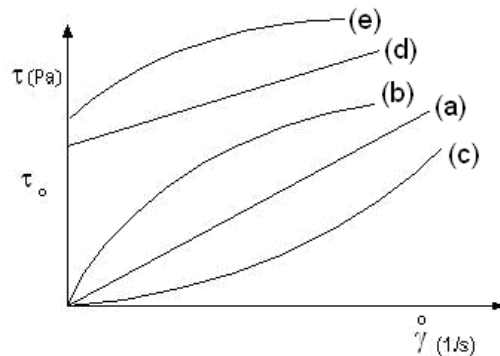


Figura 1. Curvas de flujo típicas: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplásticos; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real. Fuente: Garcel 1988.

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria del sistema para el transporte de las pulpas, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Vélez 2003a; Davidson & Nguyen 2007). El coeficiente de fricción puede obtenerse mediante la pérdida de carga en un segmento de tubería, o bien puede evaluarse por medio de modelos o gráficas propuestas para tal propósito (Macedo *et al.* 2001; Vélez 2003a).

La literatura recoge principalmente ecuaciones de cálculo obtenidas para fluidos newtonianos, ya que son pocos los estudios realizados (Vélez 2003b; Perona 2003; Sablani & Shayya 2003; Davidson & Nguyen 2007) con fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

Wojs (1993) desarrolló una ecuación teórico-experimental al estudiar factores de fricción en modelos de pérdida de carga en tuberías lisas y rugosas con soluciones diluidas de polímeros; aunque la ecuación concuerda adecuadamente con los resultados experimentales, su aplicación aún se encuentra limitada por estar el factor de fricción de Darcy implícito en la ecuación del factor de fricción.

Los trabajos realizados en la industria del níquel, referentes al transporte por tuberías de pulpas minerales que presentan comportamiento reológico de fluidos no newtonianos (Pérez 1970; Izquierdo 1989; Suárez 1998; Turro 2001; Bandala 2001; Garcel 1988; Martínez 2009; Laurencio 2012), establecen métodos de cálculo para la evaluación y proyección de sistemas de hidrotransporte de suspensiones minerales, los cuales no pueden ser generalizados para todo tipo de pulpas por la variabilidad de sus respectivos comportamientos reológicos.

La mayoría de las investigaciones precedentes abordan la fenomenología de fluidos no newtonianos, que aunque sirven de base para la investigación, no describen en la totalidad el fenómeno de transporte de estos fluidos y las irregularidades del flujo en régimen laminar.

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo del presente artículo es establecer el modelo de pérdida de carga para el transporte en régimen laminar del cieno carbonatado por tuberías, a partir del comportamiento reológico de este fluido.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Composición granulométrica**

Se utilizó una muestra de cieno carbonatado tomada del tanque de alimentación a las bombas y se cribó, según Taylor, utilizando los tamices entre 20 mesh y -325 mesh. Para determinar la granulometría predominante se empleó un analizador de partículas HORIBA LA-910.

### **2.2. Obtención de los parámetros reológicos**

Se determinó la relación del esfuerzo de corte ( $\tau$ ) en función del gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ), mediante el uso del viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos (Rheotest 2,1), de fabricación alemana. El gradiente de velocidad se varió entre 50,73 rev/s y 392,56 rev/s, para los niveles de concentración de sólido de 32 %; 40 % y 46 %, en correspondencia con las concentraciones y condiciones más frecuentes utilizadas en la práctica.

El diseño de experimentos utilizado se tomó de la literatura (Suárez 1998; Turro 2002; Laurencio y Delgado 2008b; Martínez 2009) tomándose ocho valores del gradiente de velocidad y tres niveles de concentración de sólido, para tres réplicas de cada experimento.

### **2.3 Procedimiento para determinar la pérdida de carga en tuberías**

El cálculo de las pérdidas de cargas se realizó según el procedimiento propuesto por Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed para un plástico Bingham en flujo permanente estacionario, con un diámetro constante, partiendo de un análisis de la distribución de esfuerzos cortantes en la tubería; con este procedimiento todos los parámetros del modelo pueden hallarse experimentalmente.

Consideremos en la Figura 2 un flujo en un tubo cilíndrico de diámetro (D), a una temperatura constante y una longitud (L).

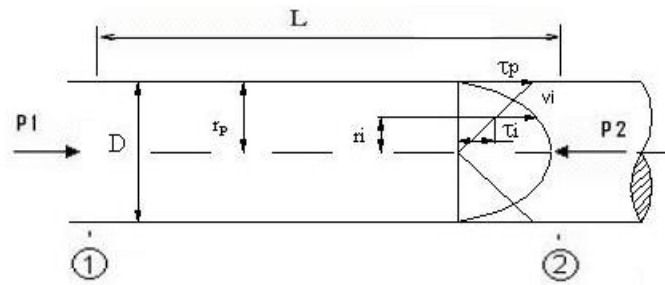


Figura 2. Sección de tubería que describe el flujo de un fluido no newtoniano, independiente del tiempo, por una tubería de sección circular y diámetro (D).

Donde:

$\tau_p$  - Esfuerzo de corte en la pared del tubo.

$v_i$  - Velocidad en un punto genérico de radio  $r_i$ .

$\tau_i$  - Tensión tangencial en un punto genérico de radio  $r_i$ .

D - Diámetro de la tubería.

Luego de analizar las fuerzas involucradas, suponiendo que la velocidad en la pared del tubo es cero, se pueden conocer parámetros del flujo.

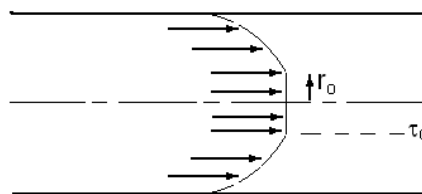


Figura 3. Perfiles en un plástico Bingham que fluye por un tubo.

Del análisis de la Figura 2 se llega a la expresión del caudal en función de los esfuerzos de corte.

El gasto volumétrico se puede calcular mediante:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^R v_2 \cdot r \cdot dr \cdot d\theta + \pi \cdot r_0^2 \cdot v_2 \tag{1}$$

Resolviendo la integral se obtiene:

$$Q = \frac{-\Delta P \cdot \pi \cdot D^3}{8 \cdot L \cdot \mu_p} \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right)^4 \right] \tag{2}$$

Que es la ecuación de Buckingham–Reiner para plásticos Bingham. Si  $\tau = 0$  la ecuación 2 se convierte en la de Hagen Poiseuille.

Para tubos horizontales, el esfuerzo de corte en la pared del tubo, para todo fluido no newtoniano, independiente del tiempo y de acuerdo con los estudios de Rabinowisch-Mooney, será:

$$\tau = \frac{\Delta P \cdot D}{4 \cdot L} \quad (3)$$

Donde:

$\Delta P$  – Caída de presión por rozamiento, (Pa).

$L$  – Longitud de la tubería entre los puntos de toma de presión, (m).

Por tanto, la ecuación 2 puede escribirse:

$$Q = \frac{\tau \cdot \pi \cdot D^3}{32 \cdot \mu_p} \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right)^4 \right] \quad (4)$$

El último término entre paréntesis es pequeño comparativamente con los restantes, por lo que la ecuación 4 puede escribirse:

$$Q = \frac{\tau \cdot \pi \cdot D^3}{32 \cdot \mu_p} \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right) \right] \quad (5)$$

La ecuación del gradiente de velocidad está dada por la ecuación siguiente:

$$\frac{dv_x}{dy} = \left( \frac{8 \langle v \rangle}{D} \right) \quad (6)$$

También, para los plásticos Bingham, a partir de la ecuación de movimiento se obtiene la expresión de gradiente de velocidad en función de la velocidad media y los parámetros reológicos siguiente:

$$\frac{dv_x}{dy} = \frac{\left( 1 - \frac{\tau_0}{\tau} \right)}{\left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_0}{\tau} \right)^4 \right]} \left( \frac{8 \langle v \rangle}{D} \right) \quad (7)$$

Para calcular la caída de presión ( $-\Delta P/L$ ) es necesario proceder de forma iterativa pues esta variable está implícita en el esfuerzo cortante ( $\tau$ ), despejando la ecuación 3 en la ecuación 5 y sustituyendo nuevamente por su valor se obtiene:

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{4}{D} \left[ \frac{4}{3} \cdot \tau_0 + \frac{32 \cdot Q \cdot \mu_p}{\pi \cdot D^3} \right] \quad (8)$$

Este modelo es utilizado para la estimación de pérdidas de cargas en tuberías rectas cuando se transporta fluidos plásticos Bingham, y se utilizó para el análisis en el caso del cieno carbonatado.

El primer componente es el gradiente de presión debido al esfuerzo de corte del fluido con la pared de la tubería. Es costumbre ajustar este a la fricción existente entre el flujo de la mezcla y la pared interna del tubo. El término de pérdidas de presión puede estimarse mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, para el flujo por tuberías rectas circulares (válida para cualquier tipo de fluido).

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (9)$$

Donde:

$\lambda$  : Coeficiente de fricción por rozamiento del fluido, (adimensional).

Las expresiones que relacionan las variables señaladas en el régimen laminar, para los modelos reológicos más difundidos en la literatura, generan limitaciones en la precisión de los sistemas de flujo con diámetros relativamente grandes. De ahí que, en los cálculos de ingeniería, se prefiera hacer uso de las expresiones que relacionan el factor de fricción con el número de Reynolds y con otros números adimensionales, tanto en régimen laminar como en turbulento.

### **2.3.1. Análisis experimental de las pérdidas de carga durante el transporte de cieno carbonatado**

La investigación de los parámetros y regímenes de transportación se realizó a escala industrial. Para el estudio de las pérdidas de carga se deben conocer los gradientes de presión ( $\Delta P/L$ ) o pendiente hidráulica ( $i$ ), requeridos para lograr flujos volumétricos ( $Q$ ), en unos diámetros ( $D$ ) de tuberías.

La pendiente hidráulica (en Pa/m) para el flujo del cieno carbonatado, durante el transporte por tuberías, se obtiene por la expresión:

$$i = \frac{\Delta P_{roz}}{L} \quad (10)$$

Con la obtención del gráfico  $\lambda = f(Re)$ , a partir del procedimiento descrito anteriormente, se estableció la correlación entre el factor de fricción con el aumento del número de Reynolds.

El número de Re se define para fluidos plásticos Bingham, según la naturaleza reológica del fluido como sigue (Turro 2002):



$$Re = \frac{D\langle v \rangle \rho}{\mu_p} = \frac{4 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot D \cdot \mu_p} \quad (11)$$

El número de corridas experimentales se determinó a partir de la aplicación de un diseño multifactorial.

La confirmación de la validez de los resultados experimentales con el modelo teórico se desarrolló a través de la diferencia entre el módulo del valor experimental " $X_{exp}$ " de la caída de presión y el valor teórico " $X_{teo}$ " (error relativo), obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento. El error relativo puntual ( $E_p$ ) se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{exp} - X_{teo}}{X_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (12)$$

### 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 3.1 Análisis granulométrico

La Figura 4 revela que las pulpas de cieno forman sistemas altamente polidispersos, las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,046 mm, constituyendo el 68,31 % en peso de las fases sólidas en la muestra.

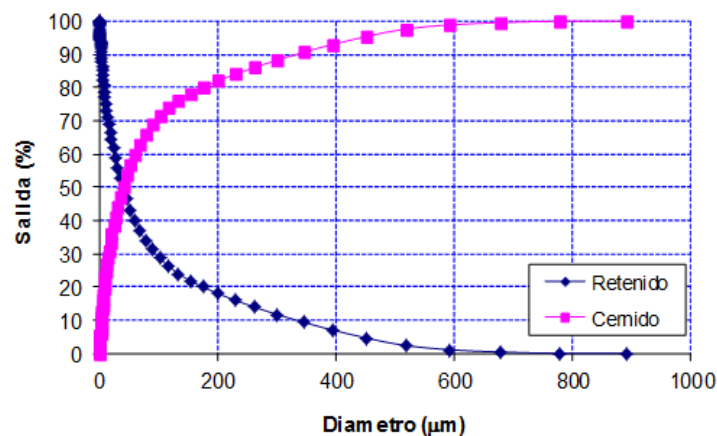


Figura 4. Curva de característica sumaria de la muestra.

Es importante destacar que aproximadamente el 50 % de la fracción menor de 0,046 mm está constituida por la fracción menor de 0,038 mm. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas coloidales, lo que confiere a la pulpa de cieno carbonatado un comportamiento de un fluido plástico.

### 3.2 Análisis del comportamiento reológico del cieno carbonatado

La Figura 5 representa, de forma gráfica, la dependencia entre el gradiente de velocidad y el esfuerzo de corte, para cada valor de concentración de sólido.

Los modelos reológicos que describen el comportamiento de las curvas de flujo de los materiales son establecidos en la literatura (Garcel 1988). Las curvas para las pulpas de cieno carbonatado se obtuvieron mediante el programa profesional Excel 2004, de Microsoft Office. Se observa que las pulpas cuyo contenido de sólido es de un 32 % presentan comportamiento seudoplástico, pudiéndose ajustar la curva al modelo reológico de Ostwald de Waele. Por otra parte, las pulpas con 40 % y 46 % de concentración de sólido manifiestan un comportamiento plástico ideal, de manera que la ecuación de la curva obtenida para estos valores se ajusta al modelo de Bingham.

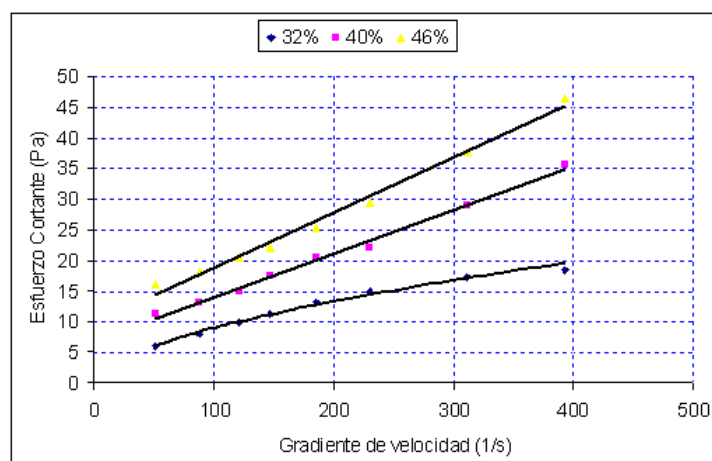


Figura 5. Curvas de flujo para el cieno carbonatado.

En todos los casos, el ajuste de las curvas se realizó por un análisis de regresión de mínimos cuadrados, pudiendo obtenerse las expresiones matemáticas que describen cada uno de estos comportamientos con índices de regresión por encima del 98 % (Tabla 1).

Tabla 1. Modelos reológicos obtenidos

Concentración de sólido (%)	Modelo matemático obtenido por regresión	Modelo reológico	Índice de regresión (R <sup>2</sup> )
32	$y = 0,6574 \cdot \left(-\frac{dv}{dy}\right)^{0,5675}$	$\tau_{xy} = k \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$	0,9927
40	$y = 6,9422 + 0,0712 \cdot \left(-\frac{dv}{dy}\right)$	$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left(\frac{dv}{dy}\right)$	0,9931
46	$y = 9,8585 + 0,09 \cdot \left(-\frac{dv}{dy}\right)$	$\tau_{xy} = \tau_0 + \mu_p \left(\frac{dv}{dy}\right)$	0,9885

A partir de las curvas obtenidas en la Figura 5 y los modelos de regresión de la Tabla 1, se estiman los parámetros reológicos en la Tabla 2, para cada concentración de sólido.

Para las pulpas cuyo comportamiento reológico es característico de un fluido Bingham (40 % y 46 % de sólido), los valores del esfuerzo cortante inicial y la viscosidad plástica aumentan con la concentración de sólido, por lo que se recomienda realizar pruebas para valores de por ciento de sólido superiores a los ensayados en este estudio con el objetivo de establecer límites en su comportamiento.

Tabla 2. Parámetros reológicos

Concentración de sólido (%)	Parámetros reológicos			
	Índice de consistencia (k), Pa.s	Índice de flujo (n)	Esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ) Pa	Viscosidad plástica ( $\mu_p$ ) Pa.s
32	0,6574	0,5675	...	...
40	...	...	6,9422	0,0712
46	...	...	9,8585	0,09

### 3.3 Identificación del modelo

En la Tabla 3 aparecen los valores de los datos experimentales, obtenidos a partir de la relación pendiente hidráulica y velocidad [ $i = f$

(v)] para el flujo de cieno carbonatado en el sistema industrial. Para cada resultado se determinó el coeficiente de fricción y el número de Reynolds.

Tabla 3. Resultados experimentales de pérdida de carga

Velocidad (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	i (Pa/m) Teórico	i (Pa/m) Experimental	Error Puntual	$\lambda$	Re
0,934	29,390	1975,232	2073,479	4,7	0,116	2356,412
1,174	33,173	2071,171	2171,547	4,6	0,095	2659,671
1,296	36,629	2158,835	2241,600	3,7	0,080	2936,776
1,597	45,129	2374,428	2318,647	2,3	0,055	3618,258
1,782	50,368	2507,313	2451,745	2,2	0,047	4038,301
1,953	55,194	2629,722	2591,842	1,4	0,041	4425,232
2,093	59,150	2730,074	2661,895	2,5	0,037	4742,441
2,464	69,628	2995,843	2879,048	3,9	0,029	5582,528
2,685	75,867	3154,092	3082,193	2,3	0,026	6082,747
2,920	82,519	3322,816	3292,342	0,9	0,023	6616,080
3,070	86,758	3430,336	3572,542	4,0	0,023	6955,947
3,291	92,997	3588,585	3768,687	4,8	0,021	7456,166
3,460	97,780	3709,888	3852,741	3,7	0,019	7839,601

En la Figura 6 se muestran las curvas de pérdidas específicas de presión teórica y experimental a 28 °C. En ellas se observa que durante el transporte de cieno carbonatado se presentan regímenes de movimiento del laminar al transitorio.

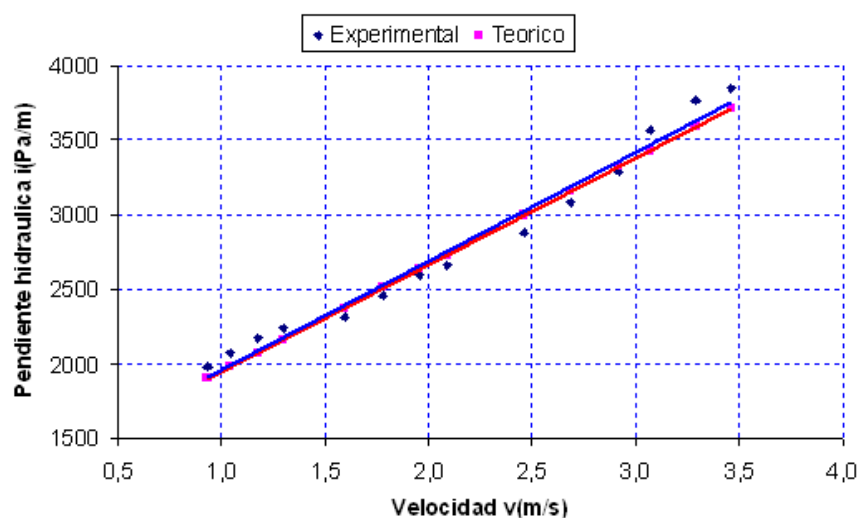


Figura 6. Pérdidas específicas de carga teórica y experimental en tubería.

En el régimen de flujo laminar el error puntual del modelo no superó el 4,8 %, obteniendo una probabilidad de 96,7 %, lo que confirma la validez del mismo.

### 3.4 Correlación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds

La descripción matemática del proceso objeto de estudio queda expresada por  $\lambda = f(\text{Re})$ .

En la Figura 7 se observa la relación del coeficiente de fricción en función del Re para el régimen laminar obtenido de los datos de la Tabla 3. Hay que señalar que las variaciones de los parámetros de hidrotransporte obtenidas son para valores de Reynolds entre 2356,41 y 7839,60 por lo que se obtiene comportamiento de un régimen laminar.

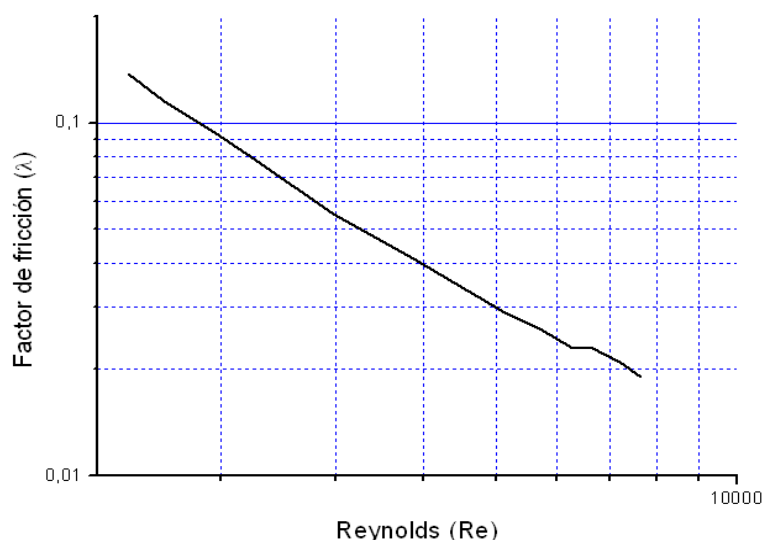


Figura 7. Correlación entre el factor de fricción y el número de Reynolds.

## 4. CONCLUSIONES

1. El cieno carbonatado presenta un comportamiento de plástico ideal por lo que se ajusta al modelo de Bingham para pulpas con una concentración de sólido mayor que 40 % y como un seudoplástico en las pulpas con una concentración de sólido de un 32 %.
2. El modelo que describe la pérdida de carga en el transporte por tubería de cieno carbonatado con comportamiento de fluido Bingham es el siguiente:

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{4}{D} \left[ \frac{4}{3} \cdot \tau_0 + \frac{32 \cdot Q \cdot \mu_p}{\pi \cdot D^3} \right]$$

3. La correlación entre el factor de fricción y el número de Reynolds para valores entre 2356,41 y 7839,60 enmarcan el comportamiento del fluido en la zona laminar.

## 5. REFERENCIAS

- ADHIKARI, B. & JINDAL, V. K. 2000: A New Tool for Prediction of Pressure Drop of Non-Newtonian Fluid Foods Through Tubes. *Journal of Food Engineering* 46: 43-51.
- BANDALA, M. 2001: *Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas Puebla, México.
- CALDIÑO, V. & SALGADO, I. 2004: Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris. En: VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México.
- DAVIDSON, R. & NGUYEN, D. 2007: A model for pressure drops in the pipeline for non-Newtonian fluids. *Journal of Food Engineering* 80(4): 1 011-1 015.
- GARCEL, P. L. 1988: *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- GARCÍA, E. J. & STEFFE, J. F. 1987: Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newtonian Fluids in Pipe Flow. *Journal of Food Process Engineering* 9: 93-120.
- GARCÍA, F. 2003: *Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento*. Tesis doctoral. Universidad Central de Venezuela. 121 p.
- MACEDO, C.; MARTÍNEZ, J. & VÉLEZ, J. 2001: Diseño, Construcción y Validación de una Unidad Piloto para el Manejo de Fluidos Newtonianos. *Información Tecnológica* 12(6): 169-176.
- MARTÍNEZ, R. 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.
- LAURENCIO, H. 2012: Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (11º API). *Minería y Geología* 28(3): 70-86.
- PERONA, P. 2003: An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. *Journal of Food Engineering* 60: 137-145.
- SABLANI, S. S. & SHAYYA, W. H. 2003: Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids. *Journal of non Newtonian fluid mechanise* 57: 327-335.
- SKELLAND, A. H. 1970: *Non Newtonian flow and heat transfer*. Ediciones

Revolucionarias, La Habana.

Wojas, K. 1993: Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes. *Journal of non Newtonian fluid mechanics* 48(2): 337-355.

Rodney Martínez Rojas. [rmartinez@ismm.edu.cu](mailto:rmartinez@ismm.edu.cu)  
Máster en Electromecánica. Ingeniero Mecánico. Profesor Asistente.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Raúl Izquierdo Pupo [rizquierdo@ismm.edu.cu](mailto:rizquierdo@ismm.edu.cu)  
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba

Murphis Pompa Larrazabal [mpompa@ismm.edu.cu](mailto:mpompa@ismm.edu.cu)  
Ingeniero Mecánico. Profesor Asistente  
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba