



Ingeniería Mecánica

E-ISSN: 1815-5944

revistaim@mecanica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José

Antonio Echeverría

Cuba

Leyva-de-la-Cruz, Benigno; Guillen-Campo, Yulexis; Laurencio-Alfonso, Héctor Luis

Caracterización reológica de un lodo que se genera en el lavado de árido

Ingeniería Mecánica, vol. 19, núm. 3, septiembre-diciembre, 2016, pp. 143-149

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría

Ciudad de La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225147535004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Caracterización reológica de un lodo que se genera en el lavado de árido

Rheological characterization of a sludge produced in washing arid

Benigno Leyva-de-la-Cruz, Yulexis Guillen-Campo, Héctor Luis Laurencio-Alfonso

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Departamento de Ingeniería Mecánica. Holguín, Cuba

Correo electrónico: bleyva@ismm.edu.cu

Recibido: 00 de mes de 2000

Aceptado: 00 de mes de 2000

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar el comportamiento reológico y de la viscosidad aparente del lodo residual generado en el proceso de lavado de árido. Para el cumplimiento del objetivo propuesto se efectuó un muestreo con vista al aseguramiento de la representatividad de los resultados, análisis granulométrico, determinación de la densidad aparente del sólido, medición de la densidad del lodo, cálculo del porcentaje de sólido, y se diseñó un experimento para la realización de las pruebas reológicas. Los resultados obtenidos indican que el lodo utilizado posee un

diámetro del 80 % cernido igual a 0,039 mm, y la densidad aparente de la arcilla es de 1 989 kg/m³; se determinó que el lodo posee un comportamiento pseudoplástico en todo el rango de variación de la concentración de sólido analizado, y un modelo matemático para el pronóstico de la viscosidad aparente realizando una extensión del propuesto por Einstein en 1911.

Palabras claves: reológico, viscosidad, lodo, pseudoplástico.

Abstract

The aim of the research was to determine the rheological behavior and the apparent viscosity of the sludge generated in the process of washing aggregate. To fulfill the proposed objective sampling with a view to ensuring the representativeness of the results, particle size analysis, determination of bulk density of the solid density measurement of mud, calculating the percentage of solid took place, and an experiment was designed for conducting rheological tests. The results indicate that the sludge used has 80% diameter

equal to 0.039 mm sieving, and the bulk density of the clay is 989 kg / m³; it was determined that the sludge has a pseudoplastic behavior throughout the range of variation in the concentration of solid analyzed, and a mathematical model for forecasting the apparent viscosity performing an extension proposed by Einstein in 1911.

Key words: rheological, viscosity, mud, pseudoplastic.

Introducción

El conocimiento del comportamiento reológico de las suspensiones de materiales en los procesos tecnológicos de las industrias es de gran utilidad para el cálculo de los equipos y conductos que las transportan y el control de procesos. Dicho comportamiento es muy complejo y está estrechamente relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas [1-2-3].

En la industria de materiales de la construcción cubana, los lodos 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[4]. Los mismos han tomado mayor auge con el desarrollo de la reología y otras ciencias afines.

La reología, es la ciencia de la deformación y flujo de la materia, estudia la forma como los materiales responden a esfuerzos o deformaciones aplicados en un tiempo determinado[5]. Su campo comprende propiedades mecánicas de sólidos, semisólidos y líquidos, bajo varios objetivos; uno de los métodos más importantes para estudiar las interacciones fisicoquímicas es la reometría [6].

Según la composición y propiedades físicas, en el campo de la reología 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, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos, las que se denominan curvas de flujo. 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 [1]. Con el estudio reológico de las suspensiones es posible establecer modelos de cálculo adecuados para obtener parámetros racionales en los sistemas de transporte que se diseñen para este fin [7].

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 [1-3-4].

Numerosos son los trabajos que se han desarrollado para determinar la influencia de los factores que determinan el comportamiento reológico. 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 [1]. La mayoría de los productos alimenticios son de naturaleza reológica compleja y su viscosidad depende de la temperatura, composición, esfuerzo, velocidad de corte, tiempo de aplicación del esfuerzo de corte, condiciones de obtención y preparación de la muestra [5]. Se ha estudiado factores tales como concentración de sólidos, porcentaje de arena y gravilla, densidad, número de mineral [8]. Se refiere que en el proceso de lixiviación ácida a presión dicho comportamiento está estrechamente relacionado con el tamaño y la distribución de las partículas en suspensión, la concentración y las características mineralógicas de la fase dispersa, las propiedades químicas de superficie y la temperatura de la suspensión [3]. Indican que existe una distribución de tamaño de gota óptimo para la emulsión del tipo aceite-agua [9].

La importancia del estudio del comportamiento reológico de lodo al ser transportado por tubería se evidencia al considerar los reportes de los trabajos que se pueden contactar hoy en día. Se plantea que varios autores 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), por lo cual los resultados que se tienen no pueden hacerse extensivos para todo tipo de suspensiones por la variabilidad de sus respectivos comportamientos reológicos [1-4-9-10].

En los casos prácticos de cálculo y selección de los sistemas de transporte de lodos para las plantas de beneficios de la industria de materiales de la construcción en Cuba no se incluye el estudio del comportamiento reológico, pues en la generalidad de los casos se asume un comportamiento Newtoniano, o se hacen estimaciones de la viscosidad aparente a partir de modelos disponibles en la literatura especializada.

En los procesos tecnológicos de las industrias cubana se manipulan y transportan gran variedad de suspensiones de diferente naturaleza: laterita, cieno carbonato, yeso, sulfuro de Ni+Co, pulpas de carbón, lodos entre otras; sin embargo, los estudios reológicos se han concentrado hasta el momento en las pulpas de mineral laterítico, por ser la materia prima fundamental. Pocos son los trabajos publicados sobre el comportamiento reológico de lodos productos del lavado de áridos de la construcción.

Este trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento reológico y la viscosidad aparente de un lodo residual generado en el proceso de lavado de árido para la construcción.

Materiales y Métodos

Origen de las muestras de lodo

En el análisis experimental se utilizaron muestras de lodo y arcilla tomadas en dos puntos del proceso tecnológico de la planta procesadora de árido, en la tubería de descarga y en el área de sedimentación del respectivamente. Para la toma de la muestra 1 se hizo un compósito del lodo evacuado por la tubería de descarga, el cual se obtuvo con tomas realizadas cada 2 horas por un período de 2 días. El lodo se homogenizó y almacenó en una cantidad de 5 litros para la realización de los experimentos. De la arcilla que llega al área de sedimentación contenida en el lodo, se tomó la muestra 2 y para ello se aplicó el método de puntos.

Determinación de la granulometría

La determinación de la granulometría se efectuó con un analizador de partículas compacto 22 (Analysette 22 Compact). Dicho analizador posee un rango de medición de 0,3 a 300 μm . Este método puede utilizarse como alternativo al tamizado por la vía húmeda, ya que la muestra a analizar contiene un alto por ciento de partículas finas.

Determinación de la densidad de la arcilla, del lodo y del porcentaje de sólido

Para la determinación de la densidad de la arcilla (ρ_s) se utilizó el método del picnómetro, siguiendo el procedimiento. Dicha prueba se realizó utilizando un juego de picnómetros de 25 ml, una pipeta de 25 ml, una balanza digital con precisión $\pm 0,0001$ g y una estufa de temperatura hasta 100 °C. En la determinación de la densidad del lodo (ρ_l) se utilizó el método volumétrico, procedimiento de la forma siguiente: se tomó una probeta de capacidad 250 ml y se pesó; se tomó la muestra del lodo y se homogenizó mediante agitación; se vertió el lodo en la probeta hasta el volumen de 25 ml y se pesó la probeta con el lodo, obteniéndose los resultados en g. Con los datos obtenidos de la densidad de la arcilla y del lodo se calculó el porcentaje de sólido (S) por la fórmula expuesta a continuación.

$$S = \frac{\rho_l - \rho_{H_2O}}{\rho_l} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_{H_2O}} \quad (1)$$

El cálculo del por ciento de sólido permitió definir la concentración en peso y volumétrica del lodo. Las expresiones que se utilizaron en el cálculo de ambas concentraciones son las que se refieren a continuación.

$$C_v = S \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} \quad (2)$$

$$C_p = S = \frac{m_s}{m_T} \quad (3)$$

Dónde:

C_v - Concentración volumétrica de la suspensión

C_p - Concentración en peso de la suspensión

m_s - masa de sólido, en g; m_T -masa total del lodo, en g

Características del instrumento de medición para la prueba reológica

La prueba reológica del lodo objeto de estudio se realizó utilizando el viscosímetro Brookfield DV-II + Procon un husillo LV1 61, vaso de precipitados Griffin de forma baja de 600 ml, incluyendo el protector.

Diseño del experimento

Para efectuar el diseño del experimento se tuvo en cuenta que es importante asegurar la simplicidad y la conducción de este, de manera que resulte ser económico y eficiente. Se hizo todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, dinero, personal y material experimental.

Para la determinación de la influencia que ejerce el por ciento de sólido contenido en el lodo sobre la viscosidad aparente se efectuó un diseño de experimento factorial completo. Las variables de entradas consideradas fueron por ciento de sólido (S) y número de revoluciones(n).El por ciento de sólido se estudió a cuatro niveles (4, 12, 20 y 28 %) y las revoluciones se evaluó a 9 niveles (75, 100, 105, 135, 140, 150, 160, 180 y 200 rev/min).

Selección de las variables de entrada y sus niveles

Los cuatro niveles de por ciento de sólido escogidos estuvieron dado por consideraciones prácticas y teóricas, en la instalación actualmente el lodo que se evacúa por la tubería de descarga posee un 4 % de sólido[11], se evalúa la posibilidad de incrementar el por ciento de sólido contenido en el lodo hasta un 28 %con fines prácticos, y se incluyen dos niveles intermedios espaciados uniformemente para un mayor estudio de la tendencia. La variable número de revoluciones y sus niveles se definió sobre la base de las características de la prueba y recomendaciones del fabricante del viscosímetros DV-II+Pro.

Caracterización de la variable de salida

La ecuación que sirvió de base al cálculo de la viscosidad aparente (μ_a)es la que se muestra a continuación, la cual se determina a partir de lo expuesto en el Manual M/03-165, del 2006.

$$\mu_a = \mu_{mezcla} = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy}\right)} = \frac{TK \cdot SMC \cdot Par}{n \cdot 10} \quad (4)$$

Donde:

n- es el número de revoluciones del husillo, rev/min; Par-es el par de torsión en el husillo; SMC y TK- son constante del husillo y el viscosímetro; τ - es el esfuerzo de corte, Pa; (dv/dy)- es el gradiente de velocidad, en s^{-1} .

Los resultados obtenidos de la viscosidad para los distintos porcentos de sólido con arreglo a la ecuación 4fueron contrastados con los que se predicen por medio de la fórmula 5 (modelo de Einstein para el cálculo de la viscosidad), que se muestra a continuación en la tabla 1, para determinar el error relativo.

Tabla 1. Modelo para la estimación de la viscosidad aparente

Modelo	Parámetros	Ecuación
$\mu_{mezcla} = \mu \cdot (1 + 2,5 \cdot C_v)$	μ_{mezcla} -viscosidad de la mezcla, $Pa \cdot s$ μ -viscosidad del medio dispersante, $Pa \cdot s$ C_v -concentración en volumen, %	(5)

Matriz de planificación del experimento

En total, para el desarrollo de los experimentos de la reología se efectuaron 108 pruebas, 36 experimentos diferentes y tres réplicas por cada uno. La matriz de planificación del experimento se expone en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz de planificación del experimento de reología

		Porcentaje de sólido(S), %			
		S1= 4 %	S2= 12 %	S3= 20 %	S4= 28 %
Número de revoluciones(rev/min)	n1=75 rev/min	$\mu_a 11$	$\mu_a 12$	$\mu_a 13$	$\mu_a 14$
	n2=100 rev/min	$\mu_a 21$	$\mu_a 22$	$\mu_a 23$	$\mu_a 24$
	.	.	.	.	.
	n9=200 rev/min	$\mu_a 91$	$\mu_a 92$	$\mu_a 93$	$\mu_a 94$

Elaboración de los resultados

Para aumentar la representatividad y considerar la incertidumbre de los resultados en la determinación de los parámetros del lodo se efectuaron tres repeticiones de las mediciones, las cuales se analizan sobre la base de criterios estadísticos. Los procedimientos que se utilizaron en el análisis son los que se plantean a continuación. El cálculo de las cantidades correspondientes se realizó utilizando el tabulador Microsoft Excel 2010.

Aseguramiento de la normalidad

En caso que existieron valores anormales, los mismos se eliminaron procediendo como se indica a continuación: para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calcularon la media ($\bar{X}$) y la desviación típica (S), (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos); se estableció los límites de tolerancia, y se eliminaron por considerarse como anormales todos los valores que quedaron fuera del intervalo establecido; se realizaron nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar como es lógico, los valores anormales.

Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado, tal que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes a las mediciones. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales.

La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó utilizando tres criterios: el del coeficiente de determinación, de Student y el de Fisher. Se consideró que el ajuste es significativo según el criterio de Student, cuando se cumplió que p-Valor es inferior al nivel de significancia adoptado en la prueba; según el criterio de Fisher, cuando el Fisher de cálculo es mayor que el Fisher crítico o tabulado y según el criterio del coeficiente de determinación, cuando el valor de este estuvo próximo a 1 o -1.

Determinación del error relativo

Esto se aplicó para determinar la validez de los resultados que se obtienen cuando se aplica el procedimiento utilizado y los que son universalmente reconocidos como correctos, se expresa como la diferencia porcentual entre el valor obtenido y el valor correcto.

Resultados y Discusión**Análisis de la determinación de la granulometría**

Se determinó el valor promedio de las tres réplicas correspondiente a cada clase y se calculó el rango de normalidad para cada experimento desarrollado, lo que permitió indicar que todos los resultados están bajo control estadístico, al no mostrarse valores fuera de los rangos calculados. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 1. Como puede apreciarse en la figura 1 el d_{80} se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0,039 mm, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas de hidromezclas estructurales.

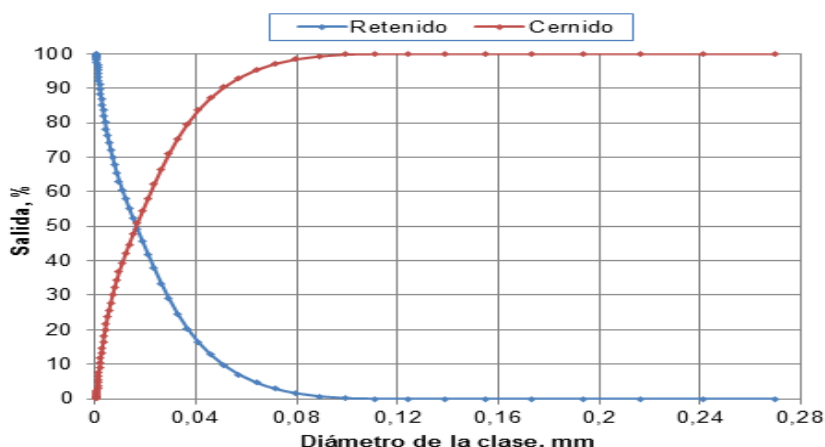


Fig. 1. Curva de características sumarias de la arcilla analizada, con el analizador de partícula

Análisis de la determinación de la densidad del sólido, del lodo y del % de sólido

Se indica que existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones de la densidad del sólido bajo condiciones similares a las que existieron en este trabajo el resultado se obtenga en el rango de 1,599 a 2,374 g/cm³, con valor para la media aritmética normal de 1,982 g/cm³. Se determinó que el proceso de medición para la determinación de la densidad del lodo también se realiza bajo control estadístico, lo que permitió plantear que la densidad del lodo es de 1,021 g/cm³, con una probabilidad de ocurrencia del 95 %. La tabla 3 muestra los valores de la densidad del lodo, de la concentración volumétrica y en peso obtenidos a cada por ciento de sólido, utilizando la ecuación 1, 2 y 3 expuesta anteriormente. La densidad para el 4 % de sólido se determinó de la muestra de lodo tomada en la tubería de descarga de la planta, mientras que las correspondientes a 12, 20 y 28 % de sólido se obtuvieron de las muestras preparadas con fines experimentales.

Tabla 3. Densidad del lodo y concentración de sólido para cada por ciento de sólido

S, %	ρ_l , kg/m ³	CV, %	Cp, %
4	1 021,31	2	4
12	1 063,21	6	12
20	1 109,98	11	20
28	1 161,06	16	28

Determinación del comportamiento reológico del lodo

Las curvas de flujo del lodo se muestra a continuación en la figura 2, la cual se elaboró a partir de los datos obtenidos en las pruebas reológicas y utilizando el Tabulador Microsoft Excel. Se observa en la figura que con el aumento del gradiente de velocidad la tangente a cada punto con relación al origen de coordenada disminuye, lo que sugiere que el lodo muestra un comportamiento pseudoplástico. Además se aprecia una marcada diferencia del esfuerzo de corte entre los puntos correspondientes a diferentes concentraciones de sólido a igual gradiente de velocidad, de lo que se infiere que la concentración de sólido influye en la viscosidad.

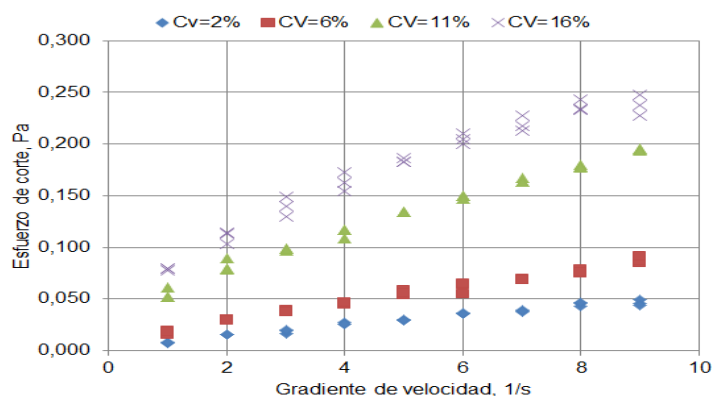


Fig. 2. Curva de flujo para las distintas concentraciones de sólidos en volumen

Los modelos reológicos que describen el comportamiento de las curvas de flujos correspondientes a cada porcentaje de sólido se muestran a continuación en la tabla 4. Se aprecia que las fórmulas propuestas son significativas ya que el coeficiente de determinación, en todos los casos, es superior a 0,98, lo que indica que más del 98 % de las variaciones del esfuerzo de corte puede ser explicado a partir de las variaciones del gradiente de velocidad. Se confirma la sospecha de que el lodo muestra un comportamiento pseudoplástico en todo el rango de variación del porcentaje de sólido examinado.

Tabla 4. Modelos reológicos de las curvas de flujo

Cv, %	Modelos reológicos	Ecuación
2	$\tau = 0,008 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,817}$ con $r^2 = 0,986$	(6)
6	$\tau = 0,017 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,716}$ con $r^2 = 0,989$	(7)
11	$\tau = 0,054 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,570}$ con $r^2 = 0,989$	(8)
16	$\tau = 0,078 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,525}$ con $r^2 = 0,989$	(9)

Determinación de la viscosidad aparente del lodo

La tabla 5 muestra los valores de la viscosidad aparente media correspondiente a cada porcentaje de sólido y los rangos de normalidad. La viscosidad aparente y los rangos de normalidad fueron determinada según la ecuación 4 y el procedimiento descrito en la sección anterior, respectivamente.

Tabla 5. Viscosidad aparente para cada concentración de sólido en volumen

Concentración de sólido en volumen, %	Viscosidad aparente media, $Pa \cdot s$	Rango de normalidad, $Pa \cdot s$
2	0,006	0,004 - 0,008
6	0,012	0,006 - 0,017
11	0,031	0,009 - 0,053
16	0,042	0,010 - 0,075

La figura 3 muestra el comportamiento de las viscosidades aparentes obtenidas en el experimento y las calculadas según el modelo propuesto por Einstein en 1911. Se aprecia que existe diferencia entre los resultados obtenidos experimentalmente en este trabajo (puntos azules) y los pronosticados, lo que demuestra la falta de concordancia de la teoría existente.

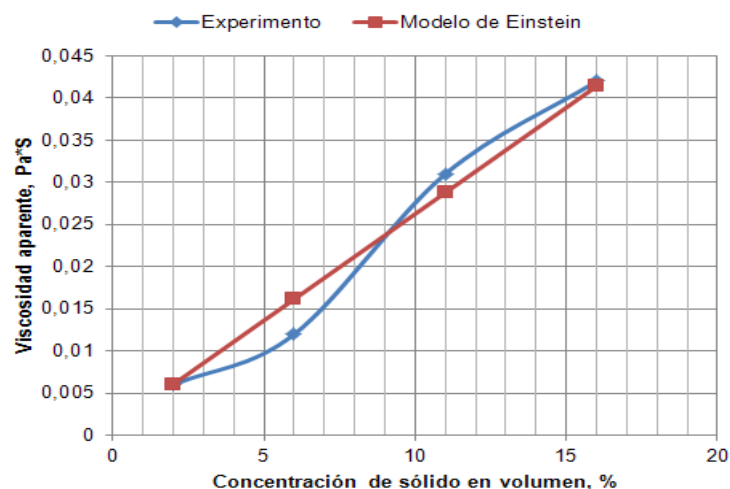


Fig. 3. Gráfico de comparación de la viscosidad aparente obtenida y la predicha

El cálculo realizado del error relativo puntual, indica que el modelo propuesto por Einstein para el cálculo de la viscosidad aparente no describe con precisión el comportamiento de la viscosidad aparente del lodo objeto

de estudio ya que el error relativo puntual varía en el rango de 1,4 a 35 %. A partir de los resultados experimentales obtenidos de la viscosidad aparente y el modelo propuesto por Einstein, se realiza un ajuste basado en el método de mínimo cuadrado determinando el valor del coeficiente K de la ecuación de Einstein, para este caso particular. La expresión determinada se muestra a continuación.

$$\mu_{lodo} = \mu_{H_2O} \cdot (1 + KI \cdot Cv) \quad (10)$$

Dónde:

KI- es un coeficiente que depende de las propiedades del lodo, para este caso adquiere en valor medio de 2,519 con un intervalo de confianza de 2,094 a 2,943 al nivel de confianza del 95 %.

El modelo ajustado es significativo puesto que el coeficiente de determinación es de 0,992, el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico (356,45 es mayor que 0,003) y la probabilidad para t es menor que el nivel de significancia empleado (0,000324 es menor que 0,05).

El resultado obtenido del coeficiente K para el modelo de la viscosidad aparente demuestra el poder de predicción del modelo propuesto por Einstein con $K = 2,5$, hasta valores de concentración en volumen en el orden del 16 %. Además se infiere que la forma de las partículas de arcilla presentes en el lodo debe ser aproximadamente esférica.

A partir de los resultados mostrados relativos al modelo propuesto se recomienda: considerar un rango más amplio de variación de la concentración de sólido para determinar un límite superior de validez del modelo de Einstein y, realizar pruebas que permitan corroborar la suposición de que las partículas disueltas en el lodo son aproximadamente esféricas.

Conclusiones

La caracterización del lodo objeto estudio refiere que este posee un diámetro del 80 % cernido igual a 0,039 mm, y la densidad aparente del sólido es de 1 989 kg/m³, lo que se debe tener en cuenta en materia de reproductividad de los resultados.

La construcción de las curvas de flujo permitió clasificar reológicamente el lodo como pseudoplástico, ya que se ajustan significativamente modelos de potencia con coeficiente de determinación superior a 0,98.

El ajuste del coeficiente de la ecuación de Einstein para el cálculo de la viscosidad aparente, en el lodo objeto de estudio, demuestra la idoneidad del modelo con $K = 2,5$ para valores de concentración en volumen en el orden del 16 %.

Referencias

- Martínez R, Hernández G. Caracterización reológica de pulpas de cieno carbonatado. *Minería y Geología*. 2015;31(4):70-83. ISSN 1993-8012.
- Martínez I, Sánchez A, Osorio L, et al. Caracterización reológica de soluciones azucaradas para el proceso de evaporación-cristalización. 2011;24(1):61-71.
- Pérez L, Garcell L, Rojas A, et al. Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. *Minería y Geología*. 2010;26(4):16-35. ISSN 1993 8012.
- Martínez R, Izquierdo R, Pompa M. Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado. *Minería y Geología* 2014;30(1):80-94. ISSN 1993-8012.
- Gallego H, Álvarez C, Vélez C, et al. Caracterización reológica de dos salsas alimenticias. *Vitae*. 2012;19(1):433-5.
- Alfonso L, Santos J, Calero N, et al. Caracterización reológica de una suspemulsión comercial para uso agroquímico. Sevilla, Spain: Universidad de Sevilla; 2012.
- Toose EM. A boundary integral method for two dimensional (non) – Newtonian drops in slow viscous flow. *Journal of Non-Newtonian*. 1995.
- Hernández G, Martínez R, C D, et al. Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas. *Minería y Geología*. 2015;31(3):109-27. ISSN 1993-8012.
- Laurencio H, Delgado Y. Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de la emulsión de petróleo pesado. *Minería y Geología*. 2008;24(2). ISSN 1993-8012.
- Turro A, Izquierdo R, Garcell L. Parámetros y regímenes del hidrot transporte de colas lateríticas en el proceso caron. *Minería y Geología*. 2008;24(4).
- García E, Leyva B, Laurencio H. Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo. *Ciencia y Futuro*. 2014;4(4):22-41. ISSN 2306-823x.