

Influencia de la concentración de sólido en la velocidad de sedimentación de lodo de la industria de áridos

Benigno Leyva-de la Cruz
Yulexis Guillen-Campo
Danienkis Suárez-Columbié
Rodney Martínez-Rojas
Raúl Izquierdo-Pupo

Resumen

El propósito del estudio fue determinar, para el lodo generado en el proceso de lavado de la planta procesadora de áridos del Jobo de Sagua de Tánamo, cómo afecta el porcentaje de sólido a la velocidad de sedimentación teórica que se predice por medio de la ley de velocidad de Stokes. Muestras de la tubería de descarga y del área de sedimentación del lodo fueron analizadas desde el punto de vista granulométrico, densimétrico y de concentración del sólido. La variable porcentaje de sólido (S) se estudió a cuatro niveles (4, 12, 20 y 28 %) y el tiempo (t) se evaluó a intervalos de veinte minutos durante cinco horas. El comportamiento de la sedimentación del lodo se caracterizó por medio de la velocidad de sedimentación. Los resultados indican que en este caso la ley de velocidad de Stokes no es válida para predecir la velocidad de sedimentación del lodo, para un nivel de confianza del 95 %, por lo que se obtiene una función de corrección para la ley de velocidad de Stokes, expresada a través de un modelo matemático polinómico de segundo grado.

Palabras clave: ley de Stokes; lodos industriales; velocidad de sedimentación.

Influence of solids concentration on the sedimentation rate of the mud in the aggregate industry

Abstract

The objective of this investigation is to determine, for the mud resulting from the wash process in the Jobo community arid industry in Sagua de Tánamo, the impact of solids percent on the theoretical sedimentation velocity that is predicted by the Stokes velocity Law. Samples of the discharge pipeline and the mud sedimentation area were analyzed from granulometric, density and solids concentration points of view. The solids percentage variable (S) was analyzed in four scenarios (4, 12, 20 and 28 %) and time (t) was evaluated at intervals of 20 minutes for 5 hours. The behavior of mud sedimentation was characterized through the sedimentation velocity. The results indicate that the Stokes velocity law does not apply for estimating the mud sedimentation velocity with a 95% confidence. Therefore, a correction function is obtained for the Stokes velocity law expressed through the polynomial mathematical model of second degree.

Keywords: Stokes law; industrial mud; sedimentation velocity.

1. INTRODUCCIÓN

En la planta procesadora de áridos del Jobo (municipio de Sagua de Tánamo) el lodo resultante del proceso de lavado es conducido a través de tuberías hacia una laguna de sedimentación. Para conseguir reciclar el agua al proceso se está considerando la colocación de un equipo que permita la separación de la fase líquida de la fase sólida, lo que redundaría en un uso más racional del agua y de la energía en la planta de áridos.

La selección correcta del equipo más racional para estos fines requiere de estudios de sedimentación del lodo para conocer la influencia de las características del mismo sobre el sistema de tratamiento que se elija.

La sedimentación de partículas en un fluido es un fenómeno que ha sido utilizado con fines prácticos desde épocas muy remotas; actualmente es de especial relevancia en las industrias de tecnologías de descontaminación, farmacéuticas, de procesos, en la elaboración de revestimientos de todo tipo, de materiales cerámicos de alta resistencia, concentración de suspensiones minerales, entre otras (Cerpa 1999).

Bajo el término sedimentación se designan genéricamente las operaciones de separación parcial de sistemas líquido-sólido, en virtud de la fuerza de gravedad o la centrífuga (Perry 2000).

El lodo proveniente de la planta de áridos es una suspensión líquido-sólido cuyas propiedades dependen fundamentalmente de la fuente o cantera de la cual se extrae la materia prima, de la tecnología utilizada para la clasificación del árido, de la vía de separación de la parte líquida, de las condiciones técnicas para el lavado y de los requerimientos del producto final (Leyva *et al.* 2014).

Diferentes investigaciones han sido desarrolladas para determinar las causas que afectan la sedimentación. Beyrís y Falcón (2000) exponen que el comportamiento de la sedimentación en pulpas lateríticas del proceso de lixiviación ácida varía en función de su composición granulométrica, observando que al aumentar el contenido de la clase gruesa disminuye la zona de caída libre y se obtienen sólidos más concentrados; sin embargo, con el aumento de partículas finas ocurre lo contrario: se retarda la sedimentación y la concentración de sólido durante el espesamiento es menor.

Falcón y otros investigadores (1997) plantean que la composición iónica del lodo es un parámetro a tener en cuenta al estudiar la sedimentación, pues la presencia de determinados iones en bajas concentraciones influye en los fenómenos de dispersión y coagulación de las partículas pequeñas durante

la sedimentación, lo cual se puede lograr con el uso de sustancias químicas electrolíticas.

Valdés (1983) estudia la influencia del pH en la sedimentación, determinando un rango óptimo de $\text{pH}=6,6-7,6$ (cercano al punto isoeléctrico), lo que más tarde fue corroborado en otras investigaciones (Beyrís & Falcón 2000; Falcón *et al.* 1997).

Nebot (1969) no llega a resultados favorables al estudiar el efecto del magnetismo en la sedimentación, aplicando un campo magnético con intensidad desde 0 hasta 4 000 Gauss. Por otra parte, Ponce *et al.* (1983) analiza muestras de pulpa con 45 % de sólido del proceso metalúrgico del níquel, logrando explicar la relación entre la composición mineralógica y la química, así como la posibilidad de que sus variaciones influyan en la sedimentación de la pulpa laterítica. Sin embargo, no establece comparaciones con otros valores de concentración que permitan detectar y explicar las diferencias. Beyrís y Falcón (2007) explican la influencia que tiene la composición mineralógica de la mena en el proceso de sedimentación de las pulpas de mineral laterítico.

Para el análisis físico de la sedimentación se han propuesto varios modelos. Uno de ellos, difundido universalmente, es el que se basa en la ley de Stokes, según lo reportado por Pavlov (1981) y por Mariño, Mora y Chang (2009), que establece la dependencia entre la velocidad de sedimentación, la granulometría, la densidad aparente del sólido y la viscosidad del medio dispersante. Este modelo, en general, es válido en el movimiento de partículas esféricas pequeñas que se mueven a velocidades bajas, esto es: número de Reynolds menor de 0,5 (Kasatkin 1987).

Robinson (1926), Steinour (1944) y Hawks-Ley (1950) (citados todos por Jiménez 2014) proponen sendos modelos que consideran la influencia del porcentaje de sólido en la velocidad de sedimentación. Las fórmulas propuestas por ellos se basan en la ley de velocidad de Stokes. Robinson cambia las variables densidad y viscosidad dinámica del medio dispersante por la densidad y viscosidad de la mezcla e introduce un coeficiente de corrección. Steinour (1994) realiza el cambio de la variable viscosidad del medio dispersante por la viscosidad de la mezcla e inserta una función de corrección para tener en cuenta la influencia de la porosidad. Hawks-Ley utiliza un método parecido al empleado por Steinour y obtiene similar resultado.

Para poder aplicar las expresiones de estos modelos es necesario disponer de todos los datos involucrados en el análisis, algunos de los cuales pueden no estar al alcance para una determinada aplicación, por lo que es

conveniente disponer de otros modelos que aumenten las posibilidades de cálculo de la velocidad de sedimentación.

Por lo anteriormente planteado este trabajo tiene como objetivo determinar cómo afecta el porcentaje de sólido en la velocidad de sedimentación teórica para el lodo generado en el proceso de lavado de áridos de la planta de beneficio de Sagua de Tánamo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Análisis experimental

Se utilizaron muestras de lodo y de arcilla tomadas en dos puntos del proceso tecnológico de la planta procesadora de árido: el primero en la tubería de descarga (M1) y el segundo en la laguna de sedimentación (M2).

Para la muestra M1 se hizo un compósito del lodo evacuado por la tubería, tomando muestras parciales de un litro cada dos horas durante dos días. El lodo se homogenizó y almacenó en cantidad de cinco litros para la realización de los experimentos.

La muestra M2 se conformó, mediante el método de puntos propuesto por Mitrofanov (1984), a partir de la arcilla contenida en el lodo sedimentado en la laguna de sedimentación, hasta obtener un volumen de 4 kg.

2.1.1. Granulometría

La granulometría se obtuvo con un analizador de partículas compacto 22 (*Analysette 22 Compact*). Este método puede utilizarse como alternativo al tamizado por la vía húmeda propuesto por Andreiev, Perov y Zverìevich (1987), ya que la muestra a analizar contiene un alto porcentaje de partículas finas. Dicho analizador posee un rango de medición de $0,3 \mu\text{m}$ a $300 \mu\text{m}$.

2.1.2. Densidad de la arcilla

La densidad de la arcilla se obtuvo por el método del picnómetro, siguiendo el procedimiento propuesto por Heny, Fred y Stephen (1959). Para ello se utilizó un juego de picnómetros de 25 ml, una pipeta, una balanza digital con precisión $\pm 0,0001 \text{ g}$ y una estufa de temperatura hasta $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Finalmente, la densidad de la arcilla se obtiene como producto del peso específico relativo del sólido por la densidad del agua.

2.1.3. Densidad del lodo

Para determinar esta propiedad se utilizó el método volumétrico, a través del procedimiento 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 gramos.

2.2. Diseño del experimento

Para la determinación de la influencia que ejerce el porcentaje de sólido contenido en el lodo sobre la velocidad de sedimentación teórica se utilizó un diseño de experimento factorial completo. Las variables de entrada consideradas fueron: porcentaje de sólido (S) y tiempo (t). El porcentaje de sólido se estudió a cuatro niveles (4, 12 y 20 y 28 %) y el tiempo se evaluó a intervalos de veinte minutos durante cinco horas.

2.2.1. Selección de las variables de entrada y sus niveles

Los cuatro niveles de porcentaje de sólido se escogieron atendiendo a consideraciones prácticas y teóricas. En la instalación, el lodo que se evacúa por la tubería de descarga posee un 4 % de sólido (Leyva *et al.* 2014) y se evalúa la posibilidad de incrementar el porcentaje de sólido contenido en el lodo hasta un 28 %, con el propósito de aumentar la disponibilidad de agua en la instalación (García, Leyva y Laurencio 2014) y se incluyen dos niveles intermedios, espaciados uniformemente, para un mejor estudio del comportamiento de la sedimentación.

Las pruebas de sedimentación para el 4 % de sólido se realizaron para la muestra M1, mientras para la muestra M2 se ensayaron los restantes porcentajes de sólido (12 %, 20 % y 28 %).

La variable tiempo y sus niveles se definieron sobre la base de la característica del instrumento de la prueba y la del lodo, de manera tal que fuese posible definir la curva que exprese el comportamiento de la interface en un diagrama de altura de sedimentación (Z), en función del tiempo.

2.2.2. Caracterización de la variable de salida

El comportamiento de la sedimentación en el lodo se caracterizó por medio de la velocidad de sedimentación, la cual se definió, desde el punto de vista matemático, como la rapidez con que varía la altura de la interface en la unidad de tiempo.

Las curvas de sedimentación se realizaron de forma experimental para ambas muestras por separado, tomando el tiempo de sedimentación y la altura de la interfase para cada tiempo en una probeta de 1 000 ml. De esta manera se graficó la curva de sedimentación del lodo para cada porcentaje de sólido.

Para el análisis físico-matemático del proceso de sedimentación se tuvo en cuenta lo planteado por Pavlov (1981) y por Mariño, Mora y Chang (2009).

El modelo propuesto (ley de velocidad de Stokes) para la determinación de la velocidad de sedimentación se refiere a continuación:

$$\omega_{sed} = \frac{d^2(\rho_s - 1)g}{18 \cdot \nu_m} \quad (1)$$

Donde:

ω_{sed} – velocidad de sedimentación en caída libre, cm/s;

d - diámetro medio de las partículas de mayor tamaño, cm;

ρ_s – densidad aparente del sólido, g/cm³;

ν_m - coeficiente cinemático de viscosidad del medio dispersante, cm²/s;

g – aceleración de caída libre, cm/s².

Los resultados de la velocidad de sedimentación para los distintos porcentajes de sólido fueron comparados con los valores teóricos predichos por la ecuación 1.

2.2.3. Matriz de planificación del experimento

En total, se efectuaron 192 pruebas, 64 experimentos y dos réplicas por cada uno. Los 64 experimentos se identificaron con números del 1 al 4, siguiendo el nivel del porcentaje de sólido, la letra **a** para la primera repetición y la letra **b** para la segunda.

2.2.4. 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 mediciones para cada parámetro, las cuales se analizan sobre la base de criterios estadísticos. Las expresiones matemáticas y procedimientos que se utilizaron en el análisis son las que se plantean a continuación.

Muestro aleatorio simple

La cantidad de réplicas a realizar para evaluar la tendencia se determinó tomando como referencia el siguiente modelo para el cálculo, de acuerdo con lo expuesto por Miller, Freun & Richar (2005):

$$n = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right]^2 \quad (2)$$

$Z_{\alpha/2}$ - estadístico de la distribución normal;

α – nivel de significancia;

σ – desviación típica poblacional;

E- error máximo de estimación.

Aseguramiento de la normalidad

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectuó aplicando las expresiones matemáticas que se refieren a continuación (Miller, Freun & Richar 2005):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (3)$$

$$LT_{Xm\acute{a}x} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (4)$$

$$LT_{Xm\acute{i}n} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Donde:

\bar{X} – media aritmética de las mediciones realizadas;

$LT_{Xm\acute{a}x}$ – límite superior de tolerancia;

$LT_{Xm\acute{i}n}$ – límite inferior de tolerancia;

S- desviación típica muestral;

t - estadístico de la distribución probabilística de Student;

n - total de observaciones.

Se eliminaron aquellos casos donde existieron valores anormales, siguiendo las indicaciones de Hernández (1986).

Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado; el cual consiste en ajustar una curva al conjunto de puntos ordenados, de tal forma que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller, Freun & Richar 2005). Dicho sistema se muestra a continuación:

$$\sum_{i=1}^n Y_i = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i = a \cdot \sum_{i=1}^n X_i + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (8)$$

Donde:

X_i - variable que adquiere los valores de la abscisa;

Y_i - variable que adquiere los valores de la ordenada;

n - conjunto de pares ordenados;

- a. intersección de la línea ajustada con el eje de la ordenada;
- b. pendiente de línea ajustada.

El ajuste de curva por regresión se realizó en el Tabulador Microsoft Excel utilizando la herramienta para análisis de datos. La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó mediante el criterio del coeficiente de determinación, el de Student y el de Fischer.

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" (Hernández 1986).

El error relativo puntual se calculó a través de la siguiente expresión, la cual fue tomada de Hernández (1986):

$$E_{rel} = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_2} \right| \cdot 100\% \quad (9)$$

Donde:

X_1 - valor obtenido;

X_2 - valor correcto;

E_{rel} - error relativo puntual, %.

Prueba de hipótesis estadística relativa a una media

Este procedimiento se aplicó con el objetivo de determinar si las variaciones mostradas entre los valores de la velocidad de sedimentación determinada por la ecuación 1 y la velocidad real obtenida para distintos porcentajes de sólido son significativas.

1. Definición de las hipótesis

Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas entre las medias de las velocidades y su valor esperado ($\mu_0 = \mu$).

Hipótesis alterna (H_1): Existen diferencias significativas entre las medias de las velocidades y su valor esperado ($\mu_0 \neq \mu$).

2. Nivel de significancia: α
3. Criterio de rechazo de la hipótesis nula: Se rechaza la hipótesis nula si $t < -t_{\alpha/2}$ o $t > t_{\alpha/2}$ con $v = n - 1$ grados de libertad, donde $t_{\alpha/2}$ es el estadístico de la distribución de Student, n es la cantidad de observaciones consideradas en el cálculo y t se determina por la siguiente fórmula (Miller, Freun & Richar 2005):

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S / \sqrt{n}} \quad (10)$$

Donde:

μ - es la media poblacional, los demás parámetros ya se definieron anteriormente.

4. Cálculo: El cálculo para la prueba se efectuó utilizando la herramienta de análisis de datos en el programa tabulador Microsoft Excel.
5. Decisión: La decisión se tomó sobre la base del criterio de rechazo definido en el paso 3 del procedimiento

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor promedio de las tres mediciones correspondiente a cada parámetro y el rango de normalidad para cada experimento, para lo cual se utilizaron las ecuaciones desde la 2 hasta la 6, indican que todos los resultados están bajo control estadístico, al no mostrarse valores fuera de los rangos calculados.

3.1. Granulometría

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 (Turro 2002).

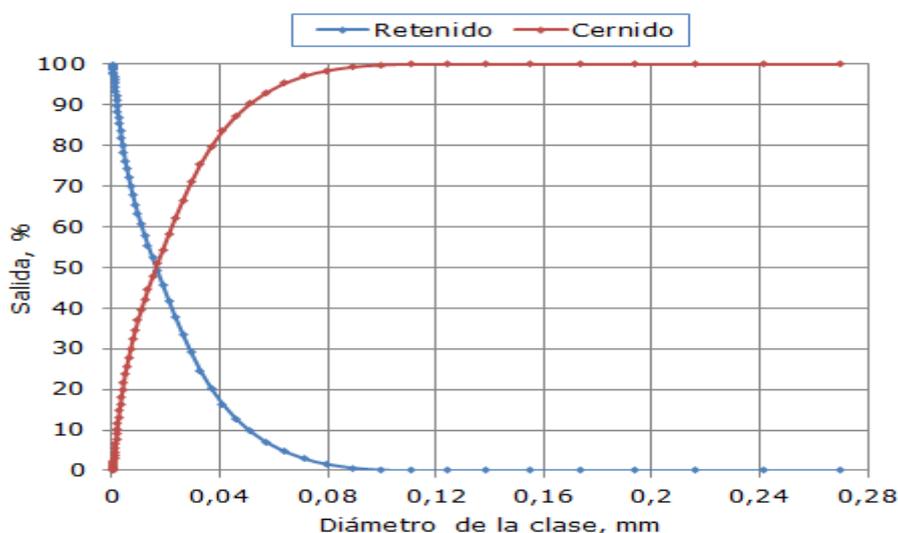


Figura 1. Curva de características granulométricas sumarias de la arcilla analizada.

3.2. Densidad de la arcilla

Existe una probabilidad del 95 % de que si se realizan las mediciones de la densidad de la arcilla (muestra M2) 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.

3.3. Densidad del lodo

La densidad del lodo es de 1,021 g/cm³, con una probabilidad de ocurrencia del 95 %. La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para cada porcentaje de sólido.

Tabla 1. Valores de los parámetros del lodo para ambas muestras

Muestras	S, %	Densidad del lodo, kg/m ³	Concentración volumétrica, %
M1	4	1 021,31	2
M2	12	1 063,21	6
M2	20	1 109,98	11
M2	28	1 161,06	16

3.4. Velocidad de sedimentación del lodo

La curva de sedimentación del lodo se muestra en la Figura 2. Puede observarse que la tangente de la curva correspondiente a la fase de caída libre disminuye con el aumento del porcentaje de sólido, ocurriendo lo contrario en la fase de caída contrariada. Ello se explica por el aumento del choque entre partículas según aumenta el contenido de sólido, lo que acentúa la violación de los supuestos de la ley de Stokes.

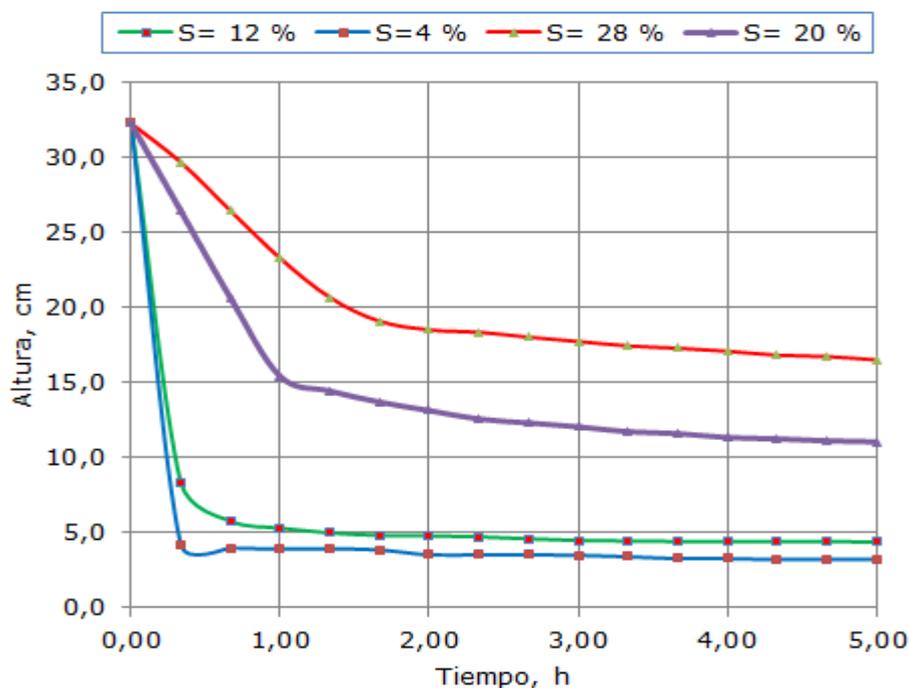


Figura 2. Curvas de sedimentación del lodo.

La Tabla 2 muestra los ocho modelos matemáticos obtenidos para establecer la tendencia del comportamiento de la altura de sedimentación en función del tiempo y la velocidad de sedimentación correspondiente.

Tabla 2. Tendencias de la altura de sedimentación

No.	Modelos obtenidos	Criterio de idoneidad	Condición de validez	$V_{sed} \cdot t$ cm/h
1	$Z = 32,30 - 84,12 \cdot t$	$R^2 = 0,999'$	S = 4 %	84,12
2	$Z = 4,17 - 0,232 \cdot t$	$R^2 = 0,925$	S = 4 %	0,232
3	$Z = 32,30 - 71,73 \cdot t$	$R^2 = 0,999'$	S = 12 %	71,73
4	$Z = 5,70 - 0,39 \cdot t$	$R^2 = 0,92$	S = 12 %	0,39
5	$Z = 32,19 - 16,93 \cdot t$	$R^2 = 0,999$	S = 20 %	16,93
6	$Z = 14,95 - 0,86 \cdot t$	$R^2 = 0,912$	S = 20 %	0,86
7	$Z = 32,13 - 8,23 \cdot t$	$R^2 = 0,991$	S = 28 %	8,23
8	$Z = 20,08 - 0,74 \cdot t$	$R^2 = 0,977$	S = 28 %	0,74

Los resultados mostrados en la Tabla 2 indican que los modelos propuestos son idóneos para la predicción de la altura de sedimentación en función del tiempo, puesto que para todos los casos el coeficiente de determinación está próximo a la unidad y se cumple el criterio de Fisher y el de Student (el

Fisher calculado es mayor que el crítico y la probabilidad para t es menor que el nivel de significancia).

Comparando los resultados de la velocidad de sedimentación expuestos en la Tabla 2 con los que se predicen, a través de la ecuación 1, mediante el empleo de la ecuación 9, se obtiene que el error relativo puntual varía de un 71 % a un 97 % para la fase de caída libre y de un 99,7 % a un 99,9 % para la fase de caída contrariada, según aumenta el porcentaje de sólido en el rango de 4 % a 28 %; esto es asumiendo un diámetro de partícula de 0,0039 cm (d_{80} cernido).

De manera complementaria se aplica la ecuación 10, determinándose que existen diferencias significativas entre los valores de las velocidades que se comparan, al nivel de significancia del 0,05, puesto que el valor de t fue igual a -12,94 y -1981,18 para la fase de caída libre y contraria, respectivamente, el cual es menor que -3,18 (el valor de t en 0,025 con tres grados de libertad). Esto sugiere que la ecuación 1 debe estar afectada por un término que tenga en cuenta la influencia del porcentaje de sólido.

Resulta conveniente, desde el punto de vista práctico, sustituir la descripción de la influencia de la concentración de sólido en dependencia de los factores que fenomenológicamente influyen (pH, porosidad, viscosidad del lodo, entre otros) por la descripción empírica que integran estos factores en una función de la concentración. Esto es válido si se asume que la variabilidad de los factores esenciales no inutiliza la referida función de la concentración.

3.5. Función de corrección

La ecuación 1 es afectada por una función que considera la influencia del porcentaje de sólido en la velocidad de sedimentación teórica; esto es equivalente a decir que se dividen los resultados que se predicen de la velocidad de sedimentación teórica entre los que se obtienen de una función del porcentaje de sólido para poder hallar la velocidad de sedimentación real. La estructura de tal arreglo se muestra a continuación en la ecuación 11.

$$v_{sed} = \frac{d^2(\rho_s - 1)g}{18 \cdot \nu_m} \cdot \frac{1}{f(S)} \quad (11)$$

Donde: $f(S)$ -es una función que tiene en cuenta la influencia que ejerce el contenido de sólido en la velocidad de sedimentación teórica.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la función de corrección en función del porcentaje de sólido. Se observa que la tendencia para la fase de caída libre y para la fase de caída contrariada puede ser representada

significativamente (coeficiente de determinación próximo a 1) por un modelo polinómico de segundo grado.

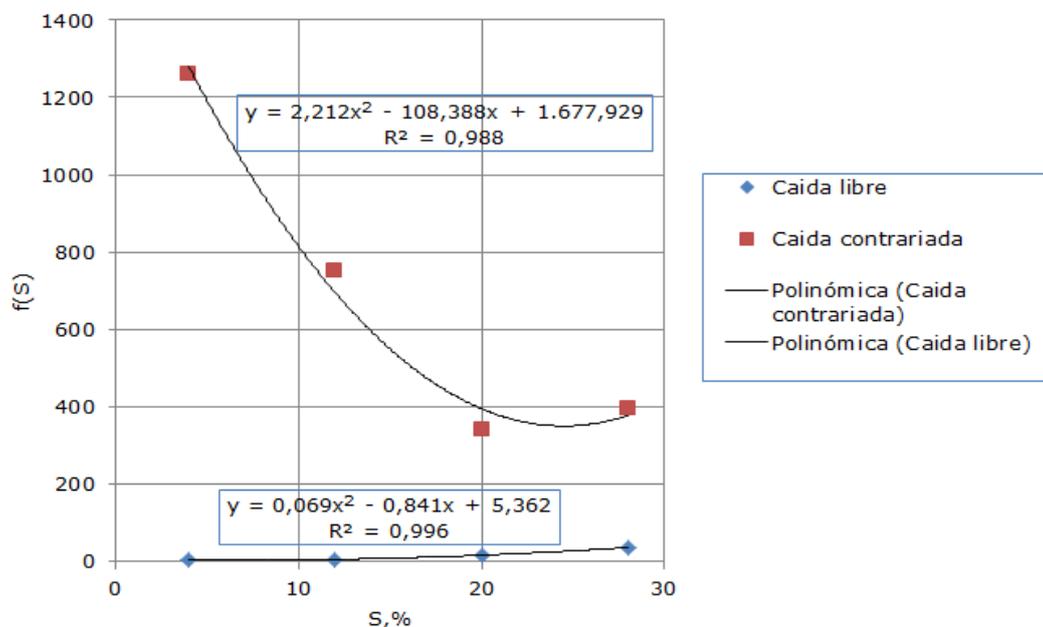


Figura 3. Comportamiento de la función de corrección.

La expresión de la función establecida para describir cómo afecta el porcentaje de sólido a la velocidad de sedimentación teórica se muestra a continuación:

$$f(S) = aS^2 + bS + c \quad (12)$$

Donde:

a , b y c - son coeficientes empíricos que dependen de las propiedades de la suspensión.

Para la zona de caída libre los coeficientes a , b y c adquirieron en este caso el valor de 0,069, -0,841 y 5,362, en ese mismo orden; mientras que para la zona de caída contrariada los valores son: 2,212, -108,388 y 1 637,929, respectivamente. Los resultados mostrados se fundamentan en un coeficiente de determinación (R^2) de 0,996 para caída libre y 0,988 para caída contrariada.

El comportamiento de la función de corrección se explica por el hecho de que con el incremento del porcentaje de sólido en el lodo se acentúa la violación de los supuestos que sustentan la ley de velocidad de Stokes.

4. CONCLUSIONES

Mediante la función de corrección obtenida para la ley de Stokes en este estudio se describe cómo afecta la velocidad de sedimentación teórica el

contenido de sólido en el lodo generado en el proceso de lavado de la planta procesadora de áridos del Jobo de Sagua de Tánamo. Esta función expresa, a través de un modelo matemático polinómico de segundo grado, el hecho de que con el aumento del contenido de sólido en el lodo la velocidad de sedimentación real en la fase de caída libre disminuye, mientras aumenta en la fase de caída contrariada

5. REFERENCIAS

- ANDREIEV, S.; PEROV, V. & ZVERIÈVICH, V. 1987: *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*. Pueblo y Educación, La Habana, 536 p.
- BEYRÍS, M. P. E. & FALCÓN, H. J. 2000: Consideraciones del efecto de la composición granulométrica en el proceso de sedimentación. En: Evento CINAREM'2000. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- BEYRÍS, M. P. & FALCÓN, H. J. 2007: Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica. *Minería & Geología* 23(1): 1-14.
- CERPA, A. 1999: Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions. *Clays and Clay Minerals* 47(4): 555-520.
- FALCÓN, J.; BEYRÍS, P.; FERRER, E. & MONTERO, M. 1997: Sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos de la planta Moa Nickel S.A. *Minería & Geología* 14(1): 31-36.
- GARCÍA, E.; LEYVA, B. & LAURENCIO, H. 2014: Sistema de sedimentación para la recuperación de aguas residuales del proceso de lavado de áridos en la UEB del Jobo. *Ciencia & Futuro* 4(4): 22-41.
- HENY, K.; FRED, H. & STEPHEN, L. 1959: *Mineralogía*. Edición revolucionaria, La Habana.
- HERNÁNDEZ, S. 1986: *Metrología dimensional*. Editorial ISPJAE, La Habana.
- JIMÉNEZ, M. 2014: *Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología carbonato amoniacal y su influencia en el consumo de energía de los sedimentadores*. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- KASATKIN, A. 1987: Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Segunda parte. Pueblo y Educación, La Habana, p. 262-366.
- LEYVA, B.; GUILLEN, Y.; TORRES, E. & LAURENCIO, H. 2014: Pronóstico de la velocidad crítica de transportación de lodo residual. En: Enermoa. CD-Rom. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

- MARIÑO, A.; MORA, L. & CHANG, A. 2009: *Equipos de la metalurgia no ferrosa*. Felix Varela, La Habana, 238 p.
- MILLER, R.; FREUN, J. E. & RICAR, J. 2005: *Probabilidad y Estadística Para Ingeniero*. Félix Varela, La Habana, p. 25–30.
- MITROFANOV, L. 1984: *Investigación de las capacidades de enriquecimiento de los minerales*. MIR, Moscú.
- NEBOT, M. 1969: Prueba de sedimentación con pulpas sometidas a un campo magnético. Trabajo de investigación. E.C.P.S.A. Moa.
- PAVLOV, K. 1981: *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. MIR, Moscú.
- PONCE, N.; HERNÁNDEZ, N.; INFANTE, G.; CABRERA-DÍAZ, I.; HIDALGO, M. 1983: Posible influencia de la composición mineralógica en la sedimentación de la pulpa cruda de Moa. *Minería & Geología* 1(3): 215-238.
- PERRY, K. 2000: *Perry's chemical engineers' handbook*. 2 t. Editorial Revolucionaria, La Habana.
- TURRO, A. 2002: *Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniaco*. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 95 p.
- VALDÉS, G.F. 1983: *Principios químicos coloidales de la sedimentación de las pulpas altamente dispersas de mineral laterítico de la fábrica de Moa*. Tesis Doctoral. Moscú, 1983.

Benigno Leyva-de la Cruz bleyva@ismm.edu.cu

Profesor Asistente. Máster en Electromecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Yulexis Guillen-Campo yguillenc@aei-ucmbybat.co.cu

Ingeniero Hidráulico. Holguín, Cuba.

Daniesky Suárez Columbié. dsuarez@ismm.edu.cu

Asistente técnico docente. Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Rodney Martínez Rojas rmartinez@ismm.edu.cu

Profesor Asistente. Máster en Electromecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

Raúl Izquierdo Pupo rizquierdo@ismm.edu.cu

Profesor Titular. Doctor en Ciencia Técnicas. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín,
Cuba.