

Modelo de viscosidad relativa que describe el comportamiento reológico de suspensiones lateríticas

Relative viscosity model which describes the rheological behavior of lateritic suspensions

Dra. C. Liudmila Pérez García^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-1705-8984>

Dr. C. Leonel R. Garcell Puyáns¹  <https://orcid.org/0000-0001-6740-8017>

Dr. C Gabriel Hernández Ramírez²  <https://orcid.org/0000-0001-6031-5263>

¹Universidad de Oriente. Facultad de Ingeniería Química y Agronomía. Cuba

²Universidad de Holguín. Cuba.

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: lpgarcia@uo.edu.cu

RESUMEN

La pulpa cruda de mineral laterítico, materia prima principal en la industria cubana del níquel, presenta características no newtonianas debido a sus propiedades físico-químicas y al contenido de sólidos requerido para su procesamiento industrial; ocasionando problemas de transportación y sedimentación por su alta viscosidad. Predecir su comportamiento reológico resulta una tarea compleja, dada la variabilidad del mineral que se alimenta al proceso; por este motivo, en el trabajo se obtuvo un modelo matemático semiempírico que permite establecer una relación cuantitativa entre los principales factores que determinan el comportamiento reológico de las suspensiones lateríticas, tales como: velocidad de deformación, contenido de sólidos, índice de estabilidad, número de mineral y Coeficiente de Polidispersión (parámetro obtenido a partir de un modelo matemático empírico, también propuesto en este trabajo, que describe la distribución de tamaño de las partículas en la suspensión). El modelo de viscosidad relativa obtenido, válido en el dominio de operación del proceso de

Lixiviación Ácida a Presión (LAP), brinda posibilidades predictivas de las características reológicas de las pulpas limoníticas para distintas condiciones de operación.

Palabras clave: reología; suspensiones de laterita; distribución de tamaño de partículas; modelo de viscosidad relativa.

ABSTRACT

The raw pulp of lateritic ore, the main raw material in the Cuban nickel industry, has non-Newtonian characteristics due to their physicochemical properties and the solids content required for industrial processing; causing transportation problems and settling their high viscosity. Predicting their rheological behavior is a complex task, given the variability of the mineral fed to the process; strain rate, solids content, stability index number: For this reason, work a semi-empirical mathematical model to establish a quantitative relationship between the main factors that determine the rheological behavior of lateritic suspensions, such as obtained mineral and polydispersity coefficient (parameter obtained from an empirical mathematical model, also proposed in this paper, which describes the distribution of particle size in suspension). The relative viscosity model obtained, valid in the domain of the Pressure Acid Leaching process operation (LAP), provides predictive possibilities of the rheological characteristics of the limonitic pulps for different operating conditions.

Key words: rheology; laterite suspensions; particle size distribution; relative viscosity model.

Recibido: 20/09/2019

Aceptado: 25/01/2020

Introducción

En Cuba no son muchas las investigaciones realizadas en el campo de la reología de las suspensiones de mineral laterítico. El poco conocimiento que existe en este sentido conlleva a que se tomen decisiones en los procesos tecnológicos que no favorecen la mejoría de la operación del sistema de transporte de las suspensiones, causando

anomalías que no tienen explicación aparente, lo que conlleva a una inadecuada selección del sistema de tuberías y bombas. ⁽¹⁾ Estos problemas son más notables cuando se manipulan fluidos no newtonianos como es el caso de las suspensiones minerales de la industria del níquel.

En los últimos años se han emprendido estudios relacionados con el manejo de estas suspensiones minerales, tanto en la Facultad de Ingeniería Química y Agronomía de la Universidad de Oriente como en la Universidad de Moa y en el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ) de Moa. De esta forma ha ido incrementándose la información experimental sobre la mineralogía y la distribución de tamaño de partículas de las lateritas cubanas, ^(2,3,4,5) así como su comportamiento durante el proceso de sedimentación, ^(6,7,8,9) propiciando una mejor comprensión acerca de la influencia de los diferentes factores que determinan las características reológicas y coloides de las pulpas que se alimentan al proceso productivo. ^(10,11,12,13,14,15,16,17)

Sin embargo, el conocimiento de esas relaciones de influencia aún posee un carácter más bien cualitativo, lo que obliga a realizar nuevas caracterizaciones experimentales ante cada situación concreta que se presenta.

En la actualidad, no es posible preparar las suspensiones lateríticas que se procesan en el área del níquel, con determinadas características que garanticen un comportamiento reológico predecible. De hecho, el comportamiento reológico de una muestra cambia con el yacimiento, así como con el sitio y profundidad en los que se tome, de ahí que el modelo reológico implica un trabajo experimental grande y complejo por el número y naturaleza de experimentos necesarios a realizar.

Las características no newtonianas de estas suspensiones minerales se deben a los efectos de diversos factores, siendo los principales la concentración total de sólidos, la distribución de tamaños de las partículas, el pH, la temperatura de la suspensión y la composición mineralógica. Debido a ello, se requiere conocer las curvas de flujo y los parámetros reológicos que describen el comportamiento de dichas suspensiones con vistas al cálculo y evaluación de equipos, conductos, sistemas de bombeo y otros. En trabajos previos realizados se han abordado los efectos por separado de las variables antes mencionadas, no lográndose aún obtener un resultado integral de la acción de las

mismas, ni de sus posibles interacciones; y tampoco se dispone de un modelo que correlacione esos efectos como un conjunto. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo consiste en obtener un modelo matemático, basado en resultados experimentales, que permita establecer una relación cuantitativa más integral entre los principales factores que determinan el comportamiento reológico de las suspensiones lateríticas cubanas.

Materiales y métodos utilizados

Diseño de experimentos para determinaciones reológicas

Para el trabajo experimental se utilizaron dos muestras de mineral laterítico provenientes de yacimientos en explotación: Moa Oriental (Área # 30) y Moa Occidental, Zona A (Área # 12). Para la preparación de las pulpas se utilizó agua de proceso, con el mismo procedimiento empleado a escala industrial y se identificaron de la forma siguiente:

A-30: Moa Oriental (Área #30)

A-12: Moa Occidental, Zona A (Área #12)

A30 G: Fracción mayor que 0,038 mm de la muestra A-30

A12 G: Fracción mayor que 0,038 mm de la muestra A-12

A30+gruesos: A30 + 10% de A30G

A12+gruesos: A12 + 10% de A12G

En el diseño de experimentos se tuvieron en cuenta variables que se controlan en el proceso, tales como: la composición química, el contenido de sólidos y la granulometría; por lo que fue necesario recopilar reportes de operación de la fábrica para definir el dominio de cada una de ellas. ⁽¹⁶⁾

La **composición química** del mineral se determina mediante análisis químicos, con los que se identifican 10 elementos; pero dado que en el proceso se utiliza un parámetro denominado **Número de Mineral (Nrmin)** para hacer estimados del comportamiento de la pulpa cruda en la sedimentación, ⁽¹³⁾ el cual se define por la ecuación (1), se decidió

utilizarlo como variable representativa de la composición química en el diseño de experimentos.

$$Nr \min = \frac{\%Mg + \%SiO_2}{\%Co + \%Mn} \dots\dots\dots (1)$$

Se ha comprobado que en el rango de valores $7 < N_{\min} < 14$, la pulpa tiene buena sedimentación. ⁽¹³⁾

La **granulometría** de la pulpa cruda se determinó con un analizador de tamaños HORIBA LA-910. Los resultados reportados fueron ajustados al modelo de distribución granulométrica propuesto (ecuación 5), el cual permitió establecer los límites del parámetro que se seleccionó para definir este efecto, denominado Coeficiente de Polidispersión (s).

El **contenido de sólidos** de la pulpa, expresado en porciento en masa, se determinó en una balanza de humedad o de sólido por secado, Sartorius MA 45, es una de las variables de mayor control, sobre todo a la salida de los sedimentadores, pues de ella depende de la eficiencia del proceso de extracción, así como del consumo de ácido requerido para el proceso.

La estabilidad de la suspensión, **punto de carga cero (p.c.c)**, se determinó construyendo curvas de σ_0 vs pH. Se utilizó una instalación que consta de un pH metro METTLER TOLEDO para la determinación del pH, una balanza KERN FCB (Max. 1200gd = 0,1g), para la preparación de las suspensiones de laterita con agua de proceso a una concentración de 80 g/L y una balanza electrónica KERN ABS (Max. 120gd = 0,1mg) para la adición del electrolito indiferente (nitrato de potasio 0,1 M). En los ensayos se utilizó un agitador de paletas IKA[®] RW 20 digital para la homogenización de la suspensión después de cada adición. Primeramente, se adicionó ácido nítrico (0,2 M) para disminuir el pH hasta un valor de 4,5 y posteriormente se añadieron volúmenes pequeños de hidróxido de potasio (0,2 M) para aumentarlo hasta 8,5. El punto de carga cero (p.c.c) es el valor del pH para el cual la densidad de carga (σ_0) es igual a cero.

Aunque en el proceso lo que se controla es el pH en el agua de reboso de los espesadores de pulpa, se decidió estudiar el efecto de la diferencia del pH de la pulpa con su punto de carga cero (p.c.c-pH) como variable, porque se ha determinado que el p.c.c de las suspensiones industriales de laterita se encuentra en valores de pH entre 5,25 y 6,75. ^(16,18) Por lo tanto, hay suspensiones industriales con valores de pH próximos a sus p.c.c y otras alejadas de él.

Una vez que se dispuso de la información requerida, se fijaron los niveles de los factores que se tuvieron en cuenta en el **planeamiento experimental**, como se muestra en la tabla 1 del acápite resultados y su discusión, definiendo como variable respuesta la viscosidad aparente de la suspensión determinada a una velocidad de deformación de 502,05 1/s (posición 12a del reómetro).

Las pulpas minerales se prepararon con agua de proceso, eliminando las partículas de tamaños mayores de 0,84 mm (20 mesh) con un agitador de hélice IKA[®] RW 28D. Se prepararon 1000 mL de pulpa para cada una de las condiciones de trabajo establecidas para las mediciones reológicas y, para ello, se utilizó una balanza digital METTLER TOLEDO PB 5001-S/FACT y una balanza de humedad o de sólido por secado Sartorius MA 45. La dilución de las pulpas se llevó a cabo con el mismo procedimiento que se emplea en los laboratorios de control de la fábrica.

Las mediciones de viscosidad se realizaron mediante **ensayos reológicos**, empleando el cilindro S₂ de un reómetro Rheotest II de fabricación alemana. En este equipo puede apreciarse el valor del esfuerzo cortante de acuerdo al torque a que se somete el rotor, brindando lecturas en una escala graduada en unidades S_{kt} (α), las cuales son proporcionales al esfuerzo cortante (τ). Cuando se grafica τ vs γ , se obtienen las curvas de flujo.

Determinación del coeficiente de polidispersión

Existen varios modelos matemáticos que describen la distribución de tamaño de partícula durante el proceso de reducción de tamaño, ^(4, 19) pero no se ha reportado ninguno que sea aplicable a minerales en su estado natural.

Por este motivo, se propone y valida un modelo que describe la distribución de tamaño de partículas de las suspensiones lateríticas, determinada con un analizador de

tamaños HORIBA LA-910, que se define por la ecuación (2) en términos de las variables normalizadas Y_N y D_N .^(16,20)

$$Y_N = \frac{D_N}{(1 - B_N) \cdot D_N + B_N} \dots\dots\dots(2)$$

Siendo D_N el diámetro normalizado de la partícula, definido por la relación:

$$D_N = (D_P / D_{50}) \dots\dots\dots(3)$$

y Y_N su correspondiente fracción normalizada en la curva de distribución acumulativa:

$$Y_N = (Y_B / Y_{50}) \dots\dots\dots(4)$$

donde D_{50} es la mediana de la distribución acumulativa y $Y_{50} = 0,5$ (ó 50%) es la fracción de sólidos correspondiente a la mediana de la distribución. B_N es un coeficiente adimensional.

Con el objetivo de lograr mejores ajustes, se decide introducir en la ecuación (2) un exponente s , obteniéndose como resultado la expresión (5):

$$Y_N = \left(\frac{D_N}{(1 - B_N) \cdot D_N + B_N} \right)^s \dots\dots\dots(5)$$

Con vistas a estudiar el significado y la relación existente entre los parámetros B_N y s se construyó la figura 1. En ella se muestran las curvas que relacionan a los dos parámetros para un número grande de muestras de laterita. La forma de las curvas sugiere el lugar geométrico de una hipérbola equilátera, lo cual se verifica al ajustar los datos a la expresión (6), siendo k una constante de la ecuación de la hipérbola.

$$k = s \cdot B_N \dots\dots\dots (6)$$

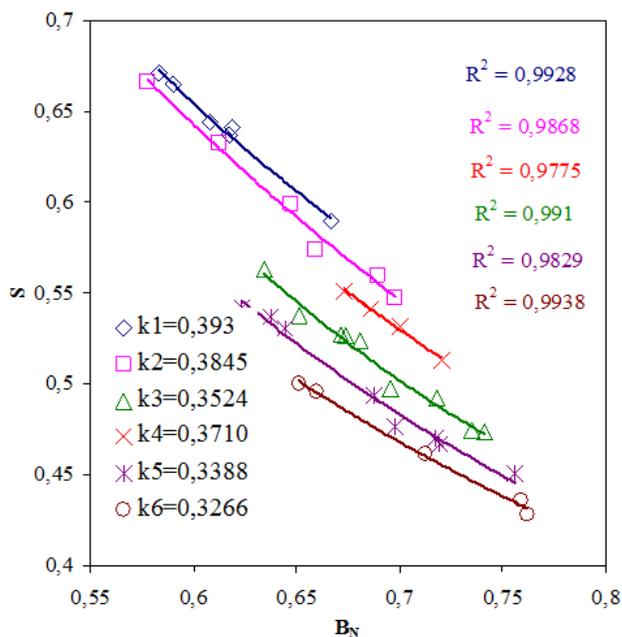


Fig. 1- Relación de s vs. B_N para valores de k constantes

Así, se observa que, a medida que el valor de s aumenta el de B_N disminuye, para cualquier valor de k; mientras que, para un valor de B_N constante, los valores de k aumentan, proporcionalmente, con el incremento de s. Esta nueva expresión (5) brinda la posibilidad de una mayor generalización en su aplicación y se comprobó que es válida para otras suspensiones minerales que se manipulan en el proceso tecnológico, tales como el cieno carbonatado, el yeso y el sulfuro de Ni+Co.

Se comprobó que el coeficiente (s), también puede ser utilizado como un indicador del grado de dispersión de los tamaños de las partículas presentes en la suspensión, por lo que se le ha identificado como Coeficiente de Polidispersión del modelo. En este caso es imposible realizar un Ajuste Mínimos Cuadrados tradicional; esto se debe a que el modelo no se puede hacer lineal respecto a s y a B_N . Según la Aplicación Informática Curve Expert [Version for 1.34],⁽²¹⁾ el método de elección es el de Levenberg-Marquardt, el cual es de compleja implementación computacional y necesita de asistencia humana permanente para garantizar su convergencia en cada caso; lo cual constituye un obstáculo importante para la obtención de los valores de (s) con vistas a

ser utilizado en la toma de decisiones en la práctica productiva diaria. Por tal motivo, se elaboró un software (ver figura 2) que permite el ajuste del modelo (ecuación 5) para la determinación de este coeficiente, con el cual se demuestra que este modelo es adecuado para la modelación de la polidispersión de cieno carbonatado y de la pulpa laterítica cruda, materias primas del proceso de lixiviación ácida a presión.

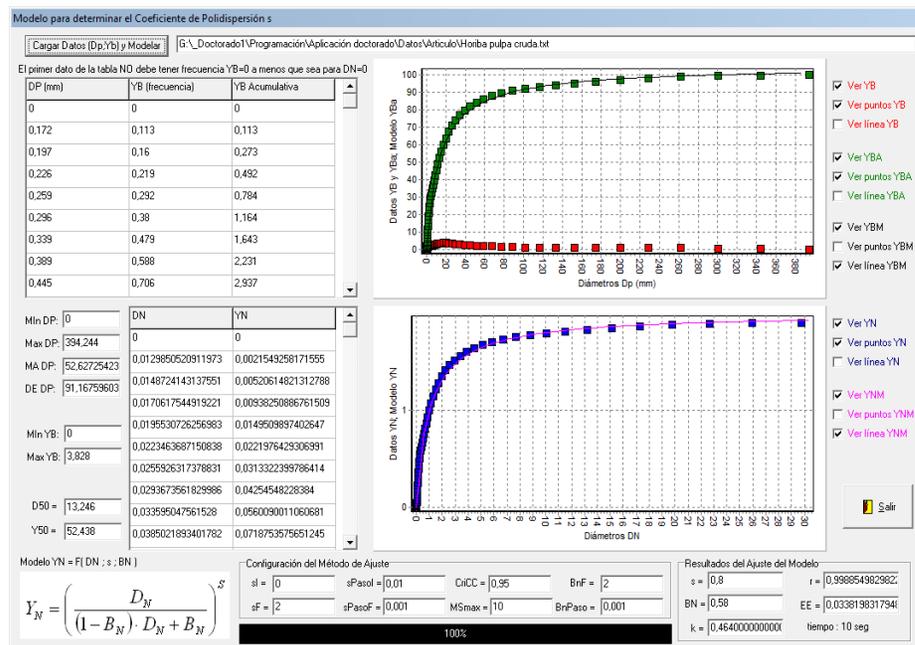


Fig. 2- Ventana de la aplicación informática para determinar el coeficiente de polidispersión.

Resultados y discusión

Mediciones reológicas según el planeamiento experimental

Los minerales analizados resultaron tener composiciones químicas marcadamente diferentes pero similares distribuciones de tamaños de partículas, tal y como se refleja en sus Números de Mineral (Nrmin) y sus coeficientes de polidispersión (s), respectivamente. Ver tabla 1. ⁽¹⁶⁾

Tabla 1- Factores considerados en el diseño de experimentos 2^k. Niveles de los factores.

Factores	Codificación de las variables.			
	Variable codificada	Variable decodificada	Nivel	
			-1	1
Granulometría	X1	s	0,7405 (+10 % G)	0,7866 (Normal)
Contenido de sólidos (%)	X2	%S	43	45
(p.c.c. - pH)	X3	Δ pH	0,2	0,8
Composición química	X4	Nrmin	10,82 (A-30)	20,74 (A-12)

Las curvas de densidad de carga superficial, σ_0 , en función del pH permitieron determinar los puntos de carga cero, en los que los valores de σ_0 se anulan (ver tabla 2). Una vez obtenidos los valores de p.c.c, de cada suspensión mineral, se utilizó una solución de KOH (3M) para variar sus pH naturales y, de esta forma, fijar los valores de Δ pH definidos para la ejecución de los experimentos.

Tabla 2- Valores de p.c.c de las suspensiones

Muestra	pH natural	p.c.c KNO ₃ (0,01.M)
A-12	4,60	7,43
A-12+gruesos	4,59	7,38
A-30	4,10	6,93
A-30+gruesos	4,61	6,86

Con la ayuda del programa profesional STATISTIC se realizó el ajuste de los resultados experimentales al modelo reológico de Bulkley-Herschel y en todos los casos el coeficiente de regresión fue superior al 99 %; los parámetros reológicos obtenidos se muestran en la tabla 3. Como puede apreciarse, la muestra A-30 presenta mayor estructuración que la A-12; lo cual se refleja en sus valores de τ_0 , a pesar de que está constituida por partículas relativamente más grandes. Esta aparente contradicción puede explicarse por el hecho de que los pH naturales están más cercanos a sus respectivos p.c.c en la muestra A-30 que en la A-12, según sus valores de Δ pH, lo cual favorece la estructuración de las partículas debido a un mayor dominio de las fuerzas de atracción de Van der Waals sobre las fuerzas de repulsión.

Tabla 3- Matriz experimental con variables respuesta



Experimento N°	s	%S	Δ (pH)	<u>Nrmin</u>	τ_0	K	n
1	0,7405	43	0,2	10,82	19,4	1,8	0,8
2	0,7866	43	0,2	10,82	36,7	2,0	0,8
3	0,7405	45	0,2	10,82	52,2	2,8	0,7
4	0,7866	45	0,2	10,82	73,2	4,6	0,7
5	0,7405	43	0,8	10,82	15,8	1,2	0,8
6	0,7866	43	0,8	10,82	27,1	2,1	0,8
7	0,7405	45	0,8	10,82	41,3	2,7	0,7
8	0,7866	45	0,8	10,82	61,3	3,9	0,7
9	0,7405	43	0,2	20,74	1,6	0,1	0,7
10	0,7866	43	0,2	20,74	2,1	0,1	0,8
11	0,7405	45	0,2	20,74	2,7	0,1	0,8
12	0,7866	45	0,2	20,74	3,5	0,3	0,7
13	0,7405	43	0,8	20,74	1,4	0,1	0,8
14	0,7866	43	0,8	20,74	1,9	0,1	0,7
15	0,7405	45	0,8	20,74	2,3	0,2	0,7
16	0,7866	45	0,8	20,74	3,0	0,2	0,7
17	0,7405	43	0,2	10,82	23,2	1,6	0,8
18	0,7866	43	0,2	10,82	35,6	2,1	0,8
19	0,7405	45	0,2	10,82	52,4	3,3	0,7
20	0,7866	45	0,2	10,82	69,0	5,6	0,6
21	0,7405	43	0,8	10,82	16,5	1,1	0,8
22	0,7866	43	0,8	10,82	28,0	2,0	0,8
23	0,7405	45	0,8	10,82	41,7	3,3	0,7
24	0,7866	45	0,8	10,82	51,8	5,5	0,6
25	0,7405	43	0,2	20,74	1,6	0,1	0,7
26	0,7866	43	0,2	20,74	2,3	0,1	0,7
27	0,7405	45	0,2	20,74	2,8	0,1	0,8
28	0,7866	45	0,2	20,74	3,3	0,3	0,7
29	0,7405	43	0,8	20,74	1,6	0,1	0,8
30	0,7866	43	0,8	20,74	2,2	0,1	0,7
31	0,7405	45	0,8	20,74	2,0	0,3	0,6
32	0,7866	45	0,8	20,74	3,0	0,2	0,7



Para facilitar la construcción de las curvas de flujo y el ajuste de los resultados experimentales a los modelos reológicos se elaboró un software, basado en ajustes

mínimos cuadrados. De manera que, al introducir los valores del esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad, se determina por las magnitudes del coeficiente de correlación a cuál modelo reológico se ajusta mejor la curva, obteniéndose de este modo los parámetros reológicos: esfuerzo cortante inicial, índice de consistencia e índice de flujo, según corresponda. (22)

En la figura 3 se presenta la ventana de la aplicación informática para la modelación de las curvas de flujo y el ajuste a los modelos reológicos correspondientes.

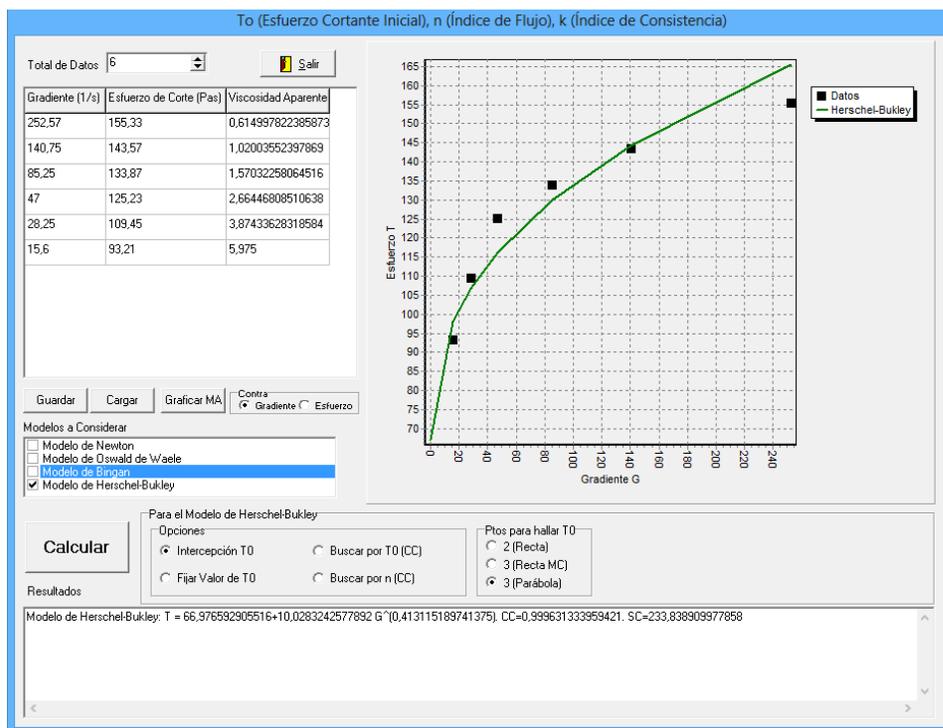


Fig. 3- Ventana de la aplicación informática para la modelación de las curvas de flujo y el ajuste a los modelos reológicos correspondientes.

Modelo que describe la correlación cuantitativa de las características reológicas y coloidquímicas en suspensiones de laterita

Por trabajos previos, es conocido que los principales factores que determinan la estructuración de las suspensiones de laterita y, por lo tanto, su comportamiento reológico son: el contenido de sólidos, la distribución granulométrica y la composición

química del mineral, condicionadas por su composición mineralógica, así como el valor del pH de la suspensión, que puede estar cercano o no a su punto de carga cero (p.c.c). (11, 12, 13,15, 16) Sin embargo, la mayor parte de los modelos de viscosidad relativa reportados, prácticamente sólo contemplan el efecto de la fracción volumen de los sólidos en suspensión. Por este motivo, se decide proponer una expresión matemática semiempírica que permita establecer una relación cuantitativa entre los factores antes mencionados para describir el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas.

Para el desarrollo de esta investigación se ha requerido un extenso y complejo trabajo de laboratorio y el procesamiento matemático, tanto de los resultados experimentales obtenidos, como de un gran volumen de datos del proceso. Para ello se han utilizado muestras minerales de distintos yacimientos, tales como: Pronóstico, Atlantic, Zona A, Yamanigüey, Moa Oriental y Moa Occidental.

La influencia del pH se expresó a través del Índice de Estabilidad (N), parámetro que fue introducido por algunos autores. (7) y que se define de la siguiente forma:

$$N = \left| \frac{p.c.c. - pH}{p.c.c.} \right| \dots\dots\dots (7)$$

Físicamente, el Índice de Estabilidades una medida del relativo grado de libertad de las partículas para permanecer suspendidas o no en el medio dispersante sin agregarse, de acuerdo con la tendencia mostrada por el desplazamiento del equilibrio atracción – repulsión, como efecto del pH. Bajo determinadas condiciones de temperatura, concentración de la fase sólida y distribución granulométrica de las partículas, puede establecerse que:

$$\tau_0 = \tau(\sigma_0) = \varphi(\xi) = f(N) \dots\dots\dots (8)$$

Las fuerza hidrodinámicas también ejercen un efecto apreciable sobre la viscosidad de las suspensiones y pueden ser representadas por el gradiente de velocidad, γ , el cual, a su vez, es una función del esfuerzo cortante, τ :

$$\gamma = \gamma(\tau) \dots\dots\dots (9)$$

Puede demostrarse que $\left(\frac{\tau}{\tau_0} - 1\right)$ es una forma de expresar γ adimensionalmente.

Si se tiene en cuenta la dependencia de las características reológicas con las fuerzas no hidrodinámicas (propiedades coloidequímicas) e hidrodinámicas, y con el contenido de sólidos se concluye que las propiedades reológicas y coloidequímicas pueden vincularse cuantitativamente mediante una correlación general expresada con las siguientes variables adimensionales:

$$\eta_r = \eta \left(\left(\frac{\tau}{\tau_0} - 1 \right), N, X, Nr \text{ min}, s \right) \dots\dots\dots (10)$$

Donde:

La viscosidad relativa se define por la relación:

$$\eta_r = \frac{\mu_{susp}}{\mu_0} \dots\dots\dots (11)$$

μ_0 : Viscosidad del medio dispersante.

La viscosidad de la suspensión se determina a partir de las mediciones reológicas por la relación:

$$\mu_{susp} = \frac{\tau}{\gamma} \dots\dots\dots (12)$$

La fracción volumen (ϕ) puede determinarse por la ecuación (13), pero en el modelo se expresó a través del parámetro X (ecuación 14).

$$\phi = \frac{x}{x + (1-x) \cdot \frac{\rho_{sólido}}{\rho_L}} \dots\dots\dots (13)$$

$$X = \frac{\phi}{(1-\phi)^4} \dots\dots\dots (14)$$

El efecto de la composición química del mineral se expresó a través del Número de Mineral (Nrmin), que se calcula a través de la ecuación (1).

Para representar el efecto de la granulometría de las suspensiones fue utilizado el Coeficiente de Polidispersión (s) del modelo granulométrico definido por la ecuación 5.

Conocidos los valores de τ_0 , resultados del ajuste al modelo de Bulkley-Herschel, se construyeron las curvas de η_r vs. $(\tau/\tau_0 - 1)$ que se muestran en la figura 4, para cada una de las condiciones definidas por el diseño de experimentos; y pudo comprobarse que tienen forma de hipérbolas equiláteras. ^(15,23)

Por este motivo fue escogida la ecuación de una hipérbola equilátera para realizar el ajuste de los datos experimentales, cuya ecuación se describe a continuación:

$$\eta_r = b + \left[\frac{\frac{a^2}{2}}{\frac{\tau}{\tau_0} - 1} \right] \dots\dots\dots (15)$$

donde los parámetros a y b están en función de las restantes variables, en forma de las siguientes expresiones lineales generales:

$$a = c + d \cdot N + e \cdot X + f \cdot s + g \cdot Nr \text{ min} \dots\dots\dots (16)$$

$$b = h + i \cdot N + j \cdot X + k \cdot s + l \cdot Nr \text{ min} \dots\dots\dots (17)$$

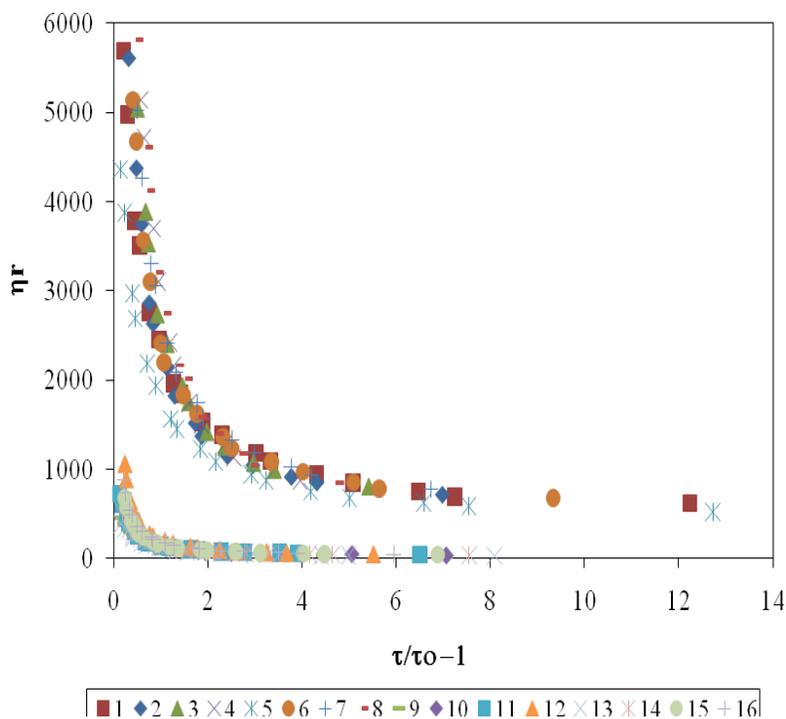


Fig. 4- Curvas de viscosidad relativa en función de la velocidad de deformación adimensional.

Los resultados experimentales se expresaron en función de los parámetros que se correlacionan en la ecuación (10) para poder ajustarlos al modelo propuesto (ecuación 15), lográndose un coeficiente de regresión de 0,99858 con el empleo del programa profesional STATISTIC. En la tabla 4 se muestra el ajuste de los resultados experimentales a la ecuación (15).

Tabla 4- Ajuste de los resultados experimentales a la ecuación (15).

	c	D	e	f	g
Estimate	273,8857	145,3492	-45,2365	-234,857	-1,62576

	h	i	j	k	l
Estimate	-313,983	-1067,28	169,8141	1729,280	-56,2685

Aunque este modelo no fue validado para suspensiones procedentes de otros frentes de explotación, no se restringe su valor práctico, pues para su obtención se seleccionaron minerales con características que reflejan el dominio de operación de la fábrica y, en base a ello, se establecieron los límites del diseño de experimentos llevado a cabo. O sea, este modelo es válido para pulpas lateríticas con concentraciones entre 43 y 45 % de sólidos, número de mineral entre 10 y 20, índice de estabilidad entre 0,03 y 0,12 y Coeficiente de Polidispersión entre 0,74 y 0,79.

Conclusiones

Como culminación de este trabajo se ha llegado a las conclusiones siguientes:

1. Se determinó que las principales variables que influyen sobre el comportamiento reológico de las suspensiones lateríticas que se manipulan en el proceso de Lixiviación Ácida a Presión (LAP) de Moa son: el contenido de sólidos, la composición química, el pH y la distribución de tamaños de las partículas.
2. Se obtuvo un modelo matemático empírico, expresado en variables normalizadas, que describe la distribución de tamaño de partículas del mineral laterítico para todo

el rango de diámetros presentes, y se expresa por la ecuación:

$$Y_N = \left(\frac{D_N}{(1 - B_N) \cdot D_N + B_N} \right)^5$$

3. Se comprobó que puede ser utilizado como parámetro representativo de la distribución de tamaño de las muestras de mineral, el Coeficiente de Polidispersión (s) del modelo granulométrico que se propone.
4. Se obtuvo un modelo matemático empírico-teórico que correlaciona la viscosidad relativa de las suspensiones lateríticas con las principales variables que determinan su comportamiento reológico:

$$\eta_r = b + \left[\frac{\frac{a^2}{2}}{\tau - 1} \right]$$

$$a = c + d \cdot N + e \cdot X + f \cdot s + g \cdot Nrmin$$

$$b = h + i \cdot N + j \cdot X + k \cdot s + l \cdot Nrmin$$

El cual es válido en el dominio de operación del proceso, a niveles de: contenido de sólidos entre 43 y 45 %, número de mineral entre 10 y 20, índice de estabilidad entre 0,03 y 0,12 y Coeficiente de Polidispersión entre 0,74 y 0,79.

Referencias bibliográficas

1. MADIGAN, C., Y.K. Leong, B.C. Ong. Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects. *Int. J. Miner. Process.* 2009, **93**, pp. 41–47.
2. AGYEI, G. *Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la MENA niquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda, Moa, Holguín, Cuba*. Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Holguín, 2006.

3. ARIOS, J.D., W. Lavaut Copa, P. S. Borgues Garrido, R. Díaz Martínez. Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en la faja ofiolítica Mayarí – Baracoa de Cuba Oriental. *Revista Minería y Geología*. 2003, **19** (1-2).
4. FALCÓN, H. J. El Beneficio de Minerales y la Separación de Fases en las Tecnologías Limpias de la Industria Minero Metalúrgica. *VII Clean Technology in the Mining Industry (CTMI)*. Buzios, Río de Janeiro Brasil, Octubre 2006.
5. ROJAS, A.L, P.Beyris. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". *Revista Minería y Geología*. 1994, **XI** (1/94).
6. ALMAGUER, A.F. Composición de las pulpas limoníticas de la planta "Pedro Sotto Alba" (Parte II). Período de Crisis de Sedimentación. *Revista Minería y Geología*. 1996, **XIII** (1), pp. 27-30.
7. BEATÓN, B. M. *Análisis de factores que influyen sobre el proceso de sedimentación de pulpas lateríticas*. Tesis de Maestría en Ingeniería de Procesos. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2001.
8. BEYRIS, P. E. *Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la Empresa Comandante "Pedro Sotto Alba" (Moa Níkel SA.)*. Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Moa, Holguín, 1997.
9. FALCÓN, H. J. Sedimentación de minerales limoníticos. *Revista Minería y Geología*. 1985, **2**.
10. CERPA, A., P. Tartaj, M. T. García-González, J. Requena, L.R. Garcell, C. J. Serna. Mineral-content and particle-size effect on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions. *Clays and Clay Minerals*. 1999, **47** (4), pp. 515-521.
11. CERPA, A., M. T. García-González, C. J. Serna y Pedro Tartaj. Relationship Between the Colloidal and Rheological Properties of Mineral Suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2001, **79**, pp. 608-611.
12. CERPA, A., P. Tartaj, M. T. García-González, C. J. Serna, A. García. Estudio comparativo del comportamiento reológico de muestras lateríticas de diferentes

yacimientos que procesa la Empresa Moa Níquel S.A. *Rev. Latin. Am. Met. Mat.* 2003, **23** (1) x-x.

13. GARCELL, L. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. *Revista Minería y Geología.* 1991, **1**(91), pp. 19-23.

14. IGLESIAS, C. Empresa “Pedro Sotto Alba, Moa Nickel S.A”, 2010. Comunicación personal.

15. PÉREZ, L. *Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas y coloidesquímicas de las suspensiones lateríticas.* Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2004.

16. PÉREZ, L. *Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas.* Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2011.

17. PUCHOL, R. Q. Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento de Moa (I): análisis granulométrico. *Revista Minería y Geología.* 1984, **3**.

18. PÉREZ, L.; Garcell, L. Análisis del efecto de las principales variables que determinan el comportamiento reológico de suspensiones limoníticas. *Revista Tecnología Química.* Santiago de Cuba: Universidad de Oriente. Septiembre-diciembre, 2011, **XXXI** (3), pp. 106-118.

19. HERNÁNDEZ, G., Legrá, A., Garcell, L., Martínez, R. Evaluación de un modelo de polidispersión para la caracterización granulométrica de la pulpa laterítica y el cieno carbonatado. *Geología y Minería.* 2016^a, **32** (3).

20. PÉREZ, L.; Cardero, Y.; Garcell, L. Modelo matemático para describir la distribución granulométrica de la fase dispersa de las suspensiones de laterita. *Revista Tecnología Química.* Santiago de Cuba: Universidad de Oriente. 2009, **XXIX**, pp. 83-91.

21. HYAMS, D. 1997. Curve Expert (Aplicación Informática). [Version for 1.34].

22. HERNÁNDEZ, G., Legrá, A., Ramírez, B., Pérez, L. Modelos matemáticos para pronosticar parámetros reológicos de hidromezclas lateríticas. *Geología y Minería.* 2017, **33** (4).

23. GONZÁLEZ, S. L. *Correlación cuantitativa de las características reológicas y coloides químicas en suspensiones de laterita*. Tesis presentada en opción al grado científico de Máster en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, 2004.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Dra. C. Liudmila Pérez García: Realizó el estudio completo e hizo el informe previo.

Dr. C. Leonel R. Garcell Puyáns: Dirigió el estudio y revisó el informe final.

Dr. C Gabriel Hernández Ramírez: Participó en el estudio y revisó el informe final.