

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES QUE DETERMINAN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE SUSPENSIONES LIMONÍTICAS

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE MAIN VARIABLES THAT DETERMINE THE RHEOLOGY OF SUSPENSIONS LIMONITICAS

Dra. Liudmila Pérez García^I, Dr. Leonel R. Garcell Puyáns^{II}

I: Empresa Niquelífera Pedro Sotro Alba, Moa, Cuba. lpgracia@moanickel.com.cu
II: Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba

RESUMEN

En el presente trabajo se han estudiado las propiedades reológicas de las suspensiones limoníticas que se alimentan al proceso de lixiviación ácida a presión (LAP) en Moa. Se seleccionaron dos muestras minerales con composiciones químicas marcadamente diferentes, correspondientes a los yacimientos Moa Oriental (Área # 30) y Moa Occidental Zona A (Área # 12), para preparar las pulpas requeridas con el mismo procedimiento empleado a escala industrial. La primera parte del trabajo experimental consistió en la caracterización físico-química de las muestras utilizando las técnicas siguientes: análisis granulométricos con un analizador de partículas, ensayos de estabilidad para la determinación de puntos de carga cero (p.c.c) y fluorescencia de Rayos X para la composición química. Luego se aplicó un diseño estadístico de experimentos 2K para valorar los efectos del contenido de sólidos (% S), la composición química (Nrmin), la diferencia de pH (p.c.cpH), la distribución de tamaños de las partículas (s) y sus interacciones sobre la viscosidad aparente de la suspensión (μ); teniendo en cuenta el dominio de operación de la planta. Los resultados han mostrado que todas las suspensiones estudiadas presentaron un comportamiento no newtoniano, que se ajusta al modelo reológico de Bulkley-Herschel. Por otra parte, se determinó que en el intervalo definido para cada variable, exceptuando el contenido de sólido, los restantes factores y varias interacciones entre dos y tres de ellos, presentan un efecto altamente significativo sobre la viscosidad aparente de las suspensiones.

Palabras clave: reología, suspensiones de laterita, número de mineral, coeficiente de polidispersión, punto de carga cero, contenido de sólidos.

ABSTARCT

The present research paper studies the rheological properties of limonitic suspensions in the ore feed to the Pressure Acid Leach (PAL) process in Moa. Two ore samples with significantly different chemical characteristics were selected. The samples were collected in Moa Oriental ore body (Area #30) and Moa Occidental ore body (Area # 12) in order to prepare the required ore slurries following the same procedure that is currently used by industrial facilities. The first part of the experiment included a physical-chemical characterization of the samples using the following techniques: particle size analysis using a particle analyzer, stability tests to determine the points of zero charge and x-ray fluorescence analysis to determine chemical composition. Afterward, a statistical design of experiments 2k was used to evaluate the effects of percent solids (% S), chemical composition (Nrmin), difference of pH (p.c.c-pH) and particle size distribution (s) and their interactions on the apparent viscosity of the suspension (μ) taking into consideration the operating band of the Process Plant. The results indicate that all suspensions had a non-Newtonian behavior that matches the Bulkley-Herschel rheological model. On the other hand, it was determined that with the exception of the % solids, the remaining factors and several interactions among two or three of them have a significantly high effect on the apparent viscosity of suspensions within the defined interval for each variable.

Keywords: rheology, laterite suspensions, mineral number, polydispersion coefficient, point of zero charge, percent solids.

INTRODUCCION

La dispersión de un sólido en un líquido puede exhibir características de flujo newtoniano o no newtoniano, dependiendo de las interacciones físicas y químicas que tienen lugar entre las partículas y el líquido, así como de la naturaleza y características de las fases. En la literatura especializada se analizan diversos tipos de interacciones, resumiéndose dentro de tres categorías diferentes /Cheng D. C-H., 1980/:

1. Interacciones hidrodinámicas entre el líquido y las partículas sólidas dispersas, las cuales incrementan la disipación viscosa en el líquido.
2. La atracción entre partículas, que da lugar a la formación de agregados y estructuras.
3. El contacto partícula-partícula, el cual es la causa de las interacciones de fricción.

En cada tipo de interacción intervienen una variedad de factores que determinan el comportamiento y las características reológicas de la dispersión. Los factores más importantes son:

1. Las características coloidquímicas de la dispersión (estabilidad), que dependen del pH, de la naturaleza del sólido y de la superficie de las partículas, y de la composición iónica del medio dispersante.
2. Composición mineralógica.
3. Forma, tamaño y distribución granulométrica de las partículas.
4. Concentración de la fase sólida.
5. Temperatura de la dispersión.

El comportamiento de dispersiones acuosas coloidales de óxidos inorgánicos continúa siendo un problema importante en la ciencia coloidal moderna, tanto teórica como experimental. Los efectos no hidrodinámicos juegan un papel predominante en el comportamiento reológico, así como en la estabilidad de las suspensiones constituidas por partículas con dimensiones coloidales o cercanas al rango coloidal, como es el caso de las suspensiones lateríticas que se procesan en el área del níquel /Avramidis K. S., R. M. Turian, 1991/.

En la actualidad, no es posible dar a estas suspensiones minerales una caracterización que garantice un comportamiento reológico predecible. De hecho, el comportamiento reológico de una muestra cambia con el yacimiento, así como con el sitio y la profundidad con que se tome, de ahí que el modelo reológico implica un trabajo experimental grande y complejo por el número y naturaleza de las experiencias.

Se ha comprobado que las características no newtonianas de estas pulpas se deben a 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, es necesario 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 de las variables antes mencionadas, pero no se ha obtenido el resultado integral de la acción de las mismas, ni sus posibles interacciones /Garcell L., 1991; Cerpa A. et. al., 1996; Cerpa A. et. al., 1999; Cerpa A. et. al., 2001; Cerpa A. et. al., 2003; Pérez L., 2004; Pérez L. et. al., 2008; Pérez L., Y. Cardero, L. Garcell, 2009/.

Por tal motivo, y teniendo en cuenta que los problemas de alta viscosidad que en ocasiones se presenta con estas pulpas ocurren a temperatura ambiente, el objetivo de este trabajo es: determinar el nivel de significación de las variables: contenido de sólidos, composición química, granulometría y pH sobre el comportamiento reológico de las suspensiones lateríticas que se alimetan al proceso de lixiviación ácida a presión (LAP); así como sus interacciones.

METODOS Y TECNICAS EXPERIMENTALES

En el diseño de experimentos propuesto (ver tabla 6) 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.

Para poder estudiar la influencia de la composición química se seleccionaron dos muestras minerales, provenientes de los yacimientos Moa Oriental y Moa Occidental, marcadamente diferentes (ver tabla 4); pero se hacía necesario cambiar sus distribuciones granulométricas sin alterar significativamente sus composiciones químicas. Por este motivo, después de varios ensayos, se determinó que este efecto podría lograrse al adicionar a la muestra inicial un 10 % (fracción peso en base seca) de las partículas mayores de 38 μm presentes en la misma. Para su preparación, las muestras se denominaron de la forma siguiente:

A30: Moa Oriental (Área 30)

A12: Moa Occidental, Zona A (Área 12)

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

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

A30+G: A30 + 10% de (A30 G)

A12+G: A12 + 10% de (A12 G)

Ver a continuación las tablas 1 y 2.

Tabla 1
Preparación de la muestra A30+G

Muestra	% S	ρ_{susp} (g/mL)	mh (g)	ms (g)	fracción peso	Vh (mL)
A30	45,06	1,474	2948	1328,37		2000
A30 G	63,32		209,787	132,837	0,1	

Tabla 2
Preparación de la muestra A12+G

Muestra	% S	ρ_{susp} (g/mL)	mh (g)	ms (g)	fracción peso	Vh (mL)
A12	47,02	1,505 5	3011	1415,77		2000
A12 G	65,95		214,674	141,577	0,1	

donde:

ms: masa de sólido seco (g)

mh: masa de suspensión húmeda (g)

Vh: Volumen inicial de suspensión (mL)

La composición química del mineral se determinó mediante análisis químicos, con los que se identifican 10 elementos; pero como en el proceso se utiliza un parámetro denominado Número de Mineral (Nrmin) para hacer estimados del comportamiento de la pulpa cruda en la sedimentación /Iglesias C., 2010/, el cual se define por la ecuación (1), se decidió utilizarlo como variable representativa de la composición química en el diseño de experimentos.

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

Se ha comprobado que en el rango de valores $7 < N_{rmin} < 14$, la pulpa tiene buena sedimentación.

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 en este trabajo (ecuación 2), el cual permitió establecer los límites de la variable que se seleccionó para definir este efecto, denominada Coeficiente de Polidispersión (s), ver tabla 5.

$$Y_N = \left(\frac{D_N}{(1 - B_N) \cdot D_N + B_N} \right)^s \quad (2)$$

siendo D_N el diámetro normalizado de la partícula, definido por la ecuación:

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

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

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

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.

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

La estabilidad de la suspensión (punto de carga cero) 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. 1200g d = 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. 120g d = 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. 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 6, 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 Skt (α), las cuales son proporcionales al esfuerzo cortante (τ). Cuando se grafica τ vs. $\dot{\gamma}$, se obtienen las curvas de flujo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Mediciones reológicas según el planeamiento experimental

Como ya se había explicado anteriormente, la primera parte de la experimentación consistió en la caracterización físico-química de las pulpas utilizadas.

En las figuras 1 y 2 se representan dos de las curvas de densidad de carga superficial (σ_0) en función del pH obtenidas; en las cuales se aprecian los valores de puntos de carga cero cuando $\sigma_0=0$, los cuales aparecen resumidos en la tabla 3 para todas las suspensiones de laterita preparadas. Por otra parte, se comprobó que para valores del pH < p.c.c, la carga neta superficial del sólido es positiva, y para pH > p.c.c, es negativa.

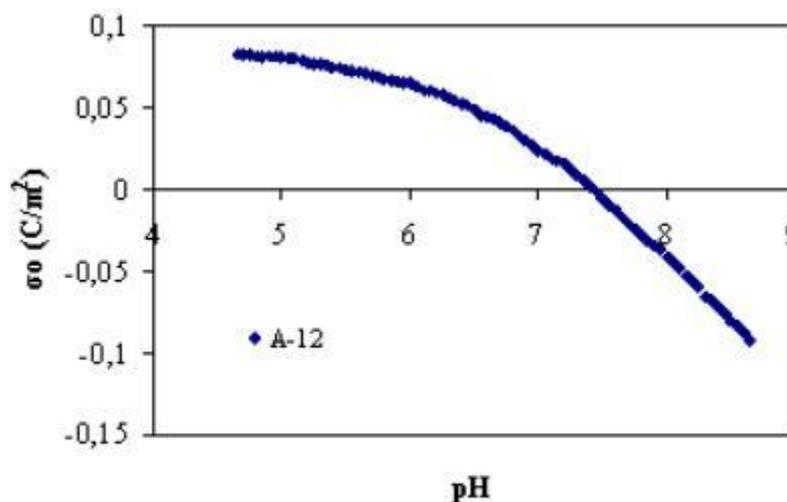


Fig. 1 Curva de estabilidad de la muestra A12.

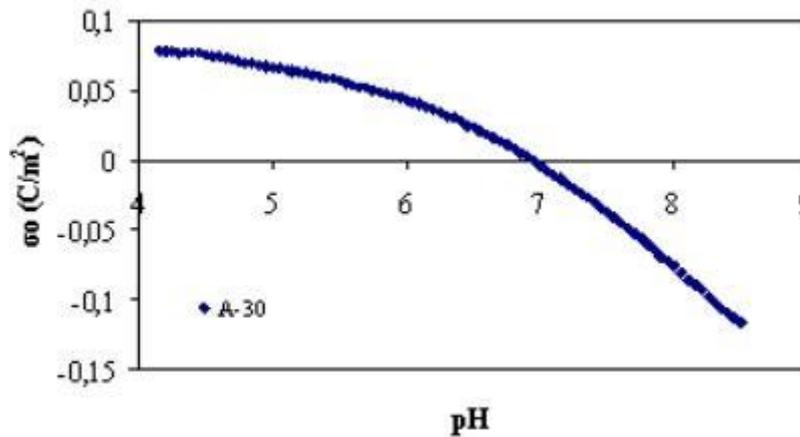


Fig. 2 Curva de estabilidad de la muestra A30.

Tabla 3
Valores de p.c.c de las suspensiones

Muestra	pH natural	p.c.c KNO ₃ (0,01 M)
A12	4,60	7,43
A12+G	4,59	7,38
A30	4,10	6,93
A30+G	4,61	6,86

Después de determinar 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.

Para lograr un cambio significativo en la composición química, como variable de diseño, se escogieron las muestras A30 y A12 por tener números de mineral bien distintos, pero que se encuentran dentro de las normas del proceso (ver tabla 4). Como puede apreciarse, estos minerales poseen un alto contenido de hierro, característica típica de las lateritas cubanas, en las que abundan los óxidos de hierro /Almaguer A. F., 1976; Rojas A., Beyris P., 1994; Agyei G., 2006/. A excepción del relativamente alto contenido de sílice (SiO₂) de la muestra A-12, el resto de los elementos se encuentran dentro de los dominios del proceso productivo y de los parámetros óptimos para la operación de la planta /Iglesias C., 2010/.

Aunque la adición de partículas gruesas no representa un cambio estadísticamente significativo en el Número de Mineral de la muestra original, se decidió utilizar los valores promedios de cada una de ellas como límites superior e inferior de esta variable en el diseño.

Tabla 4
Composición química de las muestras seleccionadas
para el diseño

Muestras	A-12	A12+G	A30	A30+G
Ni	0,91	0,91	1,52	1,54
Co	0,100	0,104	0,149	0,151
Fe	38,10	36,20	40,80	40,2
Mg	1,08	1,17	1,59	1,55
Al	3,50	3,43	3,55	3,55
SiO ₂	17,68	17,65	9,59	9,84
Cr	2,34	2,11	2,15	1,99
Mn	0,78	0,83	0,87	0,92
Cu	0,010	0,010	0,009	0,009
Zn	0,033	0,033	0,039	0,036
Nr _{min}	21,32	20,15	10,97	10,67
Nr _{min} promedio	20,74		10,82	

Las distribuciones granulométricas se determinaron en un analizador de tamaños del tipo HORIBA LA-910, el cual permite obtener fracciones de partículas muy finas, inferiores a 0,045 mm (325 mallas), que no pueden ser determinadas normalmente mediante el uso de tamices y que ejercen un efecto importante sobre el comportamiento de estas pulpas. En la tabla 5 se presentan algunas de las características que identifican las diferencias de estas muestras. Como puede apreciarse, la muestra A12 presenta partículas de menor tamaño, según sus valores de área específica y mediana, y mayor polidispersión, por el valor de s ; mientras que la A30+G es la que presenta partículas de mayor tamaño y la A12+G la de menor polidispersión. En la medida en que el valor del Coeficiente de Polidispersión (s) aumenta, mayor es la polidispersión de las partículas que conforman la suspensión. Cuando se adiciona la fracción gruesa a las muestras originales A12 y A30 disminuye el área específica, aumenta la mediana y disminuye la polidispersión, como era de esperar. Aunque se adicionó la misma cantidad de gruesos su efecto no es el mismo en cada muestra debido, probablemente, a la diferencia existente en la distribución granulométrica de cada fracción gruesa añadida. Por este motivo, se utilizaron sus valores promedios para los límites del diseño de experimentos propuesto en la tabla 6.

Tabla 5
Características y parámetros que definen la distribución granulométrica de las muestras seleccionadas para el diseño

Muestra	Área específica (cm ² /cm ³)	Mediana (µm)	Bn	s	R
A12	21108	12,055 0	0,603 3	0,803 5	0,998 8
A30	16415	17,387 3	0,518 7	0,769 7	0,988 4
Promedio	18762	14,721 2	0,561 0	0,786 6	0,993 6
A12+G	18544	17,227 6	0,595 3	0,721 7	0,997 6
A30+G	13600	22,024 9	0,516 8	0,759 4	0,987 1
Promedio	16072	19,626 3	0,556 0	0,740 5	0,992 4

Tabla 6
Factores considerados en el diseño de experimentos
2k. 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 (Original)
Contenido de sólidos (%)	X2	%S	43	45
(p.c.c – pH)	X3	ΔpH	0,2	0,8
Composición química	X4	Nrmin	10,82 (A30)	20,74 (A12)

En las figuras 3 y 4 se presentan las curvas de flujo obtenidas para cada una de las corridas experimentales llevadas a cabo. En ellas puede apreciarse, por su forma, el típico comportamiento de un fluido con plasticidad; y que la muestra A30 presenta mayor estructuración que la A12, lo cual se refleja en sus valores de τ_0 . 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 %.

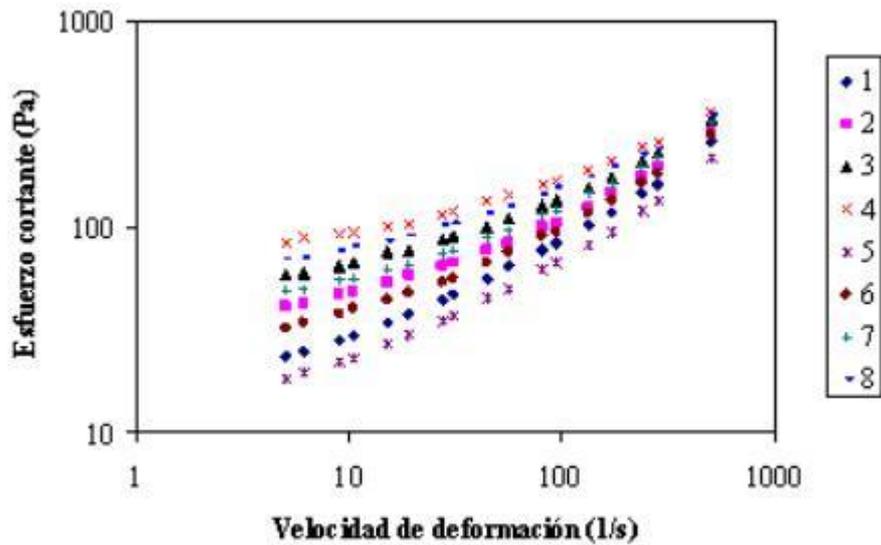


Fig. 3 Mediciones reológicas realizadas a la muestra mineral (A30).

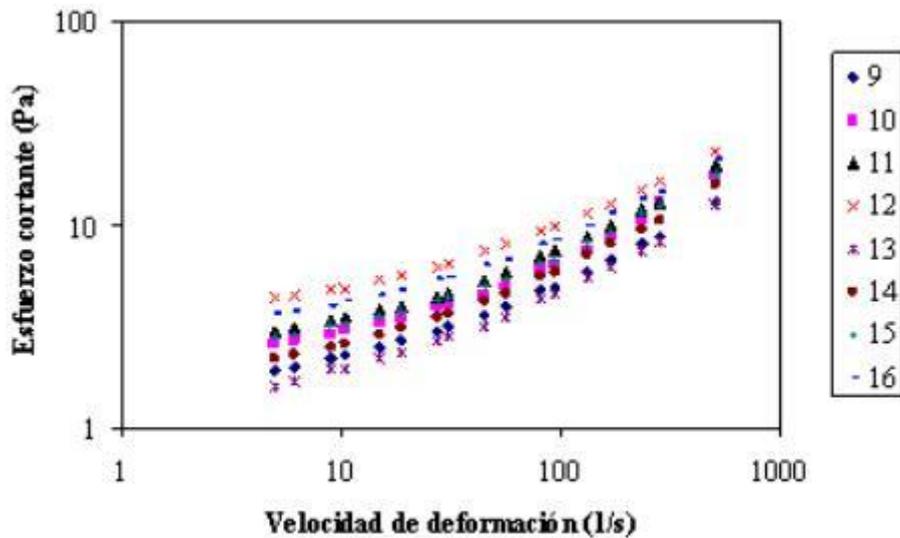


Fig. 4 Mediciones reológicas realizadas a la muestra mineral (A12).

Análisis de los resultados del diseño de experimentos

El trabajo experimental se realizó utilizando como planeamiento estadístico para las experiencias: un diseño factorial para cuatro factores, con dos niveles para cada factor y dos réplicas para cada combinación de factores. Los factores considerados como variables independientes se presentan en la tabla 6 y la variable respuesta considerada fue la viscosidad aparente de la suspensión (μ), determinada a una velocidad de deformación de 502,05 1/s (posición 12a del reómetro).

Como puede apreciarse, en la figura 5, exceptuando el contenido de sólido (%S), los factores restantes presentan un efecto altamente significativo sobre la viscosidad. También resultan altamente significativas, las interacciones entre dos factores: s.%S, s. Δ pH, s.Nrmin y Δ pH.Nrmin y las interacciones entre tres factores siguientes: s.%S. Δ pH, s.%S.Nrmin, s. Δ pH.Nrmin y %S. Δ pH.Nrmin. Debe notarse que la interacción: %S.Nrmin es prácticamente significativa a un nivel de

significación de un 0,05 (en este caso, la probabilidad del falso rechazo es de 0,0523).

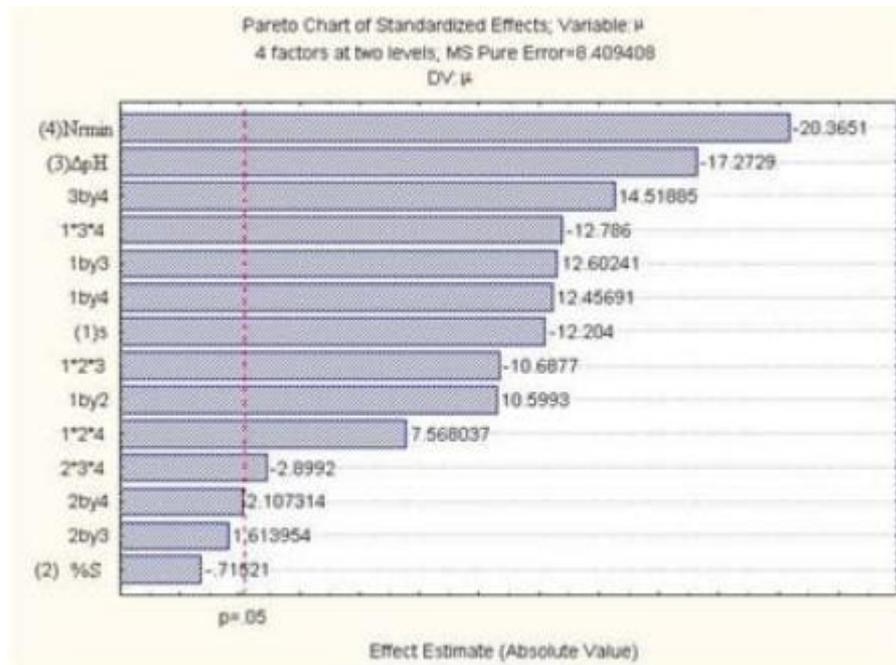


Fig. 5 Diagrama de Pareto para la viscosidad.

La práctica general en las fábricas, y los resultados de los trabajos de investigación realizados, han demostrado que el contenido de partículas finas es relativamente alto en las pulpas de laterita, y que esas partículas ejercen un efecto importante sobre el comportamiento de estas suspensiones. La forma y tamaño que alcanzan las partículas agregadas y los conglomerados de la fase sólida de estas suspensiones se deben a la combinación de los procesos de disolución y de aglomeración, ya que no son sometidas a operaciones de reducción de tamaño. Por este motivo, se ha considerado el coeficiente (s) como una medida del grado de dispersión de los tamaños de las partículas presentes en la suspensión, con la finalidad de describir el efecto de la granulometría de los sólidos sobre la viscosidad relativa de las suspensiones de laterita (ver figura 6). Como se observa, un aumento en el valor del parámetro s, ocasiona un aumento de la viscosidad aparente de la pulpa. El valor de s aumenta con el incremento de la polidispersión de la muestra y viceversa.

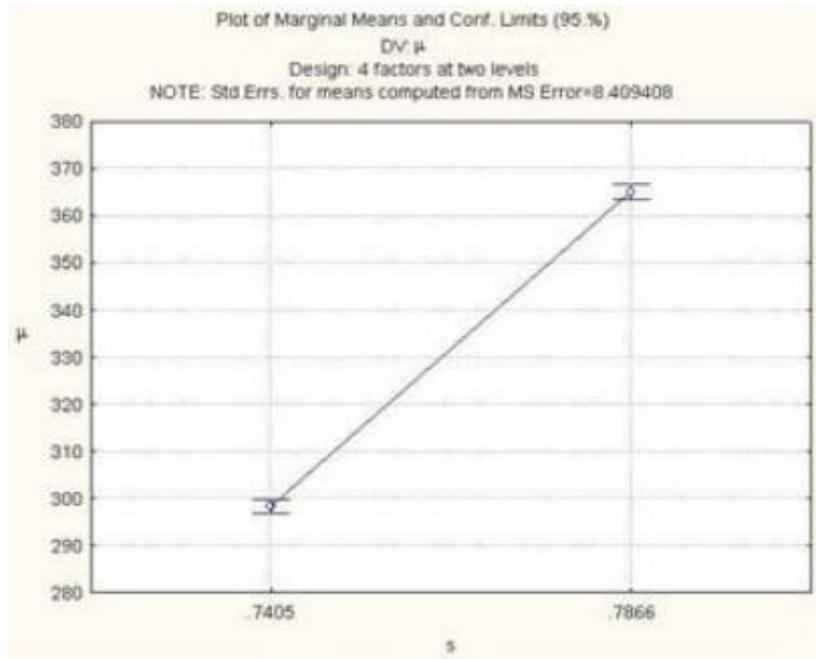


Fig. 6 Efecto de s sobre la viscosidad.

Las suspensiones diluidas generalmente exhiben un comportamiento newtoniano debido a la poca interacción entre las partículas, ya que prevalecen las fuerzas de repulsión; sin embargo, en las suspensiones concentradas las partículas se encuentran cerca unas de otras, prevaleciendo las fuerzas de Van der Waals, lo que contribuye a la floculación y formación de estructuras, apareciendo un comportamiento no newtoniano. Por este motivo, la viscosidad se incrementa proporcionalmente con el contenido de sólido, como se muestra en la figura 7.

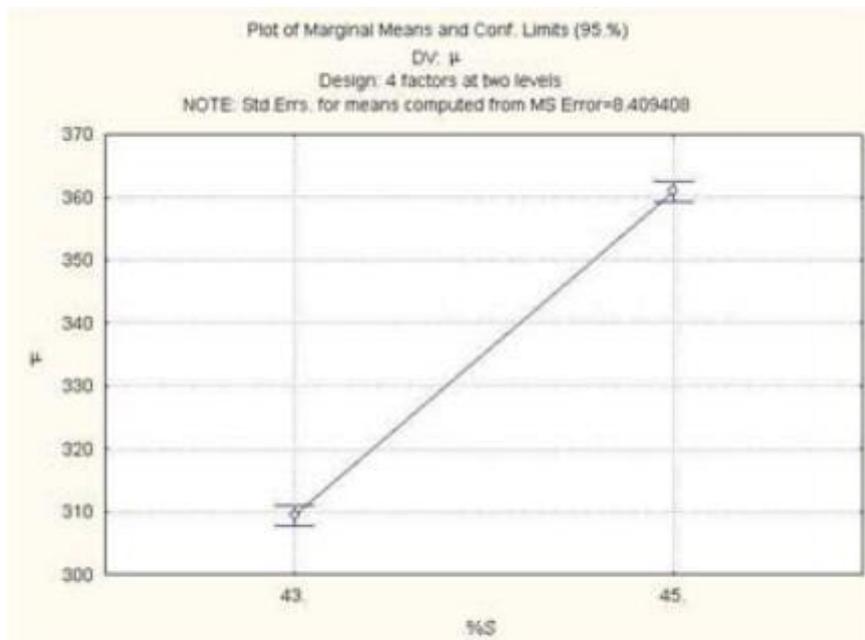


Fig. 7 Efecto del porcentaje de sólidos (%S) sobre la viscosidad.

Las propiedades coloidesquímicas tienen un efecto importante en las suspensiones minerales que poseen un alto contenido de partículas coloidales, como es el caso de

las lateritas. Ello se debe, fundamentalmente, a que el comportamiento reológico y la viscosidad de la suspensión son afectados grandemente por la densidad de carga eléctrica superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, ya que estas variables influyen sobre la interacción neta entre las partículas. Esta interacción es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo, según la teoría DLVO /Shaw J. D., 1977 (cit. por Pérez L., 2004)/. Cuando la interacción neta es repulsiva (a pH alejados del p.c.c), es de esperar un comportamiento newtoniano de la suspensión; en cambio, cuando la interacción neta es atractiva (en las inmediaciones del p.c.c) la suspensión puede exhibir comportamiento pseudoplástico o plástico debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura (retículo). Estas son las causas por las cuales la máxima viscosidad de las dispersiones se alcanza alrededor del valor del punto de carga cero /Pérez L. et. al., 2008/.

Por este motivo, a medida que aumentan la diferencia de pH (entre el pH de la pulpa y su correspondiente punto de carga cero) disminuye la viscosidad aparente de la suspensión (ver figura 8).

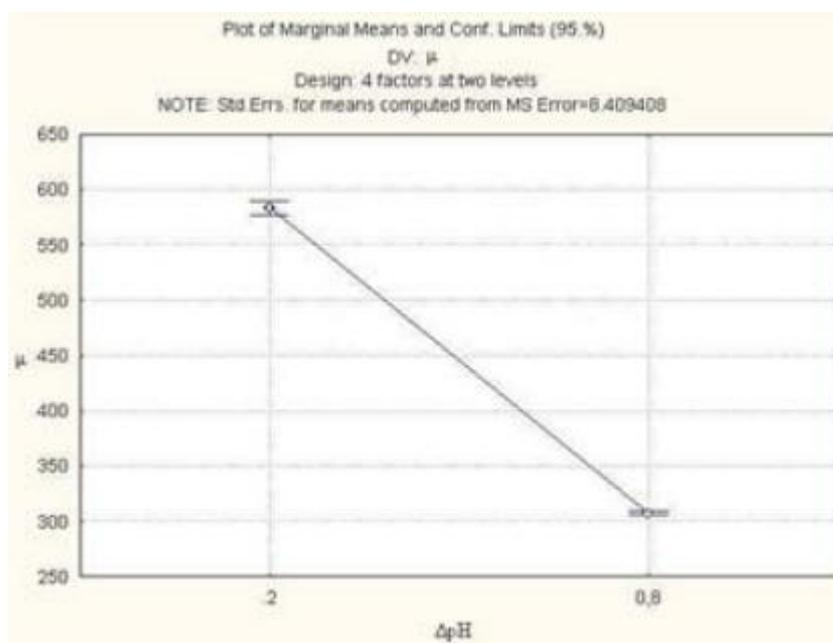


Fig. 8 Efecto del ΔpH sobre la viscosidad.

En la metalurgia extractiva la composición mineralógica de la mena es un factor importante para lograr resultados con adecuados índices tecnológicos; pues el contenido de cada una de las fases presentes en el mineral determina la forma, tamaño y propiedades superficiales de las partículas, así como la estabilidad y el comportamiento reológico de las suspensiones /Pérez L. et. al., 2008/.

En muchas ocasiones, la composición mineralógica se identifica a través del contenido de los elementos químicos presentes en el mineral, pues están estrechamente relacionadas. Así, se ha comprobado que cuando en las lateritas es relativamente alto el contenido de silicatos de magnesio y sílice, en ellas pueden encontrarse minerales de metales ligeros tales como: clorita, olivino y cuarzo; que le proporcionan una baja densidad a la pulpa y constituyen un factor desfavorable para la sedimentación /Rojas P., P. Beyris, 1994/. Cuando esto sucede, el mineral presenta mayores valores de Número de Mineral (ver ecuación 1) y disminuye la viscosidad aparente de la suspensión (ver figura 9).

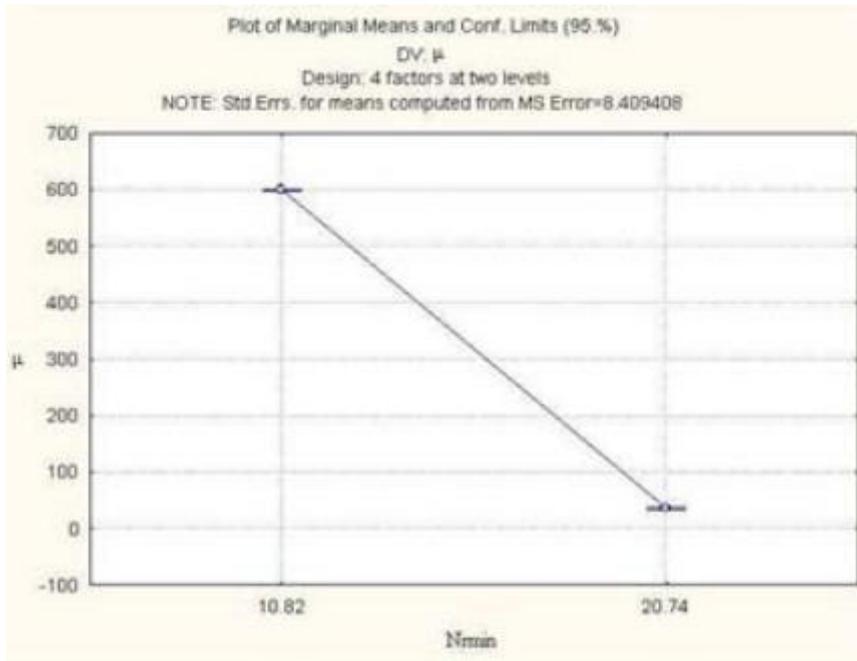


Fig. 9 Efecto de Nrmin sobre la viscosidad.

La ecuación (5) presenta el modelo de regresión obtenido a partir de los resultados experimentales, cuya validez está limitada al dominio cubierto por las variables empleadas en el ajuste, el cual es bien amplio, pues contempla las condiciones de operación normal de la Planta de Espesadores de Pulpa.

Ver a continuación la ecuación (5)

$$\mu = a + b_1 \cdot s + b_2 \cdot \Delta pH + b_3 \cdot Nr \text{ min} + b_{12} \cdot s \cdot \%S + b_{13} \cdot s \cdot \Delta pH + b_{14} \cdot s \cdot Nr \text{ min} + b_{34} \cdot \Delta pH \cdot Nr \text{ min} + b_{123} \cdot s \cdot \%S \cdot \Delta pH + b_{124} \cdot s \cdot \%S \cdot Nr \text{ min} + b_{234} \cdot \%S \cdot \Delta pH \cdot Nr \text{ min} + b_{134} \cdot s \cdot \Delta pH \cdot Nr \text{ min} \quad (5)$$

(R = 0,999332760)

	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃
Estimate	194948,7	-263146	-1912,19	-9419,18	381,0919	2503,013

	b ₁₄	b ₃₄	b ₁₂₃	b ₁₂₄	b ₂₃₄	b ₁₃₄
Estimate	12780,00	89,29979	-1,59928	-19,4526	0,069394	-117,660

CONCLUSIONES

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) son: el contenido de sólidos, la composición química, el pH y la distribución de tamaños de las partículas.

2. Se determinó que, en las condiciones de los ensayos experimentales, todas las suspensiones mostraron un comportamiento reológico no newtoniano que pudo ser ajustado al modelo de Bulkley-Herschel.

3. Se comprobó mediante el diseño de experimentos y en el intervalo definido para cada variable que, exceptuando el contenido de sólido (%S), los factores restantes: la composición química (Nrmin), la diferencia de pH con respecto a su p.c.c (Δ pH) y la distribución de tamaño (s) presentan un efecto altamente significativo sobre la viscosidad aparente de las suspensiones lateríticas; igualmente, resultan altamente significativas las interacciones entre dos factores: s.%S, s. Δ pH, s.Nrmin y Δ pH.Nrmin y las interacciones entre tres factores: s.%S. Δ pH, s.%S.Nrmin, s. Δ pH.Nrmin y %S. Δ pH.Nrmin. Todas ellas con un nivel de significación superior al 1 en 1000 de las veces.

4. El contenido de sólido no presentó un efecto altamente significativo sobre la viscosidad aparente de las suspensiones estudiadas porque en el planeamiento experimental se seleccionaron dos valores muy cercanos como límites inferior y superior (43 y 45 %, respectivamente).

BIBLIOGRAFIA

1. AGYEI G. Distribución fraccional de las especies metálicas y mineralógicas de la MENA níquelífera de un perfil del yacimiento Punta Gorda. Holguín. Cuba. Tesis doctoral. Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez. 2006.

2. 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, Vol. XIII, Nº 1, 27-30, 1996.

3. AVRAMIDIS K. S., R. M. TURIAN, "Yield Stress of Laterite Suspensions". Journal of Colloid and Interface Science. Vol.143 (1) 54, 1991.

4. CERPA A., P. TARTAJ, M. T. GARCÍAGONZÁLEZ, J. REQUENA, L.R. GARCELL, C. J. SERNA, "Rheological properties of concentrated lateritic suspensions". Progr Colloid Polym Sci. 100, 266-270, 1996.

5. CERPA A., P. TARTAJ, M. T. GARCÍAGONZÁLEZ, 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. 47 (4) 515-521, 1999.

6. CERPA A., P. TARTAJ, M. T. GARCÍAGONZÁLEZ, J. REQUENA, L.R. GARCELL, C. J. SERNA, "Relationship Between the Colloidal and Rheological Properties of Mineral Suspensions". The Canadian Journal of Chemical Engineering. Vol. 79 608-611, 2001.

7. CERPA A., P. TARTAJ, M. T. GARCÍAGONZÁLEZ, J. REQUENA, L.R. GARCELL, C. J. SERNA, "Estudio comparativo del comportamiento reológico de muestras lateríticas de diferentes yacimientos que procesa la Empresa Moa Níquel S.A". Rev. Latin. Am. Met. Mat. 23 (1), 2003.

8. CHENG D. C-H., "Viscosity-concentration equations and flow curves for suspensions". Chemistry and Industry. Vol. 17, 403-406, 1980.

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

10. IGLESIAS C., Empresa Pedro Sotto Alba, Moa Nickel S.A, 2010.
11. 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.
12. PÉREZ L., Y. CARDERO, Y. LAMOTH, L. GARCELL, "Estudio del comportamiento reológico de una suspensión industrial de laterita", Revista Tecnología Química Vol. XXVIII, No. 1, 2008.
13. PÉREZ L., Y. CARDERO, L. GARCELL, "Modelo matemático para describir la distribución granulométrica de la fase dispersa de las suspensiones de laterita", Revista Tecnología Química Vol. XXIX, No. 2, 2009.
14. 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. Vol XI, 1994.

Recibido: Mayo de 2011

Aprobado: Septiembre de 2011

Dra. Liudmila Pérez García^I. Empresa Niquelífera Pedro Sotto Alba, Moa, Cuba.
lpgarcia@moanickel.com.cu