

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA SUSPENSIÓN INDUSTRIAL DE LATERITA

Liudmila Pérez García, Yaniel Cardero Llopiz, Yanelis Lamoth Bastardo,  
Leonel R. Garcell Puyáns  
Universidad de Oriente

*En el presente trabajo, se han estudiado las propiedades reológicas de una suspensión acuosa industrial, procedente del proceso de lixiviación ácida, en Moa. Los análisis físico-químicos indicaron que la muestra estaba compuesta fundamentalmente por goethita, como fase mineralógica principal, y gibbsita y serpentina como fases secundarias. La suspensión posee un amplio rango de distribución de tamaño de partículas. Una correlación no lineal de tres parámetros se utilizó para describir la distribución de tamaño acumulativa. La reología de la suspensión estudiada se determinó como una función de la concentración del sólido y del pH. Las curvas de flujo para 25 y 47,5 % en peso de sólido se ajustan al modelo de Bulkley-Herschel, y la curva de flujo para 10 % en peso muestra un flujo pseudoplástico, que puede describirse bien por el modelo de Ostwald de Waele. La viscosidad aparente de la suspensión es grandemente dependiente del pH, alcanzando su valor máximo al pH que se encuentra alrededor del punto de carga cero (p.c.c = 5,7). A los valores de pH que se alejan del p.c.c se obtienen viscosidades bajas.*

*En este trabajo, se aplicó un diseño estadístico de experimentos  $2^k$  para valorar los efectos sobre la viscosidad aparente de la suspensión de tres factores y sus interacciones: la concentración de sólidos, la diferencia de pH (p.c.c-pH) y la temperatura. Los resultados han mostrado que todos los factores y sus interacciones son estadísticamente significativos, siendo los más importantes de todos: la concentración de sólidos, la diferencia de pH y la interacción entre estos dos factores.*

**Palabras clave:** reología, laterita, punto de carga cero, suspensiones minerales, pH, temperatura, concentración de sólidos.

*The rheological properties of an industrial aqueous suspension from the acid leaching processing, in Moa, have been studied. The physical –chemical analyses indicated that the sample was mainly composed by goethite, as the major mineralogical phase, and gibbsite and serpentine, as secondary phases. The sample showed a wide range of particle size distribution, with a large amount of fine particles. A three parameter non linear relationship was used for describing the cumulative size distribution. The rheology of the studied suspension was determined as a function of solid concentration and pH. Flow curves for 25 and 47.5 % by weight of solid fit into the Bulkley-Herschel model, and flow curve for 10 % by weight of solid showed a pseudoplastic flow which can best be described by the Ostwald de Waele model. The apparent viscosity of the suspension is strongly dependent from pH, reaching the maximum at pH value around the point of zero charge (p.z.c=5,7). At pH values which are far from the p.z.c, low viscosities are obtained.*

*In this work it was applied a statistical design of experiments  $2^k$  to examine the effects over suspension apparent viscosity of three factors and their interactions: solid concentration, pH difference (p.z.c-pH), and temperature. Results showed that all factors and their interactions were statistically important, being the most important of them: solid concentration, pH difference and the interaction between these two factors.*

**Key words:** rheology, laterite, point of zero charge, mineral suspensions, pH, temperature, solid concentration.

### Introducción

La reología de las dispersiones acuosas de óxidos inorgánicos y sus mezclas, continúan siendo un problema de interés actual, tanto desde el punto de vista experimental como teórico, ya que las propiedades

reológicas de estas dispersiones resultan tecnológicamente importantes en muchas aplicaciones industriales, tales como el bombeo a través de equipos y sistemas de transportación por conductos, operaciones de sedimentación, de mezclado y de transferencia de calor, entre otras. /2, 3, 4, 10, 13, 14, 16, 19/

---

En el proceso tecnológico, para producir níquel y cobalto por la vía de la lixiviación ácida, se manipulan distintas suspensiones de diferentes naturalezas y características /1, 11, 18, 21/. Entre ellas, ocupan un lugar importante las suspensiones de laterita ferruginosa, las cuales constituyen la materia prima principal que se alimenta al proceso. La laterita ferruginosa es una mezcla de minerales como resultado del proceso de intemperismo, siendo los óxidos de hierro los más importantes. En dicha mezcla están presentes, además, pero en menores proporciones, óxidos de aluminio, serpentinas, arcillas, sílice y otros.

Las pulpas de laterita han sido estudiadas por un número grande de investigadores /1, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 15, 16/, que han abordado diferentes aspectos acerca del comportamiento de éstas en el proceso industrial. Se ha podido establecer que dicho comportamiento está determinado por un número de factores, tales como la concentración de la fase sólida, la química de superficie, la forma, tamaño y distribución de tamaño de las partículas sólidas, y la temperatura, entre otros. Dadas las características propias de los sistemas coloidales que poseen las suspensiones lateríticas por su alto contenido de partículas finas, los factores indicados también influyen grandemente sobre el equilibrio atracción-repulsión entre partículas que determinan el grado de estructuración entre éstas y, por tanto, su comportamiento reológico y la magnitud de sus viscosidades. Algunos de esos factores no son controlados con facilidad y, por tanto, sus mecanismos de influencia no están aún bien estudiados. Así, paso a paso, de manera progresiva, se ha ido adquiriendo con cada trabajo más información acerca de los mecanismos de influencia de los factores arriba señalados, pero con el inconveniente de que la mayoría de ellos se han llevado a cabo con pulpas preparadas con agua destilada en los laboratorios y, en algunos pocos casos, con el agua industrial del rebose de los sedimentadores y con otros medios dispersantes /11, 12, 15, 16, 17, 20/. También es escasa la información encontrada acerca del efecto de las interacciones entre los mencionados factores sobre la reología de las suspensio-

nes lateríticas industriales. Por otra parte, son muy pocos los trabajos en los que se han estudiado las características reológicas de las suspensiones industriales de laterita, tomadas directamente del proceso tecnológico.

En el presente trabajo, se estudia el efecto de aquellos tres factores considerados más importantes sobre la reología de una suspensión industrial de laterita, tomada directamente del proceso tecnológico y, con esa información, se evalúa por vía estadística el grado de influencia de dichos factores y de sus interacciones sobre la viscosidad de la suspensión.

## **Materiales y métodos**

### **Origen de la suspensión y caracterización**

Se estudia una suspensión de laterita, con un 47,5 % en peso de sólidos y una gravedad específica del sólido de 3,55, que es tomada directamente a la salida de uno de los sedimentadores de la Planta de Espesadores del proceso de lixiviación ácida, en Moa. Por consiguiente, esta suspensión está conformada con la denominada “agua de rebose” de la fábrica y posee, además, aquellas características físicomecánicas que adquieren como resultado de su preparación, trasiego y sedimentación en el proceso industrial.

### **- Ensayos granulométricos**

El ensayo granulométrico de la suspensión industrial se realizó por vía húmeda, mediante el uso de un juego de ocho tamices que sigue la serie ASTM con módulo  $\sqrt{2}$ . El procedimiento que se llevó a cabo es el mismo que el utilizado en la fábrica. Para ello se deposita toda la muestra en el tamiz de 325 mesh, y se lava con agua para eliminar las partículas más pequeñas y evitar que se formen conglomerados al secarla por debajo de 40 °C.

Posteriormente, se efectuó el tamizado convencional con el juego de tamices que se presenta en la tabla 1.

Tabla 1  
Tamaño de tamices con módulo  $\sqrt{2}$  según serie ASTM

Malla	20	50	100	140	170	200	325
Abertura (mm)	0,850	0,300	0,150	0,106	0,090	0,075	0,045

Una vez determinado el peso retenido en cada tamiz, por diferencia de peso se determina el contenido de partículas con tamaños inferiores a 0,045 mm.

### - Técnica de difracción de Rayos X para la composición mineralógica y química

La fase sólida de la suspensión fue caracteri-

zada por difracción de Rayos X en un difractómetro HZ6-4, usando un régimen de radiación de  $\text{CoK}\alpha$ . Para la interpretación de los difractogramas se empleó el software ANALYZE, versión 2294, 1999. En la figura 1 y en la tabla 5 del epígrafe 3 se muestran el difractograma del sólido que conforma la suspensión y los contenidos en % de las fases mineralógicas que lo componen. La composición química se determinó por el método de fluorescencia de Rayos X.

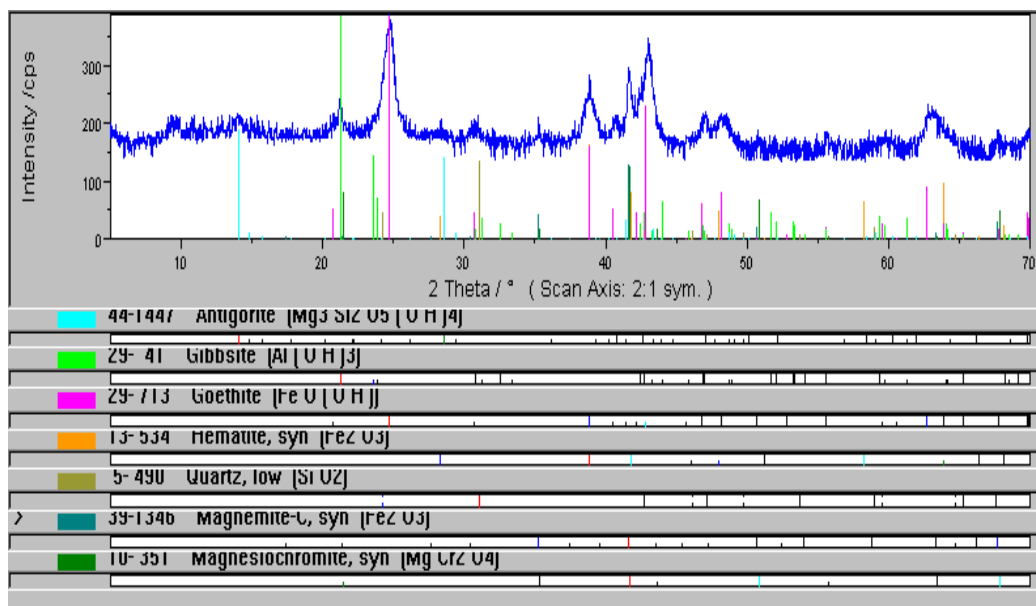


Fig. 1 Difractograma de la suspensión industrial de laterita.

### Ensayos reológicos y estimación del punto de carga cero

Para las mediciones de viscosidad y obtención de las curvas de flujo, se utilizó el reómetro Rheotest 2, de fabricación alemana. Éste es un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos del tipo Searle, en el cual el vaso (cilindro exterior) permanece estacionario, y el rotor (cilindro interior) es el que rota y está conectado al elemento de medición del torque. /2/

Se hizo uso del cilindro N para la suspensión con 10 % en peso de sólidos, y del cilindro S<sub>2</sub> para las de 25 y 47,5 % de sólidos, respectivamente. Las constantes de los cilindros empleando se verificaron por calibración, utilizando un aceite lubricante de 70 cstokes a 40 °C.

Para estimar el punto de carga cero se utilizaron dos suspensiones: la suspensión industrial original con 47,5 % de sólidos y una segunda con 10 % de sólidos, preparada a partir de la primera

mediante su dilución con un determinado volumen de agua industrial de reboso. A ambas suspensiones se les determinó la viscosidad aparente, para un valor del gradiente de velocidad correspondiente a la velocidad angular 12ad del rotor del reómetro. Así, se obtuvieron datos de viscosidad aparente en función del pH de las suspensiones.

Los ensayos se efectuaron a 28,9 °C. Para cambiar el pH de las suspensiones se utilizaron soluciones 0,1 M de HNO<sub>3</sub> y de KOH.

### Diseño de experimentos factorial 2<sup>k</sup>

Con este estudio, se analizaron los efectos de tres factores de influencia sobre la viscosidad aparente de la suspensión industrial de laterita, mediante un diseño experimental factorial 2<sup>k</sup>, donde, k=3, en correspondencia con el número de factores considerados; los cuales fueron la temperatura, el contenido de sólidos y la diferencia

(p.c.c – pH), siendo el p.c.c = 5,7. Se seleccionaron estos tres factores, teniendo en cuenta que se ha comprobado, teórica y prácticamente, que tanto la concentración de sólidos como la temperatura influyen grandemente sobre la viscosidad de líquidos y suspensiones, en general. También se seleccionó como otro de los factores de influencia el ΔpH= (p.c.c–pH), en lugar del pH solo, pues aquí se ha considerado que el pH constituye una medida más representativa de la carga superficial de las partículas y de los efectos de la estabilidad coloidal.

Los valores de viscosidad aparente se determinan para la magnitud del gradiente de velocidad correspondiente a la velocidad angular 12ad del rotor del reómetro.

En las tablas 2 y 3 se muestran los detalles fundamentales para aplicar esta técnica estadística. En todos los experimentos se realizó una réplica.

Tabla 2  
Factores considerados en el diseño de experimentos. Niveles de los factores

Codificación de las variables			
Factores	Variable codificada	Nivel	
		-1	+1
Temperatura (°C)	T	30	50
(p.z.c – pH)	Δ (pH)	0,2	0,8
Contenido de sólidos (%)	S	25	47,5

Tabla 3  
Matriz del planeamiento experimental 2<sup>3</sup> con 1 réplica

Experimento N°	T (°C)	Δ (pH)	S
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

La matriz de los datos fue procesada con auxilio del programa profesional STATISTIC. Los valores de los niveles máximo y mínimo de los tres factores seleccionados se encuentran en el rango de valores que se aplican en el proceso industrial.

## Análisis de los resultados

### Caracterización de la suspensión

#### Composición química de la fase sólida

En la tabla 4, se muestran los datos de composición química de la fase sólida de la suspensión,

expresada a través de los elementos químicos más importantes. Se observa que la muestra posee un alto contenido de hierro, que la caracteriza como laterita ferruginosa. Ésta es una característica típica de las lateritas cubanas, en la que abundan los óxidos de hierro. /7, 8, 15/

Puede verse también que esta muestra posee relativos altos contenidos de sílice, aluminio, cromo, níquel y magnesio, los cuales son los elementos que forman otras fases mineralógicas que ejercen gran influencia sobre las propiedades coloidquímicas de la suspensión. El contenido de los restantes elementos se encuentra dentro de los rangos de valores típicos de las lateritas ferruginosas cubanas.

Tabla 4  
Composición química de la fase sólida (% en peso)

% Ni	% Co	% Fe	% Mg	% Al	% SiO <sub>2</sub>	% Cr	% Mn	% Cu	% Zn
1,280	0,124	45,800	0,880	4,240	5,090	1,930	0,750	0,013	0,034

#### Composición mineralógica de la fase sólida

La composición mineralógica del mineral es de vital importancia para el proceso, y complementa la información que ofrece la composición química, ya que las fases mineralógicas influyen notablemente sobre el comportamiento reológico de la suspensión. La identificación de las fases mineralógicas presentes en la misma se muestra en la figura 1, y la determinación cuantitativa de cada una de ellas se presenta en la tabla 5.

Tabla 5  
Composición mineralógica de la muestra de laterita (% en peso)

Fase Mineral	Contenido (%)
Goethita	78,4
Gibbsita	10,6
Lizardita	10,43
Maghemita	0,57
Total	100

Como puede apreciarse, la fase mineralógica principal es la goethita, y las secundarias son la

gibbsita, la lizardita (es un tipo de serpentina) y la maghemita, en orden decreciente de sus contenidos en la muestra.

El contenido de cada una de estas fases en la muestra determina, en gran medida, la estabilidad de las suspensiones, así como los valores del punto de carga cero y del punto isoeléctrico. En trabajos anteriores /1, 6, 7, 8/ se ha comprobado que las muestras de laterita presentan un amplio rango de su punto isoeléctrico (i.e.p), y de su punto de carga cero (p.z.c), en dependencia de su composición mineralógica. La forma, tamaño y propiedades superficiales de las partículas están relacionadas con las fases mineralógicas presentes en la muestra mineral.

#### Distribución de tamaño de partículas en la suspensión

Los datos de la distribución granulométrica de la suspensión obtenidos experimentalmente, fueron ajustados a la ecuación empírica (1) con un coeficiente de correlación de 94,04 %, auxiliándose del programa profesional STATISTIC.

$$Y_b = 0,959\ 65 + 0,006\ 24 D_{pb} - \frac{0,008\ 67}{D_{pb}} \quad (1)$$

donde  $Y_b$  es la fracción másica de partículas cernidas a través de un tamiz dado, y  $D_{pb}$  es el diámetro de las partículas que han pasado por el tamiz (cernido), en mm.

Mediante la ecuación (1) se han estimado las fracciones de sólido para los tamaños de partículas correspondientes a los tamices no disponibles en la práctica. Es decir, ha brindado la posibilidad de obtener la distribución de tamaño de un juego de tamices completo, aunque sólo se disponga de algunos de ellos. De esta forma, se pudo elaborar la

figura 2, que muestra la distribución acumulativa de tamaño de las partículas, siguiendo el módulo  $\sqrt{2}$ .

La curva acumulativa de la figura 2 muestra una distribución amplia, típica de la mayoría de las suspensiones industriales de interés práctico. Se aprecia que la suspensión estudiada presenta las características propias de los materiales polidispersos y un alto contenido de partículas finas (los tamaños inferiores a 0,045 mm constituyen más del 70 % de la muestra), lo que debe conferirle propiedades plásticas y coloidales a la suspensión. Este resultado es similar a los obtenidos en trabajos anteriores con suspensiones polidispersas /1, 4, 6, 7, 11, 16/.

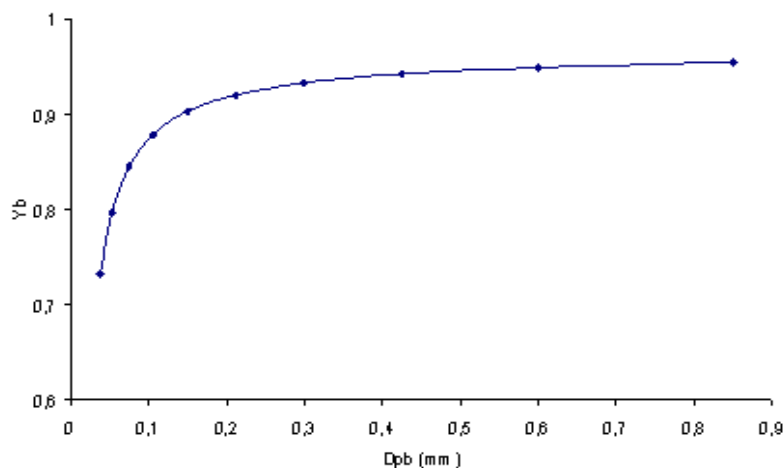


Fig. 2 Distribución acumulativa de tamaño de la suspensión de laterita.

### Estimación del punto de carga cero de la suspensión

En numerosos trabajos, se ha comprobado fehacientemente que en el punto de carga cero (p.c.c), tanto la viscosidad aparente,  $\mu_a$ , como el esfuerzo cortante inicial,  $\tau_0$ , alcanzan los máximos valores al relacionar ambos parámetros con el pH de las suspensiones acuosas de minerales /7, 9, 10, 13, 16/. En el presente trabajo se ha tomado en cuenta este hecho como vía indirecta para estimar la magnitud del p.c.c de la suspensión industrial de laterita estudiada. A modo de confirmación de los resultados, se aplicó el procedimiento de determinación de las relaciones de la viscosidad aparente vs. pH, tanto para la suspensión de 47,5 % como para la de 10 %

en peso de sólidos. Esta última, preparada por dilución de la primera con el mismo medio dispersante.

La figura 3 muestra la relación de  $\mu_a$  vs. pH para las dos concentraciones de sólido de la suspensión, observándose en ambas una fuerte dependencia de la viscosidad aparente con el pH. Las curvas tienen forma acampanada y, como se esperaba, coincidieron los máximos de las campanas con el punto de mayor valor de viscosidad, correspondiente al valor de pH= 5,7, conocido como punto de carga cero (p.c.c). En este punto, la suspensión alcanza la máxima condición de agregación y estructuración de sus partículas sólidas, ya que al anularse la carga neta superficial de éstas, las fuerzas de repulsión entre ellas cesan.



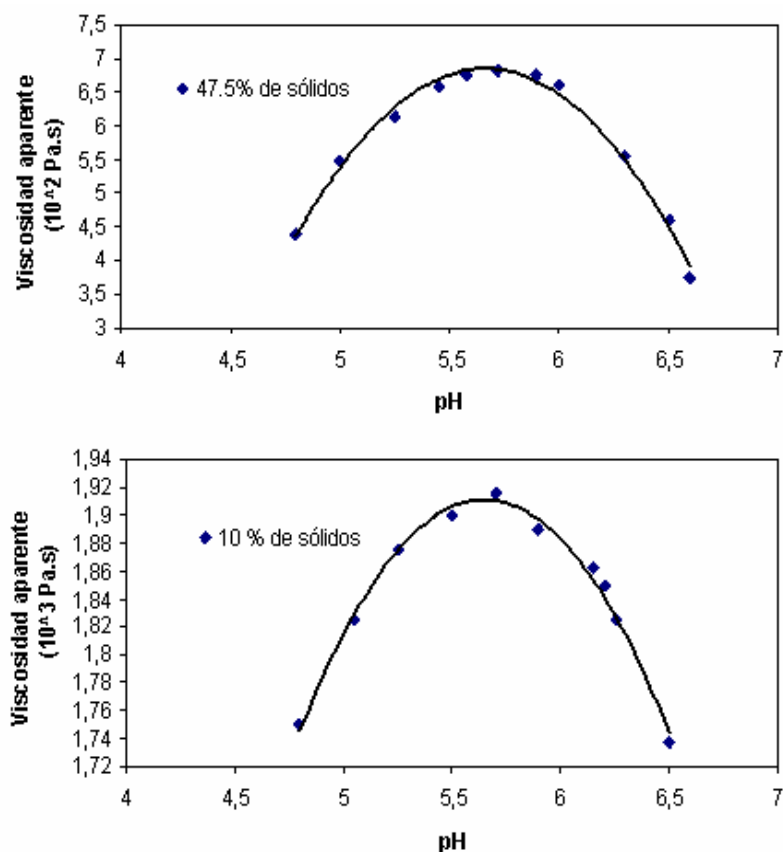


Fig. 3 Curvas de viscosidad aparente vs. pH para estimar la magnitud del p.c.c de la suspensión para 10 y 47,5 % en peso de sólidos.

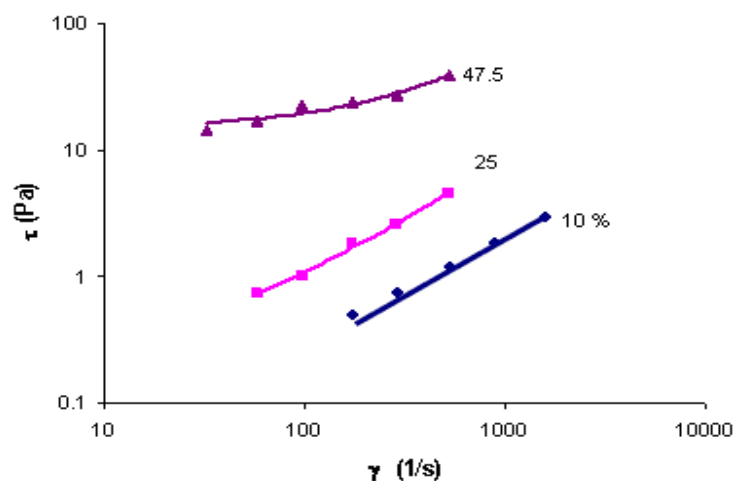
A pH superiores o inferiores al p.c.c, las viscosidades aparentes disminuyen debido a que la estructuración de las partículas agregadas se debilita, dado que la carga superficial de las partículas va aumentando y, por consiguiente, el componente repulsivo del equilibrio de fuerzas se torna más importante.

En esta suspensión industrial, el medio dispersante es la denominada agua del rebose. Con este medio, según los resultados de trabajos previos /1, 6, 12, 16, 17, 20/, se favorece el desplazamiento del p.c.c hacia valores de pH más ácidos, debido a la adsorción específica por el mineral del catión magnesio, el cual se encuentra en concentraciones relativamente altas en el agua de rebose. Por consiguiente, resulta evidente que el valor obtenido del p.c.c = 5,7 debe ser inferior al que se obtendría si el medio dispersante hubiera

sido agua destilada, la cual no propicia la adsorción específica de iones.

### Comportamiento reológico de la suspensión

El comportamiento observado en la figura 4, construida en escalas logarítmicas para las suspensiones de 25 y 47,5 % de sólidos, es característico de los materiales con plasticidad. Esto se debe, entre otras razones, a su granulometría, pues se trata de un mineral polidiserso con altos contenidos de partículas muy finas que le confieren, además, propiedades coloidquímicas dependientes del pH, según se pudo comprobar en el epígrafe; corroborando lo obtenido por otros autores /1, 6, 11, 16/. En cambio, la suspensión más diluida, con un 10 % de sólidos, exhibe una recta como curva de flujo, lo cual es propio de los materiales pseudoplásticos en los que no existe un valor de  $\tau_0$ .



**Fig. 4** Curvas de flujo de la suspensión de laterita a concentraciones de 10, 25 y 47,5 % de sólidos y pH natural.

En la tabla 6 se muestran, en forma resumida, las condiciones de trabajo y los valores de los parámetros reológicos como resultado del ajuste de los datos de las suspensiones de 25 y

47,5 % de sólidos al modelo reológico de Bulkley-Herschell ( $\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$ ) y de la suspensión de 10 % de sólidos al modelo de Ostwald de Waele ( $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ ).

**Tabla 6**  
Parámetros correspondientes al ajuste de los datos de las suspensiones analizadas a los modelos reológicos seleccionados

$\tau_0$ ? Pa?	K (Pa, s <sup>n</sup> )	n	R	pH natural	% sólidos	T ( °C )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
12,500	0,238 5	0,746 1	0,982 57	6,12	47,5	28,9	1,513
0,106	0,015 3	0,904 9	0,999 16	6,20	25,0	28,9	1,214
-	0,008 4	0,796 0	0,999 74	6,15	10,0	28,8	1,076

Los resultados obtenidos a partir de las curvas de flujo, corroboran el gran efecto que ejerce la concentración de sólidos sobre el comportamiento reológico de las suspensiones industriales de laterita, manteniendo los valores de pH y de temperatura prácticamente constantes. Ello se aprecia bien a través de los valores de los parámetros reológicos, los cuales muestran una gran diferencia en sus magnitudes al decrecer la concentración de sólidos desde 47,5 hasta 10 %, e incluso, cómo tiene lugar el cambio de la naturaleza reológica de la suspensión al disminuir el contenido de sólidos desde 25 hasta 10 %. A esta última concentración, la suspensión pierde su plasticidad como consecuencia de la disminución

de la agregación y estructuración de las partículas sólidas al ser ésta más diluida.

### **Análisis de los efectos de las variables y de sus interacciones sobre la viscosidad de las suspensiones, aplicando un diseño factorial de experimentos 2<sup>k</sup>**

Dado el hecho de que el diseño de experimentos se aplica a una misma suspensión industrial, hay tres factores importantes que permanecen invariables: las naturalezas mineralógica del sólido e iónica del medio, y la distribución de tamaño de las partículas del mineral.



Tabla 7  
Matriz codificada del planeamiento experimental  
y resultados de la variable respuesta

Nº corrida	Orden de ejecución	T	? (pH)	S	$\mu \cdot 10^3$ (Pa.s)
1	9	-1	-1	-1	9,64
2	14	1	-1	-1	9,18
3	4	-1	1	-1	10,6
4	16	1	1	-1	7,17
5	13	-1	-1	1	70,3
6	2	1	-1	1	51,0
7	7	-1	1	1	33,7
8	6	1	1	1	35,4
9	8	-1	-1	-1	9,46
10	15	1	-1	-1	8,08
11	5	-1	1	-1	9,46
12	12	1	1	-1	8,36
13	11	-1	-1	1	65,2
14	10	1	-1	1	52,7
15	3	-1	1	1	35,4
16	1	1	1	1	36,3

Los datos experimentales mostrados en forma de una matriz codificada en la tabla 7, fueron procesados utilizando el programa profesional STATISTIC. Al realizar el análisis de varianza se obtuvieron los valores del estadígrafo F, y de la probabilidad p, y se pudo construir el diagrama de

Pareto que se muestra en la figura 5, donde se observa que todas las variables analizadas, tanto de forma individual como en sus interacciones, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la viscosidad de la suspensión, con un nivel de confianza de 95 %.

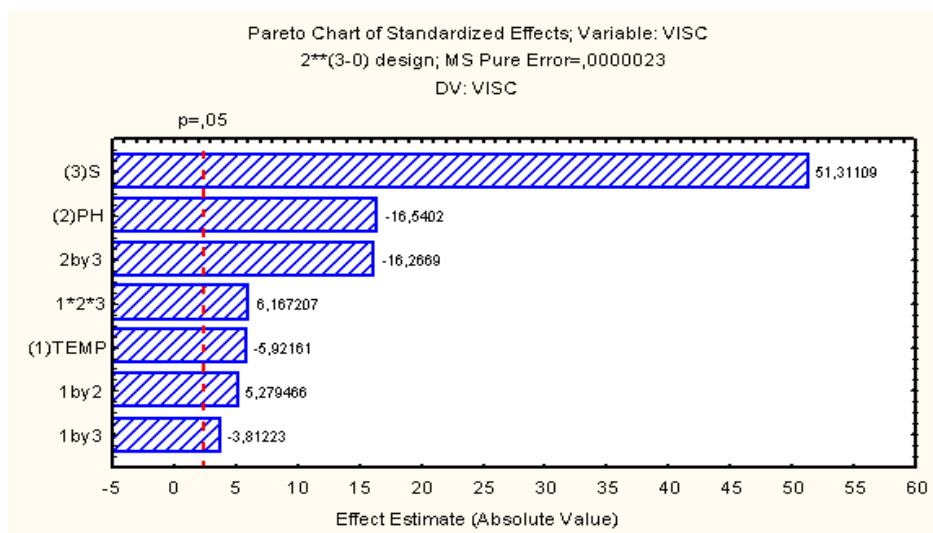


Fig. 5 Diagrama de Pareto para los efectos principales e interacciones.

Como resultado de la elaboración de los datos, se obtuvo la expresión del modelo estadístico en función de las

variables involucradas que se muestra en la ecuación (2), con un coeficiente de regresión de 99,75 %.

$$\text{VISC} = 0,02824 - 0,00222 \cdot T - 0,00621 \cdot \Delta\text{pH} + 0,01925 \cdot S + 0,00198 \cdot T \cdot \Delta\text{pH} - 0,00143 \cdot T \cdot S - 0,0061 \cdot \Delta\text{pH} \cdot S + 0,00231 \cdot T \cdot \Delta\text{pH} \cdot S \quad (2)$$

Dentro del rango de valores de los factores considerados en el análisis, según los resultados descritos por el diagrama de Pareto y por las magnitudes de los coeficientes de las variables en la ecuación (2), el factor “contenido de sólidos”,

S, es la variable de mayor efecto sobre la viscosidad de la suspensión. Le siguen en orden decreciente de sus efectos el factor  $\Delta\text{pH}$  y la interacción (S.  $\Delta\text{pH}$ ), estas dos últimas con similares grados de influencia.

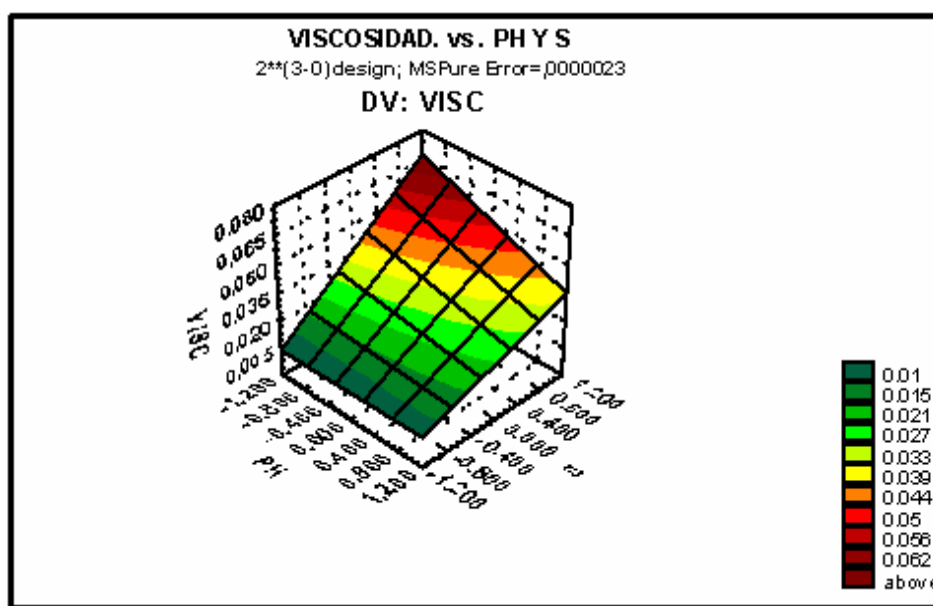


Fig. 6 Gráfico de superficie de la variable respuesta, en dependencia de las variables S y  $\Delta\text{pH}$ , a una temperatura constante de 40 °C.

Las restantes variables, en orden de importancia decreciente por sus efectos, son: la interacción de los tres factores (T. S.  $\Delta\text{pH}$ ), el factor temperatura, T, la interacción (T.  $\Delta\text{pH}$ ) y, finalmente, la interacción (T.S); teniendo las tres primeras de ellas similares grados de influencia.

En la figura 6, se muestra el gráfico de la superficie respuesta obtenido en función de los factores:  $\Delta\text{pH}$  y S, considerando constante la temperatura en su nivel medio (40 °C). En el nivel superior de S e inferior de  $\Delta\text{pH}$  se obtiene la mayor viscosidad de la suspensión y viceversa. En otras palabras, en la medida en que se

incrementa la diferencia de pH y se disminuye el contenido de sólidos, se obtienen los menores valores de viscosidad de la suspensión. Por las experiencias de trabajos anteriores y lo reportado en la literatura /6, 7, 8, 16/, estos resultados son lógicos, pues a medida que el contenido de sólidos, disminuye en una suspensión, ésta va perdiendo sus características plásticas, pudiendo tener en ocasiones hasta comportamientos newtonianos. Por otra parte, tal como se ha descrito en el epígrafe 3.2, cuando el pH de la suspensión tiene un valor cercano al p.c.c. la viscosidad adquiere mayores valores que cuando presenta un pH alejado de éste.

---

## Conclusiones

En el estudio realizado a una suspensión de mineral laterítico, tomada directamente del proceso industrial de lixiviación ácida, en Moa, se encontró que el mineral está constituido por goethita, como fase mineralógica principal, y por gibbsita y serpentina, como fases secundarias. La distribución de tamaño de partículas muestra que el mineral posee un alto contenido de partículas finas, las cuales confieren a la suspensión propiedades coloidales y un comportamiento reológico no newtoniano. Para concentraciones de la fase sólida superiores a 25 % en peso, las curvas de flujo exhiben propiedades plásticas; en cambio, para la concentración de 10 %, la suspensión se comporta como un material pseudoplástico. La viscosidad aparente máxima se alcanza alrededor del valor del punto de carga cero (p.c.c), donde las interacciones entre las partículas son gobernadas, principalmente, por las fuerzas atractivas. El valor del p.c.c está determinado, además, por la adsorción específica del catión magnesio, contenido apreciablemente en el medio dispersante.

Como resultado del diseño de experimentos se comprobó que la temperatura, la concentración de sólidos, la diferencia de pH respecto al p.c.c, así como sus interacciones ejercen efectos estadísticamente significativos sobre la viscosidad aparente de la suspensión; siendo la concentración de sólidos, la diferencia de pH y la interacción entre estos dos factores, las tres variables de mayor influencia.

## Bibliografía

1. Abreu M.; de la Cruz K., Relación entre las características granulométricas, reológicas y coloidquímicas en suspensiones de laterita y de cieno carbonatado, Trabajo de investigación, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2004.
2. Alderman N. J.; Heywood, N. I., "Improving Slurry Viscosity and Flow Curve Measurements", *Chem. Eng. Prog.*, AICHE, Nueva York, 101 (4), págs. 27-32, abril 2004.
3. Atsushi, Tsutsumi; Yoshida Kunio, "Effect of Temperature on Rheological Properties of Suspensions", *J. Non-Newtonian Flu Mech.*, 26, 175-183, 1987.
4. Avotins, A. P.; AhPschlager, S. S.; Wicker, R. G., "The Rheology and Handling of Laterite Slurries", International Lateritic Symposium, Nueva York, 1979. (Dpto. ICT, CIPIMM, N° 19, 610, La Habana, 1979).
5. Avramidis, K. S.; Turian, R.M., "Yield Stress of Laterite Suspensions", *J. Colloid Interface Sci.*, 143, 54, 1991.
6. Cerpa, A. *et al.*, "Relationship Between the Colloidal and Rheological Properties of Mineral Suspensions", vol. LXXIX, 2001, 608-611.
7. \_\_\_\_\_, "Mineral- Content and Particle Size Effects on the Colloidal Properties of Concentrate Lateritic Suspensions", *Clays and Clay Minerals*, 47, 515, 1999.
8. Cerpa, A.; Garcell, L. R., "Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas", Evento Metalurgia'98, Ciudad de La Habana, 1998.
9. Cornell, R.; Schwertmann, U., *The Iron Oxides*, Weinheim, Editorial VCH, 1996.
10. Garcell, L. R., *et al.*, "Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions", *J. Colloid Interface Sci.*, 205, 470, 1998.
11. \_\_\_\_\_, Estudio reológico de las suspensiones de limonita de la empresa "Cmdte Pedro Soto Alba" de Moa", Instituto Superior Politécnico "Julio Antonio Mella, Facultad de Tecnología Química, Departamento de Procesos Químicos, Santiago de Cuba, 1990.
- 12- Guardia, M., "Influencia del tipo de agua sobre la reología de las pulpas de mineral limonítico de Moa". Trabajo de Investigación, Dpto. de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1982.
13. Leong Y. K.; Scales, P. J.; Healy, T. W.; Boger, D. V., "Effect of Particle Size on Colloidal Zirconia Rheology at Isoelectric Point", *J. Am. Ceram. Soc.*, 78, 8, 2209 – 12, 1995.
14. Luckham, P. F.; Ukeje, M. A., "Effect of Particle Size Distribution on the Rheology of Dispersed Systems", *J. Colloid Interface Sci.*, 220, 347 – 356, 1999.
15. Pérez, G. L.; Garcell, L. R., "Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas". *Revista Tecnología Química*, vol. XXVI, N° 1, 2006, págs. 88-93.
16. Pérez García, L.; Beatón Berenguer, M.; Turro Breff A.; Garcell Puyans, Leonel, "Efectos de las características granulométricas y magnéticas de las partículas y del pH sobre la reología de suspensiones minerales acuosas concentradas" *Revista Tecnología Química*, vol. XXV, N° 1, 2005, págs. 28-38.
17. Pérez García, L.; Sam Palanco, C.; Rodríguez Ferrer, A.; Garcell Puyans, L. R., "Adsorción de iones en suspensiones acuosas de laterita", *Revista Tecnología Química*; vol. XXVII, N° 3, 2007, págs. 30-38.

- 
18. Rivas, S. *et al.*, Efecto de la granulometría sobre la reología de suspensiones de cieno carbonatado, Trabajo de Investigación, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2005.
  19. Skelland A. H. P., *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*, La Habana, Edición Revolucionaria, 1970.
  20. Torres, E., Efecto de la interacción entre las partículas sobre el comportamiento reológico de las pulpas de laterita de Moa, Trabajo de Investigación. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1989.
  21. Zamora, N. L., Caracterización reológica de los cienos carbonatados que se manejan industrialmente en Moa, Trabajo de Investigación, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2003.