

Tabla 2 Cálculo de reservas balanceadas + fuera de balance

| * Bloques/tipo de menas | Toneladas | Potencia (m) | % Ni | % Fe | % SiO ₂ | % MgO | Nal | % Extractable | Ni Recuperado |
|-------------------------|-----------|--------------|-------|--------|--------------------|-------|------|---------------|---------------|
| HV - 07 | | | | | | | | | |
| L + S | 300 033 | 274,5 | 1,354 | 42,447 | 11,56 | 7,93 | 1,74 | 77 | 3 128,1 |
| E + L | 305 988 | 251,5 | 1,181 | 46,797 | | | 2,51 | 82 | 2 963,2 |
| S | 65 953 | 73,5 | 1,598 | 22,567 | | | 0,83 | 65 | 685,1 |
| E + L + S | 371 941 | 325 | 1,255 | 42,501 | | | 2,21 | 81 | 3 780,9 |
| IW - 52 | | | | | | | | | |
| L + S | 248 284 | 239,5 | 1,357 | 41,152 | 9,4 | 5,6 | 2,20 | 81 | 2 729,1 |
| E + L | 319 251 | 266,5 | 1,114 | 44,864 | | | 4,0 | 84 | 2 987,4 |
| S | 47 115 | 55,5 | 1,351 | 23,051 | | | 0,46 | 59 | 375,5 |
| E + L + S | 366 366 | 322 | 1,144 | 42,059 | | | 3,55 | 83 | 3 478,7 |
| N - 13 | | | | | | | | | |
| L + S | 135 829 | 203,5 | 1,354 | 41,190 | 11,04 | 6,77 | 1,86 | 79 | 1 425,9 |
| E + L | 144 153 | 188,0 | 1,132 | 48,474 | | | 5,4 | 89 | 1 452,3 |
| S | 36 827 | 62,5 | 1,481 | 19,667 | | | 0,4 | 50 | 272,7 |
| E + L + S | 180 980 | 250,5 | 1,203 | 42,614 | | | 4,38 | 87 | 3 894,2 |
| K - 19 | | | | | | | | | |
| L + S | 257 683 | 389,0 | 1,278 | 45,888 | 7,42 | 5,21 | 2,73 | 82 | 2 700,4 |
| E + L | 307 553 | 413,5 | 1,103 | 50,575 | | | 6,2 | 90 | 3 053,1 |
| S | 434 49 | 71,5 | 1,492 | 21,087 | | | 0,46 | 59 | 382,5 |
| E + L + S | 351 002 | 485 | 1,151 | 46,922 | | | 5,49 | 89 | 3 595,6 |

* Donde se representa el tipo de menas
 L + S = limonita + serpentina
 E + L = escombros + limonita
 S = serpentina
 E + L + S = escombros + limonita + serpentina

COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE LAS PULPAS LATERITICAS

C.Dr. Leonel Garcell P.

Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella

RESUMEN Las características reológicas de las pulpas lateríticas cubanas han sido poco estudiadas, de ahí que la información existente en Cuba acerca de esta temática es escasa y con resultados contradictorios. En un reciente trabajo realizado en el Instituto Superior "Julio Antonio Mella" de Santiago de Cuba, en el cual se comenzó el estudio de las características reológicas de las pulpas que se procesan en la Planta de Espesadores "Comdte Pedro Sotto Alba" de Moa se obtuvo que el comportamiento reológico de las pulpas de mineral laterítico corresponde al de los plásticos reales, pudiendo ajustarse las curvas de flujo al modelo reológico de Bulkley-Herschel. Se trabajó en un rango de concentración de sólidos de 26-46,3 % a una temperatura de 30°C. Los ensayos experimentales se realizaron en un viscosímetro capilar de tubos intercambiables, diseñado y construido en Facultad de Tecnología Química del ISPJAM.

ASBTRACT The rheological characteristics of the Cuban laterite pulps have not been widely studied from this, the existent information in Cuban about this topic is scarce and contradicting results. In the recent work realized at the higher Institute "Julio Antonio Mella" of Santiago de Cuba, in which started the study of the rheologic. Characteristics of the pulps processed in the thickeners plant "Comdte Pedro Sotto Alba" of Moa, it was found, that the rheologic behaviour of the pulps of lateritic mineral corresponds to those of real plastics, having adjusted the flow curves to the modern rheologic of Bulkley-Herschel. It worked in the range of concentration of solid of 26-46,3 % at a temperature of 30°C. The experimental tests were done in a viscometer capilar of interchangeable tubs, drawn and constructed in the faculty of chemical tecnology of the Higher Institute of "Julio Antonio Mella" (ISPJAM).

INTRODUCCION

En la solución de los problemas asociados con proyectos de ampliación, modernización o diversificación de capacidades de producción de las industrias químicas y metalúrgicas, en las que se manipulan pulpas de laterita, adquiere gran importancia el conocimiento de las características del flujo de estas pulpas. Ello resulta más evidente cuando se tratan problemas relacionados con la transportación de la pulpa por tuberías, con su calentamiento, o con su procesamiento en diversos equipos. En este sentido, uno de los aspectos más importantes lo constituye la información disponible sobre el comportamiento reológico de la pulpa y los parámetros que lo caracterizan.

La literatura existente acerca de la reología de las pulpas lateríticas cubanas es escasa. En los pocos trabajos encontrados se tratan aspectos parciales, en lo que se refiere a los factores que influyen sobre las características reológicas de estas pulpas. Por otra parte, los autores reportan modelos reológicos diferentes para describir las curvas de flujo.

Uno de los trabajos más amplios, encontrados hasta el presente, sobre la reología y manipulación de las pulpas de laterita, es el de Avotins y colaboradores [2]. En el mismo se informa que las pulpas de laterita pueden caracterizarse como plásticos Bingham a valores de la velocidad de deformación mayores que 500 s⁻¹, y mues-

tran cierta dependencia del tiempo. En el trabajo de Rosell y Díaz [7] se reporta un comportamiento pseudoplástico.

La revisión bibliográfica también ha permitido conocer que sobre las propiedades reológicas de las pulpas de laterita ejercen influencia la calidad del agua utilizada para diluir el mineral, la composición química del mineral, la concentración de la fase sólida, el pH del medio, la temperatura, y el tamaño de las partículas.

En las investigaciones acerca de la reología de cualquier material la obtención de la curva de flujo que caracteriza dicho material, y del modelo reológico que la describe constituyen dos aspectos importantes.

En este trabajo se presentan los resultados preliminares obtenidos acerca del comportamiento reológico de las pulpas lateríticas que se elaboran en la empresa "Cmde Pedro Sotto Alba" de Moa. El trabajo responde a un tema de investigación que se inició en el ISPJAM.

EQUIPO EXPERIMENTAL Y METODO PARA LA ELABORACION DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Las curvas de flujo de la pulpa se obtuvieron con un viscosímetro de tubos intercambiables, el cual fue diseñado y construido en la Facultad de Tecnología Química del ISPJAM [9]. La instalación experimental está soportada por una estructura construida a base de ángulos de acero. Tanto el recipiente que contiene la pulpa, como los tubos cuentan con camisa de calentamiento que se conecta a un termostato, lo que permite realizar ensayos a diferentes temperaturas. Durante las mediciones, el tubo se sitúa en posición horizontal. El equipo posee un manómetro en U para medir la presión del aire en el recipiente.

Las curvas de flujo se obtienen de los datos que proporcionan los ensayos experimentales realizados con cuatro tubos de diferentes longitudes, pero que forman dos pares de diámetros iguales. Los tubos poseen una relación longitud/radio de 234 168; 242; 160. Como se observa, la longitud de los tubos es lo suficientemente grande, en relación con el radio, de manera que se aseguran flujos con perfiles de velocidad desarrollados a través de los tubos.

La utilización de dos pares de tubos de diámetros diferentes se hace con el objetivo de poder elaborar los datos experimentales aplicando el método desarrollado

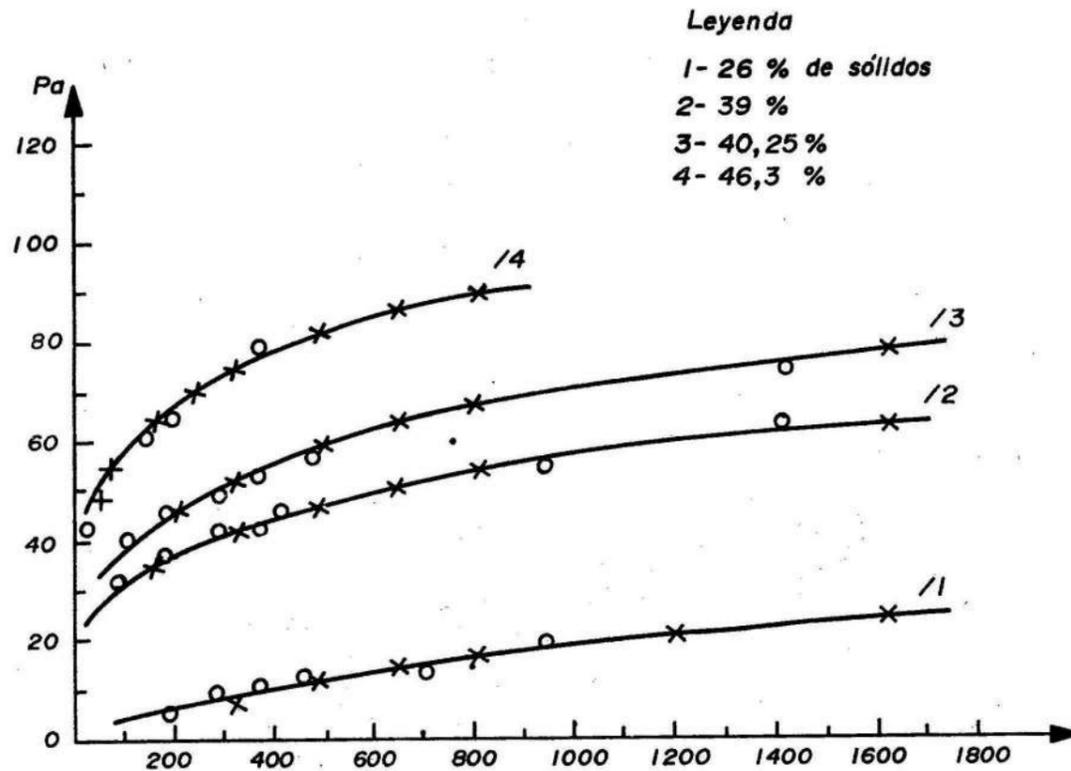


Figura 1

por Fredrickson A. G. [3,4] para estudios viscosimétricos de líquidos no newtonianos. Este método permite determinar la caída de presión, debido al flujo viscoso, en una sección del tubo, ya que en el cálculo se logran eliminar los llamados "efectos finales" en los extremos de entrada y salida de los tubos, los cuales originan pérdidas de presión que no pueden ser determinadas experimentalmente. El flujo a través de los tubos es laminar, y la caída de presión es proporcional al flujo volumétrico. Con los datos de caída de presión y de flujo volumétrico se obtienen las magnitudes de los esfuerzos cortantes como una función de la velocidad de deformación, según las siguientes expresiones:

$$\tau = \frac{(\Delta P) D}{4 L} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{32 Q}{\pi D^3} \quad (2)$$

La efectividad de medición del viscosímetro y del método aplicado para elaborar los datos, fue comprobada con un aceite de lubricación de motores de viscosidad conocida. Los ensayos de comprobación arrojaron resultados altamente satisfactorios, lográndose una curva de flujo única del aceite que no depende de las dimensiones de los tubos.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se efectuaron mediciones a una temperatura de 30°C, en un rango de concentración de sólidos de 26-46,3 % de peso.

Durante el desarrollo del trabajo se realizaron ensayos con 13 muestras de pulpa, tomadas de las secciones de entrada y salida de los espesadores de la fábrica. Las pulpas con concentraciones intermedias a los valores extremos indicados arriba, se lograron mediante decantación del agua de las muestras más diluidas, o por adición de agua a las muestras más concentradas.

Las curvas de flujo más representativas se muestran en la Figura 1, como se observa, las pulpas de laterita preparadas en la Empresa "Pedro Sotto Alba" manifiestan el comportamiento típico de los plásticos reales. Estos materiales fluyen bajo la acción de esfuerzos cortantes superiores, en magnitud, al esfuerzo cortante inicial o límite. El efecto de la concentración de sólidos se manifiesta en el incremento de los valores de los esfuerzos cortantes para valores iguales de la velocidad de deformación.

La selección del modelo reológico que describe la curva de flujo se basa fundamentalmente en el comportamiento de la pulpa en una operación unitaria específica. Así, por ejemplo, si interesan los valores de $\dot{\gamma}$ para valores de $\dot{\gamma}$ mayores que 600 s^{-1} , las curvas de 26, 39 y 40,25 % pudieran ser ajustadas al modelo reológico de Bingham. De esta forma, el comportamiento reológico de la pulpa vendría dado por dos parámetros reológicos: el esfuerzo cortante dinámico inicial (intercepto en el eje τ al prolongar la parte linealizada de la curva de flujo) y la viscosidad plástica (pendiente de la línea recta).

En este trabajo se ha preferido ajustar los valores de las curvas de flujo al modelo de Bulkley-Herschel, que aunque es más complejo que el modelo de Bingham, tiene la ventaja de describir la curva completa [5; 8]:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$$

El modelo de Bulkley-Herschel posee tres parámetros reológicos: el esfuerzo cortante inicial, τ_0 ; el índice de consistencia, K, y el índice de flujo, n.

Los parámetros reológicos permiten cuantificar los efectos de diferentes factores sobre el comportamiento de la pulpa. La magnitud de estos parámetros depende de la preparación de la pulpa, tipo de mineral, temperatura, concentración de sólidos y composición de la fase

acuosa. En este trabajo los valores de τ_0 , K y n se obtuvieron aplicando el método de los mínimos cuadrados a las magnitudes experimentales de τ y $\dot{\gamma}$ [1].

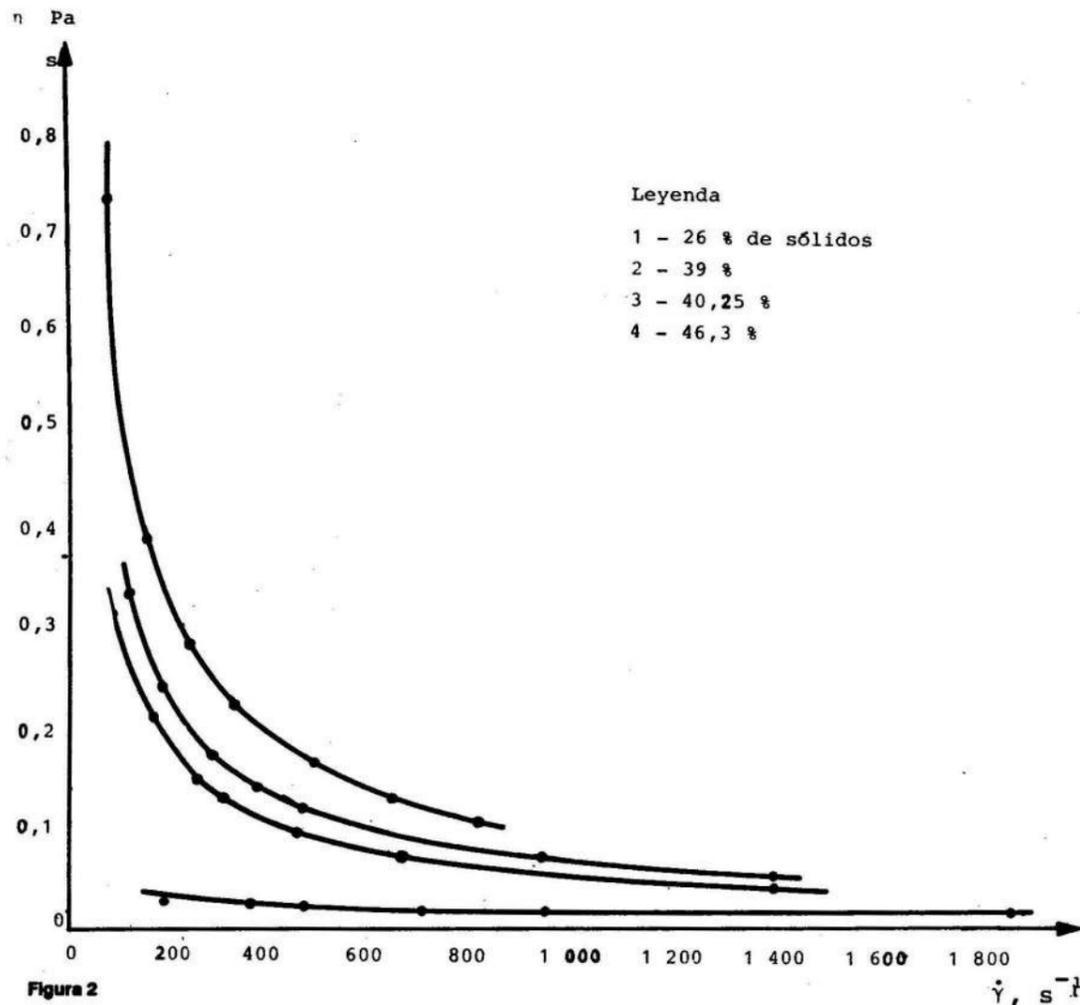
El efecto de la concentración de sólidos sobre los parámetros reológicos para las pulpas de lateritas estudiadas se muestra en la Tabla 1. El esfuerzo cortante inicial aumenta de 2 Pa, aproximadamente, a 26 % de sólidos hasta 37,86 Pa, a 46,3 % de sólidos. De la misma manera, el índice de consistencia se incrementa, en el mismo intervalo de concentración de sólidos, de 0,174 Pa.sⁿ hasta 3,35 Pa.sⁿ, en cambio, el índice de flujo disminuye de 0,657 hasta 0,41 en este rango de sólidos.

Tabla 1 Valores de los parámetros reológicos de la pulpa de laterita, en función de la concentración de sólidos

| S, % | τ_0 , Pa | K, Pa.s ⁿ | n (adimensional) |
|------|---------------|----------------------|------------------|
| 26,0 | 2,0 | 0,174 | 0,657 |
| 39,0 | 18,0 | 1,430 | 0,486 |
| 40,5 | 26,4 | 1,555 | 0,480 |
| 46,3 | 37,86 | 3,350 | 0,410 |

En la Figura 2 se muestran los efectos de la velocidad de deformación y de la concentración de sólidos sobre la viscosidad efectiva de las pulpas. Como se observa, la viscosidad disminuye con el incremento de la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$. Este comportamiento es típico de los materiales plásticos reales [5,6]. Así mismo, como es de esperar, para valores constantes de $\dot{\gamma}$, la viscosidad se incrementa con el aumento de la concentración de sólidos. Por ejemplo, para $\dot{\gamma} = 400 \text{ s}^{-1}$, la viscosidad efectiva aumenta, aproximadamente, de 0,026 0 Pa.s, a 26 % de sólidos, hasta 0,194 0 Pa.s, a 46,3 % de sólidos.

Puesto que los minerales lateríticos varían ampliamente de composición química y sus pulpas son afectadas por varios factores, enumerados al inicio de este trabajo, los parámetros reológicos en este estudio no son, por lo general, aplicables para el cálculo. No obstante, desde un punto de vista cualitativo, los resultados obtenidos permiten conocer el comportamiento de estas pulpas y el orden de magnitud de los parámetros reológicos.



CONCLUSIONES

1. Los estudios reológicos iniciados con la pulpa de laterita que se procesa en la Empresa "Comde Pedro Sotto Alba" de Moa indican un comportamiento reológico bastante complejo, que depende de varios factores presentes en el proceso tecnológico.
2. La pulpa es no-newtoniana. El modelo de Bulkley-Herschel describe bien las curvas de flujo obtenidas, para todo el rango de velocidad de deformación y de concentración de sólidos estudiados.
3. El esfuerzo cortante inicial y el índice de consistencia aumentan significativamente con el incremento de la concentración de sólidos; pero el índice de flujo disminuye con el aumento de sólidos. Sin embargo, la disminución de los valores del índice de flujo se hace menos notable a partir de 39 % de sólidos. Este comportamiento es típico de los materiales no newtonianos que pueden ser clasificados como plásticos reales.

4. El viscosímetro de tubos intercambiables utilizado en los ensayos experimentales, y el método empleado para elaborar los datos experimentales han resultado efectivos en la obtención de las curvas de flujo, las cuales son independientes de las dimensiones de los tubos utilizados.

SIMBOLOGIA

D—Diámetro interior de los tubos del viscosímetro, m.
K—Índice de consistencia del modelo de Bulkley-Herschel, Pa.sⁿ.

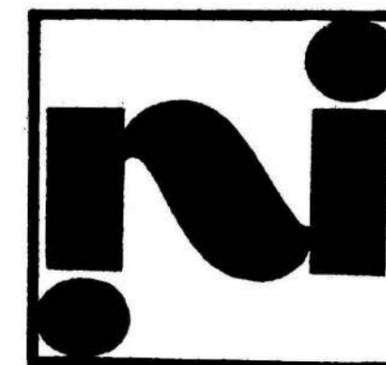
L—Longitud efectiva de los tubos del viscosímetro, m.
n—Índice de flujo del modelo de Bulkley-Herschel (adimensional)

ΔP —Caída de presión debido sólo al flujo viscoso en una longitud L efectiva de los tubos del viscosímetro, Pa.
Q—Flujo volumétrico de la pulpa a través de los tubos, m³/s.
R—Radio de los tubos del viscosímetro, m.

S—Concentración de sólidos en la pulpa, %
 $\dot{\gamma}$ —Velocidad de deformación (gradiente de velocidad), s⁻¹.
 μ —Viscosidad aparente o efectiva, Pa.s.
 τ —Esfuerzo cortante, Pa.
 τ_0 —Esfuerzo cortante inicial o límite, Pa.

REFERENCIAS

1. ACOSTA, J.: *Ajuste de curvas experimentales*. Santiago de Cuba. Editorial Oriente, 1981.
2. AVOTINS, P. y otros: "Reología y manipulación de las pulpas de laterita". *Internacional Laterite Symposium* (capítulo 31) Feb 19-21, 1979, p. 610-635. Publicado en Cuba por el Dpto. de Información Técnica del CIPIMM, La Habana, octubre de 1979.
3. BIRD R., B. y otros: *Fenómenos de transporte*. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1979.
4. FREDRICKSON A., G.: *Principles and applications of rheology* New York, Prentice-Hall Inc., 1964.
5. GARCELL P., L. y otros: "Determinación de parámetros reológicos en pulpas minerales que se comportan como plásticos reales en *Revista Tecnología Química* Año V, No. 2, p. 21, 1984.
6. Nomograma sobre datos reológicos de pulpas de lateritas de Moa. Efecto del por ciento de sólidos sobre los parámetros reológicos K' y n'. Dpto Técnico "Emp. Comde Pedro Sotto Alba".
7. ROSELL, R. y A. DIAZ: "Comportamiento reológico de las pulpas de laterita de la fábrica "Pedro Sotto Alba" de Moa. Informe Técnico. Fac. de Tecnología Química, 1971.
8. SKELLAND A., H. P.: "Laminar flow (fluids with a yield stress)", *Non newtonian flow and heat transfer*. La Habana, Instituto del Libro, 1970.
9. VERDECIA M., V. y A.M. MORENO: "Estudio del comportamiento reológico de pulpas lateríticas de Moa". Trabajo de Diploma. Fac. de Tecnología Química. ISPJAM, Santiago de Cuba, 1986.



CUBANIQUEL
Empresa Cubana Exportadora de Minerales
y Metales