

Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba

Liudmila Pérez García
Leonel Garcell Puyáns
Arturo Luis Rojas Purón
Rômulo Simões Angélica

Resumen

Se estudiaron muestras de laterita ferruginosa, cieno carbonatado, yeso y sulfuro de Ni+Co, asociadas al proceso de lixiviación ácida a presión (LAP) para la extracción de sulfuros de Ni y Co, con el propósito de caracterizarlas mineralógica y reológicamente. Se emplearon técnicas de Difracción de Rayos-X, Análisis Térmico Diferencial, Espectroscopía Infrarrojo y Fluorescencia de Rayos-X. Los resultados evidenciaron que la laterita es una mezcla de minerales de hierro, donde la goethita es la fase mineralógica principal, con maghemita, hematita, gibbsita y serpentina como secundarias. El cieno es carbonatado, en forma de calcita y aragonito; el material de yeso se identifica como bassanita y el sulfuro de Ni + Co está constituido básicamente por millerita. La laterita, el cieno y el yeso están formados fundamentalmente por partículas finas (menores de 0,045 mm), lo que explica sus comportamientos reológicos, ajustables al modelo de Bulkley – Herschel. Por el contrario, el sulfuro de Ni + Co tiene una distribución de tamaño próxima a un material monodisperso, ajustándose bien al modelo de Newton. El modelo de Pérez describe adecuadamente la distribución de tamaño acumulativa de las partículas las lateritas, del cieno carbonatado y del yeso.

Palabras clave

Cieno carbonatado, laterita, mineralogía, reología, sulfuro de Ni y Co, yeso.

Mineralogical and rheological description of minerals suspension in the selective acid-leach process in Moa, Cuba

Abstract

This work covers the analysis of samples of ferruginous laterite, calcium carbonate, gypsum and Ni+Co sulfide that are related to nickel pressure acid-leach process, which are characterized from the mineralogical and rheological point of view, by using techniques of X-Ray Diffraction (DRX), Differential Thermal Analysis (ATD) and X-Ray Fluorescence (FRX). It was found that laterite is a mixture of iron minerals, with goethite as the main mineralogical phase, with maghemite, hematite, gibbsite and serpentine as the secondary phase. Calcium carbonates occur in the form of calcite and aragonite, gypsum is identified as bassanite, and Ni and Co sulphides basically consist of millerite. Laterite, calcium carbonate and gypsum are made up of fine particles especially (smaller than 0.045 mm), hence the reason of their rheological behavior that can be adapted to the Bulkley – Herschel model; whilst the size distribution for Ni and Co sulfides is much similar to that of monodispersed materials and the specific gravity is high, which is indicative of the Newtonian behavior. Cumulative particle size distribution of solids contained in laterite, calcium carbonate and gypsum can be properly described by using Perez´ model.

Key words

Calcium carbonate, laterite, mineralogy, rheology, Ni and Co sulfides, gypsum.

INTRODUCCIÓN

En todo proceso tecnológico de la industria química el conocimiento del comportamiento reológico de las suspensiones acuosas es de gran utilidad para el cálculo de los equipos y conductos que las transportan. Dicho comportamiento está estrechamente relacionado con la viscosidad y la estructura que forman las partículas; en el caso específico de las suspensiones acuosas de minerales influyen el tamaño y la distribución de las partículas en suspensión (Cerpa *et al.* 1999, Cerpa *et al.* 2001, Pérez 2004, Rivas & Colás 2005), la concentración y las características mineralógicas de la fase dispersa (Zamora 2003), las propiedades químicas de superficie (Cerpa & Garcell 1998, Garcell *et al.* 2001, L. Garcell, com. esc. 2004) y la temperatura de la suspensión (Pérez 2004). La caracterización de los minerales en solución permitiría ampliar la comprensión de la influencia de algunos de los factores antes mencionados.

Estudios realizados en pulpas lateríticas han permitido determinar que para concentraciones inferiores al 18 % en peso de sólidos las curvas de flujo prácticamente son independientes de su composición mineralógica y exhiben un comportamiento pseudoplástico. Sin embargo, para concentraciones de alrededor de 22 hasta 45 % en peso de sólidos la viscosidad aumenta dependiendo cada vez más de la mineralogía y el comportamiento reológico adquiere propiedades plásticas, pudiendo ajustarse al modelo de Bingham, en algunos casos, o al de Bulkley–Herschel, en otros (Skelland 1970, Cheng 1980, Garcell *et al.* 1988, Avramidis & Turian 1991, Cerpa & Garcell 1998, Garcell *et al.* 1998, Cerpa *et al.* 1999, Garcell 2001, L. Garcell, com. esc. 2004, Pérez 2004).

En el proceso de lixiviación selectiva ácida a presión (LAP) de Ni + Co se manipulan y transportan gran variedad de suspensiones de diferente naturaleza: laterita, cieno carbonato, yeso, sulfuro de Ni+Co, entre otras; sin embargo, los estudios reológicos se han concentrado hasta el momento en las pulpas de mineral laterítico, por ser la materia prima fundamental. Pocos son los trabajos publicados sobre la reología de suspensiones industriales de cieno carbonatado (Zamora 2003, Rivas & Colás 2005), de yeso y de sulfuro de

Ni+Co. Este trabajo tiene como objetivo establecer las principales características mineralógicas y reológicas de las suspensiones minerales involucradas en las diferentes etapas del proceso LAP para la obtención de concentrados de Ni + Co.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Se emplearon materiales provenientes de las principales etapas del proceso tecnológico LAP en una de las empresas niqueleras de Moa, Cuba. El estudio incluyó desde la pulpa laterítica que se sedimenta en los tanques espesadores hasta el concentrado de Ni + Co obtenido como producto final, valorándose además el cieno carbonatado empleado en la neutralización y el subproducto de yeso obtenido en una de las etapas finales del proceso que se grafica en la Figura 1.

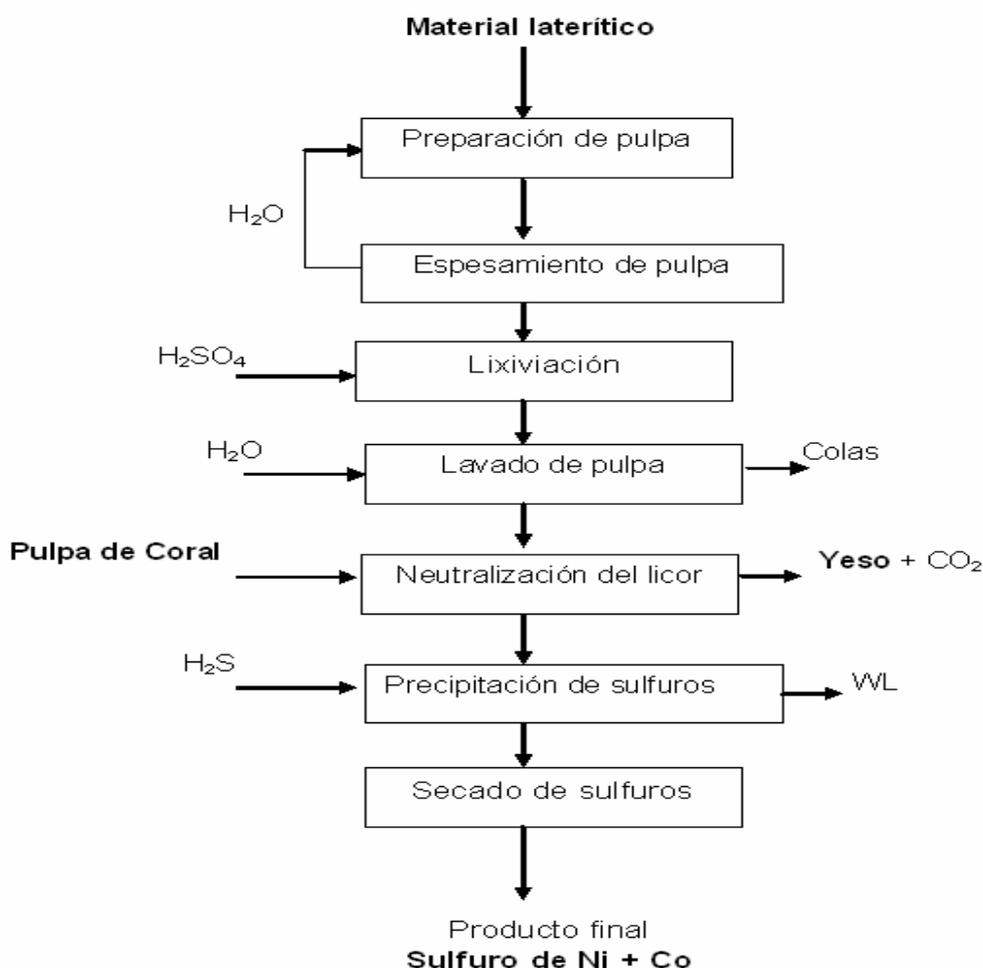


Figura 1. Esquema de las principales etapas del proceso de LAP.

La materia prima fundamental del proceso LAP son las lateritas de típico color amarillo-pardusco que se extraen de los yacimientos ferroniquelíferos de la región de Moa y contienen alrededor de un 45 % de hierro, además de otros metales (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química de la laterita suministrada a la Planta de Preparación de Pulpa

Componentes	Rango de contenido (%)
Ni	0,8 – 1,87
Co	0,053 - 1,08
Fe	35,5 – 53,4
Mg	0,1 – 3,3
Mn	0,078 – 1,44
Cu	0,007 – 0,15
Al	2,23 – 5,99
Zn	0,01 – 3,031
Cr	0,81 – 3,59

El cieno carbonatado (coral) procedente de los yacimientos situados en la bahía de Moa es de color gris claro, con restos de conchas de organismos marinos que son eliminados en el proceso de beneficio del coral, donde se convierte en una pulpa cruda, espesa, con 15 a 25 % de sólido, que se utiliza para la neutralización del licor crudo (pH=2) procedente de la Planta de Lavaderos para llevarlo a un pH=2,6 y de esta forma garantizar la eficiencia de precipitación, ya que el ácido libre en el licor tiene un efecto negativo en la precipitación de los sulfuros.

El yeso, en estado sólido, se obtiene como desecho de la Planta de Neutralización y se envía a la Planta de Lavaderos para recuperar el Ni y el Co contenido en él. Es producto de la reacción de neutralización:



El sulfuro de Ni + Co es el producto final del proceso y se obtiene en autoclave a partir de la precipitación del Ni y el Co en el licor, en presencia de H₂S.

Se analizaron pulpas lateríticas extraídas del fondo de un sedimentador convencional (TK-B) y de otro (TK-D) al que se adiciona un floculante para provocar la formación de agregados de partículas de mayor tamaño y peso que las partículas individuales, con el fin de incrementar la velocidad de sedimentación y por consiguiente, disminuir el tiempo de residencia en el sedimentador. Las muestras de cieno carbonatado, yeso y sulfuro de Ni+Co fueron tomadas directamente del proceso tecnológico, en condiciones normales de operación (Tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de trabajo y propiedades de las suspensiones utilizadas

Suspensión	pH	T (°C)	Concentración de sólido (%)	Densidad de la suspensión, ρ (g/cm ³)	Gravedad específica del sólido, Gs
Laterita TK-B	6,12	28,9	47,47	1,513	3,55
Laterita TK-D	6,20	28,9	43,14	1,445	3,55
Cieno carbonatado	7,02	29,4	39,34	1,313	2,58
Yeso	2,52	28,8	31,33	1,213	2,32
Sulfuro de Ni+Co	3,60	30,3	19,20	1,179	5,15

Métodos y técnicas

En las determinaciones de la composición química de la pulpa laterítica se empleó un espectrómetro secuencial de Florescencia de Rayos X (FRX), Phillips PW 1480, utilizando radiación de rayos X con Rn tipo PW2182/00, con un régimen de 3 000 W y 100 kV al vacío con colimador fino. Para el yeso, el cieno carbonatado y el sulfuro de Ni + Co se utilizó el Método de Absorción Atómica. La microscopía óptica ordinaria se realizó con un microscopio binocular tipo TECHNIVAL, modelo Axiolab Pol de la Carl Zeiss, valorándose las características físicas más sobresalientes de las muestras.

Para las determinaciones mineralógicas se empleó la Difracción de Rayos-X (DRX) según método policristalino utilizando el difractor de la Philips, modelo PW 3710. En el proceso de lectura e interpretación de los difractogramas se utilizaron los softwares APD (Philips) y el *Xpert HighScore 1b*, 2002, con la base de datos de la ICDD (*Internacional Center for Diffraction Data*) de 1998.

En la estimación cuantitativa de los minerales se empleó el software Autoquan de la *Seifert X - Ray Technology* (Versión 2.26) del 2001. Las técnicas de ensayos térmicos (ATD, TG, DTG) se ejecutaron con el modelo *PL-STA Thermal Science*, con analizador térmico simultáneo STA 1000/1500, de la *Stanton Rederoff Ltd.* con velocidad de calentamiento de 20 °C/min, temperatura inicial de 25 °C y final de 1 100 °C.

Para las técnicas de espectroscopía infrarroja (IR) las muestras fueron preparadas con bromuro de potasio (KBr) como dispersante. Se empleó el espectrofotómetro modelo 1760 X FT-IR, de la *Perkin Elmer*, con registros de banda espectral de 4 000 a 400 cm⁻¹, con mediciones cada 4 cm⁻¹. Los datos fueron obtenidos y procesados por el software Spectrum FT-IR 2.0, de la *Perkin Elmer*.

El análisis granulométrico de las suspensiones industriales necesitó de tres etapas de estudio:

1. Análisis del tamizado convencional, para determinar la granulometría mayor de 0,045 mm (325 mesh); por tamizado vía húmeda, empleando un juego de tamices de la serie ASTM con las siguientes aberturas: 0,85; 0,3; 0,15; 0,06; 0,09; 0,075 y 0,045 mm.
2. La determinación del contenido de las partículas menores de 0,045 mm en el sulfuro de Ni + Co, empleando un analizador de tamaños HORIBA LA – 910.
3. Aplicación de un modelo capaz de describir la distribución de tamaño de las partículas de los materiales objeto de estudio.

En la tercera etapa se comprobó si el modelo matemático obtenido por Pérez (2004) para describir la distribución de tamaño acumulativa de las partículas sólidas en la laterita era capaz de reproducir la granulometría de otros minerales del proceso. El modelo está definido por la expresión 2:

$$Yb = A + B * Dpb - \frac{C}{Dpb} \quad (2)$$

Donde:

Yb: Fracción másica de partículas cernidas en cada tamiz.

Dpb: Diámetro de partículas que han pasado por el tamiz (cernido), mm.

A, B y C: coeficientes empleados según las condiciones definidas por Pérez (2004) en las muestras minerales en estudio.

Para las mediciones de viscosidad en las pruebas reológicas se utilizó el viscosímetro Rheotest II, de fabricación alemana.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición química de las muestras

Los compósitos de materia prima mineral que ingresan al proceso LAP poseen contenidos de Fe en el orden de 35,5 a 53,4 %, incluyendo otros componentes como el Al (de 2,23 a 5,99 %) y el Mg (de 0,1 a 3,3 %).

En general, no se detectaron diferencias químicas significativas entre las dos pulpas lateríticas analizadas (Tabla 3), pero sí resultaron de interés las características mineralógicas de éstas, pues se ha observado que pulpas con composiciones químicas parecidas tienen diferentes comportamientos reológicos, lo que se explica por la presencia en ellas de distintas fases mineralógicas, lo cual ha sido reportado por Cerpa *et al.* (1999, 2001).

Por otra parte, se comprobó que el empleo de floculante no cambia la composición química de las pulpas, ya que su adición solamente induce la estructuración de las partículas en la suspensión.

Tabla 3. Composición química de las pulpas lateríticas (% en peso)

Componentes	Muestras	
	Pulpa TK-B	Pulpa TK-D
Ni	1,28	1,25
Co	0,124	0,134
Fe	45,6	43,6
Mg	0,88	0,92
Al	4,24	4,35
SiO ₂	5,09	6,47
Cr	1,93	1,75
Mn	0,75	0,96
Cu	0,013	0,013
Zn	0,034	0,030

Los análisis químicos confirmaron la composición carbonatada del cieno y que el yeso es una fase cálcica que se forma como un producto del proceso de neutralización del licor del proceso LAP.

El sulfuro de Ni + Co, producto final del proceso LAP, reveló un 52,26 % de Ni y 5,83 % de Co, valores que están dentro de los rangos establecidos para su comercialización (Tabla 4).

Tabla 4. Composición química del yeso, cieno carbonatado y el sulfuro de Ni + Co (% en peso)

Componentes	Muestras		
	Yeso	Cieno carbonatado	Sulfuro Ni + Co
Ni	0,616	0,036	52,26
Co	0,07	0,007	5,83
Fe	0,023	0,003	1,60
Mg	2,57	1,21	0,06
Mn	0,36	0,15	0,02
Cu	0,268	0,003	0,07
Zn	0,02	0,01	1,56
Ca	20,95	36,87	0,05
Cr	0,036	0,44	0,014
Al	1,99	0,99	0,56

Composición mineralógica de las pulpas

En las determinaciones mineralógicas se detectó que la suspensión de laterita proveniente del tanque TK-B prácticamente no tiene gibbsita, fase que en la suspensión del tanque TK-D alcanza un 8 %, con pequeñas diferencias en las cantidades de los óxidos de Fe, maghemita y magnetita (Figuras 2 y 3).

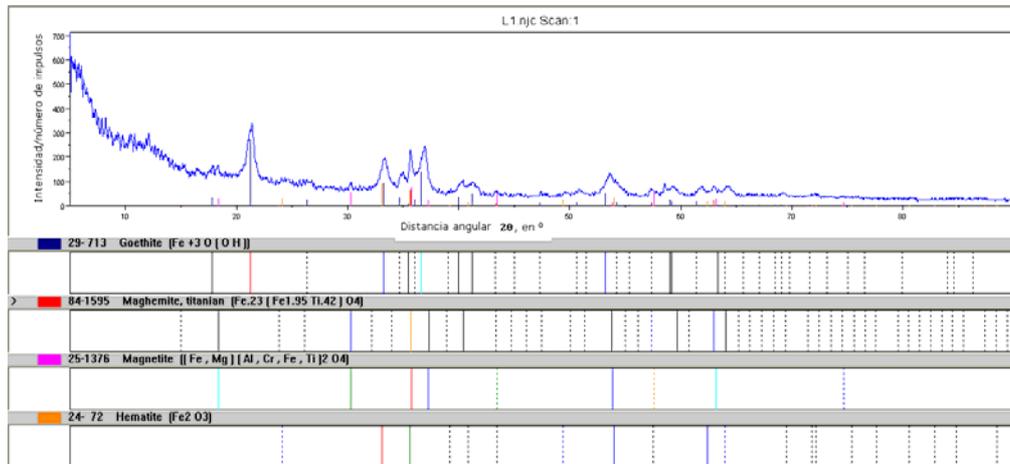


Figura 3. Difractograma de la pulpa laterítica del tanque TK-D (L2) empleada en el proceso LAP.

El termograma (curva de ATD, Figura 4) del material laterítico del sedimentador TK-B exhibe el típico pico endotérmico de la goethita (FeO(OH)), próximo a los 300 °C, que se atribuye al proceso de deshidroxilación de esta fase.

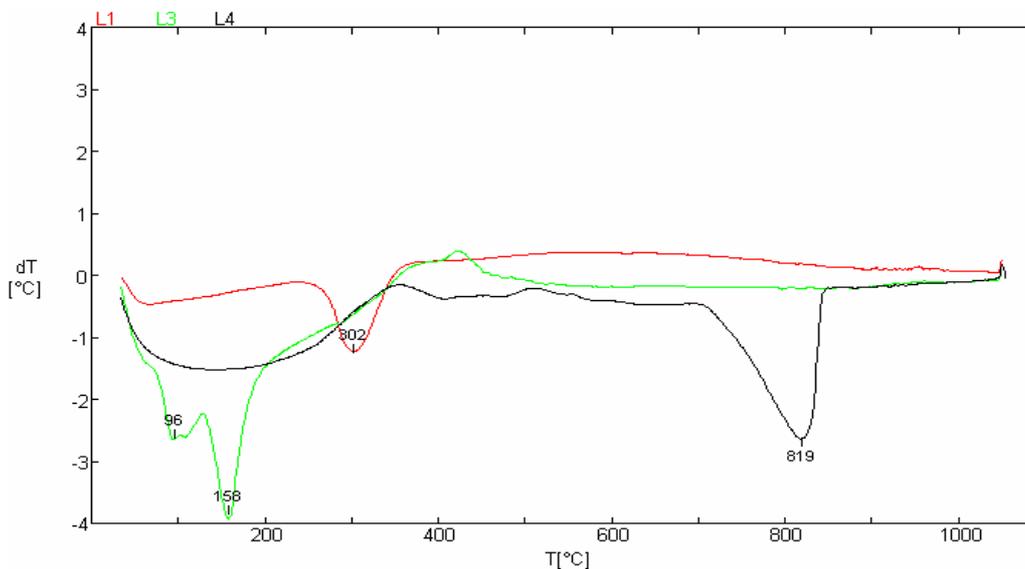


Figura 4. Curvas de ATD de laterita (L1), yeso (L3) y cieno carbonatado (L4).

Los espectros IR de las lateritas (Figura 5A) muestran las bandas de transmitancia a los 802 y 908 cm^{-1} pertenecientes a la goethita, y la banda 1 637 cm^{-1} atribuible a la gibbsita, siendo más notable en la muestra de la pulpa laterítica del tanque TK-D; la banda 3 159 cm^{-1} indica la presencia de H_2O en estas muestras.

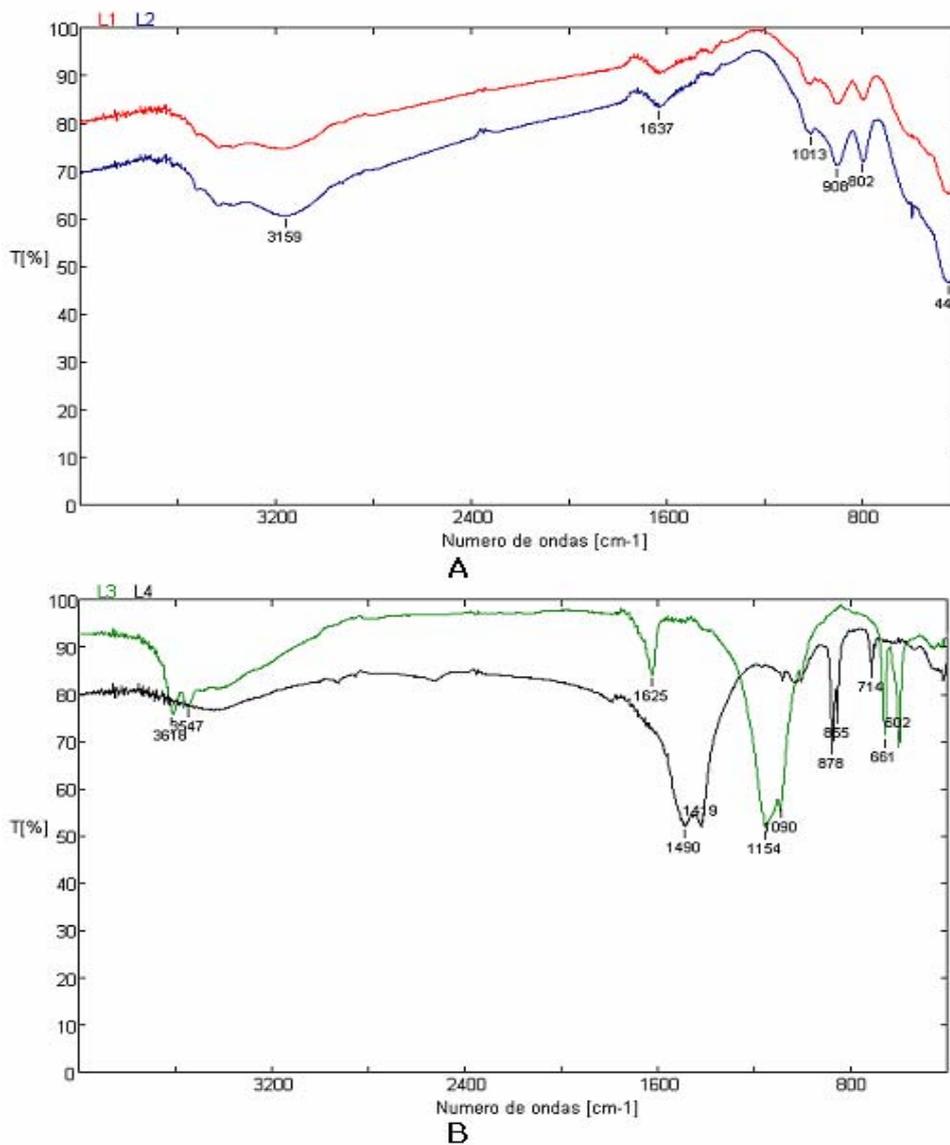


Figura 5. Espectros infrarrojos, sección A: lateritas (L1, L2), sección B: yeso (L3), cieno carbonatado (L4).

Varios autores (Cerpa *et al.* 1999, Quintana & González 1984, Rojas 2001, Falcón 2006) han determinado que en la laterita cubana la goethita constituye la fase mineralógica principal, acompañada de otras fases secundarias como la gibbsita, la serpentina, la maghemita, la magnetita y otras en menores proporciones.

Cerpa *et al.* (2001) comprueban que el valor de la viscosidad aparente de suspensiones de laterita se incrementa con el aumento de la

relación goethita/serpentina, lo cual sugiere que la goethita tiene una interacción más fuerte que la serpentina como resultado de un tamaño de partícula más pequeño que favorece la aparición de flóculos o grumos (Quintana 1984) y una mayor interacción partícula – partícula (L. Garcell, com. esc. 2004) dando lugar a la formación de una microestructura diferente. Esta microestructura puede también estar afectada por el pH de la suspensión y, en particular, por el punto isoelectrico (p.i.e) o por el punto de carga cero (p.c.c) de la misma. Aunque en este trabajo no se realizaron determinaciones del p.i.e ni del p.c.c, es conocido que la variación en los contenidos de las fases mineralógicas explica el amplio rango de valores de los parámetros reológicos observados en las suspensiones de laterita (Cerpa & Garcell 1998, Cerpa *et al.* 1999, Cerpa *et al.* 2001, Garcell *et al.* 1998).

El cieno carbonatado de la bahía de Moa posee un elevado contenido de carbonato de calcio, el cual en condiciones naturales supera el 80 % pudiendo alcanzar entre un 88 y 90 % luego de ser beneficiado, por lo que constituye un material adecuado para la neutralización de la solución ácida del proceso LAP. Mineralógicamente, está constituido por las modificaciones polimorfas de CaCO_3 , calcita y aragonito con una buena cristalinidad (Figura 4). La curva de ATD expone un intenso pico endotérmico a los 819°C , atribuible a la disociación química de los polimorfos, principalmente aragonito, mientras el espectro IR muestra bandas de transmitancia a los $714, 855, 878, 1419, 1490\text{ cm}^{-1}$, que confirman la presencia de las fases carbonatadas.

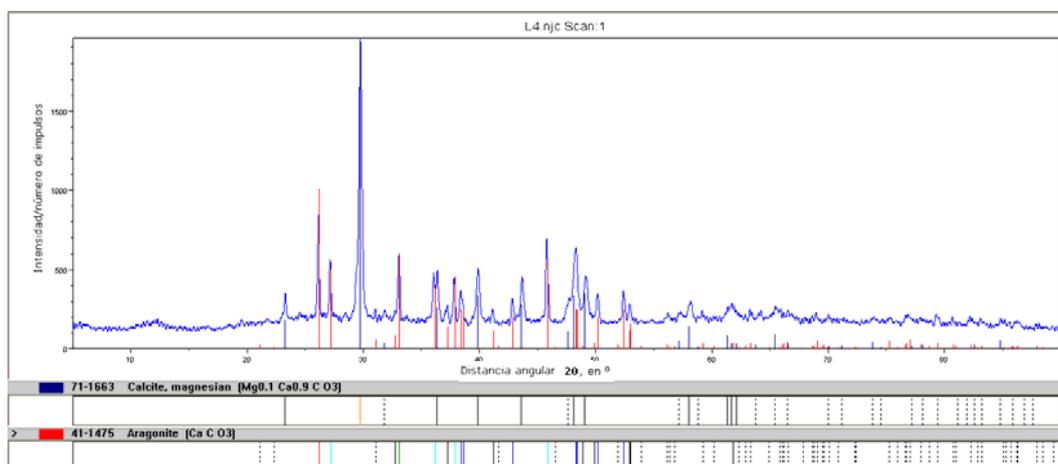


Figura 6. Difractograma del cieno carbonatado empleado en el proceso LAP.

Una fase de sulfato de calcio hemihidratado, denominada bassanita, se identificó en la suspensión de yeso (Figura 7). Esta fase se forma en la etapa de lixiviación y neutralización del proceso LAP. Presenta dos picos endotérmicos próximos a los 100 °C de la pérdida del agua en dos etapas contiguas y otro a los 160 °C de la deshidratación final. El espectro IR permitió definir con más precisión la fase de bassanita en relación con la de yeso, pues además de mostrar para ambas nítidas bandas a los 3 618 y 3 547 cm^{-1} atribuibles al modo de ocurrencia de la deshidratación inicial, presenta una sola banda débil a los 1625 cm^{-1} relacionada con el modo de vibración de enlaces O–H, donde el yeso posee dos; además la definen otras bandas a los 1 154, 1 090 661 y 602 cm^{-1} propias de las fases sulfatadas hidratadas.

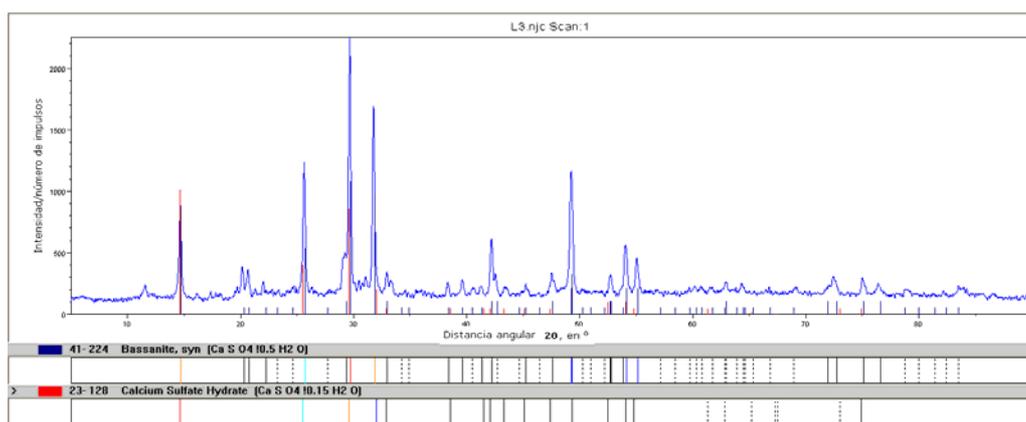


Figura 7. Difractograma del yeso asociado a la etapa de neutralización del proceso LAP.

En el producto final (Figura 8) la fase detectada de sulfuro de Ni es la millerita, con algo de cattierita (CoS_2), una fase de sulfuro de Co reportada por Grice & Ferguson (1974) y Bideaux *et al.* (1990).

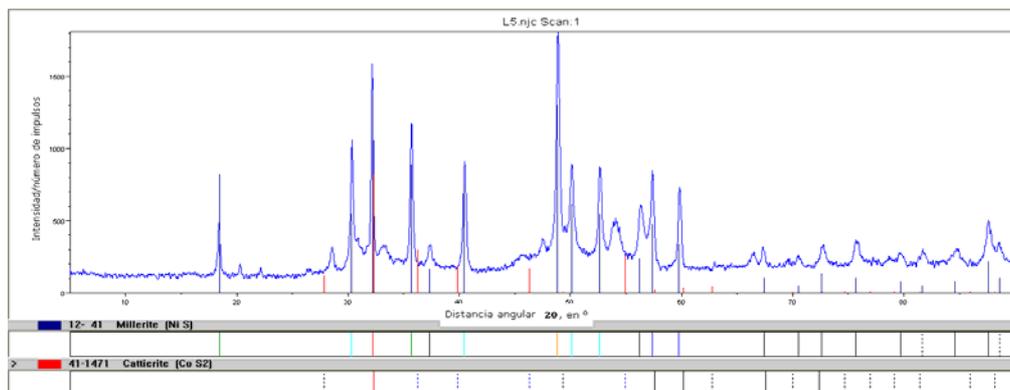


Figura 8. Difractograma del sulfuro de Ni + Co en el proceso LAP.

Distribución de tamaño de partículas minerales

Se pudo determinar que la pulpa cruda de laterita posee un 30 % de partículas mayores de 0,045 mm; por tanto, las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, así como su comportamiento reológico.

Existen varios modelos para describir la distribución granulométrica de partículas sólidas en procesos de reducción y de clasificación de tamaño. Entre ellos se encuentran los modelos de Gaudin- Schumann, de Rosin-Rammler-Sperling, de Gaudin-Meloy y de otros autores como Falcón (2006); pero se ha comprobado que ninguno es capaz de describir la granulometría de las pulpas lateríticas (Pérez *et al.* 2009), la cual, en parte, depende del proceso natural de intemperismo químico que sufre el mineral.

Los datos experimentales de las suspensiones minerales estudiadas se ajustan al modelo de Pérez (2004) excepto para la suspensión de sulfuro de Ni + Co (Tabla 5), ya que su coeficiente de regresión es inferior a 0,90.

Tabla 5. Valores de los coeficientes de la ecuación 2 para las muestras minerales indicadas

Muestras	A	B	C	R
Laterita (TK-B)	0,95965	0,00624	0,00867	0,94041
Laterita (TK-D)	0,92298	0,08556	0,00660	0,99314
Cieno carbonatado	1,04746	-0,04762	0,01441	0,99515
Yeso	1,04424	-0,02368	0,01757	0,98098

Al valorar la distribución de tamaño de partículas de todas las suspensiones minerales se tuvieron en cuenta los valores de los parámetros A, B y C definidos por Pérez (2004) y el uso un juego de tamices completo que siguiera el módulo de $\sqrt{2}$ como recomiendan Rosabal & Garcell (1988) para poder incluir la suspensión de sulfuro de Ni + Co en la valoración (Figura 9).

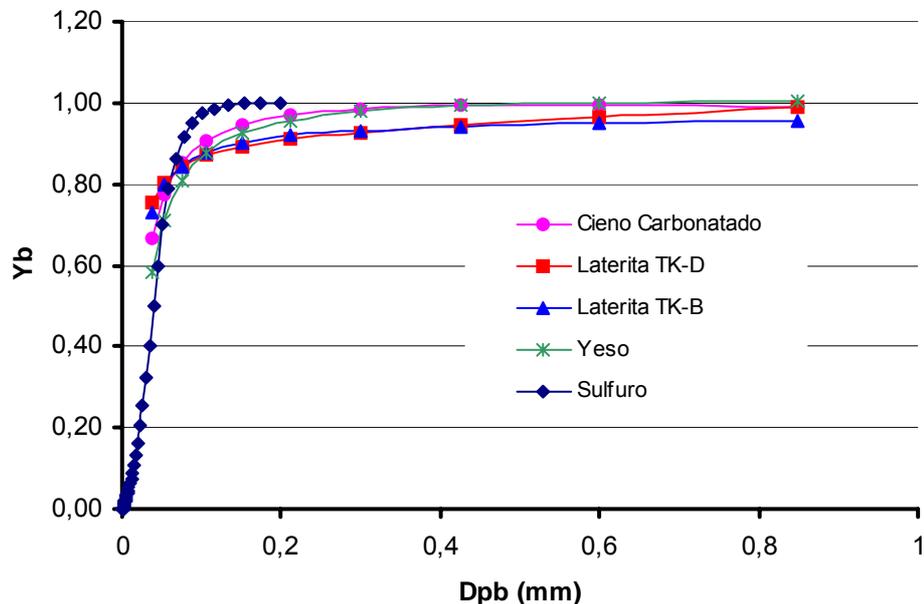


Figura 9. Distribución granulométrica de las suspensiones industriales asociadas al proceso LAP en Moa.

Como puede observarse, la distribución granulométrica en las suspensiones de laterita (pulpa laterítica) es muy similar, a pesar de que en el tanque TK-D se adiciona un floculante. El yeso y el cieno carbonatado presentan granulometrías similares, pero con mayores tamaños de partículas que las pulpas lateríticas. Las partículas de todos estos materiales tienen un comportamiento propio de sistemas polidispersos, en cambio las partículas de sulfuro de Ni + Co están más cercanas a la de un material monodisperso, dada la uniformidad de su tamaño.

Comportamiento reológico de las suspensiones industriales

Las curvas de flujo de los materiales estudiados permiten definir su comportamiento reológico (Figura 10). Como era de esperar, las suspensiones lateríticas y de cieno carbonatado se comportan como flujos no newtonianos con plasticidad, debido a su carácter de materiales polidispersos, con un predominio de granulometría fina (partículas menores de 0,045 mm), lo cual corrobora lo obtenido en trabajos anteriores (Avramidis & Turian 1991, Cerpa & Garcell 1998, Zamora 2003, Rivas & Colás 2005). Las curvas de flujo se describen por

los modelos de Bulkley–Herschell y de Newton, respectivamente, según las expresiones:

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

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

Los parámetros reológicos, según la aplicación de los modelos Bulkley–Herschell y de Newton (Tabla 6), evidencian que la suspensión de laterita es la que presenta mayor concentración de sólido, lo que explica el incremento de interacción entre partículas y, por consiguiente, una mayor estructuración de la fase sólida. Por otra parte, el cieno carbonatado, con una menor concentración de sólidos y tamaños de partículas mayores que las pulpas lateritas forma microestructuras más débiles, de ahí que su curva de flujo posea valores de esfuerzos cortantes inferiores a la laterita. La suspensión de sulfuro de Ni + Co exhibe un comportamiento newtoniano, lo cual se atribuye a su baja concentración de sólidos, a un mayor contenido de partículas superiores a 0,045 mm y a su pH.

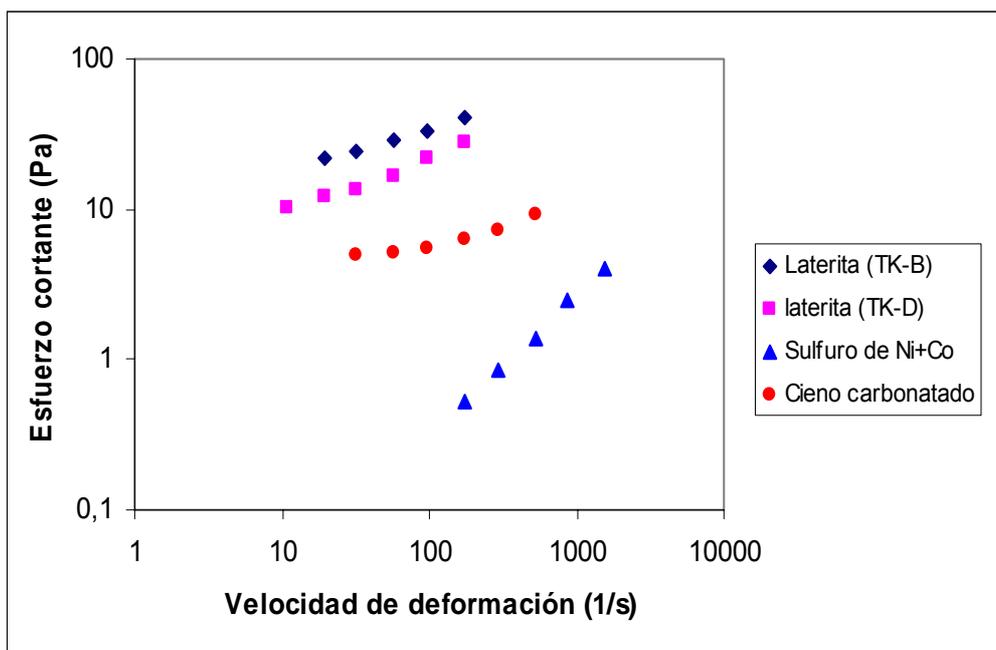


Figura 10. Curvas de flujo de las suspensiones industriales del proceso LAP de Ni + Co.

Tabla 6. Parámetros reológicos de las suspensiones industriales

Parámetros reológicos	Muestras			
	Laterita TK-B	Laterita TK-D	Cieno Carbonatado	Sulfuro de Ni + Co
Pa	13,4159	7,2515	4,5467	...
k (Pa*s^n)	1,5725	0,5941	0,0150	...
n	0,5515	0,6881	0,9166	...
(Pa*s)	0,0026
R	0,9991	0,9993	0,9994	0,9973
pH	6,12	6,20	7,02	2,52
% sólidos	47,47	43,14	39,34	19,20
T (°C)	28,9	28,9	29,4	28,8

CONCLUSIONES

Los análisis químicos realizados a los materiales estudiados confirman la naturaleza ferruginosa de las muestras de laterita, cuyos contenidos de hierro están en el orden de 43-46 %. El cieno carbonatado es esencialmente un carbonato de calcio con un 36,87 % de calcio en su composición; en tanto la muestra de yeso es básicamente sulfato de calcio con un contenido de 20,95 % de calcio. El producto final, sulfuro de níquel + cobalto, está constituido por un 52,26 % de Ni y un 5,83 % de Co.

Las muestras industriales de lateritas están constituidas, fundamentalmente, por minerales de hierro: goethita, como fase mineralógica principal, con maghemita, hematita, gibbsita y serpentina como fases secundarias. En el cieno carbonatado el carbonato de calcio está en forma de aragonito y calcita, mientras que el yeso se identifica en la forma mineralógica de bassanita. El sulfuro de Ni + Co está constituido básicamente por la fase mineralógica millerita.

La composición mineralógica determina, en gran medida, la distribución de tamaño de partículas en las suspensiones analizadas. Las muestras de laterita, de cieno carbonatado y de yeso son notablemente polidispersas y están compuestas, fundamentalmente, por partículas finas (menores de 0,045 mm). En cambio, el sulfuro de Ni + Co está constituido por partículas con una distribución de tamaño más próxima a la de un material monodisperso. El modelo matemático definido por Pérez (2004) describe adecuadamente la distribución de tamaño acumulativa de las partículas sólidas tanto de las lateritas, co-

mo del cieno carbonatado y del yeso, no resultando así para el sulfuro de Ni + Co.

Las partículas finas presentes en el material laterítico, el cieno carbonatado y el yeso son las causantes de sus plasticidades, provocando en sus suspensiones comportamientos reológicos no newtonianos que pueden ser ajustados al modelo de Bulkley– Herschel. En cambio, el sulfuro de Ni + Co por presentar un mayor contenido de partículas superiores a 0,045 mm y una menor concentración de sólidos da lugar a un comportamiento newtoniano, ajustándose bien al modelo de Newton.

AGRADECIMIENTOS

Se desea expresar el agradecimiento de los autores al Departamento de Geología y el Instituto de Geociencias de la Universidad de Pará, Belem, Brasil, por el procesamiento de las muestras minerales en DRX, DTA e IR, así como al Departamento de Tecnología de la Empresa Pedro Sotto Alba de Moa, Cuba, por su apoyo en los trabajos de muestreo y de caracterización granulométrica y química de los minerales seleccionados.

REFERENCIAS

- AVRAMIDIS, K.S. & TURIAN, R.M. 1991: Yield stress of laterite suspensions, *J. Colloid Interface Sci.* 143(1): 54-62.
- BIDEAUX, R. A.; ANTHONY, J. W.; BLADH, K. W. & NICHOLS, M. C. 1990: *Handbook of Mineralogy*, Mineral Data Publishing, Tucson Arizona, USA, by permission of the Mineralogical Society of America.
- CERPA, A.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; SERNA, C. J. & TARTAJ, P. 2001: Relationship between the colloidal and rheological properties of mineral suspensions *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 79: 608-611.
- CERPA, A.; TARTAJ, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; REQUENA, J.; GARCELL, L. & SERNA, C. J. 1999: Mineral- content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions, *Clays and Clay Minerals* 47: 515-530.

- CERPA, A. & GARCELL, L.R. 1998: Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas. Evento Metalurgia'98 [Memorias] Ciudad de La Habana.
- CHENG, D.C.H. 1980: Viscosity concentration equations and flow curves for suspensions *Chemistry and Industry* 17: 403-406.
- FALCÓN, J. 2006: El beneficio de minerales y la separación de fases en las tecnologías limpias de la industria minero-metalúrgica. En: VII Clean Technology In The Mining Industry [Memorias]. Buzios, Río de Janeiro Brazil, Octubre.
- GARCELL, L.R.; DÍAZ, A. & SURÍS, G. 1988: *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana.
- GARCELL, L.R.; MORALES, M. P.; ANDRES-VERGES, M.; TARTAJ, P. & SERNA, C. J. 1998: Interfacial and rheological characteristics of maghemite aqueous suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 205: 470-485.
- GRICE, J. D. & FERGUSON, R. B. 1974: Crystal structure refinement of millerite (B-NiS). *The Canadian Mineralogist* 12: 248-252.
- PÉREZ, G. L. 2004: Efecto de la temperatura y de la distribución de tamaño de las partículas sobre la correlación entre las propiedades reológicas y coloidquímicas de las suspensiones lateríticas. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba [Tesis de Maestría] 73 p.
- PÉREZ, G. L.; CARDERO, Y. & GARCELL, L.R. 2009: Modelo matemático para describir la distribución granulométrica de la fase dispersa de las suspensiones de laterita. *Tecnología Química* XXIX (2): 84-96
- QUINTANA, R. & GONZÁLEZ, R. 1984: Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa: análisis granulométrico. *Minería y Geología* II(3): 135-146.
- RIVAS, S. & COLÁS, E. 2005: Efecto de la granulometría sobre la reología de suspensiones de Cieno Carbonatado. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba [Trabajo de Diploma] 61 p.
- ROJAS-PURON, A.L. 2001: Evidencias a favor de que la goethita es la principal portadora de níquel en los horizontes lateríticos de las cortezas ferroniquelíferas. *Minería y Geología* XVIII (3-4) :21-31.
- ROSABAL, J.M. & GARCELL, L.R. 1988: *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. Tomo I. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.

SKELLAND, A.H.P. 1970: *Non newtonian flow and heat transfer*. Ediciones Revolucionarias, La Habana.

ZAMORA, N.L. 2003: Caracterización reológica de los cienos carbonatados que se manejan industrialmente en Moa. ISPJAM. Santiago de Cuba [Trabajo de Diploma] 59 p.

Liudmila Pérez García

liudmila@fiq.uo.edu.cu

Máster en Ciencias Químicas. Profesora Asistente. Departamento de Ingeniería Química, Sede Julio Antonio Mella, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Leonel Garcell Puyáns

garcell@fiq.uo.edu.cu

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Ingeniería Química, Sede Julio Antonio Mella, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Arturo Rojas Purón

artrojaspuron@ismm.edu.cu

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Auxiliar. Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.

Rômulo Simões Angélica

angelica@ufpa.br

Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Departamento de Petrología y Geoquímica, Centro de Geociencia de la Universidad Federal de Pará, Belem, Brasil.