

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS DE LAS PULPAS DE LIMONITA

José Castellanos Suárez¹, Abdel Casanova Gómez², Aida Álvarez Alonso³, Titular, Ing. Yania Cabaleiro Piedra³, Maritza Cortés Miranda³.

⁽¹⁾Investigador Titular, Asesor Científico, Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Carretera de Varona, km 1^{1/2}, No.12028, Boyeros, La Habana, Cuba. ⁽²⁾Investigador, CIPIMM, ⁽³⁾Directora Adjunta, Unión Geominsal, Guanabacoa

RESUMEN

La Tecnología CIPIMM1, basada en el uso de aditivos, aplicada industrialmente en la sedimentación-compactación (espesamiento de la pulpa limonítica), incrementó el % de sólidos en 1-3% y la productividad del sedimentador convencional en 1,4 veces. Con el objetivo de conocer el efecto del aditivo sobre las propiedades físico-químicas de los sólidos en la pulpa, se investigó y determinó el punto de carga cero (PZC) de los sólidos a escala de Laboratorio y se compararon los resultados con el PZC determinado en la pulpa de fondo del sedimentador.

Las partículas (coloides) del mineral en presencia de aditivos se modifican en la superficie, creándose numerosos centros activos con cargas negativas, que superan en 2,3 veces a los centros activos de las partículas sin aditivos.

Como resultado de ello, las partículas coloidales atraen y se cargan en su superficie con ión Hidronio (H^+), lo que produce un aumento del pH en el agua ascendente y en el reboso del sedimentador. Además se observó que en un período de 5 a 6 días la limonita en contacto con los aditivos, se estabiliza y adquiere un PZC de 6.1, mientras que la limonita (sin aditivos) presenta un PZC=6.56.

La importancia del PZC es que a pH superiores a 6,1, las partículas tendrán cargas negativas, mientras que a pH inferiores a 6,1 tendrán cargas positivas, que determinan las condiciones de trabajo del sedimentador, así como el comportamiento de los sólidos dentro del sedimentador. En el trabajo se describe el procedimiento utilizado para la determinación del PZC. En el trabajo se discute una propuesta del mecanismo de compactación de la pulpa en el sedimentador.

ABSTRACT

CIPIMM1 Technology based on the use of additives, was applied industrially in the sedimentation-compaction (limonitic thickening of the pulp), the % of solids increased to 1-3% and the productivity of conventional thickener in 1.4 times. In order to know the effect of the additive on the physical-chemical properties of the solids in the pulp was investigated and determined the Point of Zero Charge (PZC) of solids in the laboratory scale and was compared with the results determined PZC pulp sample from the bottom of the settler. The particles (colloid) in the presence of the mineral additives are changed in the surface, creating numerous negatively charged active centers, which exceed 2.3 times to the active centers of the particles without additives. As a result, the colloidal particles attract and loaded on its surface with hydronium ion (H^+), resulting in an increased pH in the upward and in the water overflow from the settler. It was also observed that over a period of 5 to 6 days in contact with limonite additives, stabilized and takes a PZC of 6.1, while the limonite (without additives) presents a PZC = 6.56. The PZC importance is that at pH above 6.1, the particles will have negative charges, while a pH below 6.1 have positive charges, which determine the working conditions of the thickener, and the behavior of solids within settler. The paper describes the procedure used to determine the PZC and discusses a proposed mechanism pulp compaction in the settler.

INTRODUCCIÓN

Cuba posee grandes yacimientos de minerales de níquel, los cuales se procesan por 2 tecnologías: el proceso carbonato amoniacal y el proceso de lixiviación ácida a presión.

Una de las limitantes de la tecnología para la producción de níquel, es la calidad del mineral, la que determina en gran medida la preparación de la pulpa y su espesamiento.

En el proceso ácido, durante la preparación de la pulpa, la limonita se desagrega en agua, formando una suspensión con alrededor de 20% de sólidos, que se bombea unos 7 km hasta la planta de espesadores. La pulpa espesada, con alrededor de 45-47% de sólidos se bombea al precalentador y de éste a la autoclave.

Es conocido que el porcentaje de sólido de la pulpa espesada varía con la calidad del mineral. Un aumento de la densidad (con más de 47% de sólidos) de la pulpa de fondo del sedimentador para una misma calidad del agua, incrementa la viscosidad de la pulpa, dificultando el bombeo, por lo que se le adiciona agua, diluyendo la pulpa.

La velocidad de sedimentación y el perfil de % de sólidos en el sedimentador, son aspectos que se controlan en la planta.

Se han realizado innumerables investigaciones sobre el proceso de sedimentación, tomando como objetivo principal, el estudio de los factores y propiedades del mineral sobre la velocidad de sedimentación (Alfonso Olmo, E, 2009), (Castellanos Suárez, J.; Alfonso Olmo, E.; Álvarez Alonso, A, 2009), (Alfonso Olmo, E et.al, 2006), (Valdés, F, 1982), (Pérez García, L.; Garcell Payans, L.R. 2006), (Herrera, V. y Castellanos Suárez, J. 2005), (Castellanos Suárez, J. y Acevedo Del Monte, E. 2004), (Castellanos Suárez, J. 2005), (Iglesias, C et.al, 2005), (Valdés, F.L. 1984), (Pérez García, L. et.al, 2007), (Pérez García, L.; Garcell, L.R. 2006), (Tartaj, P et.al, 2000), (Cerpa, A et. al, 1999), (Cerpa, A. et.al, 1996), (Cerpa, A et. al), (Turro Breff, A et.al, 2003), (Cerpa, A. 2000), (Beyris Mazar, P.; Falcón Hernández, J. 2007), (García Romero, E.; Suárez B, M. 1999), (Herrera, V.; Alonso, J. y Marín, J. 2010). Todos estos estudios permitieron dar una explicación de algunas propiedades físico-químicas de las pulpas limoníticas, pero no brindaron soluciones prácticas que mejoraran el proceso.

Las investigaciones realizadas por el CIPIMM con el uso de aditivos (desde la década del 80), aunque permitieron mejorar la velocidad de sedimentación, no respondían de la misma forma al procesar diferentes minerales.

En los últimos 10 años, los investigadores del Centro dieron un nuevo enfoque y se propusieron nuevos objetivos en la investigación mediante el uso de aditivos combinados (Alfonso Olmo, 2009), (Castellanos Suárez, J, 2009), (Alfonso Olmo, E et.al, 2006), (Herrera, V. y Castellanos Suárez, J. 2005), (Castellanos Suárez, J. y Acevedo Del Monte, E. 2004), (Castellanos Suárez, J. y Acevedo Del Monte, E. 2004), (Iglesias, C et.al, 2005), (Herrera, V.; Alonso, J. y Marín, J, 2010), (Iglesias, C, 2006) (Álvarez Alonso, A, 2009). Los resultados de estas investigaciones demostraron que era factible incrementar la densificación de la pulpa y alcanzar de un 2-3 % de sólidos superior en la pulpa del fondo del sedimentador (Herrera, V. y Castellanos Suárez, J. 2005), (Herrera, V.; Alonso, J. y Marín, J., 2010), (Iglesias, C, 2006), (Álvarez Alonso, A, 2009), aunque no producía una mejora significativa en la velocidad de sedimentación. Por otra parte, se observó que se lograba obtener una pulpa formada por capas en la cama de mineral del sedimentador de manera similar al proceso convencional, pero resaltando que se alcanzaba en estas condiciones, una diferencia pequeña del % de sólido entre capas.

En el período comprendido entre el 2004 y el 2006 se corrieron pruebas de confirmación de laboratorio, planta piloto (CIPIMM y Moa) y a escala industrial en la planta, en Moa. Esta tecnología, conocida como CIPIMM 1, fue protegida mediante patente (Alfonso Olmo, E et. al, 2009), (Castellanos Suárez, J et.al, 2009), (Alfonso Olmo, E et.al, 2006) y en el 2006, se generalizó en la planta mediante un contrato de licencia entre el CIPIMM y Moa Nickel S.A.

La experiencia industrial ha confirmado las bondades de la tecnología, tanto en productividad como en el procesamiento de diferentes minerales, algunos de baja calidad, determinado por la velocidad de sedimentación-compactación y las propiedades reológicas de la pulpa.

Teniendo en cuenta que el CIPIMM dispone de una tecnología exitosa con un conocimiento experimental amplio, así como del escalado de la misma, se hizo necesario profundizar en los aspectos teóricos, con vista a ofrecer una explicación científica del mecanismo que rige el proceso de espesamiento de las pulpas limoníticas tratadas con aditivos. Para este fin, se propuso desarrollar un proyecto para el estudio de las propiedades físico-químicas de dichas pulpas

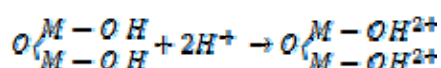
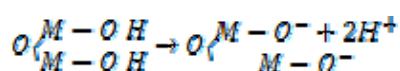
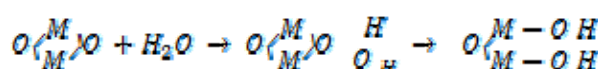
Antecedentes de las investigaciones realizadas con óxidos de hierro y la laterita cubana

Estudios anteriores

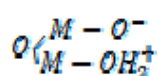
Innumerables estudios se han realizado para determinar las propiedades físico-químicas de los óxidos, usando diferentes técnicas, entre ellas el punto de carga cero del sólido (PZC) y el Zeta potencial ZP) (Valdés. F, 1982 ; Breevswma, A., Lyklema, J. 1973; www.zetameter.com; (Double layer Interfacial, wikipedia); (Morrison, S.R. 1971); (Preocanin, T and Kallay, N. 1998), (Avena, M.J. et.al, 1990); (Tourinho, F.A. et.al, 2002; Preocanin, T and Kallay, N; 2006); (González, A. et. al, 2008); (Ankomah, 1991); (www.worldbooks.com); (Wesolowski, D.J, et.al); (Pérez García, L et.al, 2005); (Montes, S. et.al., 2007); (San Polanco, M. et.al, 2005); (Pérez García, L. et.al., 2010); (Cerpa, A. et.al, 2001); (Cerpa, A. et.al 1999); (Rails back's, L.A. 2006,).

El punto de carga cero (PZC) para un mineral dado se define como el pH en cual la superficie tiene una carga neta neutral (Kosmulski, 2006), (Kralchevsky, P.A. et.al, 2009), (Vargas, R.), (Cristiano, E. et.al, 2011), (Somasundaran, P. et.al, 2009), (Rodríguez, L. 2006), (Rodríguez, L. 2006), (Salager, J.L., 1994), (Tambacz, E. 2009), (Fernández García, M. et.al, 2004), (Garcell, P.I. ,1998).

En el trabajo de Valdés (4, 10), se discute la interacción entre los óxidos hidratados y el agua. Estas interacciones se describen como:



En el caso en que la carga superficial sea anulada, el sistema se encuentra en estado de equilibrio y la superficie del óxido adquiere la forma:



Los estudios realizados de zeta potencial (Valdés, F., 1982), (Valdés, F.L. 1984) indicaron que habían 2 puntos donde ZP era cero (pH 3 y entre pH 6 y 7). La carga de la superficie de la partícula era positiva entre ambos pH (entre 3 y 6) y negativa a valores menores de 3 y superiores a 6.7.

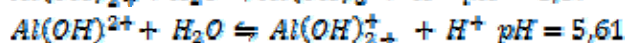
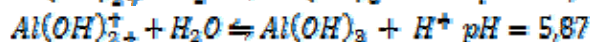
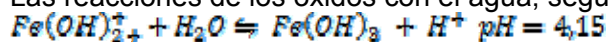
En los estudios de este investigador, además se reportó que la velocidad de sedimentación más alta se alcanzaba a pH 6.1, cercana al pH 6.7, donde el ZP = 0.

Es interesante observar que a este pH (6.1) también se obtuvo el volumen específico (m³/t) más pequeño de la pulpa espesada a las 24 h (10). En este caso, para el ajuste del pH se utilizó H₂SO₄. De acuerdo a este investigador, entre los pH 6,5 y 7,0 se crean las mejores condiciones para la sedimentación del mineral laterítico.

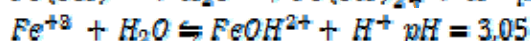
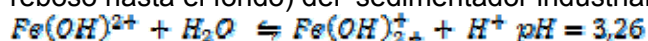
En la región de pH entre 2 y 6 se observó, en el caso de las pruebas con adición de H₂SO₄ una disminución en magnitud del potencial electrocinético de carga positiva, lo cual consideró evidente por la mayor adsorción específica de SO₄²⁻ en la superficie de las partículas de mineral.

Se concluyó que en el caso de esta pulpa, el potencial no sólo depende de [H⁺] y [OH⁻], sino de la adsorción SO₄²⁻ y de otros hidróxidos de diferentes cargas.

Las reacciones de los óxidos con el agua, según este autor y otros investigadores serían:



Estos resultados explicaron la disminución del pH hasta 4,6-5,7 en el perfil transversal (desde el reboso hasta el fondo) del sedimentador industrial (1975) (10, 54).



Estudios recientes de las propiedades de la superficie de las partículas realizados con pulpas limoníticas de moa.

Los estudios realizados de diferentes minerales de los yacimientos de níquel que procesa la planta (proceso ácido) (16, 57, 58, 59) indicaron un comportamiento diferente de cada muestra, en función del pH y del % de sólido, siendo determinante la composición mineralógica en las propiedades físico-químicas de las suspensiones. A pH cercano al punto isoeléctrico (p.i.c) de la suspensión se obtuvo una velocidad de coagulación máxima. Para determinar el p.i.c. se usó la técnica de Zeta Potencial.

Las muestras del Yacimiento Yamanigüey, con diferentes relaciones goethita/serpentina, varió el p.i.c. entre 4,8 y 8,4. Para las muestras de mineral de la Zona A (que procesa Moa), el p.i.c. varió entre 8 y 8,5, indicando que con el aumento del contenido de goethita, el p.i.c. se acerca al valor de la goethita pura de 8,4. Un aumento del contenido de serpentina disminuye el p.i.c. En este trabajo no se reporta la composición de los minerales investigados. La viscosidad más baja solo se logra a pH por debajo de 6. Otros autores (Double layer Interfacial, wikipedia) estudiaron la influencia de la calidad del agua en la preparación de las suspensiones.

Se estudiaron tres muestras de minerales de diferentes puntos del yacimiento de Moa. Se usó agua destilada para estudiar las propiedades de los mismos.

Se observó que en las tres muestras, que el tamaño de las partículas era menor en un 25% de la fracción de 75 µm, observándose distribuciones diferentes de tamaño de partículas. Estos autores determinaron el PZC de acuerdo al procedimiento dado por otros autores (www.zetameter.com).

Se observó que para pH < PZC, las partículas estaban cargadas positivamente y para pH mayores, cargadas negativamente, similar a como se reporta para oxihidróxidos férricos (Valdés, F.L. 1984) y para la maghemita (Garcell, P.I., 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se utilizaron muestras de mineral limonítico empleado en los estudios anteriores (Álvarez Alonso et.al, 2009) y (Breevswma, A., Lyklema, J. 1973) y una muestra de la pulpa espesada de un sedimentador industrial enviada a mediados del año 2010. La planta, además de la muestra de pulpa, envió agua industrial de la propia planta. Las características y comparación de los minerales se reportan en los trabajos anteriores (Álvarez Alonso et.al, 2009) y (Breevswma, A., Lyklema, J. 1973).

Para los estudios de las propiedades físico-químicas de las pulpas (sólidos en suspensión), se utilizaron las técnicas de titración (neutralización) másica continua y neutralización con dosificación de porciones de sólido para la determinación del punto de carga cero (PZC).

Técnicas potenciométricas utilizadas para determinar el pzc.

Titración másica adición de sólidos.

Se prepararon tres soluciones con agua destilada en las cuales se ajustó el pH inicial con hidróxido de sodio y ácido nítrico a 3, 7 y 8-10 (ácido, neutro y básico) y la fuerza iónica se fijó con nitrato de sodio 0,01M. Se tomó un vaso de precipitados (para cada medio) con 200 ml de la solución y se midió pH y el potencial inicial con un pH-metro Mettler Toledo S-20, mientras se mantuvo la solución en agitación. Luego se midió el pH y potencial detrás de cada adición de sólido. Las cantidades de sólido añadidas fueron 0.5, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30 gramos de mineral limonítico.

Titración másica por cantidades separadas.

Se preparan ocho frascos cónicos con 0.5, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30 gramos de mineral en 200 ml de solución con el pH y fuerza iónica fijados (pH= 3, 7, 10 y con adición de NaNO_3 (0.01M) como en la variante anterior. Se agitaron varias veces en el día durante los días de medición y se midieron los valores de pH y potencial cada día, después de 24 horas de preparadas las mezclas.

Preparación de la muestra de limonita tratada con y sin aditivo.

La pulpa fresca se preparaba en tambor, con un número pequeño de bolas, donde se desagregaba el mineral durante 30 min. La pulpa se tamizaba (-100 mesh), la pulpa producto finalmente contenía un 20% de sólidos. Se dosificaba el aditivo, se agitaba y se dejaba sedimentar el tiempo establecido (según el experimento). En la pulpa sin aditivo se preparaba de idéntica forma. En algunos experimentos se midió el pH del agua y del sólido, al inicio y al final.

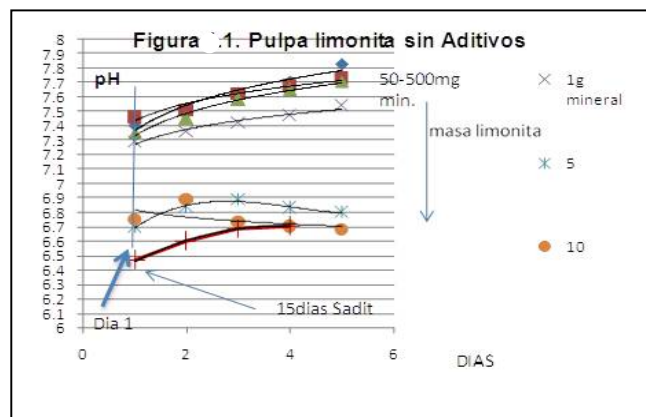
La pulpa después de terminado el tiempo de contacto se filtraba y el sólido se secaba por oreo. En los experimentos de evaluación del efecto de lavado y cinética de adsorción de Fe^{2+} y SO_4^{2-} , el sólido con y sin lavado, se secó también por oreo.

Propiedades físico-químicas de las pulpas crudas.

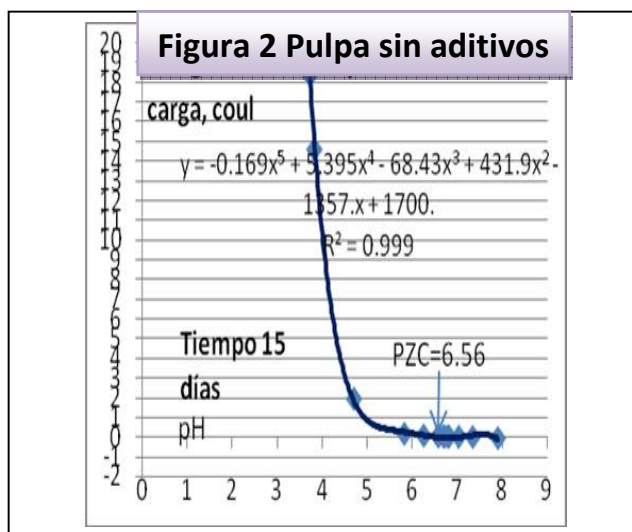
Se prepararon varias pulpas con diferentes contenidos de limonita. Se agitaron. A las 24, 48, 72, 96 y 120 horas, se le determinó el pH a cada pulpa. Se prepararon y procesaron los datos de pH contra masa de sólido para cada día.

El PZC se determinó por los procedimientos señalados y se reportan en las figuras 1 y 2. Como resultado del proceso de hidratación de la limonita, en la fase inicial las partículas con cargas negativas, adsorben lentamente ión hidronio hasta el equilibrio de cargas y sube el pH después de 1 día de contacto. Se observó la disminución del pH inicial con el peso de limonita. Con un peso mayor de limonita, el proceso es más rápido. Una vez alcanzado el equilibrio de cargas, (muestras con un peso de 5g y superior) se inicia el fenómeno de hidratación, adsorción de agua y de ión hidroxilo, liberando el H^+ , que disminuye el pH. Independiente del pH inicial de la pulpa de limonita, con un peso superior o igual a 5g/200ml agua, el pH tiende a estabilizarse en el pH 6.56 (punto de

carga cero-PZC). En la figura 1 se observa el comportamiento de la pulpa en contacto con el agua con dosis alta de limonita, en función del tiempo de contacto. Como se reporta, el pH disminuye, como resultado del proceso de adsorción de OH^- (formación de hidróxidos de Fe y Al) y liberación del H^+ al medio. (Valdés,1984) .

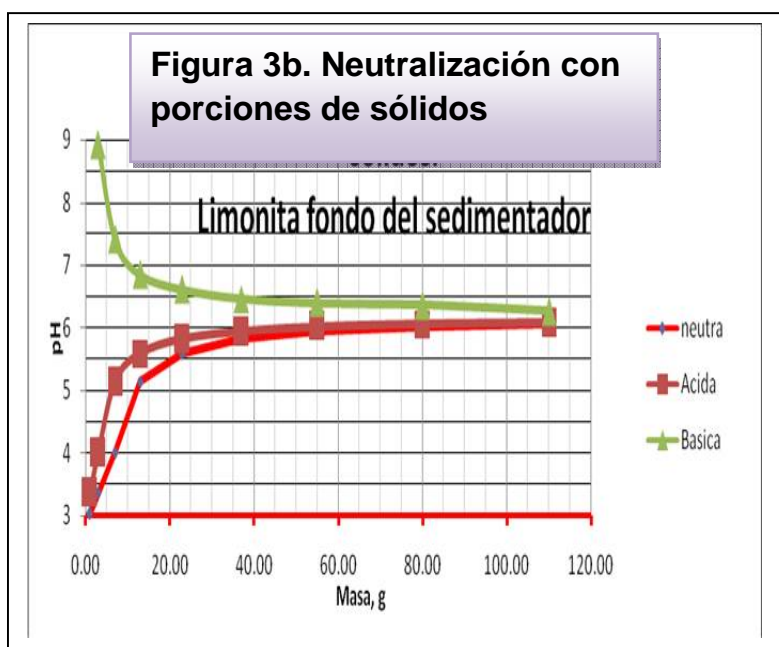
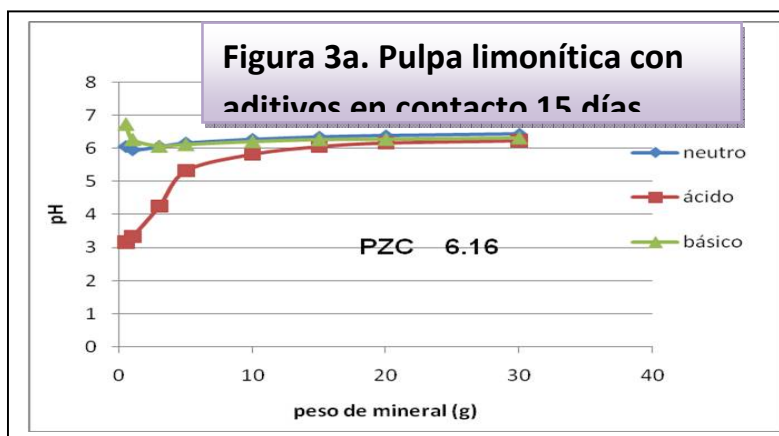


El punto de carga cero (PZC) de la pulpa limonítica se determinó mediante el procesamiento de los datos y se observa en la Figura 2. reportando el valor de $\text{PZC} = 6.56$. Las partículas coloidales a pH superiores al PZC tienen cargas negativas en la superficie, mientras a pH inferiores al PZC, presentarán cargas positivas o sea estarán cargadas con ión hidronio.



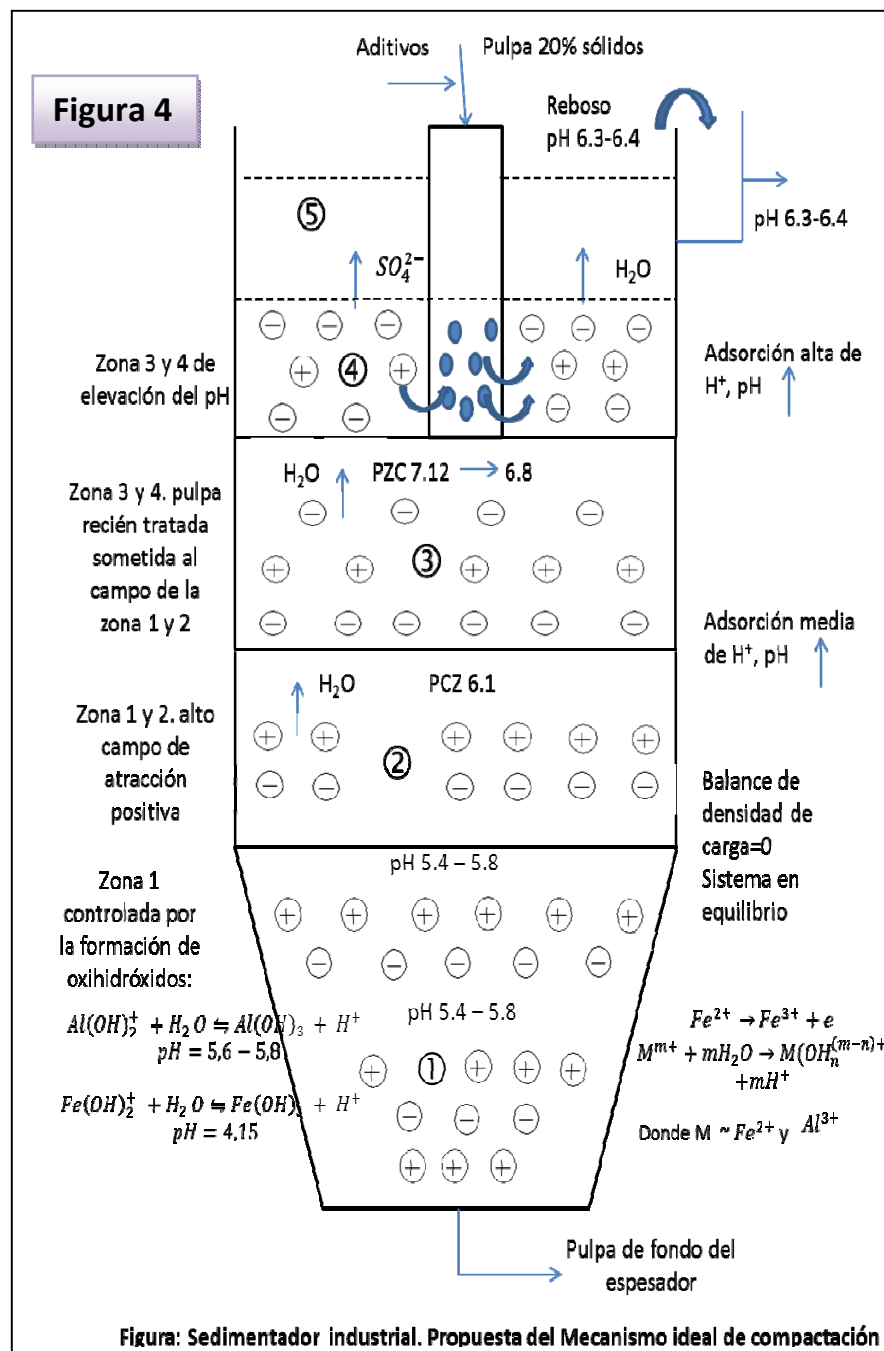
Los estudios se realizaron adicionando los aditivos (sulfatos de metales y ácido sulfúrico) a una pulpa con 20% de limonita. La pulpa se agitó y se mantuvo en contacto 15 días. En paralelo, se estudió una muestra de pulpa con aditivos tomada en el fondo del sedimentador industrial.

Los resultados se procesaron y se reportan en las figuras 3 a y b.



La determinación del PZC se realizaron a dos muestras de limonita preparadas en el laboratorio, con dos meses de diferencia, para determinar su repetitividad, reportando un PZC 6.1 y 6.16 y a una muestra tomada en el fondo del sedimentador, esta última con un PZC de 6.1.

Los valores del PZC son del mismo orden de 6.1, mientras que el PZC fue de 6.56 para la pulpa sin aditivos. Los estudios realizados de la cinética de adsorción de las sales y aniones adicionados, el comportamiento del PZC en el tiempo, el potencial de la superficie y la densidad de cargas (Informe de investigación 131, CIPIMM, 2012) permitió proponer un mecanismo de compactación de la pulpa (Figura 4).



La pulpa con aditivos a la entrada del sedimentador presenta una alta densidad de cargas negativas. A medida que desciende adsorbe ión hidronio, que produce un aumento del pH. Como resultado de ello, el pH del reboso sale con un pH 6.2-6.3.

Durante el proceso de sedimentación, los sólidos están en contacto con el agua que asciende, lavando el SO₄²⁻, lo que hace que se eleve la densidad de carga positiva en el sólido.



Los sólidos descienden en el sedimentador un aumento progresivo de la densidad de cargas positiva, hasta que se alcanza el equilibrio de cargas positiva y negativa (PZC 6.1). Bajo estas condiciones se favorece la adsorción de agua e ión hidroxilo, liberando ión H^+ , produce una disminución del pH hasta los valores donde ocurre las reacciones de formación de hidróxidos de Fe y Al. El sistema en su conjunto presenta una alta densidad de cargas positivas en la zona inferior del sedimentador (con un inventario de mineral de 11000 a 17000t), creando un campo fuerte de atracción (con cargas positivas) de las capas superiores de sólidos con densidad de cargas negativas, resultando favorecido el fenómeno de compactación de las capas de pulpa. Bajo estas condiciones variaciones de la calidad del mineral en un rango determinado, no afecta el proceso de compactación. Como se ha demostrado, es factible incrementar la productividad del sedimentador hasta 140%, con un % de sólidos más alto que el del sedimentador convencional sin aditivos. Un incremento de productividad en el sedimentador (sin el uso de aditivos) produce una caída brusca del % de sólidos.

CONCLUSIONES

- El uso de las técnicas para la determinación del Punto de Carga Cero (PZC) es sencillo y puede ser aplicado para realizar los estudios de las propiedades físico-químicas de las pulpas limoníticas y para explicar los fenómenos que ocurren en el proceso de sedimentación de la pulpa.
- El mineral en la pulpa limonítica tiene un PCZ de 6.56, mientras que en presencia de aditivos el mismo se modifica, adquiriendo un PZC de 6.1. A pH superiores al PZC, los sólidos presentan una densidad de carga negativa, mientras que a pH inferiores al PZC, la densidad de carga es positiva. En general, la limonita en un medio acuoso adsorbe iones hidronios o hidroxilos en lo fundamental, además de otros iones, alcanzando un pseudoequilibrio en un tiempo de unos 5 a 6 días.
- Los sólidos tratados con aditivos en la pulpa, entran al sedimentador a un pH 7 y están cargado negativamente, mientras que el mineral en la zona compactada (alto inventario en el sedimentador) tiene una alta densidad de carga positiva (pH 5.2-5.6 de la pulpa en dicha zona), actuando como un campo de atracción electrostático, sobre las capas superiores, que favorece la compactación de la pulpa fresca entrante. Como resultado de ello, la diferencia en el % de sólidos entre las capas de mineral, se diferencian poco entre sí, mientras que en el sedimentador convencional, sin el uso de aditivos, ocurre todo lo contrario.
- De acuerdo a este modelo, variaciones moderadas en la calidad del mineral, no afectarán las condiciones de operación del sedimentador, lo cual ha sido demostrado en la práctica industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso Olmo, E.; Álvarez Alonso, A.; Castellanos Suárez, J.; Iglesias, C.; Herrera, V. y otros, 2006 Aumento de la productividad en la planta de espesadores de la Empresa Moa Nickel S.A. Trabajo Destacado, Fórum de Ciencia y Técnica Nacional
- Alfonso Olmo, E.; Bugallo, F.; Álvarez Alonso, A.; Castellanos Suárez, J., 2009. Procedimientos para el tratamiento de pulpas acuosas de minerales lateríticos en la tecnología ácida a presión. Certificado de Patente No.23359.
- Álvarez Alonso, A.; Duménigo, M.; Castellanos Suárez, J. y Alonso, J. 2009. Estudio de las propiedades físico-químicas de los minerales en pulpas lateríticas. Reporte Técnico, CIPIMM.
- Ankomah, 1991. Filtration-rate technique for determination zero point of charge of iron oxides, Clays and Clay Minerals, V.39, No.1. 100-102.
- Benoliel, V.A.M. and Bongrand, P. 2004. Is there a predictable relationship between surface physical chemical properties and cell behaviors at the interface. European Cells and materials, Vo.7, pp. 52-63.



- Beyris Mazar, P.; Falcón Hernández, J. 2007. Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica. *Minería y Geología*, Vol. 23, No.1, ISSN 1993 8012.
- Breevswma, A., Lyklema, J. 1973. *Colloid Interface Sci.*, 43, p 437.
- Castellanos Suárez, J. y Acevedo Del Monte, E. 2004. Presentación: Las tecnologías y su impacto en la producción actual de Moa Nickel y su expansión, CIPIMM, Enero.
- Castellanos Suárez, J.; Alfonso Olmo, E.; Álvarez Alonso, A., , 2009. Procedimiento para mejorar el espesamiento de pulpas acuosas de minerales lateríticos en la tecnología ácida a presión. Certificado de Patente No. 23478
- Castellanos Suárez, J. 2005. Tecnología del CIPIMM para un incremento del espesamiento de la pulpa en el sedimentador convencional y en el sedimentador de alta productividad, CIPIMM, Reporte Técnico, Abril.
- Cerpa, A. 2000. Influencia de las características mineralógicas y coloido-químicas de las suspensiones de minerales lateríticos. *Tecnología Química*, Vol. XX, No.1
- Cerpa, A. y otros, 1999. Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions, *Clays and Clay Minerals*, 47, 555-520. Y Cerpa, A.; García González y otros. 1994. *Progressing Colloids and Polymer Science*, 1001, 286.
- Cerpa, A. y otros, 2001. Relationship between the colloidal rheological properties of mineral suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79, 608-61.
- Cerpa, A.; García-González, M.T. and others. 1999. *Clays and clay minerals*, 47, 515.
- Cerpa, A.; García, M.T.; Tartaj, P. *Progress in colloids and Polymer Science*, 100, 266, 1996.
- Cerpa, A.; Tartaj P. y otros. Estudio comparativo del comportamiento reológico de muestras lateríticas de diferentes yacimientos que procesa Moa Nickel S.A. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, Vol.23, No.1, 3-8, ISSN 0255-6952.
- Cerpa, A. y otros, 1999. Mineral content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions, *Clays and Clay Minerals*, 47, 555-520. Y Cerpa, A.; García González y otros. 1994. *Progressing Colloids and Polymer Science*, 1001, 286.
- Cerpa, A. y otros, 2001. Relationship between the colloidal rheological properties of mineral suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79, 608-61.
- Cristiano, E. y otros, 2011. A comparison of point of zero charge Measurement methodology, *Clays and lay Minerals*, April, V.59, No.2, p 102-115.
- Double layer Interfacial, wikipedia, the free encyclopedia
- Fernández García, M. y otros 2004. Nanostructured oxides in Chemistry: Characterization and properties *Chem Rev.* 104, 4063-4108.
- García Romero, E.; Suárez B, M. 1999. Arcillas, propiedades y usos, (Universidad), <http://www.uclm.es/users/higuera/yymm/arcillas.htm>
- Garcell, P.I. 1998, Interfacial and Rheological characteristic of maghemite aqueous suspensions *J. colloid interface Sci.* 205.
- González, A. y otros, 2008. Determinación del punto isoelectrico de residuos de granos finos y su potencial uso en la neutralización de aguas ácidas. Macla No.9, sept. *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*.
- Herrera, V.; Alonso, J. y Marín, J. 2010. Estudio de las propiedades físico-químicas de las pulpas acuosas de minerales lateríticos. Proyecto 62028, CIPIMM.
- Herrera, V. y Castellanos Suárez, J. 2005. Resumen de los reportes técnicos. Incremento del % de sólidos de la pulpa cruda. Reporte Técnico, CIPIMM, Mayo.
- Iglesias, C.; Guerra, I.; Álvarez Alonso, A.; Castellanos Suárez, J. y otros. 2005. Pruebas continuas a escala piloto de espesamiento de pulpa cruda con recirculación del reboso. Reporte Técnico, Moa Nickel y CIPIMM, Agosto.
- Iglesias, C.; Guerra, I.; Álvarez Alonso, A. y Castellanos Suárez, J. 2006. Prueba industrial de dosificación de aditivo CIPIMM a la pulpa cruda alimentada al sedimentador – C. Departamento de Tecnología, División Técnica, Moa Nickel, Julio.
- Kosmulski, M. 2006. Surface charging and Points of Zero charge (Libro) *Surfactant Science Serie Vol.145*, CRC, Press, Taylor & Francis Group.
- Kralchevsky, P.A. and others, 2009. *Chemical Physics of Colloid Systems and Interfaces*, Capítulo 7, Taylor & Francis Group LLC. *Handbook of surface and Colloid Chemistry*.
- Montes, S. y otros 2007. How fine particles on haematite mineral ultimately define, the mineral surface charge and the overall floatability behaviour. *SAIMM*, nov, *Template Journal*, 11/19/07, pp. 689.
- Morrison, S.R. 1971. *Prog. Surface Sci.*, 1, 105 y and the book: *The chemical Physics of surfaces*. Plenum Press, N. York— en ruso: Izdatelstvo "MIR", Moskva, 1980
- Pérez García, L.; Garcell, L.R. 2006. Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química*, Vol. XXVI, No.1.



- Pérez García, L.; Polanca, C.S. y otros. 2007. Adsorción de iones en suspensiones acuosas de laterita. *Tecnología Química*, Vol. XXVII, No.3.
- Pérez García, L y otros, 2005. Efecto de las características granulométricas y magnéticas de las partícula y del pH sobre la reología de las suspensiones minerales acuosas concentradas. *Tecnología QUÍMICA*, Vol. XXV.
- Pérez García, L. y otros. 2010. Mineralogía y reología de suspensiones minerales del proceso de lixiviación ácida a presión en Moa, Cuba. *Revista Minería y Geología*, Vol.26, No.4, Octubre-Diciembre.
- Physical chemistry of solid surfaces, Capítulo 2. Nanostructures and nanomaterials, synthesis properties and application (2da edition) <http://www.worldbooks.com/Nanosci/7885.html>.
- Potencial Zeta: un curso completo en 5 minutos. ZmeterInc: www.zetameter.com
- Preocanin, T and Kallay, N. 1998. Application of "Mass Trituration" to determination of surface charge of metal oxides, Croatica, Chemica, ACTA, CCACCA 71(4), 1117-1125.
- Preocanin, T and Kallay, N.2006. Point of zero charge and surface charge density of TiO_2 in aqueous electrolyte solution as obtained by potenciometric mars titration Croatica Chemica Acta CCACCA 79(11), 95-106.
- Rails back's, L.A. 2006. Some fundamentals of mineralogy and geochemistry. Libro 8150, Point ZERO, Charge 05, sept
- Rodríguez, L. 2006. Sistemas coloidales en farmacias <http://www3.usal.es/licesio>, Universidad de Salamanca.
- Salager, J.L., 1994. Interfacial phenomena in dispersed systems. Mérida, Venezuela, Universidad de los Andes.
- San Polanco, M. y otros, 2005. Influencia de aditivos polares (licor de desecho WL) sobre las características superficiales, reológicas y de sedimentación de las pulpas crudas del proceso de lixiviación ácidas de las lateritas. *Geociencia*, Cuba.
- Somasundaran, P. and others, 2009. Colloid systems and interfaces stability of dispersions through polymer and surfactant adsorption. Cap.6, Taylor & Francis LLG.
- Tambacz, E. 2009. pH - depended surface charging of metal oxides, *Chemical Engineering* 53/2, pp. 77-86.
- Tartaj, P.; Cerpa, A. y otros. 2000. *Colloid and Interface Science*, 231, 176.
- Tourinho, F.A. y otros 2002. Surface charge density determination in electric double Layered magnetic fluids. *Brazilian Journal of Physics*, Braz, J. Phys, V.32, No. 2b, Sao Paulo, June.
- Turro Breff, A.; Garcell Puyans, L.R.; Izquierdo Pupo, R. 2003. Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso CARON, *Tecnología Química*, Vol. XVIII, No.2.
- Valdés, F. , 1982 Fundamentos químico-coloidales de la sedimentación de pulpas acuosas de mineral laterítico. Informe de Investigación 472, CIPIMM.
- Valdés, F.L. 1984. Fundamentos químico-coloidales de la sedimentación de las pulpas acuosas del mineral laterítico. *Revista Tecnológica*, Vol. XIV, No. 0, Dic., pp 44-50.
- Vargas, R. Coagulación y floculación de contaminantes del agua. *Ciencia abierta* <http://cubierta.uchile.cl/revista/15/educacion/edu4/index.html>
- Wesolowski, D.J. and others, surface charge and ion adsorption on metal oxides to 290°C Dak Ridge National laboratory , Tennessee, USA.