

Nuevo enfoque para el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional

Armín Mariño Pérez¹ / amarino@ismm.edu.cu

José Falcón Hernández² / falcon@fiq.uo.edu.cu

George Eduardo Sales Valadao³ / gvaladao@demin.ufmg.br

Roger Samuel Almenares Reyes¹ / ralmenares@ismm.edu.cu

RESUMEN

Se emiten recomendaciones para el desarrollo de las investigaciones orientadas al perfeccionamiento del pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional. Mediante los métodos histórico, lógico y el de la experimentación pasiva, se estudia el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional en la práctica industrial, en la planta de espesadores de la empresa PSA-Moa Nickel S.A. Se concluye que para dar solución al pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional, es recomendable dirigir la investigación al estudio teórico y empírico de la correlación estadística entre esta variable y la concentración de sólidos obtenida por otros métodos de separación mecánica.

PALABRAS CLAVE

Separación sólido-líquido, sedimentación gravitacional, centrifugación, filtración, correlación, pronóstico.

Recibido: abril 2007 / Aceptado: mayo 2007

¹ Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

² Universidad de Oriente. Cuba

³ Universidad Federal de Minas Gerais. Brasil

Approaches for the prediction of the solids concentration in sludge obtained by gravitational sedimentation

ABSTRACT

The present paper gives recommendations for developing researches oriented to improve prediction of solids concentration in sludge obtained by gravitational sedimentation. In thickener plant of PSA-Moa Nickel S.A. Company this prediction is studied by means of the historical, logical and passive experimentation methods. It is concluded that in order to solve the problem concerning the prediction of the solids concentration in sludge obtained by gravitational sedimentation, it is advisable to focus the research to the theoretical and empiric study of statistical correlation between this variable and the solids concentration obtained by others mechanicals separation methods.

KEY WORDS

Solid-liquid separation, gravitational sedimentation, centrifugation, filtration, correlation, prediction.

INTRODUCCIÓN

En numerosas tecnologías de la industria química, el tratamiento de residuales, la metalurgia extractiva y la industria alimenticia, se pone en práctica la sedimentación gravitacional, proceso basado en la capacidad que tiene el sólido en un sistema sólido-líquido de sedimentar bajo la acción de la fuerza de gravedad y posteriormente consolidarse, de modo que se obtiene un licor clarificado y un lodo en el que se ha concentrado la mayor parte del sólido.

Por ejemplo, en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba (Moa Nickel S.A), la suspensión acuosa de mineral laterítico que proviene de la planta de preparación de pulpa, se alimenta a la planta de espesadores donde tiene lugar la sedimentación gravitacional con la obtención de un lodo, cuya concentración de sólidos debe encontrarse en niveles racionalmente elevados. Las dificultades para mantener en la planta de espesadores valores de concentración de sólidos en el lodo, racionalmente elevados y estables, pueden provocar las siguientes consecuencias:

- Incremento del costo unitario del producto final a medida que disminuye la concentración de sólidos en el lodo. Esto se produce como resultado del incremento de los costos asociados a la obtención y transporte de agua, ácido sulfúrico y coral, así como al calentamiento de la suspensión y el transporte de suspensiones tecnológicas y residuales.
- Intensificación de las acciones nocivas al medio ambiente y a la sustentabilidad de la producción a medida que disminuye la concentración de sólidos en el lodo. Entre estas acciones nocivas se encuentran la emisión de gases de combustión, humo y calor en la termoeléctrica; la extracción de coral de la plataforma insular; la emisión de licor residual y la emisión de yeso con las colas.

- Complicaciones operativas en la planta de Lixiviación, como resultado de las variaciones de la concentración de sólidos en el lodo.
- Complicaciones operativas en la mina, para obtener mezclas que además de garantizar la ley de níquel, hierro y magnesio, garanticen concentraciones racionalmente elevadas de sólidos en el lodo.

El incremento del valor de concentración de sólidos en el lodo, asumido en calidad de mínimo admisible, puede provocar la explotación irracional de la mina, con la acumulación del mineral de menor capacidad de compactación y la consiguiente afectación de la sustentabilidad de la producción.

Sobre la posibilidad de incrementar o estabilizar la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional, influye significativamente la eficiencia del método de pronóstico de esta variable.

El objetivo de este artículo es emitir recomendaciones para el desarrollo de las investigaciones orientadas al perfeccionamiento del pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional.

ESTADO ACTUAL DEL PRONÓSTICO DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL LODO OBTENIDO POR SEDIMENTACIÓN GRAVITACIONAL

Práctica industrial en la empresa PSA-Moa Nickel S.A

Para garantizar en los niveles requeridos la concentración de sólidos en el lodo en la referida empresa, tanto en la mina como en la planta de espesadores, el control predictivo de la concentración de sólidos se realiza mediante la velocidad de sedimentación en calidad de variable predictora. Para ello la suspensión se deja en reposo durante dos horas en una probeta de 1 000 cm³. Para esta prueba la suspensión se diluye previamente hasta la 12,5 % en masa, pues si la concentración en masa se mantuviese cercana al 25 %, que es la

concentración en la alimentación, la velocidad de sedimentación sería tan baja que los errores relativos de lectura resultarían inadmisibles.

Conforme al reporte diario de la planta de espesadores hasta el 15 de agosto de 1999, para realizar la dilución se suponía que la concentración de sólidos en la alimentación era igual a 25 % en masa. Para garantizar los valores deseados de concentración de sólidos en el lodo, se exigía que la altura leída fuese igual o mayor que 90 mm, lo que conceptualmente corresponde a una velocidad de sedimentación igual a 45 mm/h.

A partir de la fecha antes referida, para realizar la dilución comenzó a considerarse la concentración real de la suspensión alimentada. Esto permite incrementar la precisión con que se establece el valor de concentración inicial deseado para la prueba (12,5 % en masa). De ese modo, disminuye el efecto perturbador que sobre la velocidad de sedimentación provocan las variaciones de la concentración inicial. Otra modificación introducida consiste en incrementar la velocidad de sedimentación mínima admisible de 45 a 70 mm/h.

Para saber en qué medida es cierta la afirmación de que la capacidad de compactación del mineral en la suspensión, se incrementa con el incremento de la velocidad de sedimentación, en este trabajo se realizó el análisis de correlación-regresión de la concentración de sólidos en el lodo sobre la velocidad de sedimentación en la planta de espesadores. Para ello se consideró el tiempo de residencia del mineral en los espesadores. Los datos utilizados son del periodo enero-mayo de los años 1999, 2000, 2001 y 2002. La data contó inicialmente con 507 pares ordenados. El cálculo de regresión y el análisis de residuos con la subsiguiente exclusión de los puntos donde el módulo del residuo estándar es mayor o igual que 2 (puntos anómalos), se repitió iterativamente, hasta lograr que la cantidad de puntos anómalos fuese menor que el 5 % de

la cantidad de pares ordenados. El número de pares ordenados en la data final es igual a 439.

Los cálculos fueron realizados mediante el tabulador Microsoft Excel 2000 y dieron como resultado un estimador del coeficiente de correlación entre las referidas variables $\gamma=0,241$. Este valor es significativo, con un nivel de confianza mayor que 0,999. Los valores del intercepto y la pendiente son iguales a 45,6 y 0,0111, respectivamente.

El valor del coeficiente de correlación (0,241), a pesar de que es significativo, a juicio de los autores puede ser considerado técnicamente demasiado pequeño, lo que quiere decir que en la actualidad el pronóstico de la concentración de sólidos en el lodo se realiza mediante una variable cuya capacidad predictiva en el nivel industrial es baja. Esto puede ser provocado por las variaciones en las condiciones operacionales, por el pequeño valor del coeficiente de correlación real entre ambas variables o por ambos factores.

A pesar de la baja capacidad predictiva de la velocidad de sedimentación en el nivel industrial, en la actualidad se ha logrado incrementar el valor de la concentración de sólidos en el lodo y su estabilidad. No obstante, para explicar lo anterior es necesario considerar la instalación de un espesador de alta productividad, que comenzó a operar en septiembre del 2000. Otra causa del incremento general de la estabilidad de la concentración de sólidos de la suspensión, se puede atribuir a la selección de un mineral con mayor capacidad de compactación, al aumento de la homogeneidad del mineral alimentado y de la estabilidad en la operación de la planta.

Los autores consideran que la baja capacidad predictiva manifestada por la velocidad de sedimentación en el nivel industrial, constituye la causa de que haya sido necesario incrementar la velocidad de sedimentación mínima requerida de 45 a 70 mm/h. Esta medida, a pesar de que disminuye el

riesgo de obtener valores de concentración de sólidos en el lodo inferiores a los deseados, incrementa la extracción del mineral de elevada velocidad de sedimentación, con la aspiración de que también se caracterice por una elevada capacidad de compactación en el espesador. Esto provoca que una parte del mineral cuya capacidad de compactación es racionalmente elevada, no se extrae para evitar el riesgo de que la concentración de sólidos en el lodo obtenida sea menor que la deseada. En otras palabras, la baja capacidad predictiva de la velocidad de sedimentación ha llevado a la necesidad de incrementar irracionalmente el valor mínimo requerido de esta variable, provocando la acumulación del mineral de menor capacidad de compactación y poniendo en peligro la sustentabilidad de la producción.

Otra deficiencia de tomar la velocidad de sedimentación como variable predictora es su relativamente prolongado tiempo de respuesta (igual a 2,3 h aproximadamente).

De este modo se puede concluir que en la empresa PSA-Moa Nickel S.A, el problema de la inestabilidad de la concentración de sólidos en el lodo no ha sido resuelto satisfactoriamente, como resultado de que no se ha resuelto el problema del pronóstico eficiente de la referida variable.

Logros en el campo de la investigación científica

En el ámbito nacional, Beyrís (1997) ha propuesto una ecuación empírico-estadística que describe la dependencia de la concentración de sólidos en el lodo en función del índice de sedimentación, que por su esencia no es más que la relación másica metales ligeros/metales pesados. No obstante, en ese trabajo aparece como insuficiencia la determinación de la concentración de sólidos en el lodo a las 12 horas, tiempo significativamente menor que el necesario para alcanzar la concentración de sólidos en el lodo de equilibrio, que es el valor máximo de concentración de sólidos alcanzable por sedimentación gravitacional.

En el ámbito global, han sido realizadas investigaciones empírico-teóricas con la utilización de diferentes materiales. La primera referencia data de 1975, cuando Smiles aplica la Ley de Darcy en el pronóstico del perfil de concentraciones en el lodo formado por sedimentación en columna y también en el formado por filtración gravitacional con sedimentación conjunta. De acuerdo con el propio Smiles, los resultados en algunos casos son satisfactorios y en otros no lo son.

Blake y Colombera (1977) también aplican la ley de Darcy en el pronóstico del perfil de concentraciones durante la sedimentación periódica. En este trabajo a medida que las concentraciones se incrementan, los valores estimados se alejan cada vez más de los observados. Blake, Colombera y Knight (1979) consideran además el principio de conservación de la masa. Así obtienen un modelo, cuya aplicabilidad ejemplifican mediante la utilización de apenas un tipo de suspensión.

Conforme Bürger et al. (2000a) a pesar de que a partir de los trabajos de Nichols en 1908, Mishler en 1912, Coe y Clevenger en 1916 y Kynch en 1952, han sido publicados diversos trabajos teóricos y experimentales, solamente en los últimos 20 años ha sido desarrollada una teoría fenomenológica general de la sedimentación-consolidación de suspensiones completamente floculadas, que modela la suspensión como una mezcla de dos medios continuos superpuestos. Esta teoría fue formulada por Concha et al. (1996) y enriquecida por Bürger y Wendland (1998); Bürger (2000); Bürger et al. (2000a-d, 2001a, 2001b, 2003); Garrido et al. (2000), quienes desarrollaron los procedimientos matemáticos que permiten predecir el comportamiento de las concentraciones de sólidos en función de la altura del lecho de sólidos (lodos). De acuerdo con los autores, después de admitir una serie de supuestos y simplificaciones, se puede escribir:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (q(t)\phi + f_{bk}(\phi)) = \frac{\partial}{\partial z} \left(a(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (1)$$

En esta ecuación, ϕ es la concentración de sólidos expresada en partes volumétricas; t es el tiempo; z es la altura; q es la velocidad volumétrica media de ambas fases; $f_{bk}(\phi)$ es la función de densidad de flujo. El coeficiente de difusión $a(\phi)$, se define por

$$a(\phi) = - \frac{f_{bk}(\phi) \sigma'_e(\phi)}{\Delta \rho g \phi} \quad (2)$$

donde $\Delta \rho$ es la diferencia entre las densidades del sólido y del fluido y $\sigma'_e(\phi)$ se define por

$$\sigma'_e(\phi) = \frac{d\sigma_e}{d\phi} \begin{cases} = 0 & \text{si } \phi \leq \phi_c \\ > 0 & \text{si } \phi > \phi_c \end{cases} \quad (3)$$

donde σ_e - función de tensión efectiva; ϕ_c - concentración crítica.

En estas ecuaciones la función de densidad del flujo $f_{bk}(\phi)$ corresponde al modelo de Kynch, que considera únicamente el principio de conservación del flujo volumétrico. La función de tensión efectiva $\sigma_e(\phi)$ incorpora el efecto de compresión.

La teoría cuya esencia ha sido explicada, también se aplica a varias dimensiones espaciales si se toman en cuenta ecuaciones adicionales para el movimiento de la mezcla (Bürger et al., 2001a).

La ecuación (1) se resuelve por métodos numéricos, después de determinar la función de densidad de flujo $f_{bk}(\phi)$ y la función de tensión efectiva $\sigma_e(\phi)$ por las ecuaciones (2) y (3) respectivamente, a partir de datos empíricos sobre la velocidad de propagación de la interfase suspensión-licor clarificado y sobre la permeabilidad del lodo.

Los datos empíricos de los cuales se determinan las referidas funciones se obtienen mediante mediciones de concentración por rayos X, rayos gamma, conductividad y tomografía y por otro lado, mediciones de presión de poros con transductores (R. Bürger, com. esc. 2002). Todos estos son métodos relativamente complicados y costosos.

Bushell (2002) afirma que la modelación matemática probablemente dependerá por mucho tiempo, de la determinación experimental de la función de densidad de flujo y del perfil de tensiones en el lodo. Esto se explica por la gran dificultad que se enfrenta al tratar de predecir teóricamente el comportamiento de las mezclas, dada la complejidad química y reológica de los sistemas reales. Bürger et al. (2000a) han observado que las mayores dificultades se presentan cuando se trata de aplicar la referida teoría, basada en muchos supuestos ideales, a suspensiones reales.

La simulación del proceso de sedimentación-compresión en el caso de suspensiones polidispersas, ha sido enfrentada por Stamatakis y Tien (1992) y Bürger et al. (2000c, 2001a). Sobre este tema, recientemente han sido publicados varios trabajos (Berres y Bürger, 2003; Berres et al. 2003, 2004a-b, 2005).

El estudio realizado permite resumir que hasta el momento, para el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional han sido propuestas las siguientes vías:

- Mediante la utilización de la velocidad de sedimentación como variable predictora.
- Mediante la utilización del índice de sedimentación, que es la relación másica metales ligeros/metales pesados.
- Mediante modelos matemáticos de carácter empírico-teórico.

De estas vías, la primera se caracteriza por una eficiencia que deja lugar a dudas; la segunda no ha sido suficientemente

investigada. La tercera, en primer lugar se basa en la idealización y simplificación de relaciones muy complicadas, lo que provoca limitaciones en el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional cuando se trata de suspensiones industriales; en segundo lugar, exige métodos experimentales complicados y costosos.

Esto permite confirmar la necesidad de orientar la investigación a la búsqueda de nuevas vías para el pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional (Mariño, 2002).

POSIBILIDAD DE ENCONTRAR NUEVAS VARIABLES PREDICTORAS

Durante la sedimentación gravitacional, sobre la concentración de sólidos en el licor clarificado influye la velocidad de sedimentación de las partículas que no se incorporan al flujo de sólidos en sedimentación conjunta. La concentración de sólidos en el lodo se encuentra en dependencia de su capacidad de compactación, de su altura y del tiempo de residencia en la zona de compactación del espesador.

Entonces, ¿por qué razón, a pesar de que la velocidad de sedimentación no influye directamente sobre la concentración de sólidos en el lodo obtenido por sedimentación gravitatoria, en la práctica, la primera variable posee capacidad predictiva de la segunda?

Esto puede explicarse por el hecho de que existen factores que influyen positivamente tanto en la velocidad de sedimentación como en la velocidad de compactación, lo que induce una relación estadística entre la primera y la concentración de sólidos en el lodo, cuya causa es indirecta. Pueden existir otras variables indicadoras más simples; tal es el caso del color. En la mina de la empresa PSA-Moa Nickel S.A

se sabe que el mineral de color ocre, con toda seguridad ofrecerá bajas concentraciones de sólidos en el lodo.

Lo anterior corresponde con la advertencia que aparece en múltiples fuentes bibliográficas sobre estadística aplicada, acerca de que la correlación estadística entre dos variables es una interpretación matemática y no tiene que explicarse necesariamente por la influencia de una sobre la otra, sino que estas pueden depender de una tercera, cuya influencia común sobre ambas es la causante de la correlación entre ellas. Dicho de otro modo, si las variables y_1 y y_2 dependen de un mismo factor x , es posible que exista una dependencia estadística entre y_1 y y_2 , que por su naturaleza es indirecta y que puede ser aprovechada para predecir aquella variable cuya determinación es más demorada, compleja y costosa.

La capacidad de compactación del lodo constituye una función respuesta de múltiples factores cuya influencia es difícil describir teóricamente. Es por ello que se dirige la atención a la búsqueda de variables del tipo indicadoras.

Al respecto, se cuenta con la información a priori de que muchos de los factores que influyen sobre la concentración de sólidos en el lodo obtenido por sedimentación gravitacional, deben influir también sobre la concentración de sólidos obtenida por otros métodos de separación sólido-líquido (filtración, centrifugación y compresión mecánica). Esto permite suponer que la concentración de sólidos obtenida por estos métodos puede correlacionar con la concentración de sólidos en el lodo obtenido por sedimentación gravitacional.

Un ejemplo práctico del referido comportamiento, ubicado precisamente en el campo de la separación sólido-líquido, fue obtenido por Valadao et al. (1996), quienes verifican la existencia de correlación entre las condiciones óptimas de sedimentación y de filtración.

Lo anterior permite concluir que es recomendable dirigir la investigación, a resolver el problema científico que consiste en el insuficiente conocimiento para confirmar si existe relación estadística entre la concentración de sólidos obtenida por sedimentación gravitacional y la concentración de sólidos obtenida por otros métodos de separación sólido-líquido, así como para determinar las principales tendencias en el comportamiento de esta relación, en función de las condiciones experimentales.

El objeto de la investigación recomendable, es la relación estadística entre la concentración de sólidos obtenida por sedimentación gravitacional y la concentración de sólidos obtenida por otros métodos de separación sólido-líquido.

El problema científico quedará resuelto si se cumple la siguiente hipótesis: el estudio mediante el método lógico, de los fundamentos teóricos y empíricos existentes acerca del mecanismo de los procesos de separación sólido-líquido, conjugado con métodos empíricos, permitirá saber si la concentración de sólido obtenida por alguno de estos procesos se relaciona estadísticamente con la concentración de sólidos obtenida por sedimentación gravitacional, así como determinar las principales tendencias en el comportamiento de esta relación en función de las condiciones experimentales.

CONCLUSIÓN

Para dar solución al pronóstico de la concentración de sólidos en lodos obtenidos por sedimentación gravitacional, es recomendable dirigir la investigación al estudio teórico y empírico de la correlación estadística entre esta variable y la concentración de sólidos obtenida por otros métodos de separación mecánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEYRÍS, P. 1997. Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la empresa Comandante Pedro Soto Alba. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis doctoral) 120 p.

- BERRES, S y BÜRGER R. 2003. On gravity and centrifugal settling of polydisperse suspensions forming compressible sediments. *International Journal of Solid and Structures*, 40(19): 4965-4987.
- BERRES, S.; BÜRGER, R.; KARLSEN, K. H. Y TORY, E. M. 2003. Strongly degenerate parabolic-hyperbolic systems modeling polydisperse sedimentation with compression. *J. Appl. Math.* 64 (1): 41-80.
- BERRES, S.; BÜRGER, R.; KARLSEN, K. H. 2004a. Central schemes and systems of conservation laws with discontinuous coefficients modeling gravity separation of polydisperse suspensions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 164 :53-80
- BERRES, S.; BÜRGER, R.; KARLSEN, K. H. Y TORY, E. M. 2004b. Mathematical model and numerical simulation of the liquid fluidization of polydisperse solid particle mixtures, Alemania. *Computing and Visualization in Science*, 6(2-3): 67-74.
- BERRES, S.; BÜRGER, R.; KARLSEN, K. H. Y TORY, E. M. 2005. Applications of polydisperse sedimentation models. *Chemical Engineering Journal* 111(2005): 105-117.
- BLAKE, J. R. Y COLOMBERA, P. M. 1977. Sedimentation: a comparison between theory and experiment, Gran Bretaña. *Chemical Engineering Science*, 2: 221-228.
- BLAKE, J. R.; COLOMBERA, P. M. Y KNIGHT, J. H. 1979. A one-dimensional model of sedimentation using Darcys law, *Separation science and Technology*, 14(4): 291-304.
- BÜRGER, R. 2000. Phenomenological foundation and mathematical theory of sedimentation-consolidation processes, *Chem. Eng. J.*, 80: 177-188.
- BÜRGER, R. Y WENDLAND, W. L. 1998. Entropy Boundary and Jump Conditions in the theory of sedimentation with compression, *Math. Meth. Appl. Sci.*, 21: 865-882.
- BÜRGER, R.; CONCHA, F. Y TILLER, F. M. 2000a. Application of the phenomenological theory to several published experimental cases of sedimentation, *Chem. Eng. J.*, 80: 105-117.
- BÜRGER, R.; CONCHA, F.; FJELDE, K. K. Y KARLSEN, K. H. 2000b. Numerical simulation of the settling of polydisperse suspensions of spheres, *Powder Technol.*, 113: 30-54.

- BÜRGER, R.; EVJE, S.; KARLSEN, K. H. Y LIE, K. A. 2000c. Numerical methods for the simulation of the settling of flocculated suspensions, *Chem. Eng. J.*, 80: 91-104.
- BÜRGER, R.; WENDLAND, W. L. Y CONCHA, F. 2000d. Model equation for gravitational sedimentation-consolidation processes, *Math. Mech.*, 80: 79-92.
- BÜRGER, R.; FJELDE, K.-K.; HÖFLER, K. Y KARLSEN, K. H. 2001a. Central difference solutions of the kinematic model of setting of polydisperse suspensions and three-dimensional particle-scale simulations, *J. Eng. Math.*, 41: 167-187.
- BÜRGER, R.; CONCHA, F. Y KARLSEN, K. N. 2001b. Phenomenological model of filtration processes: 1 Cake formation and expression, Gran Bretaña. *Chemical Engineering Science*, 56: 4537-4553.
- BÜRGER, R.; FRID, H. Y KARLSEN, K. H. 2003. On a free boundary problem for a strongly degenerate quasilinear parabolic equation with an application to a model of pressure filtration *J. Math. Anal.*, 34(3): 611-635.
- BUSHELL, G.; BICKERT, G. Y FRANKS, G. 2002. The Role of Floc Structure in the Formation of Sediments and Filter Cakes, Australia.
<http://www.ceic.unsw.edu.au/positions/postgraduate/graeme/background1.doc> [consulta: 15 abr. 2002].
- CONCHA, F.; BUSTOS, M. C. Y BARRIENTOS, A. 1996. Phenomenological theory of sedimentation. En Ed. Etozy, M.: Sedimentation of Small Particles in a Viscous Fluid, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 51-96.
- GARRIDO, P.; BÜRGER, R. Y CONCHA, F. 2000. Settling velocities of particulate systems: 11. Comparison of the phenomenological sedimentation-consolidation model with published experimental results. *Int. J. Mineral Process*, 60: 213-227.
- GARRIDO, P.; CONCHA, F. Y BÜRGER, R. 2002. Settling velocities of particulate systems: 14. Unified model of sedimentation, centrifugation and filtration of flocculated suspension, Stuttgart, Alemania, Publicaciones de la Universidad de Stuttgart.
<http://www.mathematik.uni-stuttgart.de/mathA/IST6/buerguer/buerguer.en.html>. [consulta: 7 sep. 2002].

- MARIÑO, P. A. 2002. Variables para el control de la concentración de sólidos alcanzable por sedimentación gravitacional [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis doctoral) 100 p.
- SMILES, D. E. 1975. Sedimentation and self-weight filtration in industrial slurries, Australia. *Process Chem. Eng.*, 28: 13-16.
- STAMATAKIS K. Y TIEN, CH. 1992. Batch sedimentation calculations – the effect of compressible sediment. *Powder Technology*, 72: 227-240.
- VALADAO, G. S.; DE ARAÚJO, A. C. Y DA SILVA, R. G. 1996. Estudo das características de sedimentação e de filtração de uma amostra de pellet feed de minério de ferro. Simposio Brasileiro de Minério de Ferro, Ouro Preto, Brasil (Memorias), 207.