



PROSPECTIVA

ISSN: 1692-8261

rprospectiva@gmail.com

Universidad Autónoma del Caribe

Colombia

Ospina Alarcón, Manuel Alejandro; Bustamante Rúa, Moisés Oswaldo
Estudio hidrodinámico de equipos de concentración gravimétrica tipo JIG
PROSPECTIVA, vol. 13, núm. 1, enero-junio, 2015, pp. 52-58
Universidad Autónoma del Caribe

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496250641006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Estudio hidrodinámico de equipos de concentración gravimétrica tipo JIG

Hydrodynamic study of gravity concentration devices type JIG

Manuel Alejandro Ospina Alarcón¹, Moisés Oswaldo Bustamante Rúa²

¹Ph. D(c) en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de Materiales.

Docente Tiempo Completo. Instituto Tecnológico Metropolitano. Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales. Medellín-Colombia.

²Ph.D en Ingeniería – Metalurgia Extractiva. Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia.

Instituto de Minerales Címex. Medellín - Colombia. E-mail: manuelospina@itm.edu.co

Recibido 25/10/14, Aceptado 18/12/2014

Cite this article as: M.A. Ospina, M.Bustamante, "Hydrodynamic study of gravity concentration devices type JIG", Prospect, Vol 13, N° 1, 52-58, 2015.

RESUMEN

Este artículo presenta una investigación numérica de la obtención de un modelo semifísico de Base Fenomenológica (MSBF) de parámetros distribuidos como herramienta útil en el diseño, control y optimización de un Jig el cual es un equipo de concentración gravimétrica mediante corrientes pulsadas de alto rendimiento y alta recuperación, ampliamente utilizado en el procesamiento de minerales. Se realiza una descripción detallada de la obtención de un MSBF a partir del conocimiento y principios básicos de los procesos: balances de materia, cantidad de movimiento y trayectoria de partículas, así como principios hidrodinámicos para obtener ecuaciones constitutivas. Se aplica el procedimiento a la etapa de concentración en una planta de procesamiento de oro. El modelo se contrasta con un Jig real a través de la simulación.

Palabras clave: Concentración gravimétrica, Procesamiento de minerales, Modelado de base fenomenológica, Jig, Simulación numérica.

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation of phenomenological based semiphysical model (PBSM) of distributed parameters as a useful tool in the design, control and optimization of gravity concentration process in a jiggling device, which is a high yield and high recovery gravimetric concentrator device widely used in minerals processing. A detailed description is made to obtaining a PBSM based on the knowledge and basic principles of the processes: mass and momentum balances and particles trajectories as well as hydrodynamic principles to obtain constitutive equations. The procedure was applied to the concentration stage in a gold processing plant. The model is compared with a real Jig through simulation.

Key words: Gravity concentration, Mineral processing, Phenomenological based modeling, Jig, Numerical simulation.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de modelos en la industria de procesamiento de minerales para el diseño, control y optimización de los procesos es cada vez más frecuente. Una buena represen-

tación de los procesos por medio de un modelo permite analizar las dinámicas del proceso y la evaluación de índices como eficiencia, controlabilidad, estabilidad y robustez, entre otros [1]. El modelamiento matemático es una poderosa herramienta para el ingeniero a la hora de con-

ceptualizar un proceso, ya que permite convertir un problema real en un problema matemático y de esta manera interpretarlo y resolverlo.

El Jig es un equipo de concentración gravimétrica donde las partículas minerales se mueven en un flujo de agua pulsante, resultando al final del proceso en una estratificación de partículas de diferentes densidades y tamaños. La estratificación de las partículas al interior del Jig ocurre en un campo de flujo multifásico complejo. Las partículas se someten a diferentes fuerzas hidrodinámicas ocasionadas por el movimiento del fluido, dando lugar a diferentes trayectorias que dependen del campo de velocidad del fluido y las propiedades de las partículas. Diversas variables operacionales afectan el movimiento de las partículas entre las que se pueden incluir el caudal de alimento de agua y de mineral, la amplitud y frecuencia de pulsación del fluido, entre otras [2].

Se han utilizado muchos modelos para tratar de entender el proceso de concentración en Jigs. Estos modelos se clasifican en dos grandes grupos:

- Teoría de energía potencial [3, 4].
- Aproximación DEM (Método de elementos discretos) [5–10].

Mayers, [3] propuso su modelo de energía potencial, donde la diferencia de energía potencial entre las partículas estratificadas y las que no se han estratificado es la fuerza que ocasiona la separación. La limitante de este modelo es que solo puede representar partículas alimentadas de tamaño uniforme. Tavares y King [4] realizaron una modificación a la teoría de Mayers para simular la concentración de partículas de tamaño binario en el lecho del Jig. Sin embargo, aún es complejo para los investigadores extender este modelo a la concentración de partículas minerales que poseen una distribución de tamaño amplia.

Mishra y Mehrotra, [10] utilizaron un modelo microscópico DEM bidimensional, para obtener un análisis cuantitativo del proceso de concentración en el Jig. Srinivasan et al. [9] investigaron un modelo DEM tridimensional para simular la estratificación de las partículas en el lecho del Jig. En los modelos DEM se logra cuantificar el grado de estratificación del lecho determinando la diferencia del centro de gravedad entre las partículas de diferentes densidades [9] o determinando la disminución de la rapidez de la energía potencial del lecho del Jig. Todos los modelos anteriores tratan el fenómeno asumiendo un campo de flujo uniforme y no consideran el efecto de la posible velocidad de fluido no uniforme sobre las fuerzas de arrastre de las partículas, además asumen la estratificación como un proceso batch y desprecian la fuerza de Basset, masa virtual y gradiente de presión sin mostrar un análisis pre-

vio de su importancia al momento de calcular las trayectorias que siguen las partículas que ingresan a la cámara de separación del Jig.

En general, las teorías existentes dan una explicación cualitativa del proceso de concentración y contribuyen poco al diseño del equipo, ya que se asume un comportamiento de flujo idealizado y el efecto de aceleración relativa e historia son ignorados.

En este trabajo se presenta la obtención de un modelo semi-físico de base fenomenológica (MSBF) aplicado a un Jig para el estudio del comportamiento hidrodinámico (interacción sólido-líquido) entre las diferentes especies involucradas en un proceso de concentración gravimétrica. Se dedica un buen esfuerzo a la deducción y validación de un modelo para el Jig, contando con los pocos datos disponibles desde plantas reales. El trabajo está organizado como sigue: como punto de partida se presenta la metodología de construcción de un modelo MSBF proponiendo un procedimiento para su obtención el cual es aplicado al Jig. Posteriormente se muestran los resultados de simulación del modelo obtenido y se discute su validación cualitativa y cuantitativa. Se termina con una sección de conclusiones y la bibliografía de referencia.

2. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL MSBF PARA EL JIG

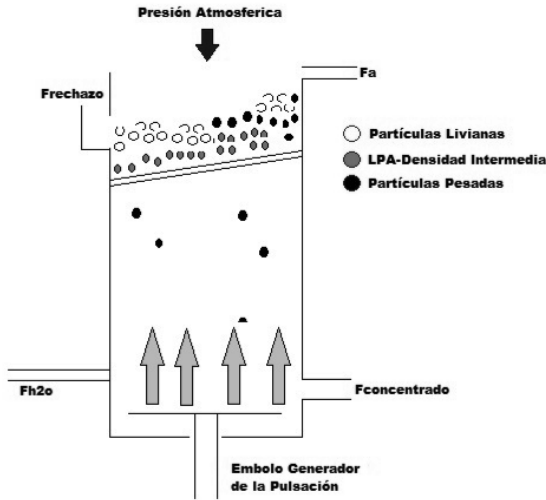
2.1 Descripción del proceso

Se pretende la separación de minerales de alta densidad de los minerales de baja densidad en un equipo de concentración gravimétrica tipo Jig (ver figura 1), de acuerdo a una estratificación de las partículas presentes en una corriente de alimento (F_a) cuya carga de sólidos es inferior al 10% en volumen.

La estratificación se produce por la transmisión de energía mecánica la cual es generada por el movimiento de un pistón que ejerce presión sobre el agua (F_{h2o}) en la cámara interna del Jig de manera armónica (o anarmónica), generando un movimiento en pulsos (ascenso y descenso) del sistema particulado que ingresa a la cámara de separación del Jig, de modo que se obtiene una estratificación del lecho que forman las partículas, la cual es usada posteriormente para producir la separación de los minerales.

La cámara de separación del Jig está abierta a la atmósfera, en su interior se encuentra una criba donde se deposita un lecho de partículas que posee una densidad intermedia respecto a los minerales que se pretenden separar. El lecho de partículas posee una altura inicial H_0 (lecho empacado) que asciende hasta una altura H_{max} (lecho totalmente fluidizado) de acuerdo al movimiento de ascenso y descenso de F_{h2o} .

Figura 1. Diagrama esquemático del Jig.
Figure 1. Schematic diagram of Jig.



La corriente F_{h2o} contiene agua a una tasa de flujo mayor o igual a la velocidad mínima de fluidización de las partículas que se pretenden separar. El movimiento anarmónico de F_{h2o} genera una interacción hidrodinámica entre las dos fases presentes en el proceso (interacción sólido-sólido, sólido-líquido). Dicha interacción altera el movimiento de las partículas minerales presentes en la cámara de separación del Jig.

El movimiento de ascenso del agua y las partículas minerales se denomina etapa de fluidización. En esta etapa las partículas minerales ascienden desde una altura H_0 hasta una altura H_{max} iniciándose la estratificación de las partí-

culas. En el inicio de la estratificación las partículas minerales que presentan mayor densidad tienden a depositarse en la parte inferior del lecho, mientras que las partículas con menor densidad se ubican en la parte superior del lecho. Cuando se inicia la etapa de descenso, las partículas más densas poseen una velocidad de sedimentación mayor que las partículas menos densas, esto permite que antes de la compactación del lecho, las partículas minerales más pesadas se depositen rápidamente por debajo de la criba, obteniéndose después de varios ciclos de pulsación, una separación completa de las partículas minerales en dos corrientes $F_{rechazo}$ y $F_{concentrado}$. El proceso se lleva a cabo bajo condiciones de temperatura ambiente y no hay presencia de reacción química.

2.2 Aplicación del principio de conservación sobre el Jig

El modelo del Jig es de parámetros distribuidos el cual puede derivarse considerando balances microscópicos de conservación aplicados a un punto particular en el Jig, a continuación se muestra el resultado de aplicar el principio de conservación de la masa y momentum en el Jig.

El agua es tratada como una fase continua que se mueve a través de la cámara del Jig y se modela de tal forma que la fracción volumétrica del agua modifica las ecuaciones de estándar de Navier-Stokes. Así las ecuaciones que gobiernan el movimiento del agua son la ecuación de continuidad y momentum, en términos de las variables medias locales sobre una celda computacional y son dadas en su forma vectorial por [11–14]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \phi_l) + \nabla \cdot (\rho_l \phi_l \mathbf{u}_l) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l \phi_l \mathbf{u}_l) + \nabla \cdot (\rho_l \phi_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l) = -\nabla P + \nabla \cdot \phi_l \mathbf{T} + \rho_l \phi_l \mathbf{g} + \frac{\sum_{i=1}^{k_c} F_{wi}}{\Delta V} \quad (2)$$

donde P , T , ϕ_l y ΔV , y son, la presión, el tensor de esfuerzos viscosos del fluido, la fracción volumétrica del agua y el volumen de una celda computacional respectivamente. El término de transferencia de momentum F_{wi} en la ecuación (2) relaciona la sumatoria de las fuerzas de interacción entre el agua y las partículas presentes en una celda computacional.

Para las partículas minerales ampliamente distribuidas en tamaño y densidad, la descripción de la trayectoria de las partículas y la interacción entre las partículas y el agua dependen del cálculo correcto de las fuerzas hidrodinámicas involucradas. El cálculo de la trayectoria de las partículas requiere la solución de dos ecuaciones diferenciales ordinarias, una para el cálculo de la posición y otra para el cálculo de la velocidad que en su forma vectorial son [7, 8, 15–17]:

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p \quad (3)$$

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = (\rho_p - \rho_l) V_p \mathbf{g} - \frac{\pi}{8} \rho_l d_p^2 C_d (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_l) |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_l| - \frac{1}{2} \rho_l V_p \left(\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} - \frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} \right) - \dots - \rho_l V_p \frac{d\mathbf{u}_l}{dt} - \frac{3}{2} \cdot d_p^2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \mu_l \cdot \rho_l} \cdot \int_0^t \left(\frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} - \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} \right) \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (4)$$

En la ecuación (4) las fuerzas involucradas son de izquierda a derecha: la fuerza de empuje, la fuerza de arrastre [18], la fuerza de masa virtual [10], la fuerza debida al gradiente de presión [17], y la fuerza de historia de Basset [19, 20] respectivamente.

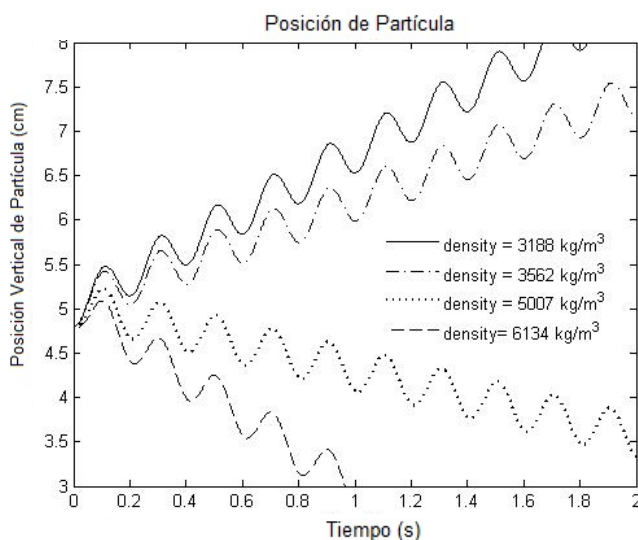
La falta de conocimiento respecto al fenómeno físico de interacción sólido-fluido, la necesidad de desarrollar modelos fenomenológicos adecuados, la demanda de datos de alta calidad a escala real [11, 12, 21, 22], la necesidad de desarrollar técnicas de análisis de datos para comprender mejor los resultados y el alto costo de dispositivos eficaces de medición por parte de la industria constituyen aspectos que requieren de herramientas numéricas como la utilizada en esta investigación.

3. RESULTADOS

Con el fin de controlar la iteración entre el fluido y las partículas, el cálculo de las trayectorias a partir de la ecuación de movimiento de las partículas (ecuaciones (3) y (4)), también como el cálculo del termino de intercambio de fuerzas de las partículas, se lleva a cabo en el mismo ciclo de iteración una vez se obtiene la solución de las ecuaciones de flujo de agua. El cambio en la velocidad de la partícula se calcula en cada instante de tiempo integrando las ecuaciones (3) y (4) mediante un método de Runge-Kutta de cuarto orden en cada instante de tiempo actualizando la posición de las partículas.

Figura 2. Movimiento de la partícula en flujo pulsante con perfil de pulsación senoidal. Amplitud de 5 mm y frecuencia de 5 Hz.

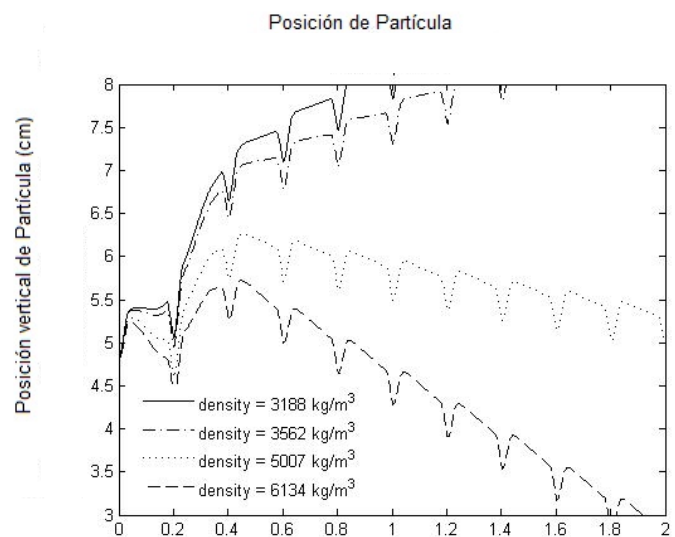
Figure 2. Particle movement in pulsating flow with sinusoidal profile. With 5 mm amplitude and 5 Hz frequency.



En la simulación se puede realizar un seguimiento del movimiento de las partículas al interior de la cámara de separación del Jig, donde se observa la estratificación de las partículas. Cuando las partículas son alimentadas la estratificación ocurre después de pocos ciclos de pulsación. Las figuras 2 y 3 muestran el movimiento pulsante de partículas que poseen un tamaño de 250 μm y diferentes densidades; sometidas a un flujo de agua con perfil de pulsación senoidal y trapezoidal respectivamente, ambos perfiles poseen una amplitud de $A=5$ mm y un periodo de oscilación de $T=0.2$ s. Como el movimiento de las partículas es pulsante, se demuestra el efecto de interacción sólido-líquido presente entre las fases en el Jig, donde las partículas oscilan a la misma frecuencia que el agua pero su amplitud es directamente proporcional a la amplitud del agua. El movimiento de las partículas se ve fuertemente afectado por la densidad. A medida que variamos la densidad de las partículas, las más livianas ($\rho=3188$ kg/m³ y $\rho=3562$ kg/m³) siguen un movimiento ascendente y las más pesadas ($\rho=5007$ kg/m³ y $\rho=6134$ kg/m³) se sedimentan en la parte inferior del Jig.

Figura 3. Movimiento de la partícula en flujo pulsante con perfil de pulsación trapezoidal. Amplitud de 5 mm y frecuencia de 5 Hz.

Figure 3. Particle movement in pulsating flow with trapezoidal profile. With 5 mm amplitude and 5 Hz frequency.



La tasa a la cual las partículas alcanzan su estratificación es diferente en ambos perfiles, mientras una partícula liviana sometida a un perfil de pulsación senoidal tarda alrededor de $t=2$ s en salir de la columna del Jig, la misma partícula sale de la columna en tan solo $t=1$ s cuando se le aplica una onda de pulsación trapezoidal. Con las partículas pesadas ocurre todo lo contrario, tarda más en salir una partícula pesada con un perfil trapezoidal que con uno senoidal.

El análisis anterior muestra la necesidad de estudiar la manera como se estratifican las partículas sometidas a diferentes perfiles de pulsación, esto con el objetivo de poder optimizar el equipo de concentración y así lograr una buena recuperación de las partículas minerales de interés.

Las fuerzas de Basset, masa virtual y gradiente de presión resultan ser significativas y no deben ignorarse cuando se emplean en equipos de concentración gravimétrica que utilizan corrientes pulsadas, donde se trabaja con suspensiones de partículas minerales que poseen distribuciones de densidad y tamaño amplias.

A continuación se muestra el efecto que tiene la combinación de las diferentes fuerzas en la determinación de la trayectoria de partículas que ingresan a la cámara de separación del Jig. Los parámetros que se mantienen constantes, a menos que se especifique lo contrario, son el diámetro de la partícula y la velocidad inicial de la partícula en la dirección axial y longitudinal, que son $d=212\text{ }\mu\text{m}$, $u_{px}=0.001587\text{ m/s}$ y $u_{py}=0$ respectivamente, la densidad relativa se evalúa en dos valores uno de baja $DR=3.562$ y otra de alta $DR=13.8$. Para el análisis, las partículas se pulsaron en una zona de $5\times 10\text{ cm}^2$ inyectándose desde una posición $x=0.048\text{ cm}$ e $y=0.048\text{ cm}$. Se le impartió al agua una forma de onda senoidal donde la amplitud y frecuencia de la velocidad de oscilación del flujo se fijaron en 0.08816 m/s y 5 Hz , respectivamente.

La forma más básica del modelo contiene las fuerzas de arrastre, gravedad y gradiente de presión. La fuerza de masa virtual y la fuerza de historia de Basset se añaden sucesivamente al modelo. Las figuras 4 y 5 muestran los resultados. Para este caso, la figura 4 muestra la trayectoria completa de las partículas de tamaño uniforme que varían en un intervalo de densidad relativa de 3.026 a 13.8 en el Jig. En la figura 5 (partícula de $DR=3.562$), la fuerza de Basset incrementa la longitud de la trayectoria de las partículas alrededor de 10 veces el diámetro de la partícula mientras que la fuerza de masa virtual parece tener un efecto menor sobre la trayectoria. Los resultados de la fuerza de masa virtual son consistentes con el análisis acerca de que se desarrolla un gradiente de velocidad pequeño alrededor de la partícula debido a su tamaño. Cuando se incluye la fuerza de Basset, la amplitud de las oscilaciones de la partícula disminuyen mientras que el desplazamiento longitudinal incrementa, desplazando la partícula y ocasionando que se incremente su tiempo de residencia en el interior de la cámara del Jig. De las Figuras 4 y 5 se observa que las partículas con densidad relativa menor a 4.3 se reportan directamente en la corriente de rechazo mientras las otras ($DR>4.3$) caen al fondo del lecho del Jig reportándose en la corriente de concentrado.

Figura 4. Efecto de las fuerzas de Basset y masa virtual sobre la trayectoria de una partícula fina. Trayectoria variando la densidad relativa.

Figure 4. Effect of the Basset and virtual mass forces on the trajectory of a fine particle. Trajectory varying the particle relative density.

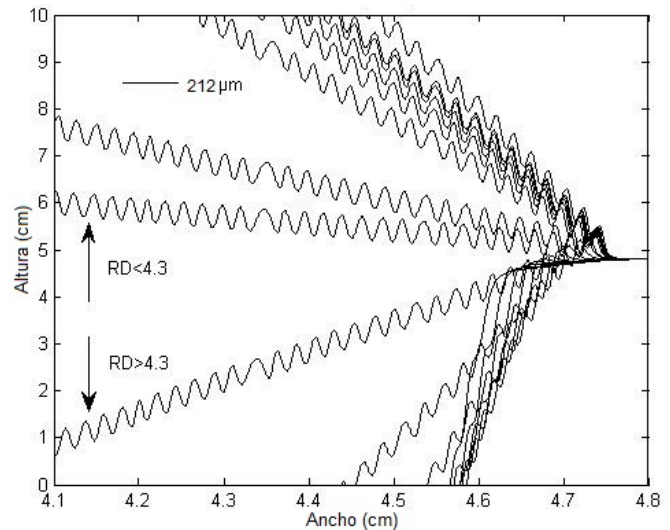
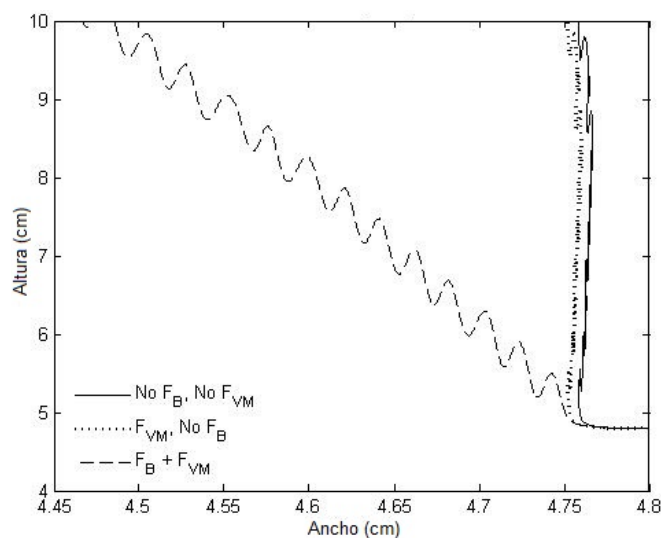


Figura 5. Efecto de las fuerzas de Basset y masa virtual sobre la trayectoria de una partícula fina con densidad relativa de 3.562.

Figure 5. Effect of the Basset and virtual mass forces on the trajectory of a fine particle with relative density of 3.562.



Las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la trayectoria de las partículas en un equipo de concentración gravimétrica varían significativamente con el tamaño, la densidad de las partículas y las propiedades de la suspensión. La fuerza de masa virtual y Basset afectan significativamente la trayectoria de las partículas en la cámara del Jig. Finalmente se pudo demostrar a partir de las figuras 2, 3, 4 y 5 que despreciar estas fuerzas en el modelo de movimiento de partículas para lechos pulsados no genera una buena explicación del fenómeno de interacción sólido-líquido en equipos de concentración gravimétrica.

4. CONCLUSIONES

- Se estudió la estratificación de partículas minerales en un Jig bajo dos perfiles de pulsación mediante la implementación de un MSBF. Con la amplitud y la frecuencia de pulsación en un valor constante, todos los 2 perfiles de pulsación logran estratificar partículas minerales que poseen una distribución amplia de tamaño y densidad, pero sujetos a diferentes velocidades y tiempos de separación y al porcentaje final de recuperación.
- La velocidad a la entrada de la cámara del Jig afecta el movimiento de las partículas. Si en el inicio de la pulsación existe una velocidad a la entrada muy alta, las partículas que se alimentan al Jig se mueven como un conjunto y muestran un comportamiento de transporte completo hacia la corriente de rechazo. Cuando la velocidad a la entrada se desarrolla lentamente, como en el perfil senoidal, las partículas no se levantan como un conjunto y domina el levantamiento individual de las partículas más livianas al inicio del ciclo permitiendo que las partículas pesadas pasen a través de las partículas livianas y se sedimenten.
- El estudio del movimiento transiente de partículas desarrollado proporciona un mejor entendimiento de la estratificación de las partículas en equipos de concentración gravimétrica que utilizan corrientes pulsadas. Como se mencionó anteriormente, los mecanismos de transporte entregados al modelo mediante las fuerzas inerciales son de gran importancia en la descripción de la trayectoria de las partículas cuya inercia se puede comparar a la inercia del fluido. En sistemas particulados en los que la inercia del fluido es considerablemente menor a la inercia de las partículas (como ocurre típicamente en suspensiones gas-sólido), las fuerzas inerciales pueden despreciarse sin consecuencias relevantes en la predicción correcta de las dinámicas de estos sistemas. Sin embargo, la derivación de un modelo para flujos de líquido pulsante

donde se consideran tales efectos (arrastre, empuje y fuerzas inerciales son del mismo orden de magnitud), es todavía un problema de investigación abierto que necesita de futura investigación tanto numérica como experimental que ayude a mejorar el desempeño del equipo como concentrador gravitacional.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en el proyecto de investigación "Modelado y control no lineal de dinámica de fluidos a partir del desarrollo de un módulo experimental" con ID P14104, Grupo de Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales COL0053581, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín-Colombia.

REFERENCIAS

- [1] H. Alvarez, R. Lamanna, P. Vega, and S. Revollar, "Metodología para la Obtención de Modelos Semifísicos de Base Fenomenológica Aplicada a una Sulfitadora de Jugo de Caña de Azúcar", *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, 6 (3), 10–20, 2009.
- [2] R. Burt, "The role of gravity concentration in modern processing plants", *Miner. Eng.*, 12 (11), 1291–1300, 1999.
- [3] F. W. Mayer, "Fundamentals of a potential theory of jigging process", in *Proc. 7th Int. Miner. Proc. Cong.*, 75–86, 1964.
- [4] L. M. Tavares and R. P. King, "A Useful Model for the Calculation of the Performance of Batch and Continuous Jigs", *Coal Prep.*, 15, 99–128, 1995.
- [5] Y. K. Xia, F. F. Peng, and E. Wolfe, "CFD simulation of fine coal segregation and stratification in jigs", *Int. J. Miner. Process.*, 82 (3), 164–176, 2007.
- [6] Y. K. Xia and F. F. Peng, "Numerical simulation of behavior of fine coal in oscillating flows", *Minerals Engineering*, 20 (2), 113–123, 2007.
- [7] S. M. Viduka, Y. Q. Feng, K. Hapgood, and M. P. Schwarz, "CFD-DEM investigation of particle separations using a trapezoidal jigging profile", in *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO*, 2012, no. December, pp. 1–8.
- [8] S. M. Viduka, Y. Q. Feng, K. Hapgood, and M. P. Schwarz, "CFD-DEM investigation of particle separations using a sinusoidal jigging profile", *Adv. Powder Technol.*, 24 (2), 473–481, 2013.

- [9] R. Srinivasan, B. K. Mishra, and S. P. Mehrotra, "Simulation of Particle Stratification in Jigs", *Coal Prep.*, 20, no. June 2013, 55–70, 1999.
- [10] B. K. Mishra and S. P. Mehrotra, "A jig model based on the discrete element method and its experimental validation", *Int. J. Miner. Process.*, 63 (4), 177–189, 2001.
- [11] N. Ferreira Feil, C. Hoffmann Sampaio, and H. Wotruba, "Influence of jig frequency on the separation of coal from the Bonito seam — Santa", *Fuel Process. Technol.*, 96, 22–26, 2012.
- [12] Y. Li, W. Zhao, S. Xu, and W. Xia, "Changes of size, ash and density of coal particles on the column axis of a liquid–solid fluidized bed", *Powder Technol.*, 245, 251–254, 2013.
- [13] P. Bagchi and S. Balachandar, "Effect of free rotation on the motion of a solid sphere in linear shear flow at moderate Re ", *Phys. Fluids*, 14, (8), 2719, 2002.
- [14] S. Balachandar and J. K. Eaton, "Turbulent Dispersed Multiphase Flow", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 42, (1), 111–133, 2010.
- [15] N. Lukerchenco, J. Dolansky, and P. Vlasak, "Basset force in numerical model of saltation", *J. Hydrol. Hydro-mech.*, 60 (4), 277–287, 2012.
- [16] J. Oshitani, S. Kajimoto, M. Yoshida, G. V. Franks, Y. Kubo, and S. Nakatsukasa, "Continuous float–sink density separation of lump iron ore using a dry sand fluidized bed dense medium", *Adv. Powder Technol.*, 24, (2), 468–472, 2013.
- [17] S. M. Viduka, Y. Q. Feng, K. Hapgood, and M. P. Schwarz, "Discrete particle simulation of solid separation in a jigging device", *Int. J. Miner. Process.*, 123, 108–119, 2013.
- [18] L. Schiller and A. Naumann, "Über die grundlegenden berchnungen bei der schwerkraftaufbereitung", *Ver. Deut. Ing.*, 77, 318, 1933.
- [19] K. Asakura, M. Nagao, and M. Mizuno, "Simulation of Particle Motion in a Jig Separator", *J. JSEM*, 7, no. Special Issue, 2007.
- [20] A. B. Basset, *A Treatise on Hidrodynamics Volumen II. London: George Bell and Sons*, 1888, pp. 260–302.
- [21] P. Lopamudra, A. K. Sahoo, A. Tripathy, S. K. Biswal, and A. K. Sahu, "Application of artificial neural network to study the performance of jig for beneficiation of non-coking coal", *Fuel*, 97, 151–156, 2012.
- [22] L. Dong, Y. Zhao, C. Duan, Z. Luo, B. Zhang, and X. Yang, "Characteristics of bubble and fine coal separation using active pulsing air dense medium fluidized bed", *Powder Technol.*, 257, 40–46, 2014.