

Propiedades Físicas y Aerodinámicas del Mineral Laterítico para uso de Transporte Neumático

Physical and Aerodynamic Properties of Lateritic Ores for use in Pneumatic Conveying

**Enrique Torres Tamayo¹, Héctor L. Laurencio Alfonso², Paco Jovanni Vásquez Carrera³,
Marcelo Fabián Salazar Corrales⁴**

RESUMEN

Para realizar la modelación matemática y lograr mayor eficiencia en los sistemas de transporte neumático del mineral laterítico en este trabajo se determinan las propiedades físicas y aerodinámicas que mayor influencia tienen en el transporte. Se establece, a partir de técnica experimental, la correlación de la velocidad de flotación y el coeficiente de resistencia en función del diámetro y el contenido de humedad de las partículas. Se determina, además, la densidad de las partículas, densidad aparente y composición granulométrica del material. Se confirmó experimentalmente que la velocidad de flotación alcanza un valor máximo de 5,42 m/s para el mayor diámetro de partículas presente en las muestras. La densidad aparente toma un valor de 1,0683 g/cm³ y la densidad de las partículas es de 3,0269 g/cm³.

Palabras claves: Transporte neumático, velocidad de flotación, densidad, partículas de mineral laterítico

ABSTRACT

To carry out the mathematical modelation and to achieve bigger efficiency in the pneumatic conveying systems, in this work the physical and aerodynamic properties of lateritic ore that have a big influence on those systems, are determined. The correlation among flotation speed and resistance coefficient settles down starting from the appropriate experimental technique in function of the diameter and the content of humidity of the particles. It was also determined the density of the particles, apparent density and composition granulometric of the material. It was confirmed experimentally that the flotation speed reaches a maximum value of 5,42 m/s for the biggest present diameter of particles in the samples. The density apparent average takes a value of 1,0683 g/cm³ and the density average of the particles is of 3,0269 g/cm³, in accordance with the technique experimental employed.

Key Words: Pneumatic conveying, flotation speed, density, particles of ore mineral

Recibido 24 de marzo del 2017; revisión aceptada 24 de abril 2017

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, enrique.torres@utc.edu.ec

² Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, hector.laurencio@utc.edu.ec

³ Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, paco.vasquez@utc.edu.ec

⁴ Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga, Ecuador, mfsalazar@espe.edu.ec

1. INTRODUCCIÓN

El transporte neumático por sus múltiples ventajas constituye uno de los más avanzados medios de transporte de sólidos, el mismo se encuentra aplicado a nivel mundial en diversas industrias. Un paso importante en la modelación matemática, evaluación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático es determinar las propiedades físicas y aerodinámicas del material en las condiciones en que se realizará el transporte del mismo.

En las empresas donde se utilizan estos sistemas para el transporte de minerales lateríticos, el gran consumo de energía se debe, fundamentalmente, a que el transporte se realiza en fase diluta a bajas concentraciones (14 kg de material / m³ de aire), muy por debajo de los valores que reporta la literatura [1] para el transporte de otros materiales en los que la concentración de la mezcla supera los 40 kg de material/ m³ de aire.

La modelación del flujo en el transporte neumático y el cálculo de su pérdida de presión es una tarea difícil; esto es debido a las diferentes concentraciones en peso de la mezcla (relación entre la cantidad de material transportado y la cantidad de aire), que implica diferentes tipos de flujo, cada uno de estos flujos requieren su propio modelo a fin de proporcionar un método de cálculo específico.

Para la optimización de los sistemas de transporte neumático es necesario transitar por cuatro etapas fundamentales: Determinación de las propiedades físicas y aerodinámicas del mineral, modelación teórico - experimental del proceso, simulación con el empleo de técnicas computacionales del proceso a escala industrial y optimización del sistema. Este trabajo está dedicado a la primera etapa.

Varios investigadores han tratado la temática del transporte neumático y la influencia de sus propiedades en la modelación, selección y diseño de estos sistemas. En el trabajo desarrollado por [2], se determinan las propiedades físicas y aerodinámicas del bagazo, harina de trigo y el centeno. Estos resultados son posteriormente utilizados por [3] para obtener una metodología de cálculo que permita la proyección de los sistemas de transporte neumático de bagazo en los centrales azucareros del país.

No menos importantes son los trabajos desarrollados por [1, 4, 5], donde se analiza la influencia de las propiedades de otros materiales tales como: madera, arroz, pelets de polietileno, entre otros, en las pérdidas de presión y el consumo de energía específica de los sistemas de transporte neumático.

En trabajos desarrollados por otros autores para analizar el movimiento de las partículas en un flujo de gas [6-9] emplean métodos de simulación para describir el movimiento de las

partículas y analizar el efecto de la pulsación del gas en el modelo de flujo, así como la interacción y colisiones entre las partículas y con las paredes de la tubería.

Relacionado con el mineral laterítico existen pocos trabajos orientados a determinar las propiedades de los materiales utilizados en los sistemas de transporte neumático, dentro de ellos se destaca el trabajo desarrollado por [10], en el que se realiza una comparación y conjugación de métodos para determinar el contenido de humedad inicial en las distintas menas de los yacimientos lateríticos, aplicándose el método de reflexión neutrónica.

En este artículo se determinan otras propiedades necesarias para la evaluación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático como son: velocidad de flotación, densidad de partículas, densidad aparente.

2. METODOLOGÍA

2.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para una mejor comprensión de los diferentes tópicos se expone cada técnica experimental por separado, analizando en cada una de ellas el procedimiento seguido para las tres propiedades físicas y aerodinámicas encontradas en el trabajo.

Velocidad de flotación de las partículas y coeficiente de resistencia

Técnica experimental empleada

Para la determinación de este parámetro se construyó una instalación experimental en áreas del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, los detalles de la misma se encuentran en la figura 1.

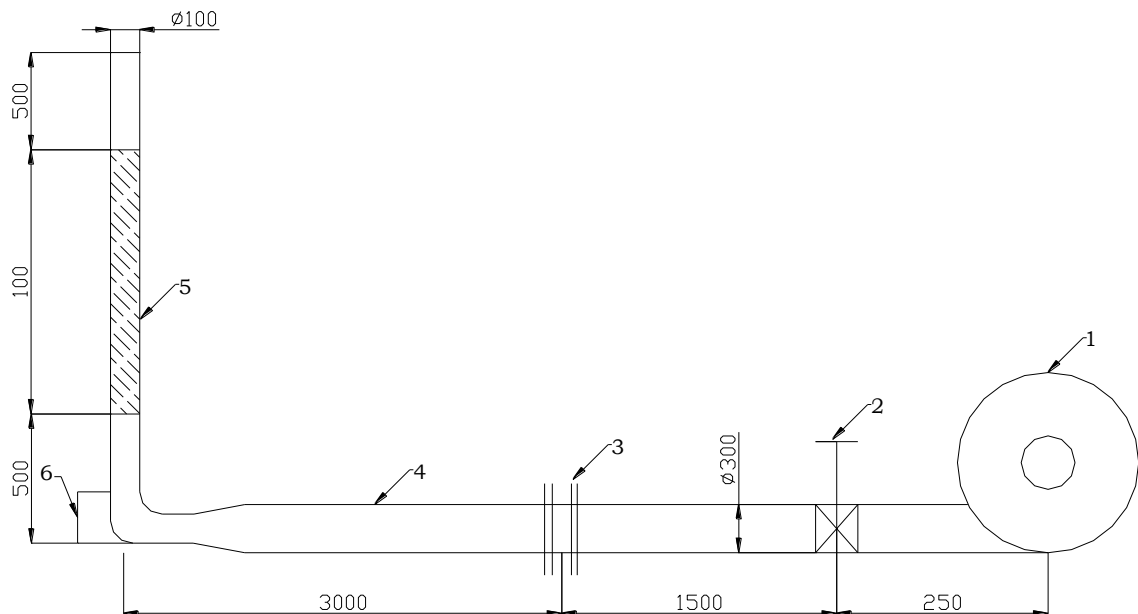


Fig.1. Instalación experimental para determinar la velocidad de flotación del mineral laterítico.

Las partes componentes de esta instalación son:

1. Fuente de aire (Ventilador)

2. Válvula para la regulación del flujo de aire.
3. Cámara con platillo orificio para la conexión del flujómetro.
4. Tubería horizontal
5. Visor de la velocidad de flotación
6. Cámara con gaveta para la recolección del producto

El material se clasificó utilizando un juego de tamices según la escala incompleta de Tayler con módulo $\sqrt{2}$, en esta selección se tomó como punto de partida el diámetro máximo de las partículas que se desean analizar, los valores se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Algunas propiedades del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático

• Contenido de humedad: 4,5%			
• Forma de las partículas: Esféricas			
• Humedad de equilibrio: 3,9%			
• Composición granulométrica			
Clase de tamaño (mm)	% en peso	Clase de tamaño (mm)	% en peso
+ 0,125	1,05	- 0,074 + 0,063	2,45
- 0,125 + 0,09	2,03	- 0,063 + 0,044	30,81
- 0,09 + 0,074	1,5	- 0,044	62,16

Para determinar la velocidad de flotación de las partículas primeramente se establece un flujo mínimo estacionario de aire a través del conducto, este valor se controla mediante el flujómetro conectado en la entrada y se regula por medio de la válvula de globo instalada. El incremento de la velocidad del aire fue de 0,1 m/seg. comenzando a una velocidad mínima de 1 m/seg para cada experimento, el tiempo de espera entre incrementos fue de 1 minuto. En cada posición se realizaron tres réplicas para las clases de tamaño.

El tamaño de las muestras fue de 50 gramos. En la cámara con gaveta se recolectaron las partículas que no son arrastradas en el flujo de gases, determinándose la velocidad de flotación por diferencia de pesada, también se observó el momento en que las partículas se mantuvieron flotando en el flujo de aire. El tubo vertical tiene una longitud $L=2000$ mm, lo que equilibra la velocidad del gas a régimen turbulento.

Coefficiente de resistencia del mineral laterítico

Existe una estrecha relación entre la velocidad de flotación y el coeficiente de resistencia para el transporte neumático del mineral laterítico, parámetro necesario para aplicar los criterios de semejanzas en la modelación y simulación de estos sistemas.

Bajo el movimiento relativo entre una partícula y el aire a su alrededor, se ejerce una fuerza de resistencia sobre la partícula. En un movimiento vertical hacia arriba de las partículas y el aire, la fuerza de resistencia actuando sobre la misma supera la fuerza neta descendiente o la diferencia entre la fuerza gravitacional y la fuerza de sustentación. Esta expresada matemáticamente conduce a la siguiente ecuación:

$$V_F = \sqrt{\frac{4}{3} \times g \times \frac{dx}{\lambda} \times \frac{(\rho_M - \rho_G)}{\rho_G}} \quad (1)$$

Donde:

dx - diámetro de las partículas (m)

ρ_M - densidad del material (kg/m³)

ρ_G - densidad del gas (kg/m³)

λ - coeficiente de resistencia del mineral laterítico.

ν - Coeficiente cinemático de viscosidad (m²/s)

V_F – Velocidad de flotación (m/s)

Las partículas dentro de todo el margen de variación de su diámetro (0,025 mm– 0,044 mm), tienen un número de Reynolds de flotación que se puede expresar a través de la siguiente expresión.

$$Re_F = \frac{V_F \times dx}{\nu} \quad (2)$$

Utilizando la ecuación (1) se puede determinar el comportamiento del coeficiente de resistencia en función del diámetro de las partículas y la velocidad de flotación.

Densidad aparente

Materiales y reactivos utilizados

- Balanza analítica de precisión 0,01g.
- Agua destilada
- Juego de Tamices
- Estufa
- Embudo de crisol
- Cubeta
- Probeta graduada

Técnica experimental:

1. Se toma una muestra de mineral y se seca en la estufa a una temperatura de 100 grados hasta peso constante, y se tamiza de manera tal que permita la clasificación de las partículas

de la roca de acuerdo a su diámetro.

2. Se lava la probeta con agua destilada, se seca en la estufa y se pesa obteniéndose la masa de la probeta (m). Cada muestra según su diámetro se traslada en una cubeta y se deposita en la probeta graduada, se trata de eliminar todo el aire de la muestra de manera que ésta quede lo más compacta posible y al mismo nivel mediante golpecitos en una mesa y se mide el volumen ocupado por esta (V_n). Se hace este procedimiento para todas las muestras clasificadas. Se toma la probeta con la muestra y se pesa obteniéndose la masa (m_n).
3. Después se determina la densidad aparente por la fórmula:

$$\rho = \frac{m_n - m}{V_n} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (3)$$

Dónde el subíndice n indica el número de la muestra según cada caso

Densidad de partículas

Para determinar la densidad del mineral se utilizó el método picnométrico por poseer todas las condiciones para su realización en el laboratorio de Física de las Rocas de la Facultad de Minas - Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Velocidad de flotación y coeficiente de resistencia del mineral laterítico

Una vez desarrollada la técnica experimental expuesta en el tópico anterior (**desarrollo experimental**) en la tabla 2 se pueden observar los resultados de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para diferentes valores del contenido de humedad. En esta se presentan los valores promedios de cada uno de los experimentos.

Tabla 2. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para diferentes valores del contenido de humedad.

dx (mm)	0,250	0,205	0,143	0,108	0,077	0,054	0,044	Contenido de humedad
Vf ₁ (m/s)	5,42	4,93	4,61	4,16	3,67	3,15	2,93	7,3%
Vf ₂ (m/s)	5,21	4,74	4,23	3,83	3,25	2,92	2,64	4,5%
Vf ₃ (m/s)	4,94	4,31	3,97	3,51	2,97	2,59	2,37	3,9%
λ	0,304	0,301	0,264	0,243	0,24	0,209	0,208	4,5%
Re _F	81,97	61,152	38,068	26,032	15,749	9,923	7,31	4,5%

A partir de los datos experimentales promedios de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas, se obtienen las curvas de velocidad de flotación. El ajuste de curva

se realizó a partir de una ecuación del tipo (5) con un coeficiente de correlación superior a 0.85 en todos los casos.

El modelo general ha sido utilizado por distintos autores para la correlación de otros materiales (Pacheco, 1984), este toma la forma general siguiente:

$$V_f = K_1 \times dx^{K_2} \tag{4}$$

Donde K_1 y K_2 son constantes.

Los resultados se muestran en las ecuaciones 5, 6 y 7

$$V_{f1} = 8,69 \times dx^{0,34} \quad \text{Para contenido de humedad del 7,3 \%} \tag{5}$$

$$V_{f2} = 8,81 \times dx^{0,38} \quad \text{Para contenido de humedad del 4,5 \%} \tag{6}$$

$$V_{f3} = 8,58 \times dx^{0,41} \quad \text{Para contenido de humedad del 3,9 \%} \tag{7}$$

En la figura 2 se muestra el comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para diferente contenido de humedad (H). Se observó un incremento de la misma con el contenido de humedad como se esperaba, alcanzándose el valor máximo para $H=7,3$ % con un valor de 5,42 m/s.

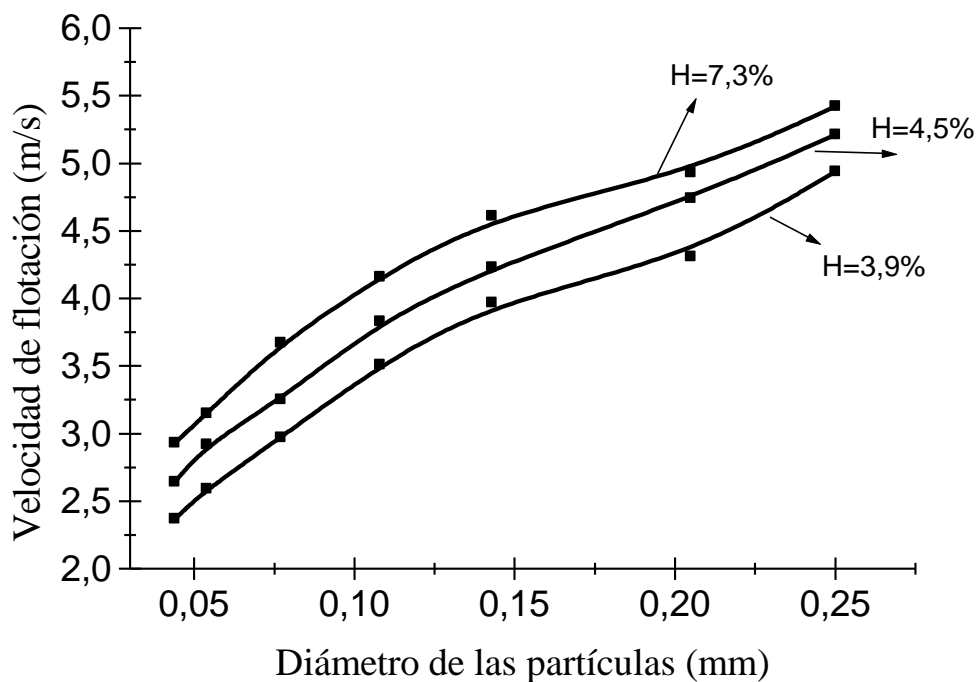


Fig. 2. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para diferentes contenido de humedad.

Se observa a partir de las ecuaciones y figura obtenidas que la velocidad de flotación depende de forma significativa del diámetro de las partículas y del contenido de humedad del mineral, factores que es necesario tener en cuenta en la selección de la velocidad mínima de los sistemas de transporte neumático.

Coeficiente de resistencia

Los valores del coeficiente de resistencia λ , calculados por la ecuación (1), se presentan en la tabla 2.

Se observa a partir de los resultados obtenidos que el coeficiente de resistencia del mineral laterítico se incrementa con el incremento del diámetro de las partículas y el número de Reynolds. Comparando estos resultados con los obtenidos para otros materiales (Pacheco, 1984), para el mineral laterítico estos valores son inferiores. Lo anterior se atribuye a los valores del diámetro de partículas ensayados que en nuestro caso se encuentra en el orden de los micrones, independientemente del valor de densidad de partículas, superior a otros materiales tales como: Bagazo, Soya, harina, entre otros. El valor máximo del coeficiente de resistencia se obtiene para un diámetro de partículas de 0,250mm, tomando un valor de 0,304.

Densidad real y aparente

En la tabla 3 se presentan los resultados promedio de la densidad aparente en función del diámetro de las partículas. La correlación se realizó a partir de una ecuación del tipo (8).

Tabla 3. Comportamiento de la densidad aparente en función del diámetro de las partículas.

dx (mm)	0,250	0,205	0,143	0,108	0,077	0,054	0,044
ρ_{apa} (g/cm ³)	0,5733	0,9517	0,9965	1,0583	1,0744	1,1025	1,1143

$$\rho_{apa} = K_3 \times EXP^{-K_4 \times dx} \tag{8}$$

Los resultados del análisis de regresión se muestran en la ecuación (9) y figura 3

$$\rho_{apa} = 1,175 \times EXP^{-1,114 \times dx} \tag{9}$$

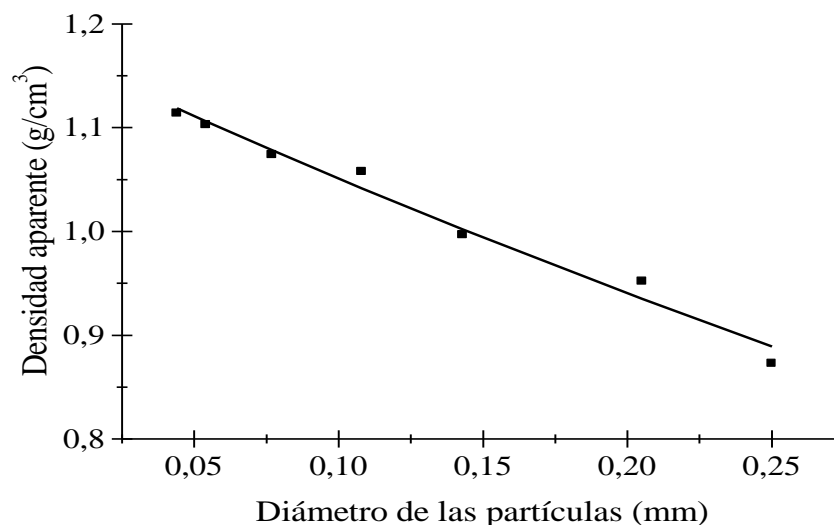


Fig.3. Comportamiento de la densidad en función del diámetro de las partículas.

De lo anterior se comprueba que la densidad aparente disminuye con el incremento del diámetro de las partículas, alcanzándose el valor de 1,1143 g/cm³ para el menor diámetro de

partículas presente en las muestras, según la clasificación efectuada. La densidad aparente promedio es de 1,0683 g/cm³.

En la tabla 4 se muestran los resultados de la densidad de las partículas a partir del procesamiento estadístico realizado utilizando el programa profesional Microsoft Excel. La densidad de las partículas promedio para las muestras analizadas tiene un valor de 3,0269 g/cm³.

Tabla 4. Resultados de la densidad real para cada una de las muestras analizadas

Muestra	Densidad real (g/cm ³)		Procesamiento estadístico	
Muestra	Benceno	Gas oil	Media	3,0269
1	3,0279	3,0229	Error típico	0,00170553
2	3,0254	3,0204	Mediana	3,027
3	3,0301	3,0279	Moda	3,0279
4	3,0329	3,0179	Desviación estándar	0,00539
5	3,0354	3,0279	Varianza	2,9088x 10 ⁻⁴

CONCLUSIONES

1. Se confirma experimentalmente que la velocidad de flotación depende de forma significativa del diámetro y del contenido de humedad de las partículas. Su valor máximo es de 5,42 m/s para el mayor diámetro de partículas presente y un contenido de humedad del 7,3%.
2. El valor máximo del coeficiente de resistencia del mineral laterítico para un contenido de humedad del 4,5% tiene un valor de 0,304. Este pequeño valor se debe al diámetro de partículas utilizado en estos sistemas que se encuentra por debajo de los 250 micrones.
3. Existe notable diferencia entre la densidad aparente y la densidad de las partículas utilizada en los sistemas de transporte neumático. La densidad aparente promedio toma un valor de 1,0683 g/cm³ y la densidad real de las partículas es de 3,0269 g/cm³, de acuerdo con la técnica experimental empleada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lampinen and Markku, "Calculation Methods for determining the pressure Loss of Twophase Pipe Flow and Ejectors in Pneumatic Conveying Systems," presented at the Acta polytechnica scandinavica Mechanical Engineering series No 99, Helsinki University of Technology Laboratory of Thermal Engineering. Finland, 1991.
- [2] Pacheco and Pedro, "Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y poli dispersos," Tesis doctoral, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1984.
- [3] Lesme, "Modelación del movimiento de las partículas y pérdidas en codos durante el transporte neumático del bagazo," Tesis doctoral, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1996.
- [4] Chavoshgoli, "Aerodynamic and some physical properties of sunflower seeds as affected by moisture content," *Agric Eng Int: CIGR Journal*, vol. 16, 2014.
- [5] Taylor, "Specific energy consumption and particle attrition in neumatic conveying," *Unilever Research and Engineering*, vol. 11, pp. 1-13, 2001.
- [6] Harada, Tanaka, and Tsuji, "Fluid Force Acting on a Falling Particle toward a Plane Wall," presented at the ASME FEDSM'00 (ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting), Boston, USA, 2000.
- [7] Kawaguchi, Miyoshi, Tanaka, and Tsuji, "Discrete Particle Analysis of 2D Pulsating Fluidized Bed," presented at the 4th Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF-2001), New Orleans, USA, May 27-June1, (2001), Paper No. 838 (CD-ROM), 2001.
- [8] Pan, Tanaka, and Tsuji, "Large-Eddy Simulation of Particle-Laden Rotating Channel Flow," presented at the ASME FEDSM'00 (ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting), Boston, USA, June 11-15, (2000), Paper No. FEDSM2000-11144(CD-ROM), 2000.
- [9] Miyoshi, Kawaguchi, Tanaka, and Tsuji, "Numerical Analysis on Effects on Pulsating Gas on Flows in Gas-Solid Fluidized Bed," presented at the Fourth International Particle Technology Forum (AIChE Annual Meeting 2000), Los Angeles, USA, November 12-17, (2000) (CD-ROM).
- [10] Miranda, "Comparación y conjugación de métodos de determinación de humedad en la Industria del Níquel," *Minería y Geología*, vol. 13, pp. 42-47, 1996.