

**TABLA 6. BALANCE MATERIAL DE 1 KG DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO**

ENTRADA							
	C	H	O	N	S	A	Total
Combustible	0,8596	0,1052	0,005	0,005	0,025	0,0002	1
Aire			3,78	12,65			16,43
Total	0,8596	0,1052	3,785	12,655	0,025	0,0002	17,43
SALIDA							
CO <sub>2</sub>	0,8596		2,2923				3,1519
SO <sub>2</sub>			0,025		0,025		0,050
H <sub>2</sub> O		0,1052	0,8333				0,9385
O <sub>2</sub>			0,634				0,0634
N <sub>2</sub>				12,655			12,655
A						0,0002	0,0002
Total	0,8596	0,1052	3,785	12,655	0,025	0,0002	17,43

**TABLA 7. VOLUMEN DE GASES SALIENTES DEL HORNO**

TIPO DE GAS	VOLUMEN DE GASES, m <sup>3</sup>			%
	Tecnológicos	De combustión	TOTAL	
CO <sub>2</sub>	2,49	55,48	57,97	6,87
SO <sub>2</sub>	2,81	0,69	3,50	0,41
O <sub>2</sub>	0,16	15,26	15,42	1,83
N <sub>2</sub>		395,62	395,62	46,87
H <sub>2</sub> O	331,06	40,57	371,63	G,Tecnol 39,22
TOTAL	336,52	507,62	844,14	Total 100

**TABLA 8. BALANCE ENERGÉTICO DEL HORNO DE CALCINACIÓN DEL CBN CON ADICIÓN DE NiS**

ENTRADA		
ÍNDICE	KJ	%
Q <sub>1</sub> = Calor de la combustión del combustible	1 403 403	85,70
Q <sub>2</sub> = Calor físico del combustible	8 009	0,49
Q <sub>3</sub> = Calor físico del aire	20 703	1,26
Q <sub>4</sub> = Calor de las reacciones exotérmicas de la oxidación del NiS	205 463	12,55
TOTAL	1 637 578	100
SALIDA		
Q <sub>5</sub> = Calor para calentar y evaporar la humedad de la carga	663 005	40,49
Q <sub>6</sub> = Calor de las reacciones endotérmicas	144 267	8,81
Q <sub>7</sub> = Calor para calentar el material y el producto	56 264	3,44
Q <sub>8</sub> = Calor físico de los gases salientes	620 514	37,89
Q <sub>9</sub> = Calor físico del polvo	9 861	0,60
Q <sub>10</sub> = Calor perdido al medio ambiente	143 667	8,77
TOTAL	1 637 578	100

## DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y AERODINÁMICAS DEL MINERAL LATERÍTICO PARA FINES DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

*Determining of physical and aerodynamic properties of the lateritic mineral for pneumatic conveying systems*

Enrique Torres Tamayo<sup>1</sup>  
René Lesme Jaén<sup>2</sup>  
Rafael Galano Milhet<sup>1</sup>  
Ekaterina Golubova<sup>3</sup>

E-mail: etorrest@ismm.edu.cu  
<sup>1</sup> Instituto Superior Minero Metalúrgico  
<sup>2</sup> Universidad de Oriente  
<sup>3</sup> Empresa Las Camariocas

### RESUMEN

Los sistemas de transporte neumático de materiales sólidos son ampliamente utilizados en la industria niquelera con tecnología carbonato amoniacal (CARON), para el traslado del mineral laterítico desde la planta de preparación hasta los hornos de reducción; sin embargo, estos sistemas tienen en contra un elevado consumo energético que llega a alcanzar los 9,5 MW/h. Para modelar matemáticamente y lograr mayor eficiencia en los sistemas de transporte neumático, se determinaron las propiedades físicas y aerodinámicas que mayor influencia tienen en el transporte. Se estableció, a partir de la técnica experimental empleada, 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 obtuvo, además, la densidad de las partículas, densidad aparente y composición granulométrica del material. Estos parámetros se determinaron tomando en cuenta su importancia en la modelación matemática del proceso, y en la evaluación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático. Experimentalmente se confirmó que la velocidad de flotación alcanza un valor máximo de 5,42 m/s para el mayor diámetro de partícula presente en las muestras, mientras que la densidad aparente toma un valor de 1,0683 g/cm<sup>3</sup>, y la densidad de las partículas, de 3,0269 g/cm<sup>3</sup>.

**PALABRAS CLAVE:** Densidad, transporte neumático, velocidad de flotación.

### ABSTRACT

The pneumatic conveying systems of solid materials are broadly used in the industries of the nickel with carbonate-ammoniacal technology (CARON), mainly to transfer of the lateritic mineral from the plants of preparation of mineral to reduction ovens. The fundamental problem of these systems is the high energy consumption reaching the 9.5 MW/h in each one of them. 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 mineral has a big influence of 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. These parameters were determined taking into account their importance in the mathematical modelation of the process and in the evaluation, calculation and design of pneumatic conveying systems. It 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/cm<sup>3</sup> and the density average of the particles is of 3,0269 g/cm<sup>3</sup>, in accordance with the technique experimental employed.

**KEY WORDS:** Density, pneumatic conveying, flotation speed.

## INTRODUCCIÓN

Por sus múltiples ventajas, el transporte neumático constituye uno de los más avanzados medios de transporte de sólidos y es utilizado a nivel mundial por diversas industrias. La modelación matemática, evaluación, cálculo y diseño de estos sistemas, requiere del conocimiento previo de las propiedades físicas y aerodinámicas del material para transportar y de las condiciones en que se efectuará el transporte. No obstante sus ventajas, el empleo del transporte neumático se ve limitado por su excesivo consumo energético. Aunque en la literatura consultada no se reportan muchas investigaciones científicas que traten este aspecto, consideramos que una de las causas asociadas a este problema es la selección incorrecta de la velocidad del gas transportador y, por otro lado, pudiera también influir el hecho de que las características físicas de los materiales para transportar resultan muy variadas.

La modelación y el cálculo de pérdida de presión del flujo durante el transporte neumático, se dificulta cuando existen en la mezcla transportada diferentes concentraciones en peso. Cuando esto sucede provoca diferentes tipos de flujo, cada uno de los cuales requiere su propio modelo a fin de proporcionar un método de cálculo específico.

Cuando el transporte se realiza a distancias de 1 km o más, se emplean velocidades relativamente altas a las cuales los sólidos viajan en una aparente suspensión uniforme, en la llamada fase pobre o diluida. Para distancias menores es recomendable el transporte en fase densa, ya que su consumo energético es menor.

En las plantas procesadoras de níquel de tecnología CARON que operan en Moa se utiliza el transporte neumático en tres lugares fundamentales:

- Desde la salida de los secaderos hasta las tolvas de los molinos (cuatro sistemas independientes).
- Desde las tolvas de los molinos hasta los silos (seis sistemas independientes).
- Desde la salida de silos hasta los hornos de soleras múltiples (seis sistemas independientes).

El gran consumo de energía de estos sistemas se debe, fundamentalmente, a que el transporte se realiza en fase diluta a bajas concentraciones (14 kg de material / m<sup>3</sup> de aire), muy por debajo de los valores que reporta la literatura (Lampinen, 1991) para el transporte de otros materiales en los que la concentración de la mezcla no supera los 40 kg de material / m<sup>3</sup> de aire.

La influencia de las propiedades físicas y aerodinámicas en la modelación, selección y diseño

del transporte neumático, ha sido tratada por diferentes investigadores. Pacheco (1984) determina estas propiedades en el bagazo, la harina de trigo y el centeno, las que posteriormente permitieron a Lesme (1996) obtener una metodología de cálculo para la proyección de los sistemas de transporte neumático de bagazo en los centrales azucareros cubanos. No menos importantes son los trabajos desarrollados por Lampinen (1991) y por Taylor (2001), quienes analizan la influencia de las propiedades antes referidas en sustancias como madera, arroz y pelets de polietileno, en las pérdidas de presión y el consumo de energía específica de los sistemas de transporte neumático. Trabajos desarrollados por otros autores a fin de analizar el movimiento de las partículas en un flujo de gas (Harada *et al.*, 2000; Miyoshi *et al.*, 2000; Pan *et al.*, 2000 y Kawaguchi *et al.*, 2001), reportan el empleo de 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 las colisiones entre partículas, y entre éstas y las paredes de la tubería. Sin embargo, existen muy pocos trabajos referentes a la determinación de las propiedades físicas y aerodinámicas desde el punto de vista del transporte neumático de minerales lateríticos. Uno de los trabajos donde se reporta la determinación del contenido de humedad es el de Miranda, y otros (1996), quienes aplican el método de reflexión neutrónica para determinar el contenido de humedad inicial en las distintas menas de los yacimientos lateríticos. En una publicación previa, uno de los autores del presente trabajo (Torres, 1999) analiza propiedades físicas como: contenido de humedad, composición granulométrica, forma de las partículas y humedad de equilibrio, las que se resumen en la tabla 1.

Este artículo concierne a la determinación de otras propiedades necesarias para la evaluación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático, como son: la velocidad de flotación, densidad de partícula y densidad aparente.

En las teorías modernas sobre el transporte neumático, la característica aerodinámica más importante de las partículas es la velocidad de flotación. De acuerdo con la literatura revisada, para una partícula caracterizada por su diámetro  $d$ , y su velocidad de flotación ( $V_f$ ), existe un cierto valor de la velocidad del gas, por debajo del cual el transporte neumático no es posible. Esto quiere decir que si se conoce la velocidad mínima necesaria para que ocurra el transporte, es posible entonces seleccionar la velocidad óptima. La obstrucción en el proceso de flujo se presenta,

**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

tan pronto como en cualquier punto de la sección transversal del conductor se identifique una velocidad del gas menor o igual que  $V_f$ . En esta zona se producirá el aumento de la concentración, el material descenderá y empezará el colapso del proceso. Por la distribución que tienen las velocidades en el tubo, es evidente que la zona más expuesta al inicio de este fenómeno es la del perímetro del tubo.

El estudio del transporte neumático en fase densa, es tratado por Kawaguchi *et al.* (2000) y Pan *et al.* (2001) con el empleo de métodos numéricos. Ellos analizan la influencia de la concentración de la mezcla y las colisiones entre las partículas en la velocidad de flotación. Estos resultados son válidos para el modelo general de flujo de transporte neumático, donde se analizan todas las variables que intervienen en la pérdida de presión durante el movimiento de la mezcla gas – sólido por el interior de un conducto. Taylor (2001), al estudiar la velocidad de flotación de las partículas, prestó gran interés al comportamiento en las proximidades de las paredes del tubo. Pacheco (1984) se interesó por la distribución de concentraciones de partículas en el tubo y observó que, al disminuir la velocidad del gas hasta cierto valor, la concentración en las paredes aumentaba, y que sucesivas disminuciones de la velocidad del gas provocaban la obstrucción. Raheman y Jindal (1993) hacen pruebas con partículas de arroz y semillas de soya para velocidad del aire desde 8 hasta 20 m/s, y observan la tendencia del traslado hacia la zona perimetral. Lo anterior se explica como consecuencia del carácter pulsante de la turbulencia que provocan sobre las partículas fuerzas aerodinámicas con componentes radiales que las obligan a emigrar hacia la pared. La solución al problema estará entonces en encontrar un valor medio de velocidad mínima del flujo de gas tal, que en el perfil de velocidades actúe sobre la partícula

la en las proximidades de la pared, una velocidad igual a la velocidad de flotación.

La densidad de partículas se define como la masa correspondiente a la unidad de volumen ocupado por una partícula simple. En ella no intervienen la porosidad del material ni el diámetro de las partículas. Por otra parte, la densidad aparente se define como la masa total correspondiente a la unidad de volumen ocupado por el material. La densidad aparente varía con la distribución por tamaño de las partículas y con los cuerpos que la rodean. La porosidad del cuerpo sólido, así como la materia que llena sus poros o espacios vacíos intermedios, influye también en el valor de la densidad aparente; para una simple partícula de un material no poroso la densidad real resulta igual a la densidad aparente.

El objetivo que se persigue con el trabajo es determinar, para el mineral laterítico, las propiedades físicas y aerodinámicas antes mencionadas con fines de modelación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para una mejor comprensión, se expone cada técnica experimental por separado, analizando en cada una de ellas el procedimiento seguido.

### Velocidad de flotación de las partículas

#### Técnica experimental

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.

Las partes componentes de esta instalación son:

1. Fuente de aire (ventilador).
2. Válvula para la regulación del flujo de aire.

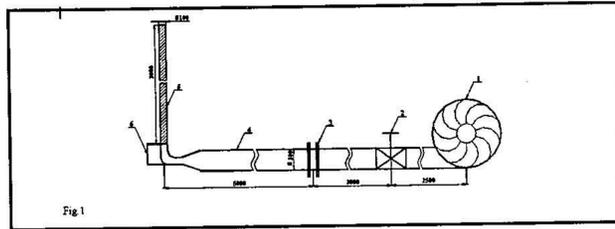


Figura 1. Instalación experimental para determinar la velocidad de flotación del mineral laterítico.

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 Taylor 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.

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. y comenzó a una velocidad mínima de 1 m/seg. para cada experimento realizado; el tiempo de espera entre incrementos fue de 1 minuto para cada caso. En cada posición se realizaron tres réplicas para cada una de las clases de tamaño.

Se utilizaron muestras de 50 gramos; en la cámara con gaveta se recolectaron las partículas no arrastradas en el flujo de gases, y se determinó la velocidad de flotación por diferencia de pesada. Se observó, además, el momento en que las partículas se mantuvieron flotando en el flujo de aire. La longitud del tubo vertical utilizado fue de 2 m, pues es a este valor cuando se logra equilibrar la velocidad del gas a régimen turbulento.

#### Coefficiente de resistencia

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

Si una partícula se mueve en presencia de un flujo de aire, se ejerce una fuerza de resistencia sobre ésta. Cuando el movimiento ocurre en sentido vertical, hacia arriba, la fuerza de resistencia que actúa sobre la

partícula supera la fuerza gravitacional y la fuerza de sustentación. Esto se expresa matemáticamente mediante la ecuación siguiente:

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

donde:

$dx$  - diámetro de las partículas (m)

$\rho_M$  - densidad del material ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_G$  - densidad del gas ( $\text{kg/m}^3$ )

$\lambda$  - coeficiente de resistencia del mineral laterítico

$V_F$  - 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 ( $Re_F$ ) que puede expresarse mediante:

$$Re_F = \frac{V_F \cdot dx}{\nu}, \quad \nu - \text{Coeficiente cinemático de viscosidad (m}^2/\text{s)} \quad (2)$$

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

- 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, se seca en la estufa a una temperatura de 100 °C hasta alcanzar un peso constante y se tamiza, de manera tal que permita la clasificación de las partículas de acuerdo con su diámetro.
2. Se lava la probeta con agua destilada, se seca en la estufa, se pesa y se obtiene la masa (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 ésta ( $V_n$ ). Se repite el pro-

cedimiento para todas las muestras clasificadas. Se toma la probeta con la muestra y se pesa para obtener la masa ( $m_n$ ).

3. Se determina la densidad aparente por la fórmula:

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

donde, 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.

#### Materiales y reactivos

- Picnómetros
- Balanza analítica
- Agua destilada
- Mortero
- Tamiz
- Estufa
- Micropipeta
- Embudo de crisol
- Cubeta
- Bicromato de potasio
- Ácido sulfúrico
- Benceno
- Gas oil

#### Técnica experimental

1. El picnómetro se lava primeramente con una mezcla caliente de bicromato de potasio con ácido sulfúrico, después con agua y seguidamente con agua destilada; se seca y se pesa. Luego se llena mediante una bureta con el líquido picnométrico seleccionado y de nuevo se pesa. La temperatura del líquido picnométrico debe ser de 18 a 22 °C y el picnómetro lleno de líquido debe pesarse en balanzas con precisión de hasta 0,01g. Se obtiene el peso del picnómetro con el líquido ( $g_1$ ).
2. La muestra, en un estado seco, se tritura en un mortero de porcelana y se cierne a través de una zaranda con agujeros de diámetro 0,2 mm. Las partículas de diámetro superior a este valor se vuelven a triturar.
3. Se seca el picnómetro y se selecciona una muestra de roca de 5g, se coloca en una estufa a la temperatura de 100-110 °C hasta alcanzar peso constan-

te, se enfría y se traslada en cubetas al picnómetro seco. El picnómetro con la muestra se pesa en balanzas de precisión con exactitud de 0,01g. Se determina el peso de la muestra (g), restando el peso del picnómetro seco al peso del picnómetro con la muestra.

4. Para eliminar el aire de la muestra, al picnómetro se le echa el líquido picnométrico puro en un 30-50 % de su volumen y se pone a hervir durante 30 min. si la muestra es de granos gruesos, y durante una hora si los granos son finos.
5. Después de la ebullición, se enfría el picnómetro en un baño con agua destilada a temperatura de 18-22 °C. El nivel del líquido debe permanecer estable en el límite superior del menisco; para ello se utiliza una micropipeta con la que se añaden o sustraen gotas de agua, según se requiera. Luego, el picnómetro se pesa cuidadosamente en balanzas de precisión con exactitud de hasta 0,01g y se obtiene el peso del picnómetro con el líquido picnométrico y la muestra, o sea ( $g_2$ ).

Con estos datos, se determina la densidad por la fórmula:

$$\gamma_e = \frac{g \cdot \rho_l}{g_1 + g - g_2} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (4)$$

donde:

$g$  - masa de la muestra seca (g).

$g_1$  - masa del picnómetro con el líquido picnométrico (g).

$g_2$  - masa del picnómetro con el líquido picnométrico y la muestra (g).

$\rho_l$  - densidad del líquido picnométrico ( $\text{g/cm}^3$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Velocidad de flotación y coeficiente de resistencia

La tabla 2 muestra los resultados de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para diferentes valores del contenido de humedad. En ésta se presentan los valores promedios de cada uno de los experimentos realizados.

A partir de los datos experimentales se graficaron las curvas de velocidad de flotación mediante el programa profesional Microcal Origin (1996). El mejor ajuste obtenido para las curvas de velocidad de flotación se obtuvo para una ecuación del tipo (5), con un coeficiente de correlación superior a 0,8 en todos los casos.

$$\rho = \frac{m_n - m}{V_n} \quad (5)$$

donde  $K_1$  y  $K_2$  son constantes.

**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 <sub>1</sub> (m/s)	5,42	4,93	4,61	4,16	3,67	3,15	2,93	7,3 %
Vf <sub>2</sub> (m/s)	5,21	4,74	4,23	3,83	3,25	2,92	2,64	4,5 %
Vf <sub>3</sub> (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 <sub>F</sub>	81,97	61,152	38,068	26,032	15,749	9,923	7,31	4,5 %

La ecuación general de la velocidad de flotación (ecuación 5) fue utilizada por Pacheco (1984) al estudiar el transporte de bagazo. Los coeficientes obtenidos para el caso del transporte de material laterítico se muestran en las ecuaciones 6, 7 y 8, y el ajuste de curvas, en las figuras 2, 3 y 4.

para contenido de humedad del 7,3 % (6)

para contenido de humedad del 4,5 % (7)

para contenido de humedad del 3,9 % (8)

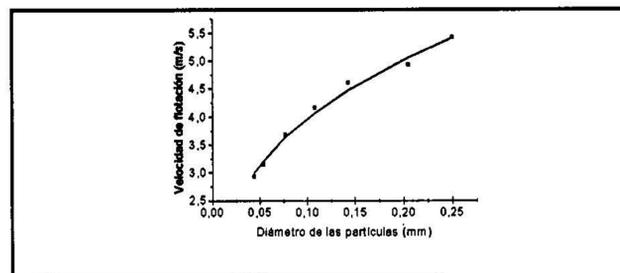


Figura 2. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para un contenido de humedad del 7,3 %.

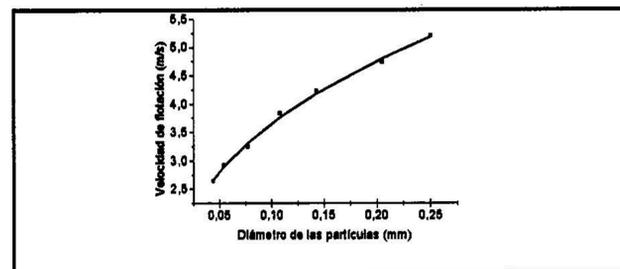


Figura 3. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para un contenido de humedad del 4,5 %.

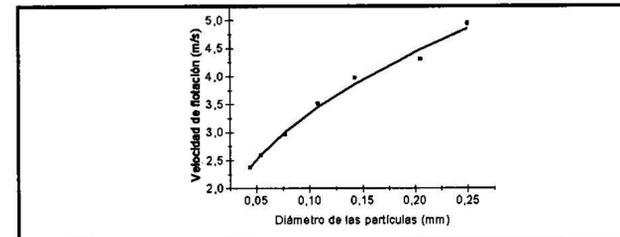


Figura 4. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para un contenido de humedad del 3,9 %.

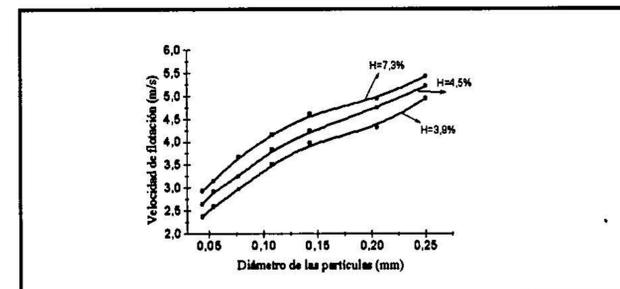


Figura 5. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para diferentes contenidos de humedad.

Se observó un incremento esperado de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para diferentes contenidos de humedad (Fig. 5). El mayor valor de velocidad de flotación alcanzado para el contenido máximo permisible de humedad (7,3 %) fue de 5,42 m/s.

Se pudo constatar, a partir de las ecuaciones y gráficos obtenidos, que la velocidad de flotación depende de forma significativa del diámetro de las partículas y del contenido de humedad del mineral, aspecto que debe tenerse en cuenta al seleccionar la velocidad de flotación mínima de los sistemas de transporte neumático.

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

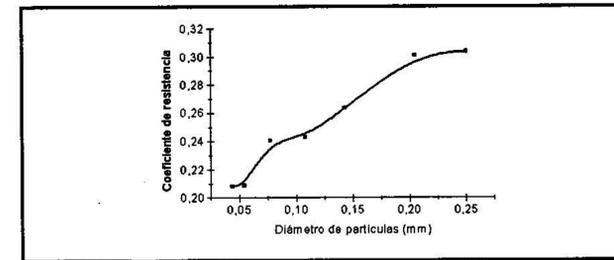


Figura 6. Comportamiento del coeficiente de resistencia del mineral laterítico en función del diámetro de las partículas.

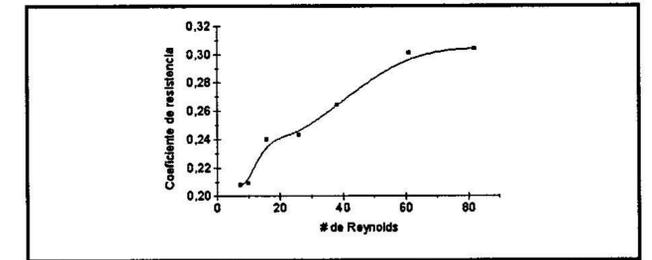


Figura 7. Comportamiento del coeficiente de resistencia del mineral laterítico en función del número de Reynolds para un contenido de humedad del 4,5 %.

En las figuras 6 y 7 se muestra la variación del mismo en función del diámetro de las partículas y el número de Reynolds de flotación. El coeficiente de resistencia del mineral laterítico aumenta con el diámetro de las partículas y el número de Reynolds. El valor máximo del coeficiente de resistencia se obtiene para un diámetro de partículas de 0,250 mm, tomando un valor de 0,304.

Vale decir que los valores obtenidos, tanto para la velocidad como para el coeficiente de resistencia en minerales lateríticos, son inferiores a los obtenidos por Pacheco (1984) para el bagazo de caña. Esto encuentra explicación en el hecho de que, independientemente de que la densidad de las lateritas es mucho mayor que la del bagazo, el diámetro de partículas en las lateritas es del orden de los micrones.

**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 (9).

$$(9)$$

Los resultados del análisis de regresión se muestran en la ecuación (10) y figura 8.

$$\rho_{apa} = 1,175 \cdot Exp^{-1,114 \cdot dx} \quad (10)$$

Se observó que la densidad aparente disminuye con el incremento del diámetro de las partículas, y se alcanzó el valor de 1,1143 g/cm<sup>3</sup> para el menor diámetro de partículas presente en las muestras, según la clasificación realizada. La densidad aparente promedio, tomando en consideración la distribución de las clases de tamaño, es de 1,0683 g/cm<sup>3</sup>.

La tabla 4 muestra los valores de densidad de las partículas a partir del procesamiento estadístico realizado utilizando el programa profesional Microsoft Excel (2000). La densidad de las partículas promedio para las muestras analizadas tiene un valor de 3,0269 g/cm<sup>3</sup>.

**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 <sub>apa</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	0,5733	0,9517	0,9965	1,0583	1,0744	1,1025	1,1143

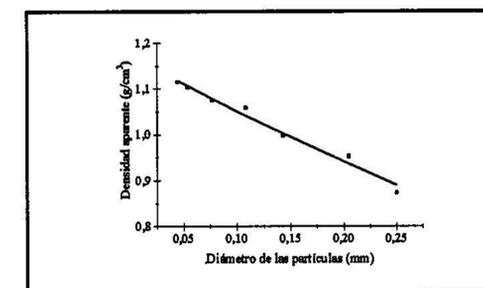


Figura 8. Comportamiento de la densidad en función del diámetro de las partículas.

**TABLA 4. RESULTADOS DE LA DENSIDAD REAL PARA CADA UNA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS**

Muestra	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )		Procesamiento estadístico
	Benceno	Gas oil	
1	3,0279	3,0229	Media: 3,0269
2	3,0254	3,0204	Error típico: 0,00170553
3	3,0301	3,0279	Mediana: 3,027
4	3,0329	3,0179	Moda: 3,0279
5	3,0354	3,0279	Desviación estándar: 0,00539
			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. El valor máximo obtenido fue de 5,42 m/s para el mayor diámetro de partículas (0,250 mm) y para 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. El pequeño valor del coeficiente responde a que el diámetro de partículas utilizado en estos sistemas 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/cm<sup>3</sup> mientras que la densidad promedio es de 3,0269 g/cm<sup>3</sup>, de acuerdo con la técnica experimental empleada.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HARADA, S., T. TANAKA, AND Y. TSUJI, 2000: "Fluid force acting on a falling particle toward a plane wall". In: Proc. of Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston, USA, June 11-15, Paper No. 11267 [CD-ROM].
- KAWAGUCHI, T., T. TANAKA AND Y. TSUJI, 2000: "Numerical analysis of density wave in dense gas-solid flows in a vertical pipe". In: Proc. of the 5th International Conference of Computational Physics: Progress of Theoretical Physics Supplement, No.138, Kanazawa, Japan, pp. 696-701.
- KAWAGUCHI, T., A. MIYOSHI, T. TANAKA AND Y. TSUJI, 2001: "Discrete particle analysis of 2D pulsating fluidized bed". In: Proc. of 4th Int. Conf. on Multiphase Flow, New Orleans, USA, May 27-June 1, Paper No. 838 [CD-ROM].
- LAMPINEN, MARKKU, 1991: "Calculation Methods for Determining the pressure Loss of Twophase Pipe Flow and Ejectors in Pneumatic Conveying Systems". In: Acta

polytechnica scandinavica: Mechanical Engineering series, No. 99, Helsinki University of Technology, Laboratory of Thermal Engineering, Finland, 37 pp.

- LESME J. R., 1996: "Modelación del movimiento de las partículas y pérdidas en codos durante el transporte neumático del bagazo", Universidad de Oriente, Santiago de Cuba [Tesis doctoral], 122 pp.
- MICROCAL ORIGIN (versión 4.1), 1996: Microcal software, Inc. One Round house plaza Northampton, MA 01060. USA.
- MIRANDA, J. L. Y OTROS, 1996: "Comparación y conjugación de métodos de determinación de humedad en la industria del Níquel", *Minería y Geología* 13 (2): 42 - 47.
- MIYOSHI, A., T. KAWAGUCHI, T. TANAKA AND Y. TSUJI, 2000: "Numerical Analysis on Effects on Pulsating Gas on Flows in Gas-Solid Fluidized Bed", En: Proc. of Fourth International Particle Technology Forum, Los Ángeles, USA, November 12-17 [CD-ROM].
- PACHECO, PEDRO M. 1984: "Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y polidispersos", Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. [Tesis doctoral], 107 pp.
- PAN, Y., T. TANAKA AND Y. TSUJI, 2000: "Large-eddy simulation of particle-laden rotating channel flow". En: Proc. Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston, USA, June 11-15, Paper No. 11144 [CD-ROM].
- PAN, Y., T. TANAKA AND Y. TSUJI, 2001: "Numerical study of particle-laden rotating turbulence", en: Proc. of 4th Int. Conf. on Multiphase Flow, New Orleans, USA, May 27-June 1, Paper No.422 [CD-ROM].
- RAHEMAN, H. AND V. K. JINDAL, 1993: "Slip velocity in pneumatic conveying of agricultural grains", *Powder technology*, 5 (1): 60 - 67.
- TAYLOR T., 2001: "Specific energy consumption and particle attrition in pneumatic conveying", *Unilever Research and Engineering*, 11(1) :1 - 13.
- TORRES, E., 1999: "Investigación del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios", Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa. [Tesis de Maestría], 76 pp.

# UTILIZACIÓN DEL MINERAL DE MANGANESO (PIROLUSITA) EN LA PRODUCCIÓN DE ACEROS AL CARBONO

## *Use of manganese ore (pirolusite) in the production of carbon steel*

Efraín Navas Medina  
Aerles Batista Cabrera

E-mail: nava@facing.uho.edu.cu  
Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya

## RESUMEN

Los métodos tradicionales de producción de acero utilizan el ferromanganeso para obtener el porcentaje de Mn en la marca establecida según la norma cubana, pero este compuesto es altamente costoso. Se ensayó, en la producción del Ac 35, sustituir el ferromanganeso por el mineral pirolusita (MnO<sub>2</sub>) con el fin de reducir los costos. Se evaluaron dos variantes de sustitución: la primera consiste en añadir el mineral con virutas de aluminio y coque (o residuos de electrodos) sobre la escoria del metal durante el proceso de reducción, en tanto que la segunda variante emplea el mineral de manganeso en lugar del de hierro durante el proceso de oxidación de las impurezas. Se encontró que ambas variantes son factibles y que la segunda resulta, además, ser más económica.

**PALABRAS CLAVE:** Acero al carbono, ferromanganeso, fusión, pirolusita, tecnología.

## ABSTRACT

The traditional methods of steel production use the ferromanganese to obtain the percentage of Mn in the established mark according to the Cuban norm, but this compound is highly expensive. In the production of the Ac 35, it was substituted the ferromanganese by pirolusite (MnO<sub>2</sub>) with the purpose of reducing the costs. It were evaluated two substitution variants; the first one consists on adding the mineral with aluminum chips and coke (or residuals of electrodes) on the scum of the metal during the reduction process; the second one uses the manganese mineral instead of that of iron during the process of oxidation of the sludges. It was

found that both variants are feasible and that the second also turn out to be more economic.

**KEY WORDS:** Carbon Steel, Ferromanganese, Fusion, Pirolusite, Technology.

## INTRODUCCIÓN

Los métodos convencionales de producción de acero incorporan el ferromanganeso (FeMn) al horno para detener la oxidación del carbono y lograr la cantidad de manganeso requerida en la aleación; sin embargo, el alto costo de este compuesto ha llevado a la búsqueda de alternativas que disminuyan o eliminen su uso. Esta investigación tuvo como objetivo encontrar un sustituto para el FeMn en la producción de aceros al carbono, específicamente en el Ac 35. Como es conocido, el horno de arco con revestimiento básico permite la utilización de los períodos de oxidación y reducción en la tecnología de producción de acero (Kudrin, 1984; Morral, 1985), la cual, en el período de oxidación, utiliza mineral de hierro para lograr la oxidación del metal, la salida de los gases del baño metálico, y la obtención del carbono y del fósforo en la marca establecida.

En el período de reducción del acero se separa el azufre (en forma de CaS), se obtiene la composición química (manganeso y silicio, el porcentaje de silicio se logra con FeSi 45 o FeSi 75), se desgasifica y establece la temperatura necesaria para el vertido en los moldes y se extrae, por último, el metal del horno hacia la cazuela de vertido (previamente calentada a 700 - 900 °C) para la colada.

Las investigaciones preliminares mostraron que en Cuba existe gran cantidad de yacimientos de Mn. A