

COMPORTAMIENTO DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS EN LOS GASES DURANTE EL SECADO DEL MINERAL LATERÍTICO EN TAMBORES CILÍNDRICOS ROTATORIOS

(BEHAVIOR OF THE PARTICLES DRAG'S IN THE GASES DURING THE DRIED
OF THE LATERITIC MINERAL IN CYLINDRICAL ROTARY DRUMS)

ENRIQUE TORRES TAMAYO

RAFAEL GALANO MILHET

EULÍCER FERNÁNDEZ MARESMÁ

ALEXIS GARCÍA PÉREZ

Máster en Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Ingeniero, Departamento de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Doctor, Departamento de Metalurgia. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba.

Ingeniero, Planta de Preparación de Mineral. Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, Moa, Holguín, Cuba.

RESUMEN: Se utiliza un método estadístico - matemático de planificación de experimentos para la investigación del comportamiento del arrastre de partículas finas en los gases durante el secado del mineral laterítico en uno de los secadores en condiciones normales de operación. En un segundo se eliminaron los levantadores sectoriales en el último tercio del equipo, y se analizó en ambos la influencia de los gases residuales provenientes de la planta de hornos de reducción. Se obtiene la correlación y regresión entre las variables de entrada más importantes que intervienen en el proceso: velocidad de los gases en el interior del cilindro (V), contenido de

humedad de los gases (W), y el arrastre de partículas (A) como variable de salida. Los resultados obtenidos ofrecen alentadoras perspectivas sobre la generalización industrial de la propuesta.

Palabras claves: secado, transporte neumático, transferencia de calor, cilindros rotatorios.

ABSTRACT: A mathematical statistic method of planning experiments is used for the research of the behaviour about the drag of fine particle in gases during the process of drying lateritic ore in one of the dryers under ordinary operational conditions. In other drier the sectorial flights were taken out from the

last third of the equipment and the influence of the residual gases that come in from the oven reduction plant was analysed. As the most significant result of the experiment it was obtained the correlation and regression among the most important variables of entry that intervene on the process: speed of the gases inside the cylinder (V), the content dampness of the gases (W), and the drag of particles (A) as variable of exit. The results offer encouraging perspectives for the industrial generalisation of this proposal.

Key Words: dried, pneumatic transportation, heat transfer, rotary cylinders.

INTRODUCCIÓN

El secado, desde el punto de vista industrial, es un proceso de transferencia de calor y de masa, mediante el cual se hace pasar un producto desde un estado inicial húmedo a otro estado final menos húmedo, lo que implica extraer el líquido que le impregna, moja o disuelve para obtener un producto diferente al inicial, ya sea como producto final o como intermedio en un proceso de fabri-

cación dado. Este líquido suele ser agua natural o mezclada, también puede tratarse de otro tipo de disolvente orgánico e inorgánico.

Este proceso en la empresa Ernesto Che Guevara tiene la finalidad de reducir el contenido de humedad del mineral laterítico hasta valores mínimos, con la mayor eficiencia posible para facilitar la molienda. Según datos de proyectos, al secador debe entrar una materia prima

con una relación limonita/serpentina igual a 3; esta relación es actualmente difícil de alcanzar, incluso en las partes más profundas de los pozos donde se concentra el mayor porcentaje de serpentina, esto trae consigo que independientemente de una buena homogeneización se esté trabajando con una relación LB/SB superior a 8; y las perspectivas futuras indican que se seguirá trabajando con este tipo de materia prima.

La Limonita es un material con un elevado contenido de partículas por debajo de 0.074 mm, que es la granulometría con que debe salir más del 80% del mineral una vez que pasa por el proceso de molienda; durante el movimiento de éste por el interior del tambor secador se está produciendo la aglomeración del mineral, se elimina sólo el agua superficial, y queda gran parte del agua interna, todo esto trae consigo la reducción del porcentaje de arrastre en el flujo de gases por debajo de los valores establecidos para estos tipos de equipos, lo que aumenta el contenido de partículas finas que van al proceso de molienda e influye negativamente en el trabajo de los mismos. Cuando esto sucede es necesario disminuir la eficiencia operativa de los secaderos lo cual reduce la alimentación de materia prima para obtener los parámetros deseados en el producto final.

Características del mineral alimentado

La humedad de entrada del mineral, según datos de proyectos, debe ser del 36% y la granulometría debe comportarse aproximadamente como se muestra en la Tabla 1.

TABLA I. GRANULOMETRÍA DEL MINERAL SEGÚN DATOS DE PROYECTO

Clase de tamaño (mm)	% en peso	Clase de tamaño (mm)	% en peso
+101.6	0.3	+1.4	2.7
+50.8	0.6	+0.83	5.2
+38.1	0.6	+0.417	3.8
+25.4	0.7	+0.246	3.9
+19.05	0.5	+0.149	2.6
+12.7	0.6	+0.074	11.3
+6.35	2.7	-0.074	62.2
+3.36	2.3	--	--

En la actualidad, independientemente de una buena homogeneización, esa relación no se cumple incluso en las partes más profundas de los pozos donde se concentra el mayor porcentaje de serpentina, por lo que se está trabajando con una relación $(LB/SB) > 8$ y las perspectivas futuras indican que se seguirá trabajando con este tipo de materia prima.

Para comprobar este comportamiento, antes de acometer el trabajo se realizó un análisis granulométrico al mineral de entrada a partir de cinco muestras aleatorias

tomadas en diferentes días de trabajo, los resultados promedio de cada una de ellas se muestran a continuación:

TABLA II. GRANULOMETRÍA DEL MINERAL EN CONDICIONES ACTUALES

Clase de tamaño (mm)	% en peso	Clase de tamaño (mm)	% en peso
+4	6.31	+0.315	1.739
+3.15	1.883	+0.25	0.761
2.5	1.283	+0.16	1.4
+2.0	0.452	+0.125	0.917
+1.6	0.61	+0.090	1.378
+1.0	1.322	+0.074	2.474
+0.8	0.952	-0.074	77.01
+0.5	1.513	--	--

Como se puede observar en las tablas, según proyecto, el 62% del mineral tiene granulometría por debajo de los 74 mm, que es la granulometría con que debe salir más del 80% del mineral una vez que pasa por el proceso de molienda, sin embargo el análisis muestra que esa cantidad alcanza el 77%. En la actualidad estos equipos poseen un arrastre de partículas con las características anteriormente mencionadas menor del 30%, por lo que en este trabajo se evalúa una variante con vistas a incrementar el mismo y enviarlo a las tolvas de producto final de los molinos con el consiguiente ahorro energético en el proceso.

Los objetivos que se persiguen con el trabajo son los siguientes:

- Establecer la correlación y regresión entre las variables de entrada V (velocidad de los gases) y W (contenido de humedad) y la variable de salida A (arrastre de partículas finas), que intervienen en el secado del mineral laterítico en cilindros rotatorios.
- Determinar el comportamiento del arrastre de partículas finas en el secador con los levantadores sectoriales y sin la presencia de los mismos después de ejecutada la modificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la parte experimental de la investigación se utilizaron los secaderos 1 y 2, que fueron sometidos a diferentes regímenes de trabajo a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo en el arrastre de partículas.

Teniendo en cuenta que no se dispone de una expresión matemática que haya sido publicada, la cual permita fijar de antemano los valores de aquellas variables que definan la máxima eficiencia en el arrastre de partículas para este tipo de mineral, nos proponemos realizar el tratamiento matemático de los principales factores involu-

crados en el proceso, éstos son:

- Número de revoluciones del tambor secador.
- Humedad de entrada del mineral.
- Temperatura de los gases en la entrada del secador.
- Composición granulométrica del mineral.
- Velocidad de los gases por el interior del secador.
- Contenido de humedad de los gases en la entrada del equipo.
- Pendiente del secador.
- Número y forma de los levantadores.
- Otros.

Después de un estudio preliminar del tema, consideramos que las variables más importantes son: velocidad de los gases en el interior del secador (V) y la humedad de los gases en la entrada del equipo (W); las demás se consideraron aleatorias y constantes.

Las variables V y W fueron escogidas por las consideraciones siguientes:

Velocidad de los gases en el interior del secador

Es el principal parámetro que caracteriza el arrastre, de ella depende el diámetro de las partículas que pueden ser arrastradas en el flujo de gases. Aplicando el método descrito por Gordon (1981) se llega a una expresión para determinar este diámetro en función de la velocidad de los gases, válida para el transporte neumático en un flujo de gases. El secado de minerales en cilindros rotatorios tiene forma compleja, donde se combinan los procesos de transferencia de calor y masa con el transporte de partículas en el flujo de gases, es por ello que esta metodología se puede aplicar para conocer el diámetro de las partículas que pueden ser arrastradas, pero no para determinar la influencia de esta variable en el arrastre.

Niveles escogidos para esta variable:

- Nivel 1: 3.5 m/s
- Nivel 2: 4.5 m/s

La elección de éstos está determinada por el rango de velocidades recomendado por la literatura para operar en los secadores cilíndricos rotatorios, y tomando en consideración la velocidad con que se operan estos equipos en la actualidad.

Contenido de humedad de los gases en la entrada del secador

En esta variable desempeñan un papel importante los gases residuales provenientes de los hornos de reducción; desde el proyecto original de la empresa se concibió utilizar los mismos porque son portadores de un gran flujo de calor ya que salen de hornos de reducción con una temperatura de 230°C aproximadamente; después que se implementó el uso de los mismos en los secaderos el consumo de combustible en estos equipos ha disminuido sensiblemente, y se ha reducido desde 39 kg/ton mineral seco hasta 34 kg/ton mineral seco. Mora (1999) realiza una evaluación detallada del efecto de estos gases en el secado a partir de un balance térmico y de masa,

esto muestra la enorme importancia del uso de los mismos en los secaderos.

Los gases residuales llegan al secador con un elevado contenido de humedad (33%), esto hace que el proceso se desarrolle en un ambiente mucho más húmedo, lo que favorece la aglomeración del material durante su paso por el interior del secador, e influye de forma negativa en el arrastre de partículas finas.

Para esta variable se adoptaron los niveles siguientes:

- Nivel 1: 11%
- Nivel 2: 16%

Estos niveles se definieron mezclando gases residuales con los productos de la combustión del combustible.

Una vez definidas las variables y sus niveles, se planificaron los experimentos a través de un diseño de experimento factorial completo a dos niveles 2^k . Este método de planificación estadística de la investigación, establece el número de ensayos (N) mínimo que hay que realizar, en nuestro caso $N = 2^2 = 4$.

Donde k es el número de factores.

La matriz de este diseño de experimento para cada uno de los secaderos es como sigue:

No. Exp.	V(m/s)	W(%)
1	3.50	11
2	3.50	16
3	4.50	11
4	4.50	16

En cada una de las posiciones referidas se realizaron 5 repeticiones, finalmente el total de mediciones considerado es 20 para cada secador investigado.

Toma de muestras y mediciones

Para los experimentos se utilizaron simultáneamente los secaderos 1 y 2, a los cuales se les tomaron muestras de mineral por un período de 4h en un intervalo de 15min, en tres puntos diferentes:

- Entrada al secador.
- Salida del secador (mineral grueso hacia molienda).
- Salida del secador (sistema de limpieza de gases).

Utilizando estas muestras y después de una correcta homogeneización de las mismas se realizó el análisis granulométrico a cada uno de ellas para determinar el porcentaje de arrastre de partículas finas en el flujo de gases. Para la selección del juego de tamices se utilizó 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.

Paralelo a esto se realizaron mediciones del flujo de gases en la salida del equipo y proveniente de la planta de hornos, también se registró el consumo de combustible en ese período, así como otros parámetros nece-

TABLA III. RESULTADOS DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS PARA CADA UNA DE LAS RÉPLICAS REALIZADAS EN EL SECADERO #2

V(m/s)	W(%)	A1(%)	A2(%)	A3(%)	A4(%)	A5(%)	Am(%)
3.50	11.00	20.10	19.80	20.24	20.40	21.90	20.48
3.50	16.00	17.84	18.40	18.10	17.97	18.50	18.16
4.50	11.00	26.4	26.1	25.8	25.9	26.2	26.08
4.50	16.00	25.1	25.4	24.3	24.7	24.4	24.78

TABLA IV. RESULTADOS DEL ARRASTRE DE PARTÍCULAS PARA CADA UNA DE LAS RÉPLICAS REALIZADAS EN EL SECADERO #1

V(m/s)	W(%)	A1(%)	A2(%)	A3(%)	A4(%)	A5(%)	Am(%)
3.50	11.00	36.40	36.20	36.30	36.50	36.40	36.36
3.50	16.00	34.70	33.90	34.10	33.80	34.40	34.18
4.50	11.00	43.00	42.80	42.40	42.60	42.70	42.70
4.50	16.00	40.25	39.40	38.90	40.00	39.40	39.59

sarios para un análisis posterior de los resultados obtenidos.

El flujo de gases en los puntos señalados se determinó con ayuda de un tubo de Prandtl. La diferencia de niveles Δh se determina en la escala inclinada del tubo de Prandtl en el largo ΔL, el cual depende del ángulo de inclinación con respecto a la horizontal α, y Δh = ΔL×α, expresada en mm H₂O para expresarla en mm Hg es necesario dividir el valor que se obtiene por 13.6. Es necesario aclarar que para la medición de Δh se tuvo en cuenta la distribución irregular de la velocidad de los gases en la sección transversal del conducto, se realizaron para ello diez mediciones, trabajando con el valor medio de las mismas.

La densidad real de los gases se determinó considerando el valor de la misma en condiciones normales de temperatura y presión, cuyo valor en este caso es de 1.293 kg/m³.

$$\rho = 1.293 \times \frac{273}{760} \times \frac{760 \pm \Delta h}{273 + T_g} \quad [kg / m^3]$$

Donde:

T_g – Temperatura de los gases en el lugar donde se realizan las mediciones, K.

Δh – Altura de presión, mm Hg.

Después de realizar algunas transformaciones a la ecuación de Bernoulli y tomando en consideración los parámetros analizados anteriormente, la velocidad de los gases en el lugar donde se realizan las mediciones se determina por la siguiente expresión.

$$V = \sqrt{\frac{2 \times g \times \Delta h}{\rho}} \quad [m / s]$$

Finalmente, el flujo volumétrico de gases para cada una de las mediciones realizadas se determina aplicando la ecuación de gasto.

$$Q = \frac{V \times A}{3600} \quad [m^3 / h]$$

Donde A es el área de la sección transversal del conducto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con el diseño experimental previsto para cada uno de los secaderos analizados se realizaron 5 réplicas, los resultados de las 20 mediciones después de efectuar una limpieza de datos, eliminando aquellos valores que no corresponden a la data tomada, se muestran en las tablas 3 y 4, donde A₁, A₂,.....A₅ son los valo-

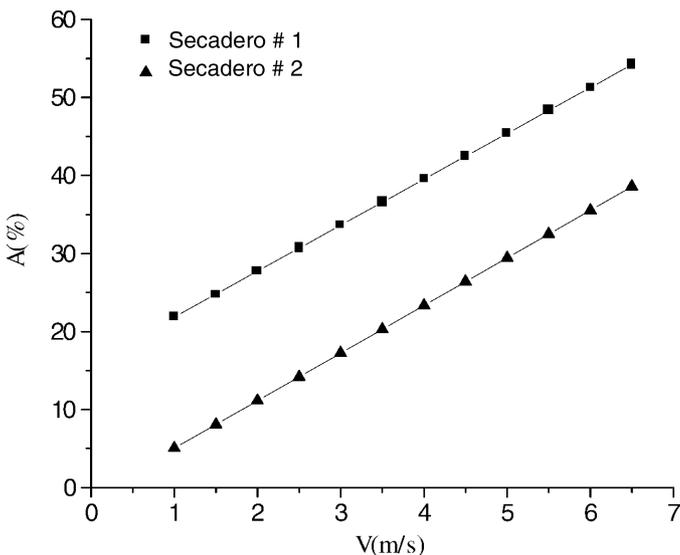


Fig. 1. Comportamiento del arrastre de partículas en función de la velocidad de los gases para un contenido de humedad de entrada del 11%.

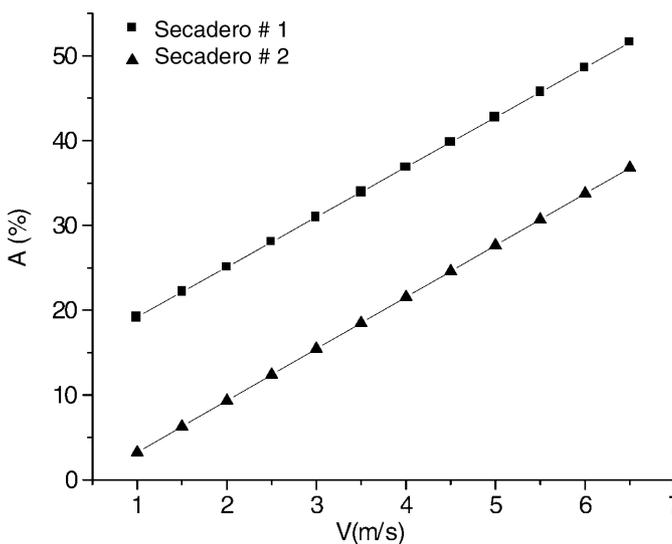


Fig. 2. Comportamiento del arrastre de partículas en función de la velocidad de los gases para un contenido de humedad de entrada del 16%.

res del arrastre para cada una de las réplicas en los diferentes niveles de las variables y A_m el valor medio de las réplicas.

Los resultados experimentales fueron procesados por el análisis de regresión lineal múltiple aplicando el modelo lineal generalizado, que tiene como expresión general para este caso:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_k$$

Donde:

μ - Es la media total de la variable de salida.

α_i - Es el efecto que produce el factor en el nivel (I).

β_j - Efecto que produce el factor en el nivel (J)

e_{ij} - Es el error aleatorio en el nivel (I) de la réplica (J).

Y_{ijk} - Valor real en el nivel (I) de la réplica (J)

Los coeficientes de las ecuaciones de regresión se calcularon aplicando el método de los mínimos cuadrados y se realizó la prueba de significación de los coeficientes por el método de Fisher.

Aplicando estas herramientas estadísticas, las ecuaciones del arrastre de partículas en función de la velocidad y el contenido de humedad de los gases para cada uno de los secadores analizados toman la forma siguiente:

$$\text{Secadero \# 1: } A = 21.82 + 5.88V - 0.53W$$

$$\text{Secadero \# 2: } A = 2.894 + 6.1V - 0.364W$$

En las figuras 1 y 2 se observa el comportamiento del arrastre de partículas en función de la velocidad de los gases en cada uno de los secaderos analizados, para un contenido de humedad de entrada del 11 y 16%, respectivamente.

Se puede observar a partir de las ecuaciones y figuras obtenidas que el arrastre de partículas depende fundamentalmente de la velocidad de los gases por el interior del cilindro y de la altura de vuelo de las partículas y no así del contenido de humedad de los gases, el que tiene una influencia insignificante en la variable de salida.

CONCLUSIONES

1. Se confirma experimentalmente que al aumentar el recorrido de la cortina de mineral al eliminar los levantadores sectoriales en el último tercio del equipo el arrastre de partículas finas, según las tablas III y IV, alcanza valores del 26.08% en el secadero No.2 y en el secadero No.1 se incrementa hasta 42.7%.
2. Del análisis de las fig. 1 y 2 se observa que existe tendencia al incremento del arrastre en la medida en que se incrementa el valor de V para ambos secaderos, esto se explica debido a que con el incremento de la velocidad de los gases por el interior del secadero aumenta el diámetro de las partículas que pueden ser arrastradas en el flujo de gases y, por ende, incrementa el arrastre. Todo lo contrario sucede con el contenido de humedad, ya que con el incremento de la misma se produce una reducción del arrastre de partículas en los gases. El uso de los gases de hornos de reducción se justifica económicamente debido al elevado poder calórico de los mismos.

3. De acuerdo con los resultados obtenidos, la correlación entre las variables de entrada V y W y la variable de salida A expresada en el modelo matemático establece de modo significativo la dependencia de esta última en función de la velocidad y el contenido de humedad.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker, C. G. J. (1997): "Cascading Rotary Dryers" in Mujumdar, A.S. (ed): *Advances in Drying*, 2, Hemisphere Publ. Corp., NY.
- _____ (1998): "The design of flights in cascading rotary dryers" in *Drying Technology*, 6 (4): 631-653.
- Boateng, A. A. y P. V. Barr (1998): "A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed" in *Heat and Mass Transfer*, 39 (10): 2131-2147.
- _____ (1996): "Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder". *Heat and Mass Transfer*. 3(20): 233-249.
- Gordon G. M. e I. L. Peisájov (1981): *Captación de polvos y purificación de gases en la metalurgia de metales no ferrosos*. Mir, Moscú.
- Guerra, J. D. y E. S. Pereda (1987): *Introducción al análisis estadístico para proceso*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- Kallel, F. et al. (1998): "Effects of moisture on temperature during drying of consolidated porous materials" en *J. Heat Transfer*. ASME Trans, 115: 724-733.
- Mora, E. (1999): "Evaluación de los gases residuales en el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios", Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Trabajo de Diploma.
- Papadakis, S. E. (1997): "Scale-up of cascading rotatory dryers" en *Drying Technology*, 12: 259-279.
- 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.