

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA DE LA MENA DE CROMITA DEL YACIMIENTO ALBERTINA

Emilio Leyva Ramírez, Manuel de La Fuente Fernández, Oscar S. Leyva González,
Alexeis Sánchez Cruz, Yosvany Ferreiro Guerrero
Centro de Investigaciones Siderúrgicas, Holguín

En la determinación de la capacidad de enriquecimiento de la mena de cromita metalúrgica del Yacimiento Albertina se encontró que para obtener: un concentrado de calidad aceptable para la industria y alta recuperación de Cr_2O_3 , es necesario molerla hasta tamaño de liberación de la cromita. Es objetivo del trabajo, mostrar como transcurre el proceso de reducción de tamaño en el tiempo. Experimentalmente se determinan los coeficientes m y k de la ecuación exponencial potencial de la cinética de molienda propuesta por V.V. Tovarov. Se emplea la molienda húmeda en un molino de bolas donde se controlan los parámetros: coeficiente de llenado del molino, contenido de sólido en la pulpa y tiempos de molienda. Los coeficientes m y k resultaron ser 0,296 6 y 0,406 9, respectivamente, lo que permitió plantear la ecuación de la cinética de molienda para la generación de partículas menores que 0,56 mm. Con ella se podrá encontrar orientativamente la molibilidad del mineral en un tiempo dado.

Palabras clave: mena, cromita, capacidad de enriquecimiento, tamaño de liberación, molibilidad.

On the determination of the enrichment capacity of metallurgical chromite's ore Albertina's Location, it was found that to obtain: an acceptable quality concentrate of to industry and high recovery of Cr_2O_3 , is necessary to grind it until the liberation size of chromite. Objective of this work is to show how the size reduction's process elapses in the time. Experimentally it's determined the m and k coefficients of the potential exponential equation in the grinding kinetics proposed by V.V. Tovarov. Was used the wet grinding in a balls mill's where the following parameters were controlled: filled coefficient of mill, solid contents in the pulp and times of grinding. The m and k coefficients turned into respectively 0,296 6 and 0,406 9, it allowed to outline the equation of the grinding's kinetic for the generation of smallest particles that 0,56 mm. With it will be able to found orientatively the mineral in a given time.

Words key: ore, chromite, enrichment capacity, liberation size, comminution.

Introducción

Para ampliar el conocimiento referente a las reservas de minerales de cromo metalúrgico en Cuba, la Empresa Geominera Oriente ha ejecutado un amplio plan de búsqueda y prospección geológica en las zonas de Pinares de Mayarí y Sagua de Tánamo /1/, en la Provincia de Holguín.

Para el pronóstico de reservas, en sus estudios, la geología se vale de la minería y el beneficio de minerales. Las investigaciones de beneficiabilidad aportan datos técnico-económicos para ser utilizados en la toma de decisiones sobre la apertura y explotación de un yacimiento mineral. Dentro de la exploración geológica detallada se debe incluir este tipo de investigaciones, las cuales definirán el método de beneficio, la calidad de los

concentrados, las tecnologías de punta y otras cuestiones técnico-económicas.

A solicitud de la Empresa Geominera Oriente, el Centro de Investigaciones Siderúrgicas realizó la evaluación tecnológica de la mena de cromita metalúrgica del Yacimiento Albertina de Sagua de Tánamo /2, 3/, dicho estudio mostró que para obtener un concentrado de cromita con calidad aceptable para la industria siderúrgica y alta recuperación de Cr_2O_3 es necesario molerla hasta tamaño de liberación del mineral de cromo. Es objetivo del trabajo, mostrar como transcurre el proceso de reducción de tamaño en el tiempo a través de la ecuación exponencial potencial de la cinética de molienda propuesta por V.V. Tovarov. Experimentalmente se determinan los coeficientes m y k de dicha ecuación.

Fundamentación teórica

En las plantas de beneficio de minerales las operaciones de: trituración, molienda y clasificación, sirven de operaciones preparatorias antes del enriquecimiento; las dos primeras tienen como destino la separación (ruptura de la unión) de los granos de distintos minerales contenidos en las rocas, fuertemente entremezclados, cuanto más se liberan unos de otros más exitoso resultará el beneficio posterior /4/.

El tamaño de los granos hasta el que hay que triturar o moler el mineral inicial antes del beneficio, se establece por la dimensión de esparcimiento de los minerales y según el proceso de beneficio a utilizar.

Estas operaciones son altas consumidoras de energía fundamentalmente la molienda, en las que se emplea cerca de la mitad de la energía consumida por la planta de beneficio. Por eso se tiende, en la molienda a reducir de tamaño, solo lo necesario.

En su obra Wills B. A. 1988 /5/ aduce que la malla de molienda (tamaño de molienda) generalmente se fija en términos de un punto sobre la curva de acumulativo de finos, frecuentemente es el 80 % del tamaño que pasa por el tamiz con orificios de diámetro similar al tamaño de molienda.

Andreiev, S. E. *et al.* 1980 /4/ señalan que para dirigir el proceso de molienda en los molinos de bolas y para escoger condiciones de su trabajo más útil es necesario conocer como se efectúa el proceso dado en el tiempo, es decir, conocer su cinética.

Describen a un sistema de muestreo, durante el trabajo del molino de acción periódica, consistente en tomar muestras del material durante determinados períodos de tiempo, luego se determina la masa de la clase gruesa y se representan los valores en un gráfico, de dependencia de la masa (Q) de la clase gruesa retenida en el tamiz de control vs el tiempo (t) de duración de la molienda. Dichos gráficos muestran la disminución normal de la cantidad de clase gruesa en el material molido y tienen forma de

curva hiperbólica, para todos los minerales, lo que indica la existencia de una relación estable entre la cantidad del material sin moler hasta el final y el tiempo de molienda.

La forma de las curvas depende de las cualidades del material que se desmenuza y las condiciones de molienda. Por eso Andreiev, S. E. *et al.* 1980 /4/ recomiendan la investigación de las curvas como parte del estudio de la cinética del proceso de molienda, así mismo estos autores a través del análisis muestra como se llega a la ecuación de Tovarov V. V.

En la práctica la ecuación de Tovarov V. V. ofrece un método más sencillo que la construcción de los gráficos Q vs t, a continuación se brinda en síntesis el razonamiento que hace Andreiev S. E. para demostrar como se llega a dicha ecuación.

El autor parte del análisis del caso más simple, suponiendo que la velocidad del desmenuzamiento (velocidad de disminución de la masa de clase gruesa) es proporcional a la masa de clase gruesa no desmenuzada hasta el final de la molienda. En base a ese supuesto obtiene que:

$$dQ/dt = -kQ \quad (1)$$

donde:

Q: la masa retenida de clase gruesa en el tiempo t.

t : tiempo de duración de la molienda.

k: coeficiente constante que depende de las condiciones de molienda.

Dividiendo las variables e integrando la ecuación 1, se llega a la expresión:

$$\int (dQ/Q) = -k \int dt + C$$

Resolviendo:

$$\ln Q = -kt + C$$

Evaluando en el momento inicial, cuando t=0, la masa de la clase gruesa es Q = Q₀; por consiguiente

$$C = \ln Q_0$$

$$\ln Q = -kt + \ln Q_0$$

Quedando finalmente:

$$Q = Q_0 e^{-kt} \quad (2)$$

donde:

Q_0 es la masa de la clase gruesa que ingresa para ser molida,

Q también puede ser expresada en % de Q_0

Estos razonamientos llevan a Andreiev a plantearse que:

a) la ecuación 2 toma la forma.

$$y = (Q/Q_0)100 = 100e^{-kt} \quad (3)$$

b) las ecuaciones 2 y 3 en sí representan las ecuaciones de la molienda en molinos de bolas.

c) la comprobación experimental de estas ecuaciones sin embargo enseñó que la cinética de la molienda no siempre sigue la ecuación 2. Por eso V.V. Tovarov propuso otra ecuación exponencial potencial de la cinética de la molienda de la forma:

$$Q = Q_0 e^{-kt^m} \quad (4)$$

que describe de modo mejor, las curvas experimentales obtenidas durante diferentes duraciones de la molienda.

La importancia de esta ecuación está en encontrar los valores de los coeficientes m y k , aspecto que será mostrado en el acápite siguiente.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

1. Muestra tecnológica de 574,74 kg de mena del yacimiento Albertina

Fue suministrada por la Empresa Geominera Oriente, en el pasaporte de muestra /6/ se especificaba que es procedente de una muestra tecnológica compuesta de 2,27 t, representativa del yacimiento, conformada por masas de muestra extraídas en todos los sectores del yacimiento y mezcladas proporcionalmente a la participación de cada sector con relación al volumen total del yacimiento. Luego de homogeneizada la muestra de 574,74 kg se seleccionó una muestra de 100 kg que fue sometida al proceso de trituración en una trituradora de mandíbulas de laboratorio.

2. Caracterización granulométrica de la muestra inicial

La selección de los tamices para la clasificación por tamaños vía seca, se realizó según el modulo 21/2 de la escala de Taylor.

3. Trituración en trituradora de mandíbulas

A la trituración se somete el mineral con las características determinadas en el punto 2.

Características de la trituradora de mandíbulas	Dimensiones
Dimensiones de la abertura de alimentación (mm)	
- Ancho	60
- Largo	100
Ancho de la rendija de salida (mm)	6-13
Tamaño máximo de los trozos a fragmentar (mm)	menor que 150
Se trabajo con rendija regulada (mm)	6

4. Molienda húmeda en un molino de bolas

Considerando que el proceso posterior es húmedo, se realiza la molienda húmeda del producto de la trituración, por lo que las características granulométricas del mineral alimentado al molino coinciden con la del producto de la trituradora de mandíbulas.

Características técnicas del molino:

Molino truncocónico,
 Velocidad de rotación rpm, 80,0
 Volumen L, 5,5

Para el estudio de la cinética de la molienda, conocidas las características del molino y fijados

los valores de trabajo de las variables: coeficiente de llenado del molino ϕ en 0,50 parte de la unidad; contenido de sólido en la pulpa en 0,80 parte de la unidad y tiempos de molienda en 5 y 30 min, se calcularon: el diámetro máximo del mineral a alimentar al molino, las cargas de bolas necesarias en el molino, la cantidad de mineral y agua necesarios para preparar las pulpas.

El tamaño máximo de las bolas utilizadas para la molienda ($D_{m\acute{a}x}$ en mm) debe de corresponderse con el tamaño máximo de los pedazos del mineral que ingresa al molino (d^+ en mm).

Razumov K. A. 1982 /7/ propone la fórmula 5 para determinar el diámetro máximo de los elementos trituradores:

$$D_{m\acute{a}x} = 28 \cdot (d^+)^{1/3} \quad (5)$$

De aquí, se obtiene la ecuación 6 para calcular el mayor diámetro del mineral que debe ingresar al molino

$$d^+ = D_{m\acute{a}x}^3 / 28^3 \quad (6)$$

El cálculo indicó que d^+ debe de estar próximo a 4 mm; por no contar con un tamiz de esta dimensión, y el contenido de las clases entre -12,7 y +6,7 mm en el producto de la trituradora sólo era el 12,09 %, se alimentó directamente al molino.

La operación de molienda se realizó en régimen discontinuo de operación, los cuerpos moledores fueron bolas de acero, a las que se les midieron los diámetros y determinaron las masas, a partir de estos datos se calculó el volumen de las bolas considerándolas esferas perfectas y su densidad real, estimándose finalmente la densidad aparente de las mismas, teniendo en cuenta la contribución de cada grupo de ellas al peso total de los cuerpos moledores.

Conocido el volumen del molino y las características de los cuerpos moledores, se determinó la cantidad de bolas necesarias para completar el coeficiente de llenado del molino. El volumen ocupado por los cuerpos moledores se estimó considerando que las bolas forman un lecho que produce un 40 % de huecos como lo estiman Andreiev, 1982 /4/ y López, F. A. 1985 /8/.

La masa del volumen de bolas de acero durante el llenado del volumen de la carga constituye el 60 %, Andreiev, 1982, por tanto:

$$\gamma = 8,24 \cdot 0,60 = 4,94 \text{ t/m}^3 \text{ ó kg/L}$$

A la masa de carga de bolas (M_{cb}) en el molino con las dimensiones exteriores $D \times L$ (en m) teniendo el grado de llenado de su volumen ϕ , en parte de la unidad, se determina por la fórmula:

$$M_{cb} = \phi \cdot (\pi D^2 \cdot L/4) \cdot \gamma \quad (7)$$

siendo $(\pi D^2 \cdot L/4)$ igual al volumen del molino (V).

Para molienda húmeda que es el caso objeto de estudio, la densidad de la pulpa en el molino se calcula por la fórmula 8:

$$\Delta = \delta p / [\delta p - (p \cdot (\delta p - 1))] \quad (8)$$

siendo

Δ la densidad de la pulpa, t/m^3

δp , la densidad del mineral, t/m^3

p , el contenido de sólido en la pulpa (por la masa) en parte de la unidad.

La relación líquido/sólido (R_p), por la fórmula,

$$R_p: L/S = (1-p)/p \quad (9)$$

En la tabla 1 se puede observar las condiciones de operación en la que trabajó el molino.

El grosor del material molido se controla con ayuda de un tamiz de control (0,056 mm) dimensiones orificio correspondientes al grosor máximo de desmenuzamiento. Los granos que pasan por el orificio del tamiz forman el producto acabado. El producto retenido en el tamiz de control representa en sí la clase gruesa no molida hasta el final.

En la tabla 2 se muestra la distribución de las bolas para un coeficiente de llenado 0,50 del molino con los cuerpos moledores.

A los productos de la molienda se le realizó análisis granulométrico por vía húmeda. La selección de los tamices se realizó según el modulo 21/2 de la escala de Tyler.

Tabla 1. Condiciones de operación en la que trabajó el molino

Volumen del molino (V), L	5,50	Coefficiente llenado (ϕ)	0,50
Masa volumétrica de las bolas (γ), g/L	4,94	Contenido de Sólido en la pulpa (p), %	0,80
Masa carga de bolas (M_{cb}), kg	13,60	Volumen de pulpa, L	1,38
Densidad de la pulpa (Δ), kg/L	2,20	Cantidad de agua, L	0,61
Masa del Volumen de Bolas (γ_{cb}), kg/L	5,83	Relación: L/S, del mineral inicial	0,025
Masa carga total en el molino (M_{CT}), kg	16,02	Cantidad agua que acompaña mineral, L	0,061
Masa de mineral al molino (Q_p), kg	2,42	Cantidad agua que hay que añadir, L	0,545
Relación: L/S en la pulpa	0,25	Relación: carga/bolas	0,18

Tabla 2. Distribución de las bolas

Diámetro de las bolas (cm)	No. de bolas (U)	masa total de las bolas (kg)	% de la masa total
4,326	20	6,80	50,00
3,607	17	3,40	25,00
3,207	5	0,65	4,78
2,771	25	2,75	20,22
Total	67	13,60	100,00

Determinación de la ecuación de la cinética de la molienda

En el acápite anterior se mostró de forma sintetizada el razonamiento que hace Andreiev S. E. para llegar a la ecuación exponencial potencial de la cinética de la molienda de Tovarov, V. V. Además, se planteó que el quid de esta ecuación está en encontrar los valores de los coeficientes m y k, aspecto que será mostrado a continuación. Los parámetros m y k se pueden obtener aplicando doble logaritmo mediante las fórmulas 10, 11, 12 y 13, dadas por Andreiev, S. E. 1982.

$$m = ((\log(\log Q_0/Q_2) - \log(\log Q_0/Q_1)) / (\log t_2 - \log t_1)) \quad (10)$$

$$A = \log(Q_0/Q) \quad (11)$$

$$\log k_0 = \log A - m \log t \quad (12)$$

Obtenido el valor de m se puede encontrar el valor de k por la expresión:

$$k = (k_0 / \log e) \quad (13)$$

siendo:

Q_0 : masa de la clase gruesa que se alimenta la molino

Q_1, Q_2 : masa que se obtiene después de los tiempos de molienda t_1 y t_2 , respectivamente

k: constante que depende de las condiciones de molienda

m: coeficiente que depende del mineral alimentado.

Fijadas las condiciones de operación en la que trabajará el molino, sólo que fijar los tiempos de duración de la molienda, en este caso se prefijaron $t_1 = 5$ y $t_2 = 30$ min. Para determinar la bondad de adaptación de la ecuación de la cinética de molienda, se determinaron por dicho modelo las Q correspondientes a los tiempos: 0; 5 y 30 min y se compararon con los obtenidos en los ensayos, como medida de la discrepancia entre ambas serie de datos se utiliza el estadígrafo χ^2 (ji-cuadrado), se debe decidir entre las hipótesis:

H_0 : no hay diferencia significativa entre los valores observados y los esperados;

H_1 : existe diferencia significativa entre los valores observados y los esperados: se acepta H_0 si

$$\chi_{cal}^2 < \chi_{crit}^2 \text{ para } \alpha = 0,05, \text{ o se acepta } H_1 \text{ si}$$

$$\chi_{cal}^2 < \chi_{crit}^2 \text{ para } \alpha = 0,05.$$

Pesentación y análisis de los resultados

Caracterización granulométrica de la muestra inicial

En la figura 1 de característica de grosor del mineral inicial se puede observar que más del

77,0 % de la muestra inicial es superior a 12,7 mm, quedando el 80,00 % retenido en 9,70 mm.

En dicha figura se incluyen las ecuaciones matemáticas que describen el modelo, para un coeficiente de ajuste del 99,70 %; esta representación de la característica granulométrica abarca todo el rango de clases tamaños de la muestra con suficiente precisión, este tipo modelo matemático se puede calcular el contenido de cualquiera de las clase que no fue considerado en el análisis, con el se pudo determinar que los orificios del tamiz por donde pasa el 50 % del material (D_{50}) es 33,69 mm y por donde pasa el 80 % (D_{80}) es 76,89 mm.

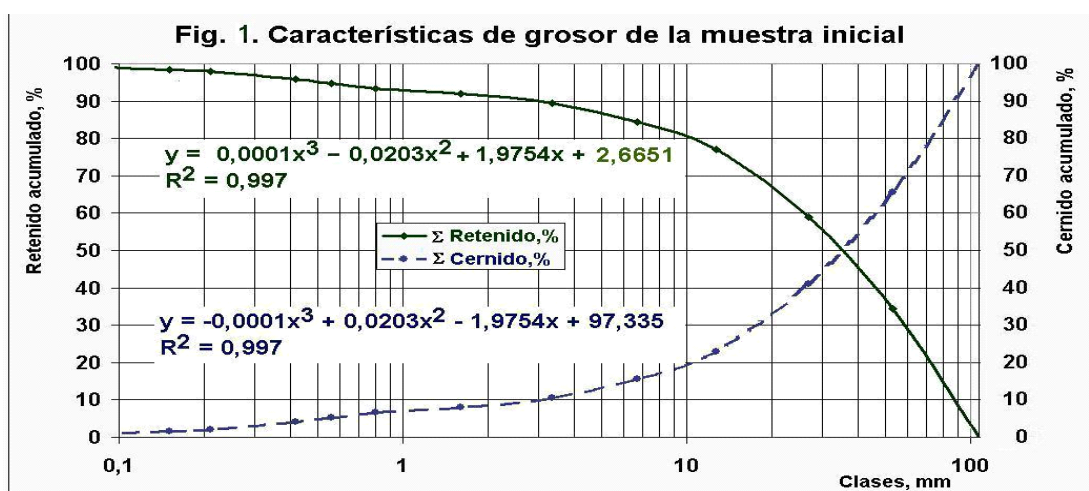


Fig. 1 Curva de característica de grosor del mineral inicial.

Como se expresó el tamaño máximo de los pedazos del mineral que ingresen al molino debe de estar próximo a 4 mm. En la figura 1 también se puede observar que menos del 10,00 % del material inicial cumple con dicho requisito es por ello que se procede a triturar en la trituradora de mandíbulas.

Trituración en trituradora de mandíbulas

En la figura 2 se exponen los resultados del análisis granulométrico al producto de la trituradora, se puede ver que sólo el 17,00 % del mismo queda con tamaño superior a la abertura de la boca de salida de la trituradora y que alrededor del 84,00 % es superior a 0,56 mm.

En dicha figura se puede observar que más del 65,00 % del producto es inferior a 4,00 mm; el D_{50} es 2,71 mm, y el D_{80} es 5,69 mm, coincidiendo con el diámetro de abertura de la boca de salida se obtiene que por el tamiz de 6,00 mm pasa alrededor del 85,05 % del producto triturado.

Determinación de la ecuación de la cinética de la molienda

Como ejemplo para facilitar la comprensión de lo realizado, se muestran en la tabla 3 los cálculos correspondientes que lleva a los parámetros del modelo que describe la cinética de la molienda de la mena cromita del yacimiento Albertina.

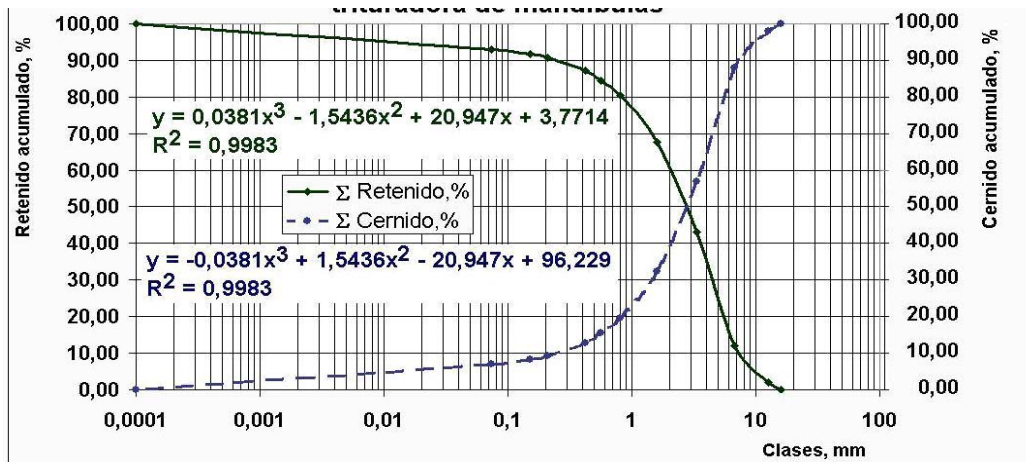


Fig. 2 Características tipo de grosor del producto quebrantado en la trituradora de mandíbulas.

Tabla 3. Cálculos auxiliares para determinar los coeficientes m y k

Tiempo, min	Retenido (+ 0,56 mm)		log		log		log		
	Q, %	Q ₀ /Q ₂	Q ₀ /Q ₁	Q ₀ /Q ₂	Q ₀ /Q ₁	(log Q ₀ /Q ₁)	(log Q ₀ /Q ₂)	t ₂	t ₁
0	84,52								
5	18,66		4,53		0,66	-0,18			0,70
30	6,47	13,06		1,12			0,048	1,48	

Por las ecuaciones: 10, 11, 12 y 13 se determinan m y k, siendo 0,2966 y 0,4069 respectivamente. Obtenidos los coeficientes m y k de la ecuación de la cinética de la molienda de Tovarov V. V. se puede escribir el modelo de la cinética de molienda para la generación de clases menores que 0,56 mm en el caso de la mena del Yacimiento Albertina.

Con dicha ecuación se podrá determinar orientativamente la molibilidad del mineral en un tiempo dado, para las mismas condiciones empleadas en los ensayos. En la tabla 4 se muestran los valores observados y esperados de Q_n para el test de bondad de adaptación del modelo.

$$Q = Q_0 e^{-0,4069 t^{0,2966}} \quad (14)$$

Tabla 4. Valores observados y esperados de Q_n

Tiempo (min)	Valor observado de Q	Valor esperado de Q
0	84,52	84,52
5	18,56	24,59
30	6,47	10,36

$$\chi_{cal}^2 = 2,933 \text{ y } \chi_{crit}^2 \frac{\alpha=0,05}{f=2}, \text{ página 65 R.}$$

López, 1988/9/; puesto que: $\chi_{cal}^2 < \chi_{crit}^2$ se puede

plantear que no hay diferencia significativa entre las frecuencias observadas y las esperadas para un intervalo de confianza del 95,0 %.

Adicionalmente para comprobar si el diámetro del material alimentado al molino se podía considerar como adecuado, se decidió determinar el grado de reducción y el tamaño de alimentación como se muestra a continuación.

$$G_r = \left[1 - \left(\frac{D_{80\text{ final}}}{D_{80\text{ inicial}}} \right) \right] * 100$$

G_r , grado de reducción en %, expresado como relación entre los valores D_{80} del producto molido y del producto inicial en mm.

$$G_r = \left[1 - \left(\frac{510}{5561} \right) \right] * 100 = 90,83 \%$$

Bibliografía

1. Ruiz R. *et al.*, “Reconocimiento Geólogo – Tecnológico cromitas en la región Sagua de Tanamo”. Informe. Técnico. EGO, Santiago de Cuba, 1999.
2. Leyva Ramírez E., Figueredo Stable O. “Evaluación tecnológica de una muestra de cromita metalúrgica del Yacimiento Albertina”. Informe de Investigación. CIS, Nicaro, 1999.
3. Leyva Ramírez E., *et al.* “Resultados de los estudios para el tratamiento premetalúrgico a dos muestras de cromita metalúrgica cubana” en Congreso METALURGIA 2006. La Habana, Cuba, 2006.
4. Andréiev S. E., V. A. Perov, V. V. Zverievich: Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Ed. Mir, Moscú, 1980.

Menéndez, J. M. 2003 /8/, reporta que para un molino de bolas el grado de reducción debe de estar entre 5 y 100, por lo que se puede expresar que el tamaño del material que se alimentó al molino era adecuado.

Conclusiones

La ecuación que describe la cinética de la molienda es:

$$Q = Q_0 e^{-0,4069t^{0,2966}}, \text{ con ella se podrá}$$

determinar orientativamente la molibilidad del mineral en un tiempo dado, para las mismas condiciones empleadas en este trabajo.

5. Wills B. A. Mineral Processing Technology. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 4ta ed. vol. 41. Pergamon Press, Great Britain, 1988.
6. Ruiz R. “Pasaporte de la muestra tecnológica del Yacimiento Albertina”. EGO, Santiago de Cuba, 1999.
7. Rázumov K. A., V. A. Perov. Proyectos de fábricas de preparación de minerales. Ed. Mir. Moscú. 1982.
8. López, F. A. *et al.*, “Estudio de la molienda de los escombros lateríticos del Yacimiento Pinares de Mayarí”. Informe Técnico. CENIM, Madrid, España. 1987.
9. López P. R. *Diseño estadístico de experimentos*. Ed. Científico-Técnica, La Habana, 1988.

Nomenclatura

Símbolos	Significado	Símbolos	Significado
m	coeficiente que depende del mineral alimentado	Q_p	Masa de mineral al molino, kg
k	constante que depende de las condiciones de molienda	D_{50}	orificio del tamiz por donde pasa el 50 % del material
Q_n	fracción de la clase gruesa en el tiempo t_n %	D_{80}	orificio del tamiz por donde pasa el 80 % del material
t_n	tiempo de duración de la molienda (min)	M_{CT}	Masa carga total en el molino (kg)
$n = 0, 1 \text{ y } 2$	subíndice que corresponde a los tiempos: 0, 5 y 30 min respectivamente	p	Contenido de sólido en la pulpa, en fracción de la unidad
ln	logaritmo natural (neperiano)	?	Símbolo de integral
mm	milímetro	U	unidades
°	grado angular	cm	centímetro
rpm	revoluciones por minuto	log	logaritmo en base 10
W	Watts	e	constante 2,718 281
L	litro	Δ	Delta mayúscula
φ	Fi minúscula	Δ	densidad de la pulpa (kg/L)
φ	Coeficiente de llenado del molino, en fracción de la unidad	$D_{m\acute{a}x}$	tamaño máximo de las bolas utilizadas para la molienda (mm)
γ_b	masa del volumen de bolas (kg/L)	d^+	tamaño máximo de los pedazos del mineral que ingresa al molino (mm)
M_{cb}	masa carga de bolas (kg)	δ	Delta minúscula
kg/L	kilogramos por litro	δ_p	densidad del mineral
γ	Gamma minúscula	π	Pi minúscula, constante= 3,14
γ	masa volumétrica de las bolas (kg/L)	L/S	relación líquido/sólido en la pulpa (kg/kg)
t/m^3	toneladas por metro cúbico	V	volumen del molino
D	diámetro del molino	L	longitud del molino
G_r	Grado de reducción (%)	χ^2	Ji - cuadrado, estadígrafo