

Escoria de fundición: estudio cinético y elección de un sistema de molienda

Slag founding: kinetic study and election of a grinding system

M. E. SALAS VINENT^{*}; A. C. RABILERO BOUZA^{**}; V. CÓRDOVA RODRÍGUEZ^{***}

(^{*}) Del. Provincial del CITMA (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente)

(^{**}) Filial Centro Técnico de Desarrollo de Materiales de la Construcción

(^{***}) Dpto. de Fundamentos Químicos y Biológicos de la Facultad de Ingeniería Química. Univ. de Oriente
Santiago de Cuba

Fecha de recepción: 19-IX-00

Fecha de aceptación: 16-XI-00

CUBA

RESUMEN

Se presentan resultados logrados a escala de laboratorio e industrial referidos al estudio cinético de las escorias de fundición de aceros para la producción de cementos. Se realiza la elección del sistema de molienda más adecuado, valorando además el efecto económico y medio ambiental del mismo.

De los resultados obtenidos se concluye que el método cinético resulta de extrema utilidad en la solución de problemas prácticos para la concepción y diseño de sistemas de molienda, amén de que en el plano teórico resulta una novedad la correlación encontrada entre la constante de velocidad de molienda y el inverso de la abertura del tamiz de modo similar a la ecuación de Arrhenius.

SUMMARY

Here we offer results obtained in laboratories and industry, concerning the kinetic study of steel founding in cement manufacture. We choose the most suitable grinding system, valuing also its economical and environmental repercussion.

The obtained results indicated that the kinetic method is extremely useful to solve the practical problems in the conception and design of grinding systems, and it is also a speed and the inverted bolting-rell gap almost like a Arrhenius equation.

INTRODUCCIÓN

Trabajos realizados a las escorias de fundición de acero de la planta ACINOX de Las Tunas¹ demostraron su potencialidad cementicia, que las hacen utilizables en la producción de cementos a base de portland-escorias y aun de cementos de escorias activados con cal. Es de hacer notar que históricamente la producción de cementos de escorias (también llamados siderúrgicos) ha sido lograda a partir de las de altos hornos dedicados a la obtención de arrabio, no disponiéndose en la literatura de muchas referencias a las escorias de fundición de aceros en cuanto a su empleo en la industria cementera.

La disponibilidad de algo más de 10-000 t de escorias por año hizo pensar en su empleo para la producción de cemento con fines de albañilería en la construcción de viviendas de interés social, aunque los trabajos de Jiménez¹ extendieron el campo de posibilidades al cemento de escoria base al portland; razón por la cual se pensó en el montaje de una instalación para la producción de cemento de escoria de fundición de acero.

En consecuencia con lo anterior, comenzamos los estudios sobre la molturación de las escorias desde el punto de vista cinético y el cálculo de una instalación para su molienda y la producción del cemento y/o aglomerante descado.

MATERIAL Y METODOS

Las muestras se tomaron directamente del enfriador de la planta ACINOX a escala industrial en la fábrica, las cuales, luego de homogeneizadas y troceadas previamente se sometieron en iguales condiciones a moliendas sucesivas en un triturador de impacto o mandíbulas primero, uno de disco después y, por último, en un molinillo discontinuo tipo "batch" con cylpebs o maníes, todos estos equipos a escala de laboratorio.

Para el estudio de la cinética de la molienda fina se tomaron 1.000 g de escoria después de pasar por la etapa de trituración en el molino de discos previo troceo de la masa total inicial tomada para el ensayo. El molinillo, de cuerpo de acero, tenía una carga de 40 cylpebs o maníes también de acero con una masa total de 5.300 ± 10 g. En la cámara del molinillo se depositaron cada vez 1.000 ± 1 g de escorias pasado por el triturador de disco. El control de la cinética de la molienda se realizó tomando una muestra de 2.000 g del producto de la molienda cada hora, a la cual se le determinó el % de retenido en tamices certificados de 147, 88 y 53 μm , lográndose un retenido del 80% en el tamiz de 4.700 μm , material que fue objeto del estudio cinético.

RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

Los primeros resultados experimentales obtenidos a nivel de equipos de trituración y molienda en el laboratorio, evidenciaron la mayor dureza de la escoria con relación al clinker de cemento portland, lo que coincide con lo reportado en la literatura consultada sobre el tema, presentándose además problemas de aglomeración en la molienda fina. De acuerdo con lo anterior se tomó como índice de Bond el valor de 20 kwh/t.

Las pruebas de trituración de trozos de escoria demuestran que la dureza aumenta con el tiempo de enfriamiento, encontrándose muestras de trituración extremadamente difíciles, lo que evidencia la necesidad de un enfriamiento lo más brusco posible (quenching) para una mayor facilidad de trituración y molienda, así como elevada actividad hidráulica.

Los resultados experimentales demostraron que la cinética de la molienda de la escoria no sigue una ley de primer orden, sino de segundo orden², la que puede ser descrita matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$Q = Q_0 e^{-kt^m}$$

Aplicando logaritmos:

$$\ln \ln \frac{Q_0}{Q} = \ln K + m \cdot \ln t$$

En donde Q es la fracción retenida en el tamiz de abertura X a un tiempo t determinado y Q_0 antes del inicio de la molienda ($t = 0$).

Cuando representamos $\ln \ln(Q/Q_0)$ vs $\ln t$ se obtiene una línea recta cuya intersección nos dará $\ln K_c$, es decir, el logaritmo natural de la constante de velocidad de molienda, tal como se puede apreciar en la tabla 1 y la figura 1.

Hay que señalar que en la tabla 1, los casos correspondientes del 1 al 5 pertenecen al tamiz 0,175 mm ($\ln K_c = 0,7528$ y $R = 0,99$); del 6 al 10 al tamiz 0,088 mm ($\ln K_c = 0,4900$ y $R = 0,9987$); del 11 al 15 al tamiz 0,074 mm ($\ln K_c = 0,3990$ y $R = 0,9916$) y del 16 al 20 al tamiz de 0,038 mm ($\ln K_c = -1,7640$ y $R = 0,9942$).

En estudios realizados con anterioridad^{3,4}, quedó demostrado que la ecuación para la cinética de la molienda en un proceso de primer orden es idéntica a la correspondiente para una reacción química del mismo orden.

De acuerdo con ello, de modo similar a la ecuación de Arrhenius que relaciona la constante de velocidad de reacción con la temperatura y permite la obtención del valor de la energía de activación:

$$K = A e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

hemos considerado la existencia de una relación entre la constante de velocidad de molienda K_c y la abertura X del tamiz de referencia que permitiría obtener el valor de lo que, en principio, podríamos denominar como energía de activación para la molienda de un material cualquiera que debe depender del módulo de elasticidad del mismo y, en consecuencia, de su resistencia a la deformación y la rotura, de la granulometría del material de partida y de las condiciones experimentales. La ecuación propuesta es la siguiente:

$$K_c = C e^{-\frac{E_c}{X}}$$

Aplicando logaritmos:

$$\ln K_c = \ln C - \frac{E_c}{X}$$

Cuando por medio de la ecuación 5 determinamos E_c representando el $\ln K_c$ vs $1/X$ se obtiene una línea recta para los puntos correspondientes a las aberturas de tamices entre 175 μm y 53 μm (figura 2); con una apreciable desviación del correspondiente a la abertura del tamiz de 38 μm , lo cual nos dice la dificultad práctica de lograr tamaños de partículas menores en el proceso de molienda, figura 2

Este mismo estudio se realizó en la fábrica de cemento Chimborazo en Ecuador, con escorias de altos hornos, con el objetivo de comparar los resultados, también en un molinillo de bolas a escala de laboratorio tipo "batch" pero en condiciones experimentales algo distintas (1 kg de muestra y 9 kg de bolas de 40, 20, 10 y 2,5 mm) de escoria de alto horno procedente de Colombia (ver tabla 2) y mostró que la molienda de esta escoria también

TABLA 1

Cinética de molienda de la escoria de fundición de acero

No.	Ln tiempo	Q_0/Q	$\ln Q_0/Q$	$\ln Q_0/Q$	$\ln \ln Q/Q$
1	000	---	1.000	000	---
2	1.000	000	8.640	2.156	768
3	2.000	603	13.230	2.582	949
4	3.000	1.099	23.810	3.170	1.154
5	4.000	1.386	30.490	3.417	1.229
6	000	---	1.000	000	---
7	1.000	000	5.130	1.635	492
8	2.000	693	6.680	1.899	641
9	3.000	1.099	8.310	2.177	750
10	4.000	1.386	9.330	2.233	803
11	000	---	1.000	000	---
12	1.000	000	4.390	1.479	392
13	2.000	093	5.710	1.742	555
14	3.000	1.099	6.270	1.836	607
15	4.000	1.386	7.080	1.957	672
16	000	---	1.000	000	---
17	1.000	000	3.050	1.115	109
18	2.000	693	3.720	1.314	273
19	3.000	1.099	4.580	1.522	420
20	4.000	1.386	5.970	1.787	580

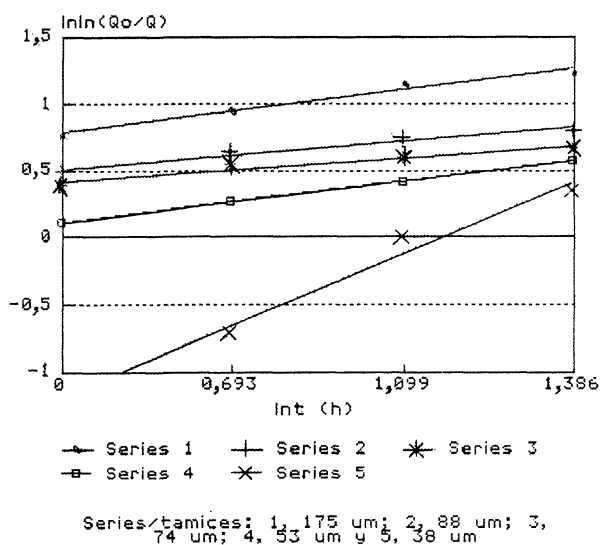


Figura 1.- Determinación de las constantes de velocidad de molienda para la escoria de acero.

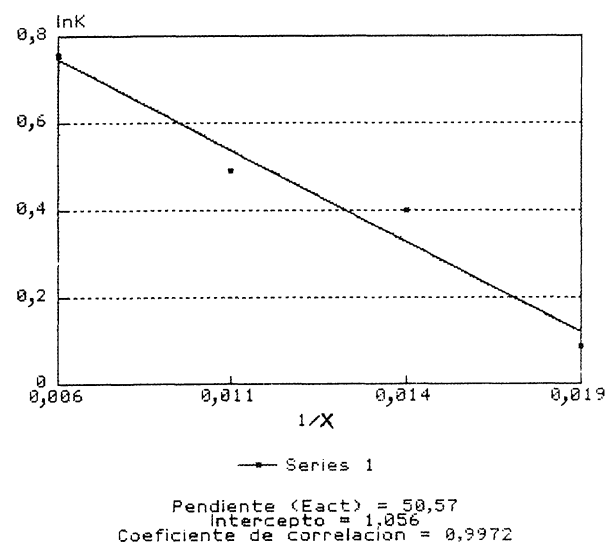


Figura 2.- $\ln K$ vs $1/X$ para la molienda de escoria de acuerdo con los valores de la tabla 1.

TABLA 2

Cinética de molienda de escoria de alto horno

No.	t	Ln t	Q	Ln t	Q ₀ /Q	Ln Q ₀ /Q	Ln Ln/Q
1	000	---	100.000	4.605	1.000	000	---
2	30.000	3.401	14.240	2.656	7.020	1.949	667
3	60.000	4.094	8.640	2.156	11.570	2.448	895
4	90.000	4.500	5.340	1.675	18.730	2.930	1.075
5	000	---	100.000	4.605	1.000	000	---
6	30.000	3.401	29.390	3.381	3.400	1.224	202
7	60.000	4.094	21.450	3.066	4.660	1.539	431
8	90.000	4.500	16.730	2.817	5.980	1.788	581
9	000	---	100.000	4.605	1.000	000	---
10	30.000	3.401	33.870	3.523	2.950	1.082	079
11	60.000	3.094	26.910	3.292	3.720	1.314	273
12	90.000	4.500	20.720	3.031	4.830	1.575	454
13	000	---	100.000	4.605	1.000	000	---
14	30.000	3.401	47.480	3.860	2.110	747	-292
15	60.000	4.094	41.560	3.727	2.410	880	-128
16	90.000	4.500	36.050	3.585	2.770	1.019	-019

obedece a la ecuación 2, como se aprecia en la figura 2; obteniéndose un valor de E_c igual a 18,2 el cual consideramos muy bajo (figura 3), pero se debe tener presente las condiciones experimentales en la que se obtuvo, caracterizada por una elevada proporción de los cuerpos molidos respecto a la escoria (9:1) mientras que en nuestras experiencias la relación es de 5,3:1, amén de que la escoria de fundición de acero es sin lugar a dudas mucho más difícil de moler.

En la tabla 2, los casos del 1 al 4 corresponden al tamiz 0,074 mm ($K_c = 0,3667$ y $R = 0,9967$); del 5 al 8 al tamiz 0,090 mm ($K_c = 0,3438$ y $R = 0,9995$); del 9 al 12 al tamiz 0,074 mm ($K_c = 0,3352$ y $R = 0,9915$) y del 13 al 16 al tamiz de 0,043 mm ($K_c = 0,2729$ y $R = 0,9930$).

ELECCIÓN DEL MOLINO

Cálculo del molino cónico, con y sin rejillas

El molino elegido es uno tipo Hardinge cónico, con una longitud total de 335 cm y diámetro exterior de 183 cm (6ft), siendo su parte cilíndrica de 6 ft de diámetro exterior y 4 ft de largo, aportando, para un molino de este tipo y

dimensiones, una carga de bolas de 15.000 libras (6,4 t) accionado por un motor de 70 HP (52 kw) para una velocidad de rotación del molino de 25 rev/min (75% de la crítica).

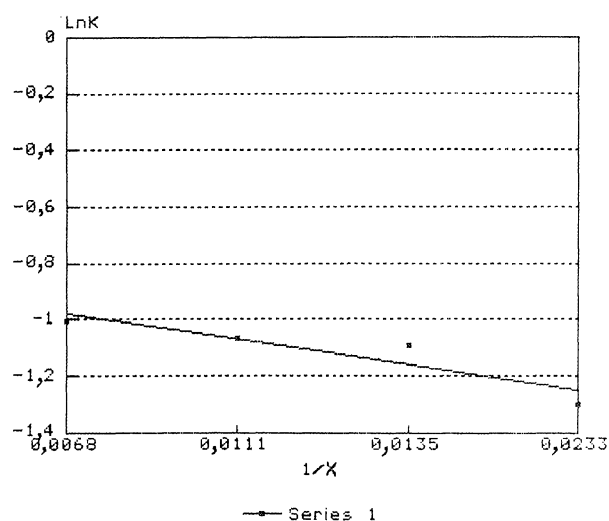


Figura 3.- LnK vs 1/X para la molienda de la escoria de alto horno.

De acuerdo con lo aportado en la literatura⁵, este molino puede lograr los siguientes rendimientos cada 24 horas con un material de dureza media (índice de Bond entre 9-13 kwh/t):

-Trabajando en circuito abierto, alimentado con partículas menores de 1½ in (38 mm) hasta obtener un producto con retenido de 10% en el tamiz de 100 mesh (147 µm) se alcanza 144 t (6 t/h).

-Trabajando en circuito cerrado (barrido con aire), alimentado con partículas menores de ¾ in (19 mm) con retenido de 10% en el tamiz de 200 mesh (75 µm) se alcanza 108 t (4,5 t/h).

Como se aprecia, con este molino trabajando en circuito abierto, ha de ser muy difícil alcanzar para la escoria la finura deseada de no más de 10% retenido en el tamiz de 90 µm.

Los datos generales de interés para el análisis del molino son los siguientes:

-Diámetro interior (D _i)	5,6 ft (170 cm)
-Volumen interior útil (V _i)	4,24 m ³
-Índice de Bond para la escoria (W)	20 kwh/t
-Densidad de la escoria (d)	3,0 g/cm ³
-% velocidad de rotación crítica del molino (N)	75%
-Constante para bolas de acero (K)	200

El diámetro máximo de las bolas de molienda a emplear puede ser calculado por medio de la ecuación empírica de Bond:

$$d_{\max}^2 = \frac{X_f W}{NK} \sqrt{\frac{\delta}{D_i}}$$

donde X_f es la abertura en micras del tamiz por el cual pasa el 80% del material a moler y, para el caso que nos ocupa, hemos tomado como igual a 4.700 mm (una arena gruesa) lo que significa un adecuado enfriamiento y/o trituración previa.

La sustitución de los valores correspondientes de las variables en la ecuación anterior nos permite obtener para d_{max} 2,14 in, es decir, 5,44 cm, que redondeado al diámetro comercial disponible superior nos lleva al diámetro máximo de 60 mm para las bolas de molienda.

Este tipo de molino lleva por diseño 6,4 t de bolas para un 32% de llenado considerando un peso volumétrico para las bolas de 4,7 t/m³.

En nuestro caso mantendremos las mismas condiciones, lo cual nos lleva a la siguiente distribución de la carga de bolas:

Bolas de 60 mm	18%	1.150 kg
----------------	-----	----------

Bolas de 50 mm	41%	2.600 kg
Bolas de 40 mm	32%	2.600 kg
Bolas de 30 mm	9%	650 kg
TOTAL	100%	6.400 kg

En caso de alimentar el molino con partículas de hasta 10 mm, el diámetro máximo de las bolas aumentaría hasta 80 mm y el producto ha de ser aún más grueso, razón por la cual se requiere el enfriamiento más brusco posible y hasta la trituración previa.

En cuanto al rendimiento del molino podemos decir que podría obtenerse hasta unas 4 t/h con un producto de 40% de retenido en el tamiz de 147 µm (100 mesh) inadecuado para cemento, requiriéndose de una segunda etapa de molienda fina que puede ser utilizada, a su vez, como de mezclado para la obtención de los aglomerantes a base de escorias.

Debemos aclarar que en los molinos existe una correlación inversa entre rendimiento y finura, pero no debe pensarse que reduciendo cada vez más la alimentación podremos obtener de modo continuo mejores finuras indefinidamente, pues, a partir de determinado valor, la propia finura puede empeorar por este medio.

Algo que podría mejorar la eficiencia del molino cónico sería la instalación de una rejilla hacia el extremo de la descarga, a unos 50 cm de la parte cilíndrica del apoyo. Dicha rejilla -constituida por sectores de circunferencias sujetas por tornillos al cuerpo del molino e integradas en un núcleo central ciego que las amarra- estaría formada con ranuras concéntricas de 6 mm de ancho, con una superficie activa total de 1.200 cm² (suma de las áreas de todas las ranuras).

Considerando que la escoria a la salida del primer molino ha de tener un 20% de retenido en el tamiz de 175 µm, el cálculo del diámetro máximo de las bolas, de acuerdo con la ecuación empírica de Bond es de 25 mm y, en consecuencia, es conveniente emplear cylpebs (maníes) de 25 x 32 mm en vez de bolas de pequeño diámetro, debido al mayor peso de los maníes y su mayor eficacia en la refinación; razón por la cual se llenaría el molino con 6.400 kg de maníes para el 32% de llenado, con un rendimiento calculado de 5 t/h con producto de 10% de retenido en el tamiz de 90 µm (170 mesh).

Dada la existencia de un segundo molino tipo Hardinge cónico idéntico al anterior, se decidió instalar el mismo como segunda etapa de un sistema de molienda en tandem, de circuito abierto, cargando este segundo molino con maníes y dotándolo de una rejilla situada a unos 50 cm de la descarga del mismo, ésta ha de permitir elevar el tiempo de retención del material y, en consecuencia, el grado de refinamiento.

Este mismo análisis también se efectuó mediante la toma de decisiones o alternativas de acuerdo con lo estudiado en ingeniería de procesos⁶.

VALORACION ECONÓMICA

Utilizando un sistema de molienda en tandem, con un rendimiento de 4 t/h, pueden obtenerse los siguientes beneficios económicos:

Para tres turnos de trabajo de 8 h cada uno, se obtendrían 96 t/d, lo que se revertiría en 35.040 t/a; el precio del cemento es de 25 USD/t, por lo que se prevé un IBA de 876 000 USD/a. Teniendo en cuenta unos gastos de 15 USD/t por concepto de operación, mantenimiento, depreciación, salarios, transportación y otros, los gastos anuales (GA) serían de 525.600 USD/a.

La ganancia neta anual (GNA) sería de:

$$GNA = IBA - GA$$

$$GNA = 350\,400 \text{ USD/a}$$

En las Tunas, actualmente es incalculable el extraordinario impacto económico causado por la contaminación ambiental, producto de que las escorias de fundición de acero son arrojadas en las cercanías de la planta ACINOX

con grandes daños para la agricultura y el entorno en general, por lo que la utilización de las mismas para los fines propuestos permitirá grandes beneficios medio ambientales.

CONCLUSIONES

1. El método cinético de estudio de los procesos de molienda de materiales cementantes y/o adiciones para los cementos resulta de extrema utilidad en la solución de problemas prácticos para la concepción y diseño de sistemas de molienda para estos cementos y aglomerantes, extendiéndose a la evaluación y análisis de la operación de molinos de cemento.

2. Resulta una novedad en el plano teórico la correlación encontrada entre el logaritmo de la constante de velocidad de molienda y el inverso de la abertura del tamiz de referencia, de modo similar a la ecuación de Arrhenius para la cinética química, lo cual abre un amplio campo por explorar en esta esfera.

3. Es posible lograr la producción de cemento de escoria de fundición de acero por medio del sistema de molienda tandem, empleando dos molinos tipo Hardinge cónicos, con un rendimiento de no menos de 4 t/h. Ambos molinos fueron recuperados del patio de chatarras de la planta René Ramos Latour de Nicaro.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Jiménez, O. L.: Tesis Maestría en Ingeniería Civil. Univ. Central "Marta Abreu". Santa Clara, 1997.
- (2) Andréiev, S.E.; Perov V. A. y Zverievich, V. V.: "Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales". Editorial Mir, Moscú. 1980, 542 págs.
- (3) Rabilero, A. C. y Salas M. E.: "Método cinético para el cálculo y diseño de sistemas de molienda de cementos y otros aglomerantes". XI Forum de Ciencia y Técnica. Trabajo destacado provincial. Santiago de Cuba, 26 p.
- (4) Rabilero, A. C. y Velázquez, E.: "Alternativas de la ingeniería en la producción de materiales de la construcción". XXIII Convención UPADI, 1994, 18 págs.
- (5) Perry, O.: "Chemical Engineers Handbook". Tomo I y II. Edición Revolucionaria 1967. Acevedo, C. I. et al: "Materiales de Construcción" Departamento de Geotécnia y Materiales de la Construcción. Facultad de Ingeniería Civil. IPSJAE. MES. Ediciones. La Habana, 1985, pp 1-174.
- (6) Ulrich, D. G.: "Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química". University of New Hampshire. Fotocopia del Centro de Estudios de Biotecnología Industrial de la Universidad de Oriente. Ejemplar Único-Andréiev, S.A., Perov, V.A. y Zverievich, V. V.; "Trituración, desmecanizamiento y cribado de minerales". Editorial Mir. Moscú, 1980, 542 págs.

* * *