



Dyna

ISSN: 0012-7353

dyna@unalmed.edu.co

Universidad Nacional de Colombia

Colombia

ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, BEATRIZ; MENÉNDEZ-AGUADO, JUAN MARÍA; ROSA DZIOBA, BLANCA;  
COELLO-VELÁZQUEZ, ALFREDO LÁZARO

EVALUACIÓN DE MATERIAS PRIMAS EN UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARENA DE SILICE  
PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL PROCESO DE MOLIENDA

Dyna, vol. 80, núm. 177, febrero, 2013, pp. 95-100

Universidad Nacional de Colombia

Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49625661012>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# EVALUACIÓN DE MATERIAS PRIMAS EN UNA PLANTA DE BENEFICIO DE ARENA DE SILICE PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL PROCESO DE MOLIENDA

## RAW MATERIALS EVALUATION IN A SILICA PROCESSING PLANT TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY IN THE GRINDING PROCESS

BEATRIZ ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ

*PhD, Universidad de Oviedo, España. alvarezrbeatriz@uniovi.es*

JUAN MARÍA MENÉNDEZ-AGUADO

*PhD, Universidad de Oviedo, España. maguado@uniovi.es*

BLANCA ROSA DZIOBA

*PhD, Universidad Nacional de San Luis, Argentina. rbdzioba@unsl.edu.ar*

ALFREDO LÁZARO COELLO-VELÁZQUEZ

*PhD, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. acoello@ismm.edu.cu*

Recibido para revisar Diciembre 20 de 2011, aceptado Noviembre 11 de 2012, versión final Diciembre 10 de 2012

**RESUMEN:** El presente trabajo tiene por objetivo primordial optimizar el consumo energético y reducir la contaminación ambiental asociada, por la liberación de  $\text{CO}_2$ , en una planta de micronización de sílice. La metodología empleada consiste en aplicar la teoría de Bond para la selección de materias primas a tratar en la mencionada planta, la cual dependiendo de las necesidades actuales opera con dos tamaños de molienda  $d_{100}$ , 50 y 75  $\mu\text{m}$ . Los ensayos experimentales se llevaron a cabo sobre muestras tomadas en la planta, teniendo en cuenta que las tres materias primas son de distinta procedencia y de similares características químicas y mineralógicas. Del análisis de los resultados obtenidos se concluye que el consumo energético de la planta puede reducirse hasta algo más de un 30% en ambos tamaños y evitando las emisiones de  $\text{CO}_2$  en 293,83 kg y 128,86 kg por hora de funcionamiento respectivamente.

**PALABRAS CLAVE:**  $\text{CO}_2$ , eficiencia energética, molienda.

**ABSTRACT:** The aim of this study was the optimization of the power consumption in a grinding plant of silica and the consequent reduction of  $\text{CO}_2$  emissions. The methodology used consisted on applying the Bond theory for the selection of raw materials to the plant, which operates at two different grinding sizes (100% passing 50 and 75  $\mu\text{m}$ ). The experimental tests were carried out with samples picked up in the plant, from different ores but similar chemical properties. The results pointed that the energy consumption in the plant can be reduced up to 30% in both cases, avoiding  $\text{CO}_2$  hourly emissions of 293,83kg and 128,86kg for each size.

**KEYWORDS:**  $\text{CO}_2$  emissions, energy efficiency, grinding.

### 1. INTRODUCCIÓN

La conminución es un proceso que consume una gran cantidad de energía, aproximadamente el 29% de la energía total en minería [17]. La corriente medioambiental energética da como resultado la necesidad de realizar esfuerzos tendientes a minimizar y/o disminuir la cantidad de energía que es consumida en la conminución. Un estudio de National Materials

Advisory Board of America [14] estima que la conminución constituye aproximadamente un 3-4% de la energía mundial consumida. Un estudio reciente [17] estima que el proceso de beneficio de minerales usa el 39% de la energía total usada en minería y el procesamiento de minerales, de la cual el 75% es responsable la conminución. La reducción de tamaño de 1mm a 75  $\mu\text{m}$  utiliza cerca del 75% de la energía necesaria en la conminución [15].

Las plantas de beneficio de arena de sílice micronizada tienen en la actualidad un alto consumo energético debido precisamente a las grandes razones de reducción que exige este proceso. Sobre la base de estas consideraciones, resulta evidente el vital interés de ahorrar energía en dicho proceso, lo cual se traduce en un ahorro de costos considerables. El consumo de energía en la conminución de minerales y el fenómeno físico en si, es un proceso que se lleva estudiando desde hace tiempo [4, 5, 9, 16].

Entre uno de los usos más destacados de la sílice micronizada que se puede mencionar, es como aditivo para mejorar las propiedades de los plásticos como el PVC y/o para recubrimientos cerámicos [7].

## 2. METODOLOGIA DE BOND

Uno de los parámetros aplicados en la industria a nivel mundial para predecir el consumo energético en la molienda de minerales es el índice de Bond ( $w_i$ ) o work index. Este parámetro indica la facilidad

de molienda de una determinada mena. Su valor es obtenido mediante ensayo estándar en laboratorio, empleando el molino estándar de Bond con una distribución determinada de cuerpos moledores (bolas de acero). Es una metodología sencilla, que puede ser encontrada fácilmente en la literatura [11], en la que se simula un circuito cerrado de molienda, con una carga circulante del 250% (ver Figura 1). El material introducido en el molino, a un tamaño 100% inferior a 3,35 mm, corresponde al equivalente de un peso de 700cm<sup>3</sup>, el cual se muele durante un determinado número de revoluciones. El producto de la molienda, es pasado a través de una criba con tamaño de corte  $P_{100}$ . Los finos se apartan y los gruesos son devueltos al molino. Se añade alimentación fresca, de tal manera que en el interior del molino siempre exista un peso correspondiente al volumen de 700cm<sup>3</sup>. A la fase de molienda-clasificación se le denomina ciclo. Se realizan ciclos sucesivos hasta alcanzar el 250% de carga circulante, lo cual coincide con la estabilización del valor de Gbp en los sucesivos ciclos.

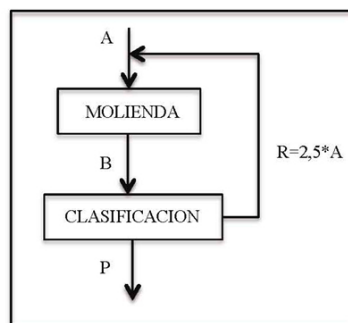


Figura 1. Circuito cerrado de molienda.

El Índice de Bond es obtenido mediante la siguiente ecuación (Ec.1):

$$W_i = \frac{44,5}{P_{100}^{0,23} \cdot Gbp^{0,82} \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (kWh / sht)$$

Siendo:

- $P_{100}$ : tamaño de corte de la criba ( $\mu m$ ).
- Gbp: índice de molturabilidad (g/rev), gramos de finos que se producen en el molino por cada vuelta.
- $P_{80}$ : tamaño correspondiente al 80% del pasante

acumulado en los finos del último ciclo ( $\mu m$ ).

- $F_{80}$ : tamaño correspondiente al 80% del pasante acumulado en la alimentación fresca ( $\mu m$ ).

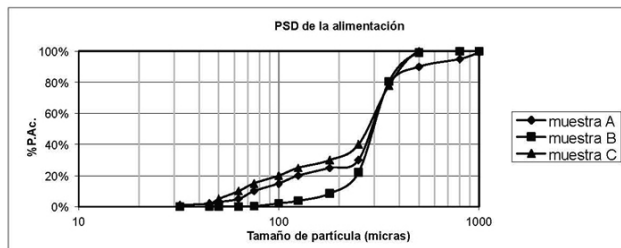
De estos cuatro parámetros, el  $P_{100}$  está impuesto por el tamaño de corte al cual se puede moler, el Gbp se obtiene una vez se ha llegado al equilibrio ( $R=250\%$ ) y los parámetros  $F_{80}$  y  $P_{80}$  se obtienen de las curvas de distribución granulométricas correspondientes. Debido a la laboriosidad del ensayo con algunas menas, puede simularse a partir de ensayos más sencillos de molienda-clasificación [3, 10, 13] e incluso con molinos comunes de laboratorio [10]. En el caso de este estudio se utilizó el molino estándar de Bond.

El  $w_i$  se puede utilizar para comparar la aptitud para la molienda de minerales de distinta procedencia y de esta forma obtener un indicador energético de dicho mineral que pueda ser utilizado para la selección del mismo [1, 6, 12].

### 3. MATERIAL Y METODO EXPERIMENTAL

La planta de tratamiento de arena de sílice trabaja a dos tamaños de corte, 100% menor de 50 y 75  $\mu\text{m}$  según las necesidades comerciales del momento. Se estudiarán dos muestras de arena de sílice adicionales (muestras B y C) a la usada habitualmente en la planta (muestra A), para poder compararlas energéticamente. Por lo tanto, se realizarán ensayos para la determinación del  $w_i$ , para cada una de las tres muestras y por duplicado, a mallas de corte equivalentes a:  $P_{100}$  de 50 y 75  $\mu\text{m}$ .

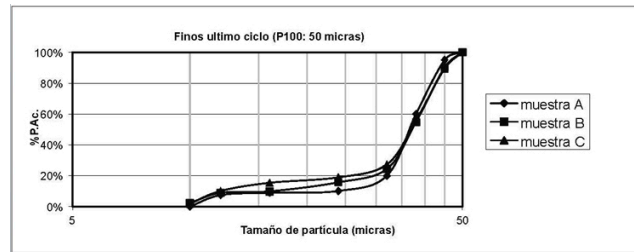
En primer lugar se obtuvieron por tamizado las curvas de distribución granulométricas correspondientes a las muestras A, B y C (ver Figura 2), de las cuales se obtienen los valores  $F_{80}$  de 360, 351 y 369  $\mu\text{m}$  respectivamente [2, 3, 4]:



**Figura 2.** Curvas de distribución granulométricas de las muestras

#### 3.1 Ensayos del Índice de Bond a 50 $\mu\text{m}$

Los ensayos correspondientes fueron realizados por triplicado a fin de comprobar no sólo la reproducibilidad del método sino también para detectar alguna anomalía en la toma de muestra-la cual debe ser representativa de la misma-, y registrándose los valores medios de éstos. Los valores de Gbp se obtienen teniendo en cuenta la tendencia de los valores de los últimos ciclos de molienda. Se muestra a continuación, la gráfica de las curvas de distribución granulométricas de los finos del último ciclo, de las que se obtienen [2, 3, 4] los valores de  $P_{80}$  equivalentes a 42, y 44  $\mu\text{m}$ , respectivamente para cada muestra:



**Figura 3.** Curvas de Distribución Granulométricas de los finos del último ciclo de molienda.

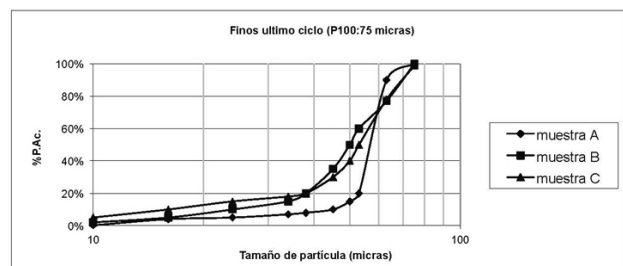
Los parámetros para la determinación del  $w_i$  se resumen en la siguiente Tabla 1. Con éstos y aplicando la Ec. 1 se obtienen los valores finales. Para obtener el resultado en toneladas, se multiplica por un factor corrector de 1,12.

**Tabla 1.** Parámetros resultado del ensayo de Bond

	Muestra A	Muestra B	Muestra C
$P_{100}$ ( $\mu\text{m}$ ):	50	50	50
Gbp (g/rev):	0,2005	0,2852	0,3230
$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ ):	42	44	44
$F_{80}$ ( $\mu\text{m}$ ):	360	351	369
$W_i$ (kWh/t):	73,28	57,26	51,02

#### 3.2 Ensayos del Índice de Bond a 75 $\mu\text{m}$

Al igual que el apartado anterior, se toman los valores medios de los tres ensayos realizados para cada muestra. Los valores de Gbp se obtienen teniendo en cuenta la tendencia de los valores de los últimos ciclos de molienda. En la Fig. 4 se presentan las curvas de distribución granulométricas de los finos del último ciclo, para las tres muestras, a partir de que se obtienen [2, 3, 4] los valores de  $P_{80}$  igual a 62, 65 y 64  $\mu\text{m}$ , respectivamente:



**Figura 4.** Curvas de Distribución Granulométricas de los Finos del último ciclo de molienda.

Los parámetros para la determinación del  $w_i$  se resumen en la Tabla 2. Con éstos y aplicando la Ec. 1

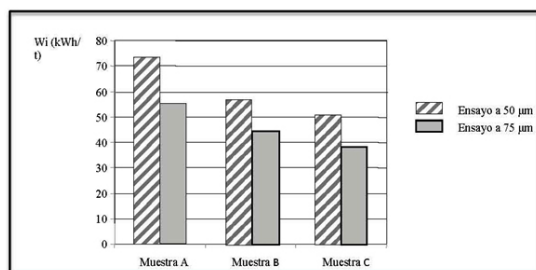
se obtienen los valores finales. Para obtener el resultado en toneladas se multiplica por un factor corrector equivalente a 1,12.

**Tabla 2.** Parámetros resultado del ensayo de Bond

	Muestra A	Muestra B	Muestra C
$P_{100}$ ( $\mu\text{m}$ ):	75	75	75
Gbp (g/rev):	0,3711	0,5119	0,5872
$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ ):	62	65	64
$F_{80}$ ( $\mu\text{m}$ ):	360	351	369
$w_i$ (kWh/t):	51,11	44,51	38,53

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

En la Fig. 5 se presentan en forma comparativa los valores obtenidos de los Índices de Bond correspondientes a las diferentes muestras ensayadas, utilizando dos diámetros de corte.

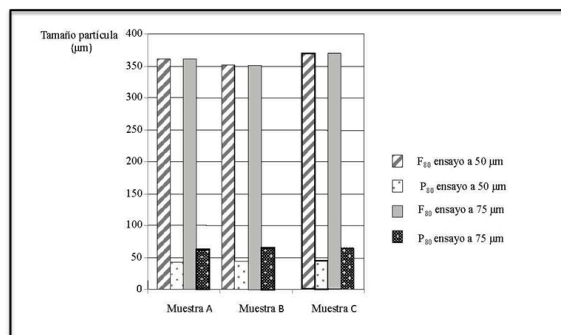


**Figura 5.** Comparación de los valores del  $w_i$  para las muestras A, B y C.

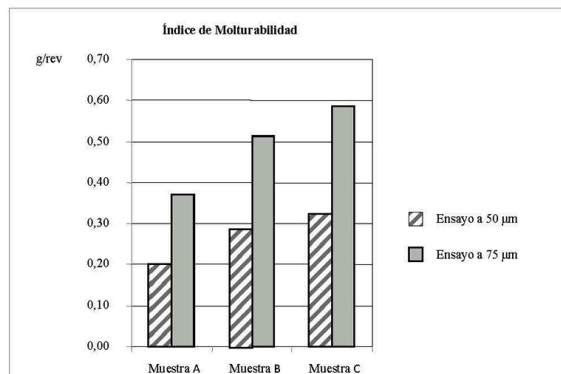
Se puede observar que para las muestras B y C, y para ambos diámetros de corte, tienen un  $w_i$  menor que la muestra que se utiliza habitualmente en la planta y en idénticas condiciones de trabajo (muestra A), lo cual indica un mayor aptitud para la reducción de tamaño (molturabilidad). Considerando que en este caso particular la calidad del producto está determinada únicamente por su granulometría, se podría decir que el empleo de las muestras B y C permitiría la obtención del producto con las características deseadas con un gasto energético menor que en el caso de la muestra A.

En forma análoga, en las Fig. 6 y 7 se presentan en forma comparativa los valores obtenidos de  $F_{80}$ ,  $P_{80}$  y Gbp para las tres muestras de minerales y ambos diámetros de corte. Del análisis de los mismos se concluye que todas ellas presentan distribuciones granulométricas parecidas como así también sucede con los  $P_{80}$  y Gbp indicando que todos los minerales se comportan de maneras similares ante la molienda.

Respecto al índice de molturabilidad (g/rev) se revela que en la molienda de las muestras B y C se producen más gramos de finos por revolución. Esto último concuerda con los valores menores de  $w_i$  de las mismas en comparación con la muestra A.

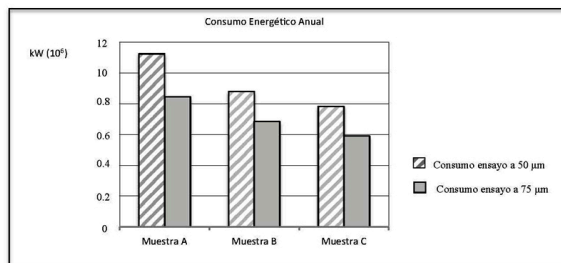


**Figura 6.** Valores  $d_{80}$



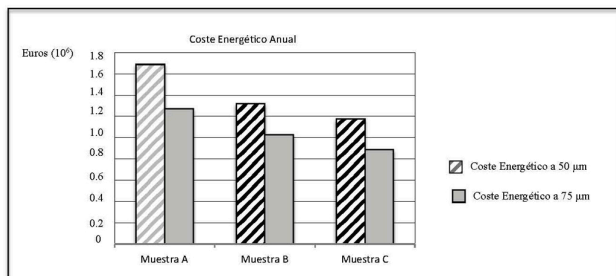
**Figura 7.** Valores del Gbp de los ensayos

Considerando que la planta procesa 30 toneladas por hora y que el  $w_i$  permitiría estimar el consumo energético en kWh/t (la estimación más precisa se realizaría conociendo el índice de trabajo operativo, que para una aplicación concreta se podría correlacionar con el índice de trabajo de laboratorio), el consumo energético anual según el mineral a moler se podría estimar en primera aproximación como se presenta en la Fig. 8.



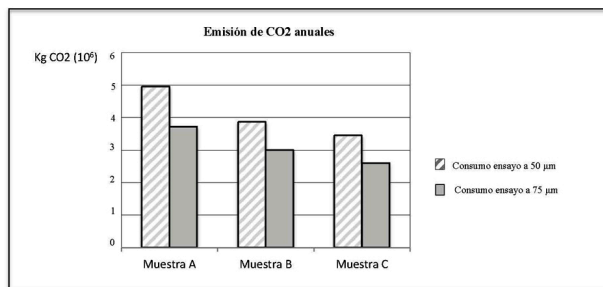
**Figura 8.** Consumo energético anual

Si el precio del kW son 0,15 euros, se tienen los siguientes gastos anuales del molino:



**Figura 9.** Coste energético anual

Por otro lado es necesario resaltar que si bien el proceso de molienda necesita de un aporte energético, que es directamente proporcional al  $w_i$ , pero que a su vez se traduce en emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera cuando esta energía proviene de fuentes no renovables. Teniendo en cuenta que el coeficiente de emisión específico medio del parque de generación de energía eléctrica en España son 0,44g  $\text{CO}_2$  por cada kWh eléctrico producido [8], se tiene:



**Figura 10.** Emisiones  $\text{CO}_2$  anuales

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de estos datos y tanto en caso de molienda a 50 y 75µm, las muestras B y C tienen un  $w_i$  menor. Para la molienda a 50 µm, se puede estimar la reducción del consumo energético hasta en 22,26 kWh/t si se usa la muestra C, suponiendo una correlación lineal entre el índice de trabajo operativo y el obtenido en el laboratorio. Para una molienda a 75µm, se puede estimar, análogamente, la reducción del consumo energético hasta en 16,58 kWh/t, si se usa la muestra C. Se podría recomendar como orden de prioridad en la utilización de las muestras el siguiente: C, B y A.

Estas reducciones de consumo de energía se traducen en una reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  que se pueden

estimar en el entorno del 30% tanto en la molienda a 50 µm como en la molienda a 75µm.

Se puede concluir que de las tres muestras ensayadas la utilización de la muestra C, en lugar de la usada habitualmente por la planta (muestra A), podría reducir considerablemente el gasto económico, energético y emisiones de  $\text{CO}_2$ .

#### REFERENCIAS

- [1] Coello, A. L., Menéndez, J. M., Hechevarría, J. R. and Rodriguez, A. B., Toward determining the behavior of fragmentation functions during the impact crushing of minerals. *Miner. Metall. Proc.*, Vol. 28 (2), pp. 82-87, 2011.
- [2] Álvarez, B., Análisis de la Influencia de los Modelos de Distribución de Tamaños de Partículas en la Determinación de Consumos Energéticos en Molienda Mediante el Método de Bond [PhD Thesis]. Universidad de Oviedo, 2010.
- [3] Álvarez, B., Menéndez, J. M., Coello, A., Dzioba, B. R., Transient state analysis by simulation in a closed grinding circuit. *Miner. Eng.*, 24, pp. 473–475, 2011.
- [4] Bond, F. C., *Crushing and Grinding Calculations*, Allis Chalmers Manufacturing Co., Milwaukee, 1961.
- [5] Bond, F. C., *Third Theory of Comminution*. *Min. Eng. Trans. AIME*, 193 pp. 484-494, 1952.
- [6] Coello, A.L., Menéndez, J.M. y Brown, R.L., Grindability of lateritic nickel ores in Cuba, *Powder Technol.* 182 (1), pp. 113-115, 2008.
- [7] Elzea, J, Trivedi, N. and Barker, J., *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets and Uses*. SME, Littleton, 2006.
- [8] IDAE. Factores de conversión de consumo o producción a energía primaria (EP) y Factor, 2010. Available: <http://www.idae.es>
- [9] Lynch, A.J., *Mineral Crushing and Grinding Circuits*, Elsevier, 1977.
- [10] Menéndez, J.M., Aplicación de la Simulación Matemática a la Determinación de Consumos Energéticos en Fragmentación [PhD Thesis]. Universidad de Oviedo, 2001.
- [11] Menéndez, J.M., Dzioba, B.R. y Coello, A.L., Determination of work index in a common laboratory mill, *Miner. Metall. Proc.* 22 (3), pp. 173-176, 2005.



- [12] Menéndez, J.M., Coello, A. L., Tijonov, O.N. y Rodríguez, M.A., Implementation of energy sustainability concepts during the comminution process of the Punta Gorda nickel ore plant (Cuba). *Powder Technol.* 170, pp. 153–157, 2006.
- [13] Menéndez, J.M., Dzioba, B.R., Aplicación de la simulación matemática al análisis del régimen transitorio de un circuito cerrado de molienda. *DYNA-COLOMBIA* 71 (142), pp. 25– 31, 2004.
- [14] National Materials Advisory Board. *Comminution and Energy Consumption*. Washington, D.C, NMAB-364, National Academy Press, 1981.
- [15] Powell, M. S., Govender, I., y McBride, A.T., Applying DEM outputs to the unified comminution model. *Miner. Eng.* 21 (11), pp. 744-750, 2008.
- [16] Prasher, C. L., *Crushing and Grinding Process Handbook*, John Wiley & Sons, Great Britain, 1987.
- [17] Tromans, D., Mineral comminution: energy efficiency considerations. *Miner. Eng.* 21 (11), pp. 613–620, 2008.