

## **Eficiencia energética en molienda de minerales de wolframio: funciones características del índice de trabajo**

<sup>a</sup>González García, G., <sup>b</sup>Coello-Velázquez, A. <sup>a</sup>Menéndez Aguado, J.M.

<sup>a</sup>Universidad de Oviedo (España) <sup>b</sup>Inst. Sup. Minero Metalúrgico de Moa (Cuba).

Contacto: gonzalezgloria@uniovi.es

### **RESUMEN**

Este trabajo estudia la variabilidad en la facilidad de molienda en molino de bolas de varias menas de wolframio, utilizando la metodología del ensayo estándar de Bond, reconocido a nivel industrial como herramienta para caracterizar la facilidad de molienda de los materiales.

Fueron realizados una serie de ensayos variando el tamaño de molienda y se obtuvo una ley matemática que describe el aumento del consumo de energía al disminuir el tamaño de molienda para cada una de las menas de tungsteno, realizándose un análisis comparado de los resultados obtenidos.

**Palabras Clave:** molturabilidad, molinos de bolas, eficiencia energética, molienda, índice de Bond.

### **INTRODUCCIÓN**

El tungsteno es un metal relativamente raro en la corteza terrestre, con una concentración media estimada de 1.5 ppm [1]. Es el metal con mayor punto de fusión (3422 °C) y además posee una elevada densidad (19.26 g/cm<sup>3</sup>), propiedad de la cual deriva su nombre, tung sten (piedra pesada en sueco).

Está considerado como materia prima crítica para Europa debido a su importancia económica y a su riesgo de suministro [1, 2].

En la naturaleza, el tungsteno, no se presenta en forma nativa, sino formando hasta 45 minerales; de todos ellos, sólo dos tienen importancia económica: la wolframita (FeWO<sub>4</sub>) y la scheelita (CaWO<sub>4</sub>). Las leyes económicas de los yacimientos están entre 0.1 y 2.5 % de WO<sub>3</sub> [1]. Por otro lado, los concentrados

deben tener un mínimo de 65-75% de  $WO_3$  para su refinamiento posterior [3], por lo que la mena debe ser concentrada previamente.

Los procesos involucrados en el beneficio de tungsteno son, habitualmente, estrío, conminución, separación gravimétrica, flotación por espumas y separación magnética. En el caso de la scheelita, las etapas principales de concentración suelen ser la separación gravimétrica y la flotación por espumas, mientras que en el caso de la wolframita suele ser más adecuado el tratamiento por gravimetría y la separación magnética.

Se calcula que el coste en procesos de conminución (trituración y molienda) en una planta de beneficio asciende al 38% de los costes totales, correspondiendo el 30,2% a costes derivados de la molienda de minerales [4]. Cobra especial interés, debido al elevado porcentaje en costes que suponen las operaciones de molienda, la posibilidad de predecir el consumo energético específico derivado de las mismas con el fin de optimizar el proceso. Cualquier ganancia en términos de eficiencia, por pequeña que sea, puede redundar en un impacto significativo en los costos de operación de la planta con la consecuente conservación de los recursos [5].

El ensayo estándar de Bond propuesto por Fred Bond [6] para estimar el consumo energético específico es la metodología aceptada a nivel industrial para caracterizar la molturabilidad de los materiales.

En este trabajo se presenta el concepto de funciones de índice de trabajo, que generalizan el concepto de índice de Bond. La determinación de estas funciones se realiza sobre varias menas diferentes de tungsteno procedentes de yacimientos en explotación.

## **EQUIPOS Y MÉTODOS**

Se utilizaron materiales provenientes de cuatro menas diferentes de tungsteno, todas ellas localizadas en Europa. En las menas 1, 2 y 4 el tungsteno aparece en forma de scheelita, mientras que la mena 3 es de wolframita.

Para la realización de los ensayos, se utilizó un molino de bolas estándar de Bond de 12 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de largo, que gira a 70 rpm, posee esquinas redondeadas y revestimiento liso, con una carga de bolas de acero determinada [7].

La alimentación al molino corresponde a material triturado controladamente al 100% menor de 3.35 mm (6 mallas Tyler), pudiendo utilizarse una alimentación más fina si fuese necesario; el volumen aparente de dicha alimentación es en este caso de 700 cm<sup>3</sup>. Previamente a la realización del ensayo, la alimentación se caracteriza mediante su peso y su distribución granulométrica.

El ensayo consiste en la realización de una molienda en seco en el molino de bolas, simulando una operación en circuito cerrado con 250% de carga circulante, y utilizando la malla de corte requerida, de acuerdo con el circuito industrial, de forma que los tamaños de cierre del circuito se encuentren siempre en el rango comprendido entre 600 y 45 μm (28 y 325 mallas Tyler).

El material molido se tamiza al tamaño de corte P<sub>100</sub>. Los finos se apartan y los gruesos se devuelven al molino. Se introduce en el molino un peso de alimentación fresca igual al peso de finos obtenido, de tal forma que en el molino siempre haya un volumen de 700 cm<sup>3</sup>. Se realizan ciclos sucesivos de molienda-clasificación hasta que se establezca el valor Gbp (gramos producidos por revolución). Cuando esto sucede se alcanza la condición de carga circulante al 250%.

El índice de Bond se obtiene con la siguiente ecuación:

$$W_i = \frac{44,5}{P_{100}^{0,23} \cdot Gbp^{0,82} \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (kWh / sht) \quad (1)$$

dónde: P<sub>100</sub>, es tamaño del tamiz de corte (μm); Gbp, son los gramos de finos producidos por revolución (g/rev), también denominado índice de molturabilidad; F<sub>80</sub>, es el tamaño correspondiente al 80% del pasante acumulado en la alimentación (μm) y P<sub>80</sub>, es el tamaño correspondiente al 80% del pasante acumulado en los finos del último ciclo (μm).

## ENSAYOS REALIZADOS

Se realizaron ensayos de Bond a tres tamaños de malla de corte y para cada una de las menas de tungsteno: 125, 75 y 45  $\mu\text{m}$  (115, 200 y 325 mallas Tyler). En primer lugar, se caracterizaron granulométricamente las muestras, con los resultados mostrados en la Figura 1.

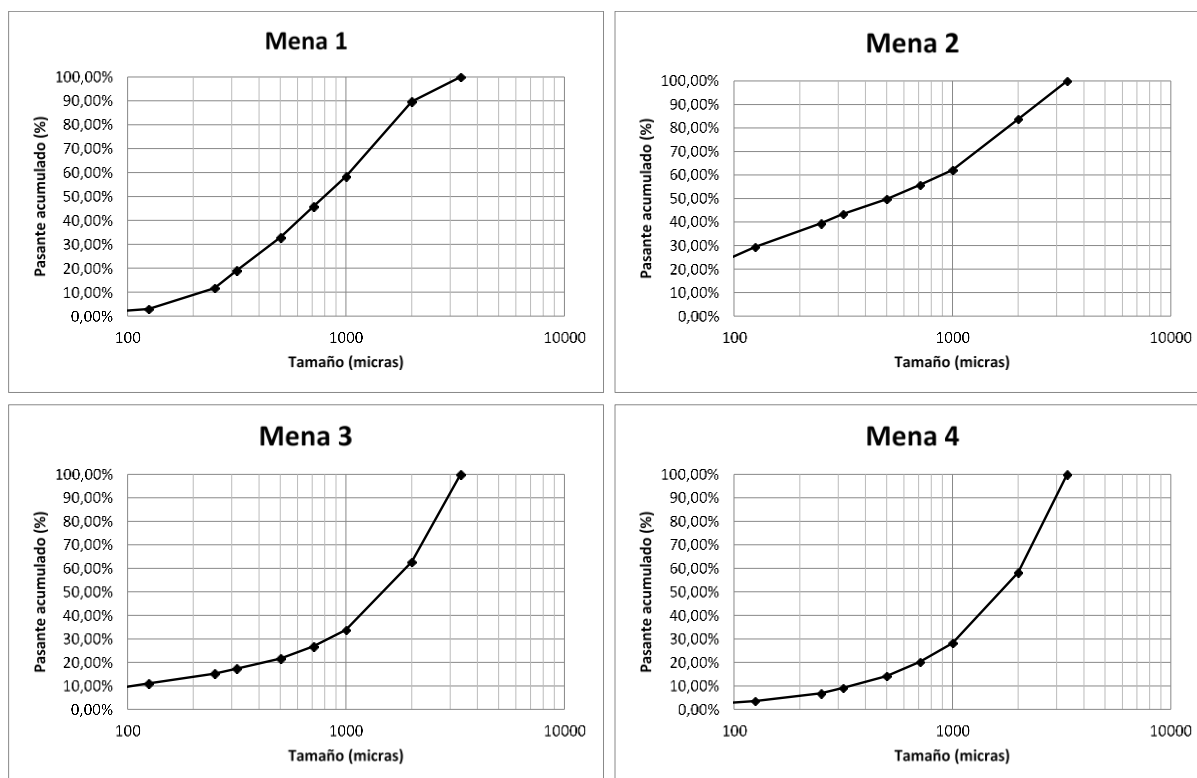


Figura 1. Caracterización granulométrica de las menas de tungsteno.

Se obtienen unos valores de  $F_{80}$  de 1690, 1828, 2624 y 2704  $\mu\text{m}$  para las menas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

A continuación, se realizan los ensayos estándar de Bond, comenzando por la mena 1 y tamiz de corte de 125  $\mu\text{m}$ .

Los datos iniciales del ensayo son los siguientes: Peso inicial (correspondiente a 700  $\text{cm}^3$ ) = 1087.4 g; Peso ideal de finos = 310.7 g;  $P_{100}$  = 125  $\mu\text{m}$ ;  $F_{80}$  = 1690  $\mu\text{m}$ ; % finos en la alimentación = 2.98 %

Para el cálculo del índice de molturabilidad o Gbp, se realiza una serie de ciclos de molienda, que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ciclos de molienda realizados para el cálculo del Gbp

Ciclo	Nº vueltas	Peso finos (g)	Finos ya presentes (g)	Finos netos (g)	Gbp (g/rev)
1	100	153,6	32,4	121,2	1,2120
2	253	328,2	4,6	323,6	1,2791
3	235	317,7	9,8	307,9	1,3102
4	230	308,1	9,5	298,6	1,2983
5	232	303,5	9,2	294,3	1,2685

El índice de molturabilidad se obtiene como resultado del cálculo de la media aritmética del Gbp de los dos últimos ciclos, siendo 1.2835 g/rev.

Realizando una caracterización granulométrica de los finos obtenidos tras la molienda del material se obtiene el parámetro  $P_{80}$ , cuyo valor, en este caso, es de 107  $\mu\text{m}$ .

Con los parámetros obtenidos, se calcula el índice de Bond,  $w_i$

El resto de ensayos se realiza de forma análoga al descrito en este apartado.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los parámetros calculados para cada una de las menas de tungsteno.

Tabla 2. Parámetros calculados para cada una de las menas de tungsteno.

Mena 1					Mena 2				
$P_{100}$ ( $\mu\text{m}$ )	$F_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	GBP (g/rev)	$w_i$ (kWh/t)	$P_{100}$ ( $\mu\text{m}$ )	$F_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	GBP (g/rev)	$w_i$ (kWh/t)
125	1690	107	1,2835	18,22	125	1828	92	2,3302	9,96
75	1690	68	0,7854	22,87	75	1828	58	1,1208	15,39
45	1690	41	0,4986	27,28	45	1828	42	0,5407	26
Mena 3					Mena 4				
$P_{100}$ ( $\mu\text{m}$ )	$F_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	GBP (g/rev)	$w_i$ (kWh/t)	$P_{100}$ ( $\mu\text{m}$ )	$F_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	$P_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	GBP (g/rev)	$w_i$ (kWh/t)
125	2624	92	1,5325	13,43	125	2704	103	1,6181	13,69
75	2624	66	1,2305	14,77	75	2704	62	0,916	18,19
45	2624	42	0,92,1	16,23	45	2704	41	0,5534	24,18

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se representa la relación entre el índice de trabajo de Bond y tamaño de corte para las 4 menas de tungsteno. Se observa que existe una tendencia prácticamente lineal en la relación  $w_i$  frente a  $P_{100}$  en el rango estudiado de tamaños, cuando el tamaño se representa a escala logarítmica.

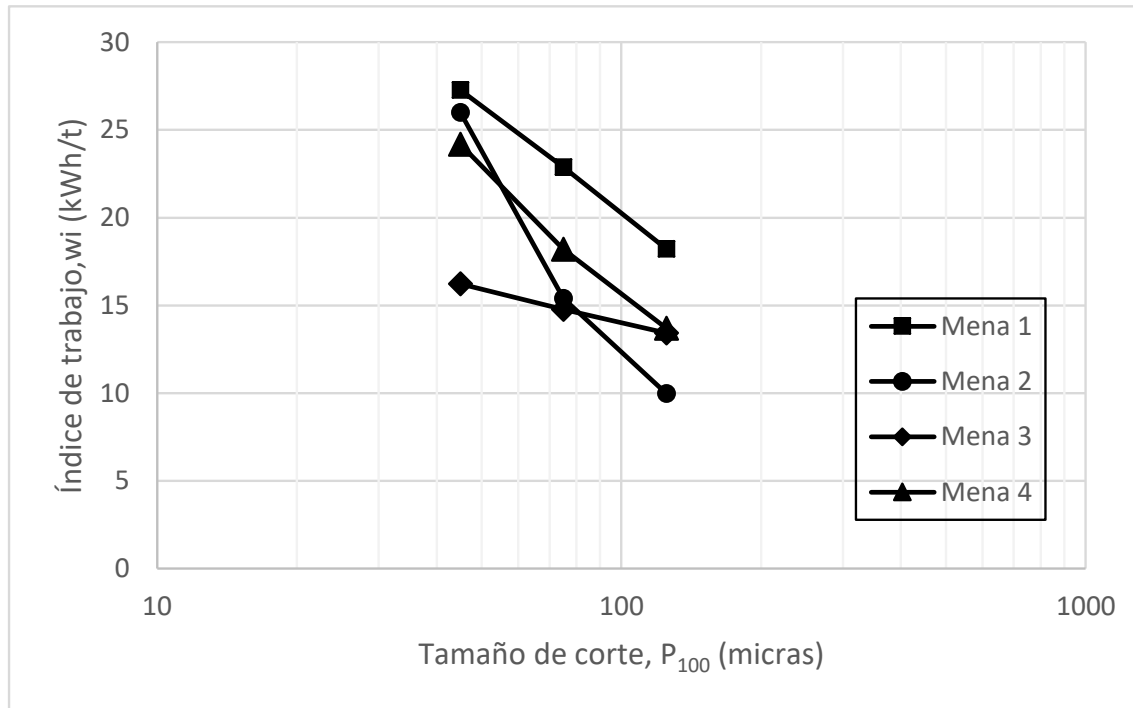


Figura 2. Relación entre índice de Bond y tamaño de corte.

La mena 1 sigue una tendencia lineal cuando se representa el tamaño de corte en escala logarítmica, esta tendencia permite predecir el valor del índice de trabajo para el rango de tamaño de molienda estudiado mediante la ecuación 2, con un  $R^2 = 0,98$ .

$$w_i = -0,1112 \cdot P_{100} + 31,87 \quad (2)$$

La mena 2 se ajusta más una tendencia potencial, sin embargo, haremos el ajuste lineal para comparar las pendientes de las otras menas. El ajuste lineal de la ecuación (3) para predecir el valor del índice de Bond es, con un coeficiente  $R^2 = 0,90$ :

$$w_i = -0,1911 \cdot P_{100} + 32,73 \quad (3)$$

En el caso de la mena 3, la ecuación (4) resultante es, con  $R^2 = 0,97$ :

$$w_i = -0,0342 P_{100} + 17,60 \quad (4)$$

La mena 4, con ajuste potencial y  $R^2 = 0,95$ , presenta la siguiente ecuación (5):

$$w_i = -0,1269 \cdot P_{100} - 29,05 \quad (5)$$

A pesar de que las menas 1, 2 y 4 son menas de scheelita, su comportamiento frente a la molienda se mueve en rangos muy diferentes. Esto se debe al hecho de habitualmente se procesan menas poliminerales o multicomponente, constituidas por al menos dos menas mineralógicas que se distinguen por la diferencia en sus propiedades físicas y físico-mecánicas. Son varios los trabajos [8,9,10] que demuestran que la no consideración de la variabilidad de la composición mineralógica en la alimentación trae consigo grandes desviaciones en la eficiencia metalúrgica planificada, así como problemas en la operación y tratamiento de las menas con tales características.

Se observan índices de trabajo similares para las tres menas de scheelita cuando el tamaño de salida del molino es de 45  $\mu\text{m}$ , mientras que la mena de wolframita presenta un índice de trabajo mucho menor. Se puede decir que, en general, las menas de scheelita siguen una tendencia similar, bastante diferente a la que sigue la mena de wolframita. Es destacable el comportamiento de la mena 2, cuyo índice de trabajo aumenta mucho más cuando el tamaño de molienda disminuye, como se muestra en el mayor valor de su pendiente, en valor absoluto.

Se evidencia que el valor del índice de trabajo o índice de Bond varía según el tamaño de corte, aumentando el índice cuando el tamaño disminuye, lo cual es de esperar por las leyes de la fragmentación: el consumo energético (y, por tanto, el consumo económico del proceso) aumenta cuanto más fina sea la molienda.

Ya que el índice de Bond no es un valor único y constante para un determinado material y depende del tamaño de salida del molino, puede ser una fuente de error tomar como válido un único valor del mismo, siendo más preciso tomar una función, al estilo de las propuestas, que describa esta variación para cada material.

## **CONCLUSIONES**

Como resultado de los ensayos realizados se demostró que el consumo energético en molienda aumenta al disminuir el tamaño de salida del molino.

El índice de Bond no es constante para cada material y depende del tamaño de salida del molino, por lo que es más adecuado tomar una función que describa esta variación en lugar de un valor único.

En general, las menas de scheelita estudiadas presentan una tendencia similar en el comportamiento frente a la molienda, siendo esta tendencia muy diferente a la que sigue la mena de wolframita.

Se propusieron ecuaciones matemáticas que describen la variación del consumo energético específico en función del tamaño de molienda para cada una de las menas y dentro del rango estudiado (entre 125 y 45  $\mu\text{m}$ ). Estas ecuaciones permiten obtener de forma directa el valor del índice de Bond para cualquier tamaño de molienda comprendido entre 125 y 45  $\mu\text{m}$ .

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo ha contado con la financiación del proyecto europeo H2020 OptimOre (Grant nº 642201).

## **REFERENCIAS**

1. European Commission. "Report on critical raw materials for the EU" Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. 2017.
2. European Commission. "Report on critical raw materials for the EU" Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. 2014.
3. E. Lassner, y W. Schubert. "Tungsten : properties , chemistry, technology of the element, alloys , and chemical compounds". Springer Science+Business Media New York. 1999.
4. E.G. Kelly, D.J Spottiswood. "Introduction to Mineral Processing". John Wiley & Sons.1987.
5. D.W. Fuerstenau, A. Abouzeid. "Effect of fine particles on the kinetics and energetics of grinding coarse particles". International Journal of Mineral Processing. 31, 151-162. 1991.



6. Bond. "The third theory of comminution". Transactions of AIME Mining Engineering. 193, 484-494. 1952
7. F. Bond. "Crushing and Grinding Calculations". Allis Chalmers Manufacturing Co. 1961
8. R. Laborde Brown. "Modelación y Simulación del proceso de molienda del mineral laterítico, con composición sustancial variable". Tesis Doctoral, ISMMMoA, Cuba. 2005.
9. J.M. Menéndez-Aguado, J.M.M., A.L. Coello-Velázquez, O. Tikjonov, M.A.R. Díaz, "Implementation of energy sustainability concepts during the comminution process of the Punta Gorda nickel ore plant (Cuba)". Powder Technology. 170, 153-157. 2006.
10. A.L. Coello-Velázquez., J.M. Menéndez-Aguado, R. Laborde Brown. "Grindability of lateritic nickel ores in Cuba". Powder Technology. 182, 113-115. 2008.