



## Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Yagrumaje Sur en la empresa Ernesto Che Guevara\*

Alisa Lamorú Urgellés

Carrera: Ingeniería en Metalurgia.

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** En el presente trabajo se determinó el rango de variación del índice de Bond a las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Yagrumaje Sur de la empresa Ernesto Che Guevara, a través de diferentes relaciones de serpentina-limonita. Se precisó el modelo cinético acumulativo para la simulación de la molienda que permita la posterior comprobación del índice de Bond a escala industrial. La fase experimental se realizó en la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel. Para la realización de los experimentos la muestra fue tomada directamente de las bandas transportadoras a la salida de los secaderos en la Planta de Preparación de Minerales. Como resultado fundamental se obtuvo que el consumo específico de energía en los molinos de la empresa Ernesto Che Guevara debe fluctuar entre 3,4 y 24,4 kWh/t para composiciones extremas del material a moler y el modelo cinético acumulativo obtenido permite realizar la simulación del proceso de molienda a escala industrial bajo las condiciones actuales de operación.

**Palabras clave:** Índice de Bond; yacimiento Yagrumaje Norte; yacimiento Yagrumaje Sur.

## **Determination of the Bond Index of the Yagrumaje Norte and Yagrumaje Sur ore bodies at the Ernesto Che Guevara plant**

**Abstract:** This work was conducted to determine the range of variation of the bond index in the ore bodies Yagrumaje Norte and Sur from the Ernesto Ché Guevara Plantsite considering different serpentine-limonite ratios. The cumulative kinetic model was determined for the simulation of the grinding process to allow applying the bond index at industrial scale. The experimental phase was conducted in the pilot plant located in the Investigation Center of the Nickel Industry (Centro de Investigación del Níquel). To complete the test works, the samples were taken directly from the belt conveyors operating at the dryer outlet in the Slurry Preparation Plant. The results indicated basically that the power consumed specifically by the Ernesto Ché Guevara's mills is to be between 3.4 and 22,4 kWh/t for extreme composition of the materials to be ground. The cumulative kinetic model obtained allows simulating the grinding process at industrial scale under current operating conditions.

**Key words:** Yagrumaje Norte ore body; Yagrumaje Sur ore body; bond index.

### **Introducción**

La molienda seca del mineral laterítico ha sido objeto de estudio con el fin de profundizar en los complejos fenómenos que tienen lugar durante el proceso industrial y sus altos consumos energéticos. La molienda del mineral es considerada un verdadero coloso energético, consume aproximadamente el 3 % de toda la energía que producen los países industrializados, de ahí que en términos de costos la etapa de molienda sea la más significativa en el procesamiento de los minerales.

En el caso particular del mineral laterítico de los yacimientos Yagrumaje Norte y Yagrumaje Sur (ubicado al este de la provincia de Holguín), estudios preliminares han puesto de manifiesto la alta complejidad de este tipo de mineral y la conveniencia de tratarlo como un mineral multicomponente, donde la variación de su composición sustancial está dada por la proporción en que se mezclen las componentes limoníticos y serpentiniticos (Coello & Tijonov, 2001).

Uno de los métodos que se utiliza para velar la eficiencia del proceso de molienda es llevar un control estadístico del consumo específico de energía, sin embargo, este método no tiene en consideración un conjunto de factores que pueden influir sobre la variabilidad del consumo específico de energía, ni tiene en cuenta tampoco una referencia como es el índice de Bond que es un indicador con gran aceptación en la práctica mundial para los trabajos de racionalización del consumo de energía de los molinos de bolas.

A pesar de haberse realizado importantes intentos de caracterizar por vías alternativas el comportamiento energético ante la fragmentación de los diversos materiales, siempre se fija como referente comparativo en primera instancia el análisis de Bond (Austin *et al.*, 1973; Austin *et al.*, 1983; Levin, 1989; Levin, 1990; Coello, 1993; Laplante *et al.*, 1993; Moscher *et al.*, 2001) y la indudable eficacia práctica de su método permite presagiar que seguirá siendo así por mucho tiempo, por lo que nos encontramos ante la siguiente situación problemática.

### **Caracterización del proceso de molienda de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara**

La molienda de mineral es considerada como un proceso complejo donde se gasta cantidad de energía, fundamentalmente en el movimiento de las bolas en el molino, para obtener un producto con la fineza adecuada que permita la máxima extracción de Ni + Co en los procesos posteriores (Laborde *et al.*, 2004).

Por esto el esquema tecnológico de la fábrica de níquel Comandante Ernesto Che Guevara cuenta con circuito de molienda que recibe el mineral procedente del proceso de secado a través de las correas transportadoras, denominadas comúnmente "correas calientes". El mineral se descarga en cuatro tolvas, una para cada molino, mediante desviadores de mineral colocados sobre la correa y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Desde cada tolva el mineral llega a los molinos en forma dosificada de 120 t/h donde es sometido a un proceso de desmenuzamiento en molinos cilíndricos monocámaras de bolas (molienda seca) hasta valores de granulometría de: +0,149 mm (4 a 7,5 %), +0,074 mm (7 a 8 %), -0,074 mm (85 a 87 %), en un sistema a ciclo cerrado, barrido por aire, provocado por un ventilador centrífugo, cuya función es crear una recirculación de aire dentro del molino para generar la descarga del mineral.

Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 t, con una distribución de bolas según su masa y dimensiones.

### **Índice de Bond como herramienta para valorar la eficiencia energética de los procesos de molienda**

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda. Este índice se ha empleado en la industria desde finales de la década del 20 del pasado siglo XX (Mosher & Tague, 2001).

#### **Definición del índice de Bond**

El índice de Bond se define a partir de la formulación de la tercera ley de la fragmentación propuesta por el propio Bond, la cual plantea:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right)$$

En la que:

W: consumo energético específico, kWh/t

d y D: tamaños que dan un pasante del 80 % en producto y alimentación respectivamente,  $\mu\text{m}$

Wi: índice de trabajo o índice de Bond, kWh/t.

De la fórmula se puede deducir una definición, de valor más teórico que práctico, del índice de Bond, que sería el consumo energético específico en kWh/t necesario para

reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (teóricamente infinito) hasta un tamaño de 100  $\mu\text{m}$ , y según el propio Bond sería un parámetro de conminución que expresa la resistencia del material ante las operaciones de trituración y molienda.

Según Bond (1961), si el material se comportase de manera homogénea ante la reducción de tamaño (caso muy poco habitual, por otra parte), el valor de su índice de trabajo se mantendrá constante en las sucesivas etapas de conminución. Pero la realidad es que los materiales frecuentemente son heterogéneos en su estructura, pudiendo hablarse normalmente de un tamaño de grano natural, de forma que el comportamiento de ese material a tamaños de molienda superiores a dicho tamaño nos daría valores del índice de trabajo inferiores que en el caso de realizar la molienda a un tamaño inferior a dicho tamaño de grano natural; esto se explica de una forma sencilla, ya que en el primer caso, los esfuerzos sobre las partículas generados por la acción de la molienda se dirigirán en principio, preferentemente, hacia las superficies intergranulares, que normalmente presentarán una resistencia inferior a la presentada por la red del grano monocristalino, y por tanto, el consumo energético de la operación será menor.

No cabe duda que la eficacia de la operación estará influenciada enormemente por las características de la máquina, y es por ello que Bond definió con bastante precisión las condiciones en las que se debería realizar el ensayo. Por tanto, las determinaciones del índice de Bond mediante ensayos de laboratorio muestran el comportamiento del material en un rango estrecho de tamaños, y cualquier desviación puede acusar la influencia de esa heterogeneidad, lo que puede traducirse en variaciones que pueden ser importantes del índice de trabajo. Por esto es muy recomendable que la determinación del índice de trabajo se realice lo más cerca posible del tamaño requerido en la molienda industrial (Laborde, 2004).

### **Análisis de los resultados obtenidos en la determinación del índice de Bond**

En la Tabla 1 se muestra el resultado de la caracterización granulométrica del material básico utilizado para los diferentes ensayos. Como se aprecia, este material contiene aproximadamente un 29 % de fineza y un 17 % de componente serpentínico apreciable a simple vista en el retenido entre 10 y 4 mm. Este comportamiento tiene su explicación por el hecho de que ha sido suprimido el material con partículas

mayores de 10 mm, que antes de la colocación del tromell llegaban a alcanzar tamaños superiores a los 40 mm, lo que elevaba la proporción serpentina-limonita por encima de lo normado en el flujo tecnológico (25 % de la componente serpentinitica y 75 % de la componente limonítica). La nueva composición se ajusta más a la norma del proceso.

Tabla 1. Caracterización granulométrica del material inicial utilizado para preparar las diferentes muestras empleadas en los ensayos de molienda

Tamiz mm	Masa de muestras g					Promedio masa de muestra g	Retenido %
	1	2	3	4	5		
10,00	89,10	65,60	106,10	91,50	105,90	91,64	3,77
9,50	22,30	20,30	19,80	23,30	32,80	23,70	0,98
5,00	193,50	101,30	169,90	217,30	200,80	176,56	7,27
3,50	187,10	158,90	155,20	170,00	159,70	166,18	6,84
2,00	479,10	412,50	405,10	384,30	366,10	409,42	16,85
1,60	323,60	297,90	310,40	303,90	295,20	306,20	12,60
1,00	44,00	43,80	47,60	64,40	62,00	52,36	2,16
0,71	40,20	42,20	40,40	38,20	39,60	40,12	1,65
0,40	73,20	101,80	87,20	81,40	65,60	81,84	3,37
0,315	42,40	51,60	45,00	38,20	47,40	44,92	1,85
0,250	67,60	101,20	87,60	81,60	51,00	77,80	3,20
0,150	97,40	103,80	107,00	90,40	130,20	105,76	4,35
0,074	134,40	152,80	140,20	184,00	187,40	159,76	6,58
-0,074	638,80	791,60	712,70	647,50	674,20	692,96	28,53
	2432,70	2445,30	2434,2	2416,0	2417,9	2429,22	100

Tabla 2. Caracterización granulométrica del mineral natural utilizado para el ensayo de Bond

Tamiz mm	Masa de muestras g			Promedio masa de muestra g	Retenido %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0
2,00	124,50	134,60	145,90	135,00	21,65
1,60	82,40	93,10	95,30	90,27	14,48
1,00	135,50	145,10	150,50	143,70	23,05
0,71	14,60	13,90	13,30	13,93	2,23
0,40	23,20	21,10	15,20	19,83	3,18
0,315	12,10	9,20	7,90	9,73	1,56
0,250	11,90	10,50	9,30	10,57	1,69
0,150	24,70	27,30	20,80	24,27	3,89
0,074	28,20	32,70	24,70	28,53	4,58
-0,074	135,60	150,10	157,40	147,70	23,69
	592,70	637,60	640,30	623,53	100

Puede apreciarse que el material así obtenido cumple con las exigencias de este tipo de ensayo al tener un 100 % pasante en el tamiz de 3,5 mm y menos del 28 % de la clase-0,074 mm.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los diferentes ciclos de molienda, donde se utilizó un peso inicial de 954,90 g en la alimentación, equivalente a 700 cm<sup>3</sup> de material en la probeta.

Tabla 3. Ciclos de molienda realizados para el material natural

No. Ciclo	Peso de la Carga Fresca	Pasante en 0,074 mm		No. de revoluciones	Pasante en 0,074 mm en el Producto		Gbp, g/rev
		Alimentado, g	A Moler g		Finos producido g	Finos neto, g	
1	954,90	225,35	47,47	60	666,70	441,35	7,35
2	666,70	157,34	115,49	16	473,40	316,06	19,75
3	473,40	111,72	161,11	8	349,90	238,18	29,77
4	349,90	82,58	190,25	6	277,60	195,02	32,50
5	277,60	65,51	207,32	6	319,20	253,69	42,28
6	319,20	75,33	197,5	5	240,40	165,07	33,01

En la Tabla 4 se muestra la caracterización granulométrica del material predominantemente serpentinitico utilizado para el ensayo de Bond y en la Tabla 12 los resultados de los ciclos de molienda.

Tabla 4. Caracterización granulométrica del mineral predominantemente serpentinitico utilizado para el ensayo de Bond

Tamiz mm	Masa de muestras g			Promedio masa de muestra g	Retenido %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0
2,00	221,30	209,50	220,80	217,20	32,20
1,60	89,60	85,50	93,50	89,53	13,27
1,00	99,50	97,40	95,70	97,53	14,46
0,71	43,10	45,50	44,20	44,27	6,56
0,57	24,50	27,30	25,00	25,60	3,79
0,40	20,90	19,30	19,00	19,73	2,93
0,315	17,90	17,70	17,60	17,73	2,63
0,250	12,70	15,10	12,60	13,47	2,00
0,150	25,10	23,80	23,40	24,10	3,57
0,074	25,90	26,40	29,30	27,20	4,03
-0,074	107,10	98,30	89,40	98,27	14,57
	<b>687,60</b>	<b>665,80</b>	<b>670,5</b>	<b>674,63</b>	<b>100</b>

Tabla 5. Ciclos en el ensayo de Bond para el material predominantemente serpentinitico

No. Ciclo	Peso de la Carga Fresca	Pasante en 0,074 mm		No. de revoluciones	Pasante en 0,074 mm en el Producto		Gbp, g/rev
		Alimentado, g	A moler g		Finos producido g	Finos neto, g	
1	1046,00	152,30	146,50	60	377,10	224,80	3,75
2	377,10	54,90	243,95	65	191,30	136,40	2,09
3	191,30	27,85	271,00	130	245,10	217,30	1,67
4	245,10	35,69	263,20	158	450,50	414,81	2,62

En las Tablas 6 y 7 se exponen los resultados de la caracterización granulométrica y de los ciclos de molienda del mineral con características predominantemente limoníticas, respectivamente.

Tabla 6. Caracterización granulométrica del mineral predominantemente limonítico utilizado para el ensayo de Bond

Tamiz mm	Masa de muestras g			Promedio masa de muestra g	Retenido %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0
2,00	133,20	192,00	152,10	159,10	23,39
1,60	77,00	106,60	103,70	95,77	14,08
1,00	130,60	174,60	169,0	158,07	23,24
0,71	6,30	9,40	9,60	8,43	1,24
0,57	6,10	6,50	6,00	6,20	0,91
0,40	5,90	7,70	6,60	6,73	0,99
0,315	5,20	7,10	6,80	6,37	0,94
0,250	12,10	12,90	19,90	14,97	2,20
0,150	14,30	19,60	16,00	16,63	2,45
0,074	26,70	42,00	43,90	37,53	5,52
-0,074	139,00	185,40	186,90	170,43	25,06
	<b>556,40</b>	<b>763,80</b>	<b>720,5</b>	<b>680,23</b>	<b>100</b>

Tabla 7. Ciclos en el ensayo de Bond para el material predominantemente limonítico

No. Ciclo	Peso de la Carga Fresca	Pasante en 0,074 mm		No. de revoluciones	Pasante en 0,074 mm en el Producto		Gbp, g/rev
		Alimentado, g	A moler g		Finos producido g	Finos neto, g	
1	925,80	232,00	32,50	50	679,30	447,30	8,95
2	679,30	170,20	94,30	10	516,50	346,30	34,63
3	516,50	129,43	135,06	3,9	389,70	260,27	66,74
4	389,70	97,66	166,84	2,5	335,60	237,94	95,18
5	335,60	84,10	180,40	2	334,90	250,80	125,40
6	334,90	83,92	180,60	1	270,50	186,58	186,58
7	270,50	67,79	196,71	1	236,20	168,41	168,40

En la Tabla 8 se puede apreciar los resultados obtenidos en la determinación del índice de Bond para los tres tipos de materiales ensayados.

Tabla 8. Resultados de la determinación del índice de Bond para los tres tipos de materiales ensayados

Material	F80, $\mu\text{m}$	P80, $\mu\text{m}$	Gbp, g/rev	wi, kWh/t	kWh/t
Natural	2 320	1 595	36,00	4,00	5,40
Serpentinítico	2 614	528	2,14	18,10	24,40
Limonítico	3 514	2 000	177,50	2,50	3,40

Los resultados se corresponden con estudios realizados anteriormente (Laborde, 2005). El material natural ensayado corresponde a una mezcla cuya composición es cercana al 24 % de serpentina y 76 % de limonita, valor este que puede considerarse como la composición del material que actualmente se está procesando a escala industrial y para el cual corresponde, aproximadamente, un consumo específico de energía de 5,4 kWh/t.

En trabajos posteriores debe definirse la tendencia de variación de la composición del material que se mueve entre los extremos del material predominantemente serpentinitico y limonítico, con respecto a la composición del material que aquí hemos llamado natural, de modo que pueda obtenerse un intervalo más pequeño y más preciso de variación del consumo específico de energía de los molinos.

Debe significarse que para los casos extremos, es decir, para el mineral predominantemente limonítico y serpentinitico, la industria no debe operar bajo estas condiciones en ninguna circunstancia, aunque el valor del índice de Bond obtenido para el mineral denominado natural en este trabajo (con relación limonita/serpentina similares al de la industria) permite afirmar que se puede lograr un ahorro significativo de energía durante el proceso de molienda, pues actualmente el consumo de una unidad de molienda de la empresa Ernesto Che Guevara está en el rango de 13,33 a 13,77 kWh/t.

### **Resultados obtenidos durante la determinación de los parámetros del modelo cinético acumulativo para el material natural**

En la Tabla 9 se puede apreciar la composición granulométrica del material preparado para realizar los ensayos de molienda a partir de los cuales se determinan los parámetros del modelo cinético acumulativo.

Tabla 9. Caracterización granulométrica del mineral natural utilizado para el ensayo del modelo cinético acumulativo

Tamiz mm	Masa de muestras g			Promedio masa de muestra g	Retenido %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0
2,00	151,40	152,60	155,2	153,07	23,79
1,60	99,10	100,80	103,05	100,98	15,70
1,00	152,80	152,30	156,9	154,00	23,94
0,71	12,40	11,10	13,8	12,43	1,93
0,57	9,90	11,30	9,3	10,17	1,58
0,40	8,60	7,80	10,6	9,00	1,40
0,315	10,80	12,80	12,6	12,07	1,88
0,250	17,70	19,00	11,7	16,13	2,51
0,150	20,80	14,60	19,6	18,33	2,85
0,075	36,10	31,60	34,5	34,07	5,29
-0,075	646,80	629,50	653,90	643,40	100
	<b>646,80</b>	<b>629,50</b>	<b>653,90</b>	<b>643,40</b>	<b>100</b>

En la Tabla 10 se exponen los resultados de los ciclos de molienda para los diferentes tiempos.

Tabla 10. Resultados de los ciclos de molienda para la determinación de los parámetros del modelo cinético

Diámetro, µm	Tiempo, min			
	0	0,5	1	1,5
	Masa de muestra, g			
4000	0,00	0,00	0,00	0,00
3500	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	153,07	48,37	33,63	25,63
1600	100,98	23,80	15,47	11,95
1000	154,00	42,90	20,03	14,40
710	12,43	14,83	13,13	10,10
570	10,17	15,00	15,10	9,80
400	9,00	20,63	18,60	12,10
315	12,07	20,27	19,73	15,53
250	16,13	35,37	30,77	15,80
150	18,33	45,67	53,97	34,50
75	34,07	85,10	85,00	46,20
-75	123,15	603,07	649,57	758,98

A partir de los resultados anteriores se obtuvo para cada tamaño una regresión, como se observa en la Figura 1, donde se ilustra el resultado obtenido para el tamaño correspondiente a 1000 µm.

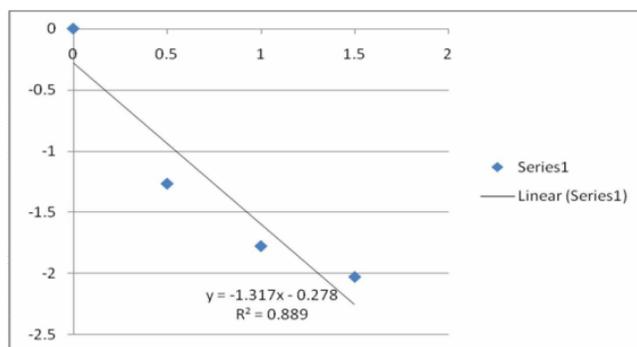


Figura 1. Ecuación de regresión para el tamaño correspondiente a 1000 µm.

Los resultados que se muestran en el gráfico son semejantes a los obtenidos por Laborde (2005) para este tipo de material. Después de obtener mediante este procedimiento todos los valores de k (coeficiente de x en la ecuación de regresión que aparece en el Figura 1), correspondientes a cada tamaño, se obtuvo la regresión que se muestra en la Figura 2, donde  $n = 0,4496$  y  $\ln C = 2,7906$ .

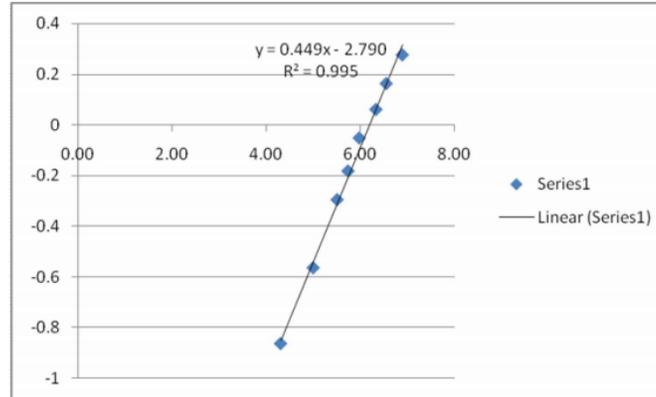


Figura 2. Ecuación de regresión para determinar finalmente los parámetros del modelo cinético acumulativo correspondiente al material natural.

De modo que el modelo cinético acumulativo para el material natural queda expresado según la ecuación.

$$W(x, t) = W(x, t_0) e^{-16,3x^{0,449}t}$$

Con este modelo se puede realizar la simulación de la molienda del mineral a escala industrial y realizar comprobaciones del índice de Bond.

## Conclusiones

Una vez analizados y discutidos los resultados se concluye que:

El consumo específico de energía en los molinos de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara debe fluctuar entre 3,4 y 24,4 kWh/t, para composiciones extremas del material a moler, y debe presentar un valor aproximado de 5,4 kWh/t como valor promedio para el material que se procesa actualmente.

El modelo cinético acumulativo obtenido permite realizar la simulación del proceso de molienda a escala industrial bajo las condiciones actuales de operación; los parámetros del modelo son:  $n = 0,449$ ;  $C = 16,3$ .

## Referencias bibliográficas

AUSTIN, L. G. 1973: A comentary on kick, bond and rittinger laws of grinding. *Powder Technology* 7: 315-317.

- AUSTIN, L. G. & BRAME, K. 1983: A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling mills with a size mass balance simulation model. *Powder Technology* 34: 261-274.
- BOND, F. C. 1961: "Crushing and Grinding Calculations", Allis Chalmers Manufacturing Co. Milwaukee, Wisconsin.
- COELLO, V. A. 1993: Consideraciones sobre la molienda seca de minerales lateríticos. *Minería y Geología XIII* (2): 57-60.
- COELLO, V. A & TIJONOV, O. 2001: Molienda de minerales multicomponentes: modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía. *Minería y Geología XVIII* (3-4): 49-53.
- LABORDE, B. R. 2004: Diagnóstico energético del proceso de molienda de la laterita. *Minería y Geología XX* (3-4): 107-113.
- LAPLANTE, A. R.; PRASAD, U.; MCIVOR, R. E. & FINCH, J. A. 1993: Error Analysis for Bond Work Index Determinations. Part 2: A Phenomenological Basis for the Analysis of Systematic Errors for the Rod Mill Test. *Minerals Engineering* 6 (5): 509-521.
- LEVIN, J. 1989: Observations on the Bond Standard Grindability Test, and a Proposal for a Standard Grindability Test for Fine Materials, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*
- LEVIN, J. 1990: Observations on the Bond standard grindability test for the fine materials. *Mineral and Metallurgical Processing* 89 (1): 13-21.
- MOSHER, J. B. Y TAGUE, C. B. 2001: Conduct and precision of bond grindability testing. *Minerals Engineering* 14 (10): 187-197.

\*Trabajo tutorado por el Dr. C. Reynaldo Laborde Brown, el Ing. Ángel Legrá Legrá y el M. Sc. Roger Samuel Almenares Reyes.