

CORRELACIÓN EMPIRICA PARA LA ESTIMACION DE CONSUMOS DE MEDIOS DE MOLIENDA

GUZMÁN, L.J.¹, RABANAL, C.A.¹

¹ Moly Cop Adesur S.A, Perú

RESUMEN

La investigación relacionada con el consumo de medios de molienda es tan antigua como la invención misma de los molinos de bolas. Durante muchos años se han evaluado diferentes tipos de materiales y formas de medios de molienda, teniendo como resultado que los medios de molienda esféricos de acero han probado ser los más efectivos para la molienda de minerales. (Bond FC, 1943; M. J. Meulendyke and J. D. Purdue, 1989; Austin LG, Klimpel RR, 1985). Sin embargo a través de los tiempos no se ha desarrollado una técnica que permita estimar con precisión los consumos de medios de molienda. La Industria minera aún utiliza la metodología del índice de abrasión desarrollada por Bond en los años 60' (Bond, FC, 1961), El modelo de desgaste desarrollado por Bond esta basado únicamente en las propiedades del mineral y tiene un error promedio $> 60.0\%$. En el año 2004, Chenje TW & Radziszewski P y posteriormente, Tapiwanashe W. Chenje en su tesis doctoral de la universidad de Mc Gill (2007), propusieron un modelo de desgaste basado en mediciones a nivel laboratorio de los mecanismos de abrasión, corrosión e impacto, logrando un error promedio de $\pm 17\%$, el cual tuvo una gran mejoría sobre la estimación del modelo de Bond, pero aún con estimaciones que presentaban un alto grado de error. Coincidentemente, Benavente del grupo Moly-Cop presentó en el año 2007 un modelo empírico para la predicción del consumo de medios de molienda, este modelo incluyó adicionalmente al índice de abrasión de Bond, el efecto del F_{80} y el pH, los cuales afectan los mecanismos de desgaste por abrasión y corrosión respectivamente. El modelo desarrollado por Benavente muestra un error promedio de $\pm 10\%$. El resultado del estudio realizado permitió establecer una estructura más robusta del modelo de estimación de medios de molienda, obteniéndose un error promedio de $\pm 5\%$, lo cual es un avance significativo sobre los modelos previamente

KEYWORDS: molienda; bolas de acero; desgaste; modelos; consumos.

1. MECANISMOS DE DESGASTE

El desgaste ha sido definido en forma general como la interacción de la superficie expuesta del material con el medio ambiente, teniendo como resultante la pérdida de material de la superficie expuesta (Chattopadhyay, 1990). Se reconoce que son por lo menos tres mecanismos que gobiernan el desgaste de medios de molienda; abrasión, impacto y corrosión (Gangopadhyay AK, 1985).

1.1. Desgaste por abrasión

Es el tipo de desgaste más importante en el proceso de molienda, y se produce por la remoción de partículas de la superficie expuesta por acción de otra superficie con mayor resistencia (Fig 1 y 2).

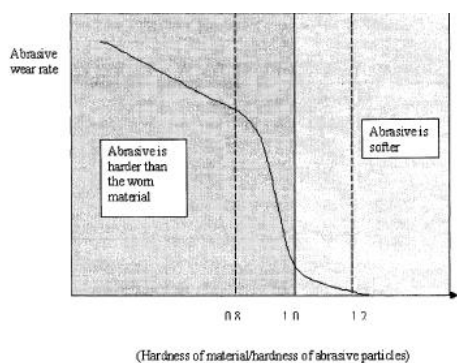


Figura 1

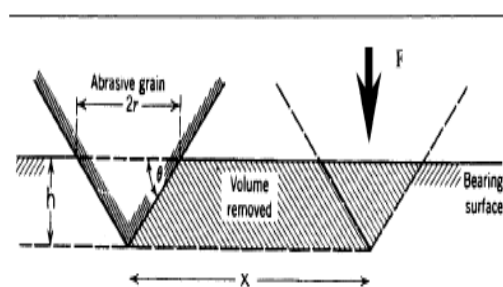


Figura 2

Se cree que por lo menos 2 tipos de desgaste por abrasión son los predominantes (Iwasaki, Riemer, Orlich, (1985) Natajaran, Iwasaki 1984, Natajaran-1992-1996, Blau, 1989); desgaste abrasivo de 2 cuerpos y desgaste abrasivo de 3 cuerpos.

1.2. Desgaste por Corrosión

La remoción de material de la superficie expuesta por efecto electroquímico produce el desgaste por corrosión. Una de las reacciones principales es la disolución anódica de metales.

En ausencia de desgaste por abrasión, los productos de corrosión forman una película que reduce y en algunos casos elimina la corrosión, sin embargo la interacción con la abrasión ocasiona que la corrosión continúe (Dean, France, Ketcham, 1971).

1.3. Desgaste por Impacto

Este tipo de desgaste es observado durante la acción repetitiva de golpes de carga, las cuales inducen a la deformación plástica y formación de grietas superficiales o sub superficiales. El resultante de esta formación de microgrietas es la remoción de material de la superficie (Bayer RG, Engel PA, Sirico LC, 1972).

2. TEORÍA LINEAL DE DESGASTE

Esta teoría, (Sepúlveda, 2004) es ampliamente aceptada para caracterizar la cinética de consumo, según la cual la velocidad de desgaste del cuerpo molidor es directamente proporcional al área expuesta por éste, a los diferentes mecanismos de desgaste (abrasión, corrosión).

$$\Omega_t = \frac{d(m)}{d(t)} = -K_m A_b \quad (1)$$

Donde:

Ω_t = velocidad de desgaste másico, kg/h;

m = peso bola, kg, transcurridas t horas desde su ingreso al molino;

A_b = área del cuerpo moledor expuesta al desgaste, m²;

k_m = constante cinética de desgaste, kg/h/m².

Tomando en consideración la geometría del cuerpo moledor (esfera), se obtiene:

$$\frac{d(d)}{d(t)} = \frac{-2K_m}{\rho_b} = -K_d \quad (2)$$

Donde:

d = diámetro del cuerpo moledor, transcurridas t horas, mm;

ρ_b = densidad del cuerpo moledor, g/cm³;

k_d = constante cinética de desgaste, mm/h (lineal).

La expresión anterior es fácilmente integrable para el caso más frecuente de recarga con un solo tamaño de cuerpo moledor d^R , (mm), obteniéndose:

$$d = d^R - K_d t \quad (3)$$

lo cual indica que la reducción del cuerpo moledor es uniforme en el tiempo (cinética lineal).

Por directa analogía con la cinética de fracturamiento, resulta razonable indicar que más representativo y escalable indicador que el “ k_d ” es la “**Constante Especifica de Desgaste k_d^E** ” (k_d^E , $\mu\text{m}/(\text{kWh}/\text{ton})_b$), la cual se le define a través de la siguiente expresión:

$$K_d = K_d^E \frac{\left(\frac{\rho_b}{W_b}\right)}{1000} \quad (4)$$

Donde el ratio de intensidad de potencia (P_b/W_b) corresponde a la potencia neta P_b (kW) demandada por cada tonelada de bolas W_b .

En otras palabras k_d^E es equivalente a k_d , pero corregida proporcionalmente por la cantidad de potencia absorbida por cada tonelada de bolas. En consecuencia es de esperar que k_d^E sea menos sensible que k_d a variaciones de las condiciones operacionales del molino (que puedan afectar a P_b y/o W_b) y en consecuencia den como resultado mayores o menores índices de consumo (kg/h), no causados por la calidad del medio de molienda.

3. EL ENTORNO DEL PROCESO DE MOLIENDA

Se conoce que el proceso de molienda es un sistema altamente interactivo, influenciado por diferentes variables tales como : El tipo de mineral, el % de sólidos, el tamaño de alimentación F_{80} , el pH de la pulpa, el tipo de agua, la viscosidad de la pulpa, etc. Tomando como referencia el trabajo desarrollado por Benavente (Benavente, 2007) se realizó un análisis estadístico, con lo cual

se identificó como los más influyentes en el desgaste de medios de molienda a la dureza del mineral, al F_{80} de alimentación, al pH de la pulpa y se identificó un nuevo componente en el diámetro del molino, el cual se asume contribuye con el desgaste por impacto.

De las variables anteriormente mencionadas, se puede concluir que es la dureza (abrasividad) del mineral la de mayor significancia, sin embargo es la menos difundida, por lo cual merece una breve revisión.

3.1. La Dureza del Mineral

La dureza de un mineral queda definida por la resistencia a la abrasión de un material, el cual es la forma más conocida de desgaste en la industria (Mineral Processing Handbook). También se le puede definir como la resistencia de un material a ser rayado por otro de mayor dureza. Cabe hacer notar que la dureza no guarda ninguna relación con el Work Index que equivocadamente se denomina “dureza” del mineral. En la figura 3 adjunta se puede apreciar la escala de Mohs donde se muestra al material más blando (talco) hasta el más duro (diamante).

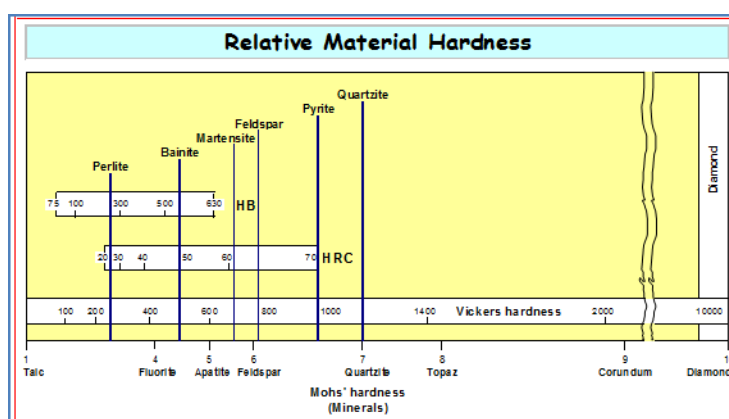


Figura 3. Durezas relativas de diferentes minerales y materiales.

4. ESTIMACIÓN DE CONSUMOS DE MEDIOS DE MOLIENDA

Se tomó como base información operacional de 53 molinos ubicados en Perú, y Chile principalmente. Abarcando operaciones de una gran variedad de minerales tales como; cobre, molibdeno, plomo, plata, zinc, oro, plata, hierro, y sus diferentes matrices con mayores o menores contenidos de cuarzo, feldespatos, pirita, dolomita, etc. lo cual permite analizar un amplio rango de condiciones abrasivas cuantificadas mediante el (Ai), cubriendo un rango muy amplio de valores, desde los muy bajos de 0.08 elevados 0.70, con alto contenido de cuarzita, como algunos yacimientos de oro, por ejemplo.

La Tabla 1 muestra información resumida de molinos industriales que se considera relevante, incluyendo el tipo de mineral valioso, tonelaje procesado, el F_{80} , el Índice de Abrasión, pH de la pulpa, el Wio, el tamaño de bola de recarga d^R y los consumos de en g/kWh.

Tabla 1. Base de datos de diferentes operaciones en Minerías.

Operation	Ai	F80	p80	pH	diam	%Vc	WR gr/kwh	Bond	
								WRo	% error
Cuajone	0.21	9750	215	11.6	19.0	77.0	45.08	92.063	104.22
Cuajone	0.24	10350	230	11.6	16.0	73.1	50.13	96.561	92.64
Tintaya F80=7500	0.21	7500	170	10.5	15.5	74.4	47.30	92.063	94.65
Toquepala	0.25	14000	174	11.6	21.0	78.7	53.98	97.971	81.50
Antamina	0.15	3100	250	10.3	24.0	65.0	51.22	81.443	59.00
Antamina	0.16	3500	250	10.3	24.0	63.8	52.27	83.406	59.57
Antamina	0.16	2800	250	10.3	24.0	64.8	50.48	83.406	65.22
MILPO	0.21	6650	160	8.0	9.5	76.9	68.97	92.063	33.47
MILPO	0.21	5900	155	8.0	9.5	76.8	67.27	92.063	60.74
Chungar	0.35	1200	190	9.5	8.0	76.5	76.38	110.261	44.36
Chungar	0.35	1250	184	9.5	7.0	73.8	70.08	110.261	67.34
Iscaycruz	0.15	732	149	10.5	9.0	74.8	55.85	81.443	45.82
Toquepala	0.25	3500	250	11.6	10.4	76.1	61.44	97.971	59.47
Orcopampa	0.40	1100	250	10.5	6.5	80.0	76.37	115.495	51.24
Ares	0.26	456	64	11.5	9.0	72.2	73.09	99.341	35.92
Arcata	0.23	5370	240	9.5	8.0	72.0	60.93	95.109	56.10
Inty Raymi	0.4	700	112	11.0	16.0	72.0	76.62	115.495	50.74
Shila	0.4	580	120	10.5	6.0	76.3	79.55	115.495	45.19
Arcata	0.26	8370	168	11.0	8.0	72.0	67.26	99.341	47.70
Cuajone	0.09	128	54	11.6	10.0	75.0	46.79	66.952	43.08
Toquepala	0.08	150	60	12.0	7.9	66.4	53.53	63.833	19.25
Atacocha	0.28	11281	169	10.5	8.0	74.0	62.49	101.974	63.18
Raura	0.15	9795	181	8.0	12.0	72.0	51.85	81.443	57.07
Huaron	0.21	16000	126.1	10.5	11.5	75.0	45.38	92.063	102.87
Tintaya F80=11500	0.21	11500	185	10.5	15.5	74.4	48.99	92.063	87.90
Santa Luisa	0.21	16100	180	10.5	9.5	72.0	53.15	92.063	73.22
SIMSA	0.08	8769	248	8.7	8.0	75.0	44.55	63.833	43.30
Cerro Verde	0.21	2500	200	10.2	23.0	73.5	66.85	92.063	37.71
Goldfields	0.15	2100	140	10.0	19.5	72.0	61.91	81.443	31.55
Condestable	0.21	3199	203	9.0	12.5	75.0	57.73	92.063	59.47
Brocal	0.136	1621	231	8.0	9.0	79.0	68.84	78.524	14.07
Brocal	0.136	231	145	8.0	9.0	79.0	68.84	78.524	14.07
Antamina	0.17	3200	250	10.3	24.0	64.0	51.58	85.281	65.34
Antamina	0.17	3500	250	10.3	24.0	63.8	53.45	85.281	59.55
Antamina	0.17	3200	250	10.3	24.0	64.0	55.45	85.281	53.80
Yauliyacu	0.455	990	192	10.3	12.0	72.8	81.66	120.751	47.88

4.1. La correlación Empírica de Bond vs el Consumo de medios de Molienda

Tomando como base la información operacional de la tabla 1 se realizó el cálculo de consumos de medios de molienda utilizando la correlación empírica planteada por Bond (ecuación 5).

$$g / Kwh = 0.159(A_i - 0.015)^{0.22} \quad (5)$$

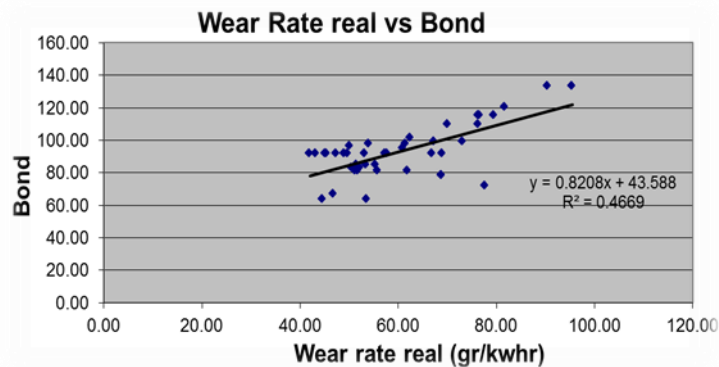


Figura 4. Correlación entre el modelo de Bond vs. Consumos reales de diferentes operaciones.

Los resultados obtenidos mostraron un error de 59% con una desviación estándar de 25, lo cual sin lugar a dudas afectara las estimaciones de consumos de acero, ya sea para proyectos greenfield, brownfield y para la realización de budgets para plantas en operación.

4.2. La correlación Empírica de Benavente vs el Consumo de medios de Molienda

Como se indicó anteriormente, en el año 2007 Benavente del grupo Moly-Cop estableció una correlación empírica en función a parámetros operacionales (F_{80} , pH), así como la dureza del mineral (índice de abrasión). (ecuación 6).

$$K_d^E = 1.279 \left[\left(\frac{Ai-0.015}{0.20} \right)^{0.3388} \left(\frac{F80}{5000} \right)^{0.1302} \left(\frac{pH}{10} \right)^{0.6818} \right] \tag{6}$$

De igual manera tomando como base la información operacional de la tabla 1 se realizó el cálculo de consumos de medios de molienda utilizando la correlación empírica planteada por Benavente.

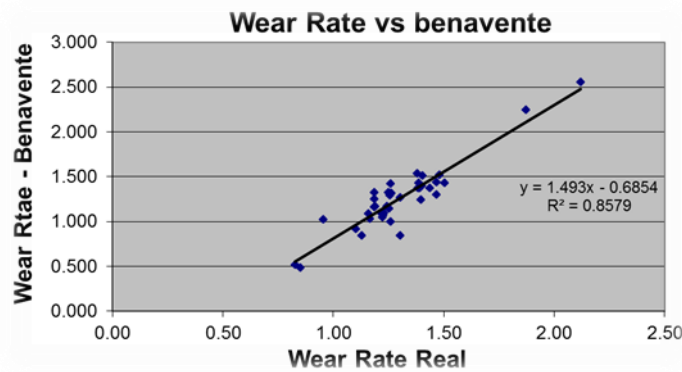


Figura 5. Correlación de Benavente.

Los resultados obtenidos con la ecuación de Benavente mostraron un error de $\pm 10\%$ con los datos industriales, lo cual sin lugar a dudas es una mejora substancial en comparación con los datos obtenidos por Bond.

4.3. La Ecuación de Benavente Modificada vs el Consumo de medios de Molienda

Tomando en consideración el análisis de sensibilidad realizado a las diferentes variables operacionales, se consideró que el diámetro del molino tiene un efecto positivo en el desgaste por impacto, determinándose una nueva correlación empírica que denominaremos la ecuación de Benavente Modificada (ecuación 16).

$$K_d^E = 1.205 \left[\left(\frac{Ai-0.02}{0.20} \right)^{0.188} \left(\frac{F80}{5000} \right)^{0.055} \left(\frac{pH}{10} \right)^{-0.39} (D)^{0.034} \right] \tag{7}$$

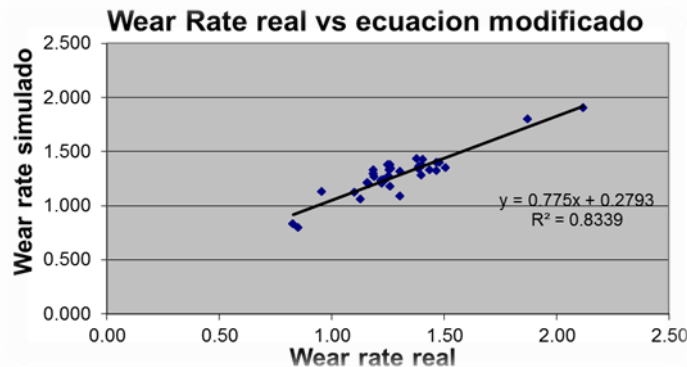


Figura 6. Correlación de Benavente Modificada.

Los resultados obtenidos con la ecuación de Benavente modificada mostraron un error de $\pm 5.0\%$, lo cual se puede considerarse altamente confiables para la proyección de consumos de medios de molienda ya sea para proyectos o para elaboración de presupuestos.

5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

5.1. Certidumbre del Modelo

El ejemplo a continuación muestra como hubiera sido la determinación de consumos de acero para una planta en operación.

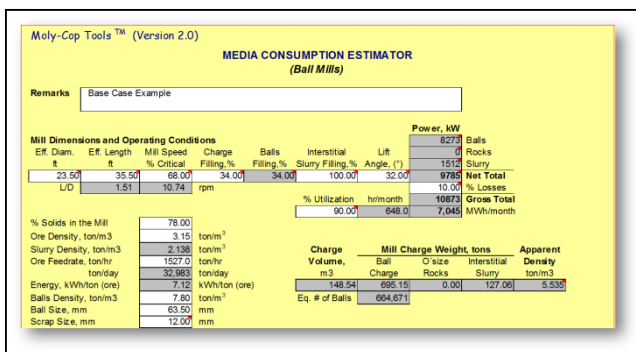


Figura 7. Condiciones de operación del molino.

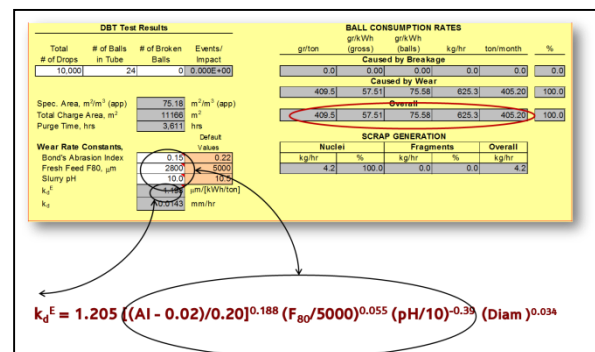


Figura 8. Planilla “Media Consumption Estimator”.

Haciendo uso de la planilla “Media Consumption Estimator” del software Moly-Cop Tools, se puede determinar los consumos de acero en forma diaria, semanal y/o mensual.

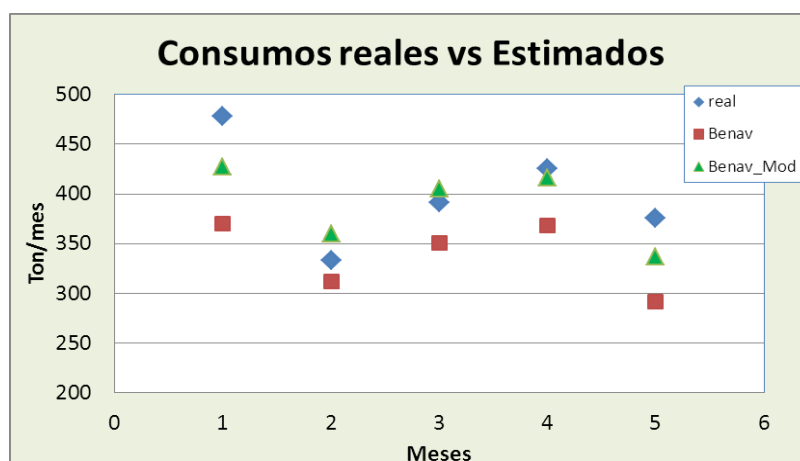


Figura 9. Comparación de consumos de acero reales y los estimados por los modelos de Benavente y Benavente Modificado.

Los resultados obtenidos muestra que el error obtenido utilizando la ecuación original de Benavente vs. el consumo real sería de un 15% aproximadamente (promedio de 5 meses), mientras que el error obtenido utilizando la ecuación de Benavente modificada hubiera sido de 2.0% aproximadamente.

Tabla 2. Consumos de aceros (T/mes) reales y estimados por los modelos de Benavente y su respectivo % de error.

Mes	1	2	3	4	5	Promedio
Real	478	333	391	426	376	401
Benavente	370	312	351	368	292	338.6
Error (%)	-23%	-6%	-10%	-14%	-22%	-15%
Benavente Modificado	427	360	405	416	337	389
Error (%)	-11%	8%	3%	-2%	-10%	-2%

6. CONCLUSIONES

Tomando como base el modelo desarrollado por Benavente, se ha logrado reducir el grado de error a +/- 5.0%; lo cual se puede considerar de alta confiabilidad.

El modelo modificado por Moly Cop sirve como una poderosa herramienta para la estimación de costos de proyectos greenfield, brownfield; así como para la proyección de consumos para plantas existentes.

El nuevo modelo servirá como una herramienta para sustentar mayores o menores consumos de aceros a nivel industrial, así como para el desarrollo de nuevos productos.

7. REFERENCIAS

ADAM K, IWASAKI (1984), Pyrrhotite-grinding media interaction and its effects on flotability, *Min metall process Process.*, vol. 1, pp 81-87.

AUSTIN LG, KLIMPEL RR (1985) Ball wear and ball distributions in tumbling ball mills, *Powder technology*, vol. 41, pp 279-286.

BAYER RG, ENGEL PA, SIRICO LC (1972), Impact wear testing machine, *Wear*, vol. 19, pp 343-354.

BLAU PJ (1989), *Friction and wear of materials, break-in, Run-in, Wear-in*, Noyes, Park Ridge NJ, pp 56-63

BENAVENTE H, 2007, Correlación empírica para estimar consumos de medios de molienda, X *Simposium de Molienda Moly-Cop*.

BOND FC (1943), Wear and size distribution of grinding balls, *Trans AIME*, vol. 153, pp. 373-384
 BOND FC (1961), Crushing and Grinding calculations, Part I, *British Chemical Engineering*, vol. 6, pp 378-385.

CHATTOPADHYAY R, (1990), National seminar of maintenance and productivity, National Productivity Council and Confederation of Engineering Industries, 14-15 Feb New Delhi, India.

CHENJE TW, RADZISZEWSKI P (2004), Determining steel media abrasive wear as a function of applied force and friction, *Comminution '04*, Perth, Australia.

DEAN, FRANCE, KETCHAM (1971), Electrochemical methods, *Handbook of corrosion testing and evaluation*, Wiley, NY, Chap. 8, pp 170.

GANGOPADHYAY AK, MOORE JJ (1985), The role of abrasion and corrosion in grinding media wear. *Wear*, vol. 104, pp 49-64

M. J. MEULENDYKE AND J. D. PURDUE; Wear of grinding media in the mineral processing industry: An overview, *Mineral and Metallurgical Processing*, November 1989, pp167-172.

MOLY-COP ADESUR, Reportes internos de determinación de abrasividad.

NATARAJAN KA, IWASAKI L, (1984), Electrochemical aspects of grinding media-mineral interactions in magnetite ore grinding, *Int '1 J Min. Process.*, vol. 13, pp 53-71.

NATARAJAN KA, 1992, Ball Wear and its Control in the Grinding of a Lead-Zinc Sulphide, ore, *Int. J Min. Process.*, vol. 34, pp. 161-175

NATARAJAN KA, 1996, Laboratory studies on ball wear in grinding of a chalcopyrite ore, *Int. J Miner. Process.*, vol. 46, pp. 205-213

RADZISZEWSKI, P. (2002). Exploring total media wear. *Minerals Engineering Volume 15, Issue 12* (1073-1087).

SEPULVEDA, JAIME E. (2004), Methodologies for the evaluation of grinding media consumption rates at full plant scale, *Minerals Engineering*, vol 17, pp 1269–1279.

SEPULVEDA, JAIME E. (2012), Moly-Cop Tools, Software For Mineral Processing, Version 3.0.

TAPIWANASHE W. CHENJE, (2007) Development and validation of a Model for steel grinding media wear in tumbling mills, PHD Thesis, Mc Gill University.

