

# Análisis del desgaste de medios moledores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos S.A.

## Wear analysis of steel grinding media in a balls mill of the Argos S.A company

Ismael E.Rivera M<sup>1</sup>, Fredy Quintero<sup>2</sup>, M. Oswaldo Bustamante<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD(c) Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Profesor Tecnológico Pascual Bravo Medellín, Grupo de Investigación GiiEN.  
email:ismael.rivera@pascualbravo.edu.co

<sup>2</sup>MsC. Universidad EAFIT Medellín, Gerente de Procesos Productivos Compañía Argos S.A.

<sup>3</sup>PhD Universidad de Concepción Chile, Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Instituto de Minerales CIMEX.

Recibido 29/11/11, Aceptado 12/05/2012

### RESUMEN

En esta investigación se hizo un análisis del desgaste de los medios moledores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos S. A. Las medidas de desgaste se hicieron a dos tipos de bolas con una composición química diferente, la base de datos fue tomada de un molino industrial utilizado para el proceso de molinda en humedo. El análisis de la base de datos se hizo bajo el programa Matlab para mirar el tipo de curva que mejor se ajusta a los datos, la variable analizada fue la disminución del diametro en el tiempo, todo esto con el fin de obtener una ecuación constitutiva que serviría para obtener la velocidad de desgaste de las bolas al interior del molino. y posteriormente esta podría ser utilizada para encontrar el flujo de bolas a reponer diariamente en el molino, la distribución masica de bolas entre otras. La metodología utilizada para tomar las medidas del desgaste fue bajo el método de bola marcada, las bolas fueron entregadas perforadas de fabricación por la compañía Indú Vega Industries. Como resultado en general se obtuvo que la mejor curva que aproxima los datos experimentales es una curva de tendencia lineal y se comprobó la hipótesis propuesta por algunos autores que la cinética de desgaste de las bolas es constante.

**Palabras clave:** Molienda, Molino de bolas, Prueba de bola marcada, desgaste de bolas, velocidad de desgaste.

### ABSTRACT

This research was an analysis of the wear of the grinding media of steel in a ball mill of the Argos S.A. company. Wear measurements were made to two types of balls with a different chemical composition, the database was taken from an industrial mill used for the grinding wet process. The analysis of the database was done under Matlab program to look at the kind of curve that best fits the data set, the analyzed variable was the decrease of the diameter at the time, all this in order to obtain a constitutive equation that would serve to obtain the wear rate of the balls inside the mill then this can be used to find the balls flow to replace daily in the ball mill, ball distribution among other. The methodology used to take measurements of the attrition was under the marked ball method, the balls were delivered drilled by the Vega industries company. As a general result it was found that the best curve that approximates the experimental data is curve with a linear trend and it was test the hypothesis proposed by some authors that the kinetics of wear of the balls is constant.

**Keywords:** Grinding, Ball Mill, Marked Ball Test, Ball Wear, Wear rate.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los procesos de beneficio de minerales, la molienda gasta aproximadamente el 50% de la energía necesaria en el beneficio de minerales metálicos e industriales [1,2,3]. Este consumo está determinado principalmente por las pérdidas de energía y el desgaste de los medios moledores.

El análisis del movimiento de los cuerpos moledores en molinos data de la segunda década del siglo XX, cuando Davis [4] calculó las trayectorias de una bola al interior de un molino rotatorio, basado en un simple balance de fuerzas pero despreciando los efectos de la fricción.

Este hecho, sumado a la complejidad del problema debido a la gran cantidad de partículas (bolas y mineral) presentes durante el proceso, produjo resultados que fueron poco satisfactorios, y solo hasta los años 50 Rose y Sullivan [5] enfatizaron en la necesidad de considerar la fricción en los cálculos correspondientes.

Hasta la década del 90 el análisis del movimiento de la carga en molinos rotatorios se limitaba a cálculos de las trayectorias de una sola bola. No fue sino hasta la segunda mitad de esta década que M.S. Powell y G.N. Nurick [6] calcularon con buenos resultados las trayectorias que deberían seguir los cuerpos moledores en un molino rotatorio de bolas, mediante un modelo en el cual se hace uso del concepto de superficie de equilibrio.

Añadido a esto, nuevas herramientas se sumaron al esfuerzo por entender la dinámica de los sistemas de molienda, las computadoras y el método de los elementos discretos DEM. El DEM se refiere a un esquema numérico que permite rotaciones finitas y desplazamientos de cuerpos discretos que interactúan con sus vecinos, por medio de leyes de contacto, donde se tiene en cuenta para los cálculos, tanto la pérdida como el nacimiento de contactos. El DEM fue desarrollado inicialmente por Cundall y Strack [7] para ser aplicado a partículas de materiales granulares bajo condiciones de carga dinámica. Esta técnica se ha convertido en una alternativa a la mecánica del medio continuo en la modelación de muchos sistemas físicos. Algunas revisiones de ésta técnica de simulación pueden encontrarse en las publicaciones de B.K. Mishra [8,9].

La relación de tamaños de bola y de tamaños de partícula fue inicialmente modelada por Bond [10], quien, utilizando un criterio basado en la caracterización de la distribución de tamaños a la entrada de molino, desarrolló ecuaciones que permiten seleccionar los tamaños de bola al inicio de la operación.

En este sentido, cobra interés una segunda clase de trabajos cuyo objetivo es la búsqueda de leyes de cinética

desgaste de cada medio molidor en particular, para optimizar el consumo energético por desgaste a partir de balances de población.

En la década del 80 la minería del cobre chilena dio importancia a la determinación de leyes de cinética de desgaste de bolas de acero a fin de tener una idea de la recarga utilizando balances de población. Tarifeño [11], utilizaron ensayos de bola marcada, abrasión sobre lija e impacto repetitivo sobre bolas de acero de 5'' de diámetro en un molino semiautógeno, para determinar la tasa promedio de desgaste de las bolas, en términos de la pérdida de masa.

Posteriormente, el mismo Tafireño [12] midió la tasa de desgaste por abrasión e infirió la tasa de desgaste por impacto de bolas de acero de diferentes marcas y diferentes tamaños en un molino semiautógeno, utilizando ensayos de bola marcada con trazador radiactivo. En todos los casos estudiados, la tasa de desgaste presentó un comportamiento lineal, es decir, obedece a una cinética de orden cero. Aún hoy, la cinética de desgaste de medios moledores se estima con base en teorías planteadas poco antes de la segunda mitad del siglo XX, como puede evidenciarse en la publicación de Sepúlveda [13], donde se utiliza la teoría de desgaste lineal para calcular la constante de velocidad específica de desgaste.

De otro lado, se tiene evidencia de que estos fenómenos de desgaste de bolas y también de revestimientos en la minería de minerales industriales afectan seriamente la productividad de los equipos, las distribuciones granulométricas generadas, las razones de recirculación, la eficiencia de los separadores de tamaño y en general de las diferentes operaciones que están alrededor del proceso de molienda.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se efectuó en la planta Yumbo propiedad de Cementos Argos S.A. Se aplicó la prueba de bola marcada a dos tipos de bolas diferentes, tomando 196 bolas de 90mm de diámetro para ambas especificaciones, estas fueron suministradas por un mismo proveedor (Vega Industries), con las siguientes composiciones químicas.

**Tabla 1.** Composición Química de Bolas  
**Table 1.** Chemical Composition Ball

REFERENCIA DE BOLAS	Cr%	C %	DUREZA HRC
180-Vegaplus-tipo I	21-23	2.7 – 3.1	63
90-Vegaplus-tipo II	18-21	2,5-2,8	60-66

Las 196 bolas marcadas con dos huecos de 13mm de profundidad, formando entre los dos huecos 180° para el tipo de bola I y 90° para el tipo de bola II, fueron introducidas dentro de un molino industrial con las siguientes especificaciones.

**Tabla 2.** Especificaciones del Molino  
**Table 2.** Mill Specifications

Dimensione internas	3500 mm * 5100 mm F. L.S / 1962
Tipo de descarga	7 mm
Fracción de velocidad critica de giro	72,5%
Flujo de alimentación fresca al molino	66 t / h
Flujo de alimentación total al molino	165 t / h
Índice de trabajo operacional del mineral	12 Kwh / t
F- 80	19000 µm
P- 80	195 µm
Fracción de volumen carga de bolas	32%
Masa total de carga de bolas	48,62 t
Procedencia bolas de reposición	Vega Industries
Consumo de bolas	143 gr / t
Secuencia de recarga, Kg/día del ciclo	1000 Kg (Ø 3,5 ") cada 7 días. 143 Kg / día
Composición granulométrica de la recarga	100% de Ø 3,5 "

Se realizó seguimiento durante 5368 horas con muestreos entre 500-600 horas, en cada parada del molino eran sacadas 12 bolas del molino y se media su respectivo desgaste con un pie de rey electrónico, después se calculaba la media de estas doce muestras, los resultados del desgaste del diámetro se encuentran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** Tabla de desgaste en milímetros  
**Table 3.** Table of wear in millimeters.

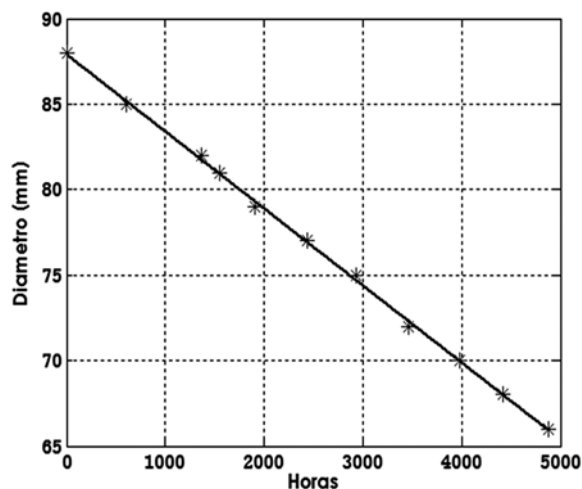
HORAS DE OPERACIÓN	DIÁMETRO DE BOLA TIPO I	DIÁMETRO DE BOLA TIPO II
-	89	88
601	87	85
1,363	84	82
1,551	83	81
1,910	81	79
2,432	80	77
2,927	77	75
3,461	75	72
3,984	73	70
4,422	71	68
4,874	70	66
5,368	67	64

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

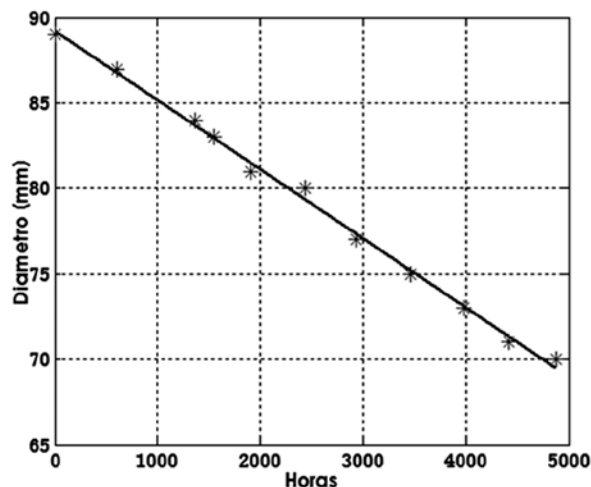
#### 3.1 Simulación del desgaste de medios molidores

Las figura 1 y 2 muestran el ajuste por mínimos cuadrados de los datos de la tabla 3 para el tipo de bola I y II, obteniendo como ecuaciones las rectas:  $Y = -0,0045X + 89,21$  donde  $g(d) = \alpha = -0,0045$  y la recta  $Y = -0,0040X + 81,34$  donde  $g(d) = \alpha = -0,0040$  respectivamente.

**Figura 1.** Regresión lineal tipo de bola I  
**Figure 1.** Regression type of ball I



**Figura 2.** Regresión lineal tipo de bola II  
**Figure 2.** Regression type of ball II



El análisis de regresión que se muestra en las figuras 1 y 2 se deduce claramente que la ley de desgaste que gobiernan las bolas en el molino corresponde a una cinética de desgaste de orden cero o una velocidad de desgaste constante, tal y como lo afirmo Menacho y Concha [14]

### 3.2 Análisis de los diferentes desgastes de bolas en el molino

#### 3.2.1. Abrasión Pura y desgaste isotrópico

Este fenómeno ocurre por micromecanizado y rayado de superficies, es decir, es un fenómeno netamente superficial. En éste caso, la velocidad de pérdida de masa es proporcional al área superficial del medio moedor, lo cual equivale a decir que la velocidad de disminución de su diámetro característico es constante en el tiempo [15].

$$g(d) = \frac{d(d)}{dt} = \alpha_A = \frac{2k_A}{\rho} \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad de los cuerpos moedores y  $k_A$  es la constante cinética por abrasión pura, la cual depende de la abrasividad de la pulpa y la dureza, macro y microestructural de los cuerpos moedores, entre otras.

#### 3.2.2 Impacto Puro y Desgaste Isotrópico

Para desgaste por impacto puro, la disminución de masa ocurre por microfractura. La velocidad de pérdida de masa es proporcional a la fuerza del impacto, la cual depende solamente del peso de los cuerpos moedores y por lo tanto de su masa. Este mecanismo de desgaste obedece a una cinética de orden 1:

$$g(d) = \frac{d(d)}{dt} = \alpha_i d = \frac{k_i}{3} d \quad (2)$$

Donde  $k_i$  es la constante cinética de desgaste por impacto, la cual depende de la viscosidad de la pulpa, el tamaño y la densidad de los cuerpos moedores, la fracción de velocidad crítica del molino y la resistencia al impacto de los cuerpos moedores, entre otras variables.

#### 3.2.3 Corrosión-Erosión Pura y Desgaste Isotrópico

El mecanismo de desgaste por corrosión-erosión también obedece a una cinética de orden cero debido a que es un fenómeno superficial. Se diferencia de la abrasión pura en el hecho de que la constante cinética es ahora función de las condiciones electroquímicas del medio, de hecho, la velocidad de pérdida de masa está dada por la ley de Faraday [15].

$$g(d) = \frac{d(d)}{dt} = \alpha_0 = \frac{2M_w i_c (E_M, pH, pO_2, c_j)}{\rho e F} \quad (3)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del medio moedor,  $M_w$  es el peso atómico del elemento que se oxida,  $e$  es el número de elec-

trones transferidos por átomo del elemento que se oxida,  $F$  es la constante de Faraday (96500Cb) e  $i_c$  es la densidad de corriente generada por la corrosión, la cual es función del potencial mixto  $E_M$  el  $pH$ , la presión del oxígeno disuelto y la actividad de otras especies presentes susceptibles de oxidar los medios moedores  $C_j$ .

Las siguientes fotografías muestra los diferentes desgastes de las bolas obtenidos al interior del molino.

**Figura 3.** Bola marcada al inicio de la operacion  
**Figure 3.** Ball marked the beginning of the operationl



**Figura 4.** Bolas deformadas  
**Figure 4** Deformed ball



La figura 3 muestra una bola de 90 mm de diámetro marcada antes de introducirla en el molino para después ser analizada durante el proceso de molienda y la figura 4 muestra la diferencia de una bola al inicio de la operación y otras bolas extraídas después de transcurrido un tiempo dentro del molino las cuales están deformadas por las altas temperaturas dentro del molino en medio de la operación.

#### 4. CONCLUSIONES

- El análisis de regresión que se hizo a la base de datos tomada de la prueba de bola marcada muestra que la mejor curva que se ajusta a los datos es una línea recta por lo que la velocidad de desgaste de las bolas es una constante, lo que comprueba una vez más la hipótesis planteada por Menacho y Concha [14] que la cinética de desgaste es constante.
- Dentro del molino las bolas pueden desgastarse de diferentes formas pero la literatura no menciona un desgaste en especial y es el desgaste por deformación.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la compañía Argos s.a por hacer posible esta investigación, además al Instituto de Minerales CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y también al Tecnológico Pascual Bravo

#### REFERENCIAS

- [1] MENACHO M. JORGE. Modelo de desgaste de bolas y optimización de su perfil de tamaño en molinos rotatorios continuos. En: Avances en Mineralúrgia. Volumen 1. Serie de Metalurgia Extractiva. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 1985.
- [2] AUSTIN. L.G. LEONARD & CONCHA Fernando. Diseño y Simulación de circuitos de molienda y clasificación. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED. Subprograma de Tecnología Mineral. Red de Fragmentación XIII-A. Concepción, Chile. 1994.
- [3] FUERSTENAU D.W. & A.-Z.M. ABOUZEID. The energy efficiency of ball milling in comminution. En: International Journal of Mineral Processing. 67. 62. 2002.
- [4] DAVIS, E. W. Fine crushing in ball mills. En: Trans. AIME. 61. 250. 1919.
- [5] ROSE, H.E and SULLIVAN, R.M.E. A treatise on internal mechanics of ball, tube, and rod mills. En: Constable and Company. London. 1958.
- [6] POWELL M.S. and G.N. NURICK. A study of charge motion in rotary mills. Part 1: Extension of the theory. En: Minerals Engineering. Vol. 9. No. 2. 259. 1996.
- [7] CUNDALL, P.A. y STRACK, O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. En: Geotechnique 29. 47. 1979.
- [8] MISHRA. B.K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method. Part I: Contact Mechanics. En: International Journal of Mineral Processing. 71. 73. 2003.
- [9] MISHRA. B.K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method. Part II: Practical Applications. En: International Journal of Mineral Processing. 71. 95. 2003.
- [10] BOND, F.C. The Third Theory of Comminution. En: Trans. AIME. Vol. 193. 484-494. 1952.
- [11] TARIFEÑO. E, BORRIES VON .G, VALDERRAMA. W, ESTAY .S, and BASUALTO .J. Análisis del desgaste en el molino semi autógeno de disputada. En: IV Simposium sobre molienda. 1984. Viña del Mar. Chile.
- [12] TARIFEÑO .E. Desgaste de bolas en molienda semi autógena. En: V Simposium sobre molienda. 1987. Viña del Mar. Chile.
- [13] SEPÚLVEDA .E. JAIME. Methodologies for the evaluation of grinding media consumption rates at full plant scale. En: Minerals Engineering. 17 (2004). p1269.
- [14] J.M. MENACHO AND F. CONCHA, Mathematical model of ball wear in grinding mills: I. Zero-order wear rate. Powder Technol. 47 (1986) 87-96.
- [15] MENACHO M., JORGE, JOFRÉ JAVIER, ZIVKOVIC YANDRANKA. Tópicos Especiales de Comminución de Minerales. CYTED. Concepción. Chile. 1995