

DESGASTE DE LA BOLAS DE LOS MOLINOS EMPLEADAS EN LA TRITURACIÓN DE MINERAL LATERÍTICO

Autores: Ing. Yobani Fernández Ramírez

Dr.C. Tomás Fernández Columbié

E-mail: yfernandez@ismm.edu.cu ; tfernandez@ismm.edu.cu

Resumen

En el trabajo se realiza una investigación sobre la influencia que genera el desgaste abrasivo y la fricción de un par tribológico metal-metal sobre los cuerpos molidores que forman parte de los molinos, los cuales se utilizan para la molienda del mineral laterítico. A partir del análisis microestructural empleando técnicas de microscopía óptica se determina el tamaño del grano de las muestras cortadas, para estudiar las capas deformadas, las que se forman por la deformación plástica en frío (acritud) y al mismo tiempo se realizan ensayos de dureza. En esta investigación se hizo un análisis del desgaste de las bolas en un molino rotatorio con el fin de determinar qué tipo de ecuación describe el desgaste de las mismas en una operación de molienda convencional.

Palabras Claves: desgaste abrasivo, cuerpos molidores, dureza, análisis microestructural.

1. Introducción

El desgaste por fricción genera considerables pérdidas de materiales, recursos, tiempo y gran cantidad de medios para su reparación, con la consiguiente disminución de la producción, así como en la elaboración o adquisición de nuevos elementos (Alcántara, 2012). Si a estos factores se une la tendencia a incrementar las velocidades de trabajo, se tienen elementos suficientes para entender por qué el incremento de la vida útil de los elementos molidores de los molinos de bola, se ha convertido en un problema básico en la práctica de la ingeniería en los últimos años. Estos elementos molidores, los cuales son fabricados de hierro blanco aleado y de aceros están sujetos a desgaste continuo por la actividad que realizan.

A lo largo de los años, una serie de trabajos han explorado el desarrollo de diferentes formas y medios para entender tanto el desgaste de los medios de molienda, como el modelo a seguir. Con respecto al desgaste y particularmente al desgaste de los medios abrasivos, todavía existen algunas escuelas de pensamientos diferentes (Bond, 1963; Benavente, 2007; Gates et al., 2008; Chenje et al., 2009), las cuales convergen en la noción general de que el desgaste en los procesos de trituración es una función de tres componentes principales que son; la energía implicada en el desgaste, las propiedades químicas y mecánicas de los medios, así como las propiedades químicas y mecánicas del mineral o lechada (Sabih et al., 2016).

Según Archard (1953), el desgaste por abrasión es inversamente proporcional a la dureza. Como resultado, se podría esperar que el desgaste por abrasión disminuyera con el aumento de la dureza. La correlación entre dureza y desgaste abrasivo ya ha sido investigada por varios investigadores como el propio Archard, 1953, además de Rabinowicz, 1983, Gates et al, 2008, Radziszewski, 2009 (Sabih et al., 2016). En el desgaste abrasivo, generalmente se considera que el material más resistente resiste mejor la abrasión (Sundström et al., 2001). Sin embargo, algunas investigaciones han arrojado conclusiones contradictorias y han demostrado que la correlación entre dureza y desgaste abrasivo no es tan clara.

Esta contradicción se debe a las diferentes condiciones de operación, parámetros de configuración y tipos de pruebas utilizadas (Subramanian, 1992). Además, esta contradicción puede atribuirse a los métodos de endurecimiento del material (Sabih et al., 2016). La cinética del desgaste de los medios de molienda se estima basándose en teorías presentadas poco antes de la segunda mitad del siglo XX, como se evidencia en el trabajo de Sepúlveda (2004), que utiliza la teoría del desgaste lineal para calcular el desgaste constante de la velocidad específica. Según Austin et al. (1984) y Gupta et al. (1985), se sabe que hay un tamaño de bola que maximiza la velocidad de rotura de un tamaño de partícula de alimentación dado (Rivera et al., 2014).

En lo referente al desgaste de medios moledores se han encontrado trabajos como el de Radziszewski y Tarasiewucz (1993), quienes, mediante un balance

de energía cinética al interior de un molino de bolas de acero alto en carbono y de acero austenítico lograron establecer la tasa de desgaste de bolas y revestimientos. En su estudio ellos destacan que las bolas más grandes se desgastan mucho más lentamente que las bolas pequeñas y por lo tanto, la cinética de desgaste no es la misma para diferentes tamaños de bola. Aseguran que lo interesante de este modelo, es ver cómo se relaciona la dureza del material con su tasa de desgaste, algo que no es muy común en la literatura.

Además, según este estudio, la tasa de consumo de energía cinética durante la fragmentación por abrasión permanece, prácticamente constante y es independiente de la velocidad de rotación del molino y su fracción de llenado. Como consecuencia de esta teoría, en cualquier instante de tiempo, después de que el cuerpo moledor se ha cargado al molino, su velocidad de pérdida de masa es directamente proporcional a su área superficial expuesta a mecanismos de desgaste por abrasión o corrosión. En otras palabras la velocidad de disminución de su diámetro es constante en el tiempo, por lo tanto, el desgaste obedece a una cinética de orden cero. Una de las dificultades más relevantes en la investigación del desgaste de cuerpos moledores es el hecho de que el desgaste global es el resultado de mecanismos simultáneos, principalmente el impacto, la abrasión y la corrosión.

La relación de tamaño de bolas y el tamaño de partículas fue inicialmente modelada por Bond (1960), quien, utilizando un criterio basado en la caracterización de la distribución de tamaños a la entrada del molino, desarrolló ecuaciones que permiten seleccionar los tamaños de bolas al inicio de la operación. Desde esta perspectiva es importante estudiar la recarga de bolas y desgaste de los medios de molienda. Desde el punto de vista de las ecuaciones cinéticas que rigen el desgaste de las bolas de acero y sus aplicaciones en modelos de equilibrio poblacional, las contribuciones de Menacho y Concha (1986 y 1987) constituyen un buen avance; esto queda demostrado por la bondad de ajuste entre los resultados teóricos y los experimentales (Rivera et al., 2014).

El trabajo tiene como objetivo determinar el desgaste de las bolas empleadas en el proceso de molienda del mineral laterítico, en la empresa Comandante Che Guevara, una vez que estas (las bolas) son retiradas de servicio.

2. Materiales y Métodos

2.1 Desgaste en las bolas de los molinos

Los mecanismos principales de desgaste de cuerpo moledores son la abrasión, el impacto y la corrosión-erosión, todos ellos influenciados por la existencia de gradientes de dureza y distribución radial de macro y microconstituyentes. Este fenómeno tiene lugar como resultado del rozamiento durante el deslizamiento de los elementos que desmenuzan el material abrasivo (las bolas) y la colisión entre sí, de ellos y el revestimiento del molino. Por lo general durante la molienda seca, el desgaste se produce motivado por la abrasión. Este proceso depende de muchas condiciones como son: propiedades del metal de las bolas, su grosor, el grosor del material a desmenuzar, del método a desmenuzar (seco o húmedo), de la agresividad del medio (ácido, alcalino), de su temperatura, de la existencia de sustancia tenso-activas, del régimen de velocidad del molino, del esquema de desmenuzamiento (cerrado o abierto). El desgaste de las bolas tiende a disminuir el volumen de las mismas en el interior del molino. Para contrarrestar este efecto, periódicamente se le adicionan bolas al molino de distintos tamaño según las especificaciones del fabricante.

2.2 Desgaste abrasivo

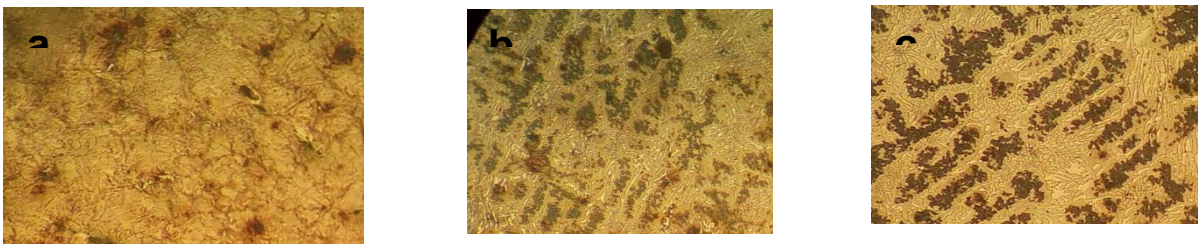
Bermúdez (2003) considera el desgaste abrasivo, como un fenómeno complejo de degradación de los materiales y que está directamente relacionado con factores hidrodinámicos, mecánicos, metalúrgicos y químicos. Los mecanismos antes relacionados, cuando actúan de manera combinada, son los responsables de los enormes gastos de materias primas, materiales, consumo de energía, baja productividad y la contaminación del medio ambiente. El fenómeno del desgaste está ubicado, según Archard (1953), en el quinto puesto de los mecanismos de degradación más importantes en los términos del coste por fallo prematuro ya que impacta sobre el equipamiento en todos los sectores industriales, tales como la industria naval, equipos de molienda y perforación en el sector minero, la industria del petróleo y la industria química

en sentido general, acortando notablemente la vida útil de los materiales convencionales empleados.

La ASTM (1992) afirma que el desgaste abrasivo es debido a partículas o protuberancias duras que son forzadas y movidas a lo largo de una superficie de un sólido más blando teniendo como resultado una pérdida de material o rayado de la misma, sin embargo autores como Márquez (2002); Hutchings (2000); Nam (1994) y Raymond (1994) plantean que esta apreciación resulta un tanto general; ya que afirman que la abrasión es generada por las partículas duras que se introducen entre dos superficies más blandas y al deslizarse interactúan mutuamente donde las partículas abrasivas pueden ser las propias asperezas de la superficie o bien el producto del desgaste de las mismas; que tienden a cortar y arrancar material de la superficie, generando virutas y causando deformación plástica severa (superficial y subsuperficial).

2.3 Comportamiento microestructural

Para el análisis microestructural se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina (ASTM E 3 – 95; NC 10 – 55: 86 y NC 04 – 77: 86). Las muestras de la figura 1, las cuales tienen una dureza de 22,75; 48,17 y 40,17 HRC respectivamente, con un tamaño de grano 6 (ASTM E 112), se corresponden con la estructura metalográfica del centro de las muestras del acero AISI D2 empleado en las bolas de los molinos.



Figuras 1 (a), 1 (b), 1 (c) Muestras patrones de las bolas

Puede observarse en la microestructura de la figura 1 (a) que está compuesta por la cementita proeutectoide, que aparece en forma de retículos, esta cementita se encuentra rodeando a los granos de perlita. Como la cementita es muy dura y la ferrita muy blanda, la primera se verá clara, iluminada, mientras que la última se verá oscura.

Las figuras 1 (b) y 1 (c) presentan microestructuras dendríticas, en forma de collar rodeando a la fase austenítica y en bordes de grano, mostrando una precipitación parcial. En ambas muestras se observa una distribución equiaxial de los granos.

Los constituyentes de la microestructura, al ser sometido a proceso de compresión, por las características propias de la cementita de poseer una mayor ductibilidad que la perlita, provoca que el efecto de la fuerza aplicada conlleve a una deformación inicial, deformándose con facilidad, característico de aceros hipereutectoides, que con el incremento de las interacciones entre las bolas, aumenta la densidad de las dislocaciones y de hecho, la deformación plástica y un mayor endurecimiento.

2.4 Caracterización de la capa deformada en las bolas

Las bolas que se emplean en los molinos rotatorios para la molienda del mineral laterítico, presentan un diámetro de 48,52; 44,76 y 47,47 mm respectivamente. Durante el proceso de molienda, las mismas sufren las consecuencias del desgaste por efecto de la fricción producida entre ellas con el mineral y la superficie interior del molino. Se forma una capa en toda la superficie de la bola, la cual es la que está directamente en contacto con los elementos deformantes.

2.5 Profundidad del desgaste en las bolas

La profundidad del desgaste está limitada por las interacciones que se producen entre las bolas con el mineral y las paredes del molino durante el proceso de molienda. Es una variable que define el comportamiento de la capa deformada, se relaciona con los parámetros de dureza.

2.6 Dureza superficial

La dureza es uno de los parámetros más importantes de los materiales, se admite también que es el más relevante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo y a la fatiga por contacto superficial (Rodríguez, 2009). Esta variable define el comportamiento del proceso y se medirá al concluir la deformación en frío.

2.7 Elaboración mecánica de las probetas

Las operaciones de corte se realizaron según norma ASTM E 3 – 95, con el empleo de una fresadora vertical y un constante régimen de enfriamiento para evitar que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso, pudiera

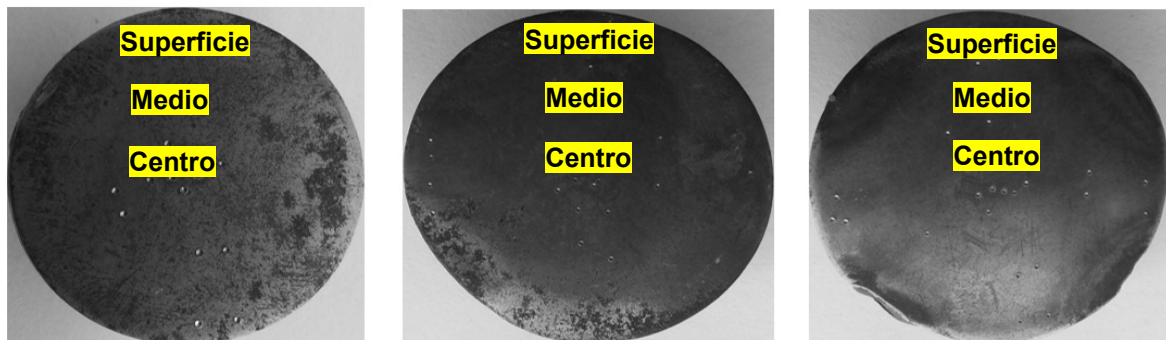


Figura 3 Muestras del corte realizado a las bolas

2.8 Ensayo de dureza

En la medición de la dureza se siguieron los procedimientos de la norma NC 10 – 56: 86, por lo que se utilizó un durómetro modelo 2818 TP. Las superficies de las probetas se prepararon de la misma manera que para el análisis microestructural, desbaste y pulido, se efectuaron seis mediciones a las muestras en diferentes lugares, las que se promediaron, la carga aplicada fue de 150 kg (1470 N). El penetrador empleado fue un cono de diamante.

2.9 Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizaron un conjunto de operaciones como son desbaste, pulido y lavado (ASTM E 3 – 95 y Norma NC 10 – 56: 86). El pulido con los papeles abrasivos se realizó variando la granulometría del mismo al ser aplicados a las piezas de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. Se emplearon lijas del tipo No 180, 400 y 600 (ASTM E 3 – 95). El pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio cambiando el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro, para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el anterior, esto permite obtener una superficie lisa y pulida, libre de impurezas o ralladuras, por último las muestras se pulieron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL.

Para el acabado final se utilizó un paño de fieltro grueso, usando como sustancia abrasiva, el óxido de cromo. Una vez pulidas las probetas se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro, se volvieron a lavar con

tetracloruro de carbono (Cl 4 C) para evitar cualquier vestigio de pasta de pulir, se empleó la técnica de ataque manual por inmersión en el reactivo químico. Se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante cinco segundos con el reactivo nital, al cuatro por ciento (mezcla de cinco mL de ácido nítrico (HNO 3) y 95 mL de alcohol etanol (ASTM E – 262 Practice A).

2.10 Determinación del desgaste en las bolas

Para el cálculo de las bolas desgastadas se deben tener en cuenta diferentes factores que influyen en las mismas como son: el tiempo de explotación del molino, la carga y el diámetro de las bolas desgastadas. En la práctica industrial los elementos de máquinas pueden presentar características dinámicas diferentes debido al tipo de unión, condiciones del medio y tipo de desgaste. El esquema más sencillo es el lineal, en este caso el desgaste con relación al tiempo de trabajo se determina según Álvarez (1995) por la siguiente ecuación.

$$W_h = k * t \quad 1$$

Donde:

W_h ----- desgaste lineal; mm

t ----- tiempo de trabajo; hr

De esta manera el coeficiente del desgaste se determina como:

$$k = \frac{H_a}{H_m} \leq 0,6$$

2

Donde:

K ----- coeficiente del desgaste

H_a -----dureza del material abrasivo; MPa

H_m ----- dureza del material desgastado; MPa

Tenembaum (1966) determinó que esta relación en los aceros es de 0,6, hasta este valor se observa una dependencia lineal entre el aumento de la dureza del abrasivo y el desgaste que sufre el material de las bolas. El desgaste lineal se utiliza cuando los valores absolutos del desgaste son de medianos a altos y está fundamentado en las dimensiones de las piezas antes y después del desgaste, la exactitud de este método depende de la calidad de los

instrumentos de mediciones que se utilicen.

La velocidad o razón de desgaste es un indicador que permite determinar el ritmo del proceso de desgaste y no es más que la relación que existe entre el desgaste y el tiempo en que este ha tenido lugar. Archard (1953) propone calcularla como:

$$\dot{W} = \frac{Wh}{t} \quad 3$$

Donde:

\dot{W} - velocidad o razón del desgaste; mm/hr

El mecanismo de microcorte ocurre si la penetración de la partícula abrasiva o aspereza sobrepasa cierto valor; si la partícula presenta cantos vivos; si la dureza del abrasivo es superior a la del material y si la tensión de contacto se sobrepasa el límite de rotura del material; se produce el microcorte de las superficies, generándose partículas de desgaste en forma de limallas o virutas, entonces la existencia del microcorte se puede determinar por el grado de penetración de las asperezas o partículas abrasivas según Martínez (2006) como:

$$D_p = R \left(\frac{\pi \cdot HV}{2F_n} \right)^{0.5} - \left(\frac{\pi \cdot HV}{2F_n} - R^2 - 1 \right)^{0.5}$$

4

Donde:

D_p - grado de penetración; μm o mm

HV - dureza del material más blando; MPa

R - radio de la aspereza o del abrasivo; μm o mm

F_n - fuerza sobre la zona de contacto; N

Si el microcorte se produce cuando el grado de penetración $D_p > 0,27 \mu\text{m}$, entonces la deformación plástica es por rayado (Alcántara, 2012).

2.11 Metodología de cálculo para el ensayo de desgaste abrasivo

El desgaste en ciertos contactos geométricos produce pérdida de material sobre un área nominal. El desgaste volumétrico se fundamenta en la medición

del volumen antes y después del proceso de desgaste. Este generalmente se determina partiendo del indicador lineal del desgaste.

$$W_v = W_h * A_n$$

5

Donde

W_v - desgaste volumétrico; mm³

A_n - área nominal de las bolas; mm²

Entonces el área nominal se determina como:

$$A_n = 4\pi r^2$$

3. Análisis de los Resultados

3.1 Análisis de las microestructuras

Para el análisis microestructural se tomaron las muestras de las capas que se forman en las bolas por efecto de la carga del molino y por el desgaste abrasivo al cual están expuestas, primero se analizó la superficie de las bolas, representadas en la figura 3, siendo esta la capa deformada en cada medio moledor. En este análisis se tomaron como muestra de comparación las microestructuras patrones ilustradas en la figura 1. La figura 4.1, se corresponde con las superficies de las bolas donde se produce el desgaste y las 4.2 con los puntos medios de las mismas.

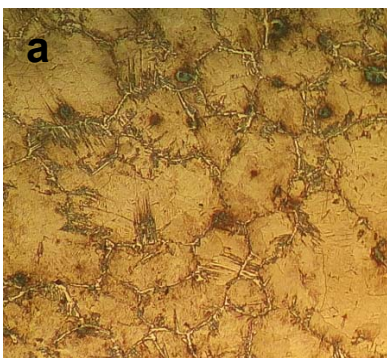


Figura 4.1 Muestra de la superficie



Figuras 4.2 Muestras de los puntos medios

En las figuras 4.1 se observan las microestructuras de las bolas luego del fenómeno de desgaste y retiradas de servicio. Nótese que aún se mantiene la estructura de la cementita proeutectoide, rodeando a los granos de perlita (figura 4.1a), pero para el borde existe la disminución del tamaño de los granos en la medida que se aleja del centro. Las microestructuras dendríticas para las figuras 4.2b y 4.2c, no cambian tampoco su morfología, pero de igual manera que en la figura 4.2a, ha disminuido el tamaño de los granos, lo que evidencia que durante el proceso de molienda, en la medida que las bolas realizan el trabajo de conmición y sufren desgaste, también están expuestas al fenómeno de endurecimiento por acritud.

Las estructuras obtenidas tienen su origen en los procesos de deformación al que se someten las superficies de las bolas durante las operaciones de trabajo, lo que provoca una disminución en el tamaño de los granos y un aumento considerable en la dureza de las bolas (29,25; 50,42 y 48,25 HRC) por el fenómeno de la acritud,

3.2 Análisis de la dureza en la capa

Las mediciones de la dureza se realizaron por el método de Rockwel (HRC), se efectuaron al menos seis mediciones para cada muestra en las diferentes secciones mostradas en la figura 3 (superficie, medio y centro), las que luego se promediaron. Las mismas se relacionan en la tabla 1.

Tabla 1. Dureza en las capas deformadas

Capas	Parte	Dureza (HRC)	Dureza (HV)	MPa
Bola 1	Superficie de la bola	29,25	296	945
	Parte media	26,33		
	Centro de la bola	22,75		

Bola 2	Superficie de la bola	50,42	519	1696
	Parte media	50,17		
	Centro de la bola	48,17		
Bola 3	Superficie de la bola	48,25	488	1586
	Parte media	48,08		
	Centro de la bola	40,17		

3.3 Análisis del desgaste en las bolas

Para determinar el desgaste lineal en las bolas se consideró la ecuación 1, la que considera el tiempo de trabajo del molino, para nuestro caso (t) es igual a 24 h de trabajo continuo y K determinado por la ecuación 2 es igual a 1,16 para la primera bola, a 0,65 para la segunda y a 0,69 para la tercera. La primera bola alcanza un desgaste de 27,84 mm, la segunda; 15,6 mm y la tercera de 16,56 mm. Como se observa, el desgaste en el material de las bolas ocurre de forma rápida y está originado porque las partículas abrasivas de origen mineral se encuentran en altas cantidades en los suelos; así por ejemplo el óxido de sílice (arena de cuarzo) con una dureza aproximada de 1000 Vickers (HV) y resistencia a la compresión de 1100 MPa, constituye entre el 40 y 60 % de los suelos cubanos.

El incremento de la resistencia al desgaste en masa abrasiva se logra aumentando la dureza del metal hasta valores que no afecten el trabajo del elemento de máquina desde el punto de vista de su resistencia a la fragilidad o impacto. La velocidad del desgaste en las bolas se determinó considerando el desgaste lineal W_h , al sustituir estos valores en la ecuación 3 se tiene que la bola 1 se gasta a una velocidad de 1,16 mm/h, la bola 2 a 0,65 mm/h y la bola 3 a 0,69 mm/h. El aumento de la velocidad del desgaste en las bolas se acelera por la fuerza de rozamiento e incrementa el efecto de la deformación plástica sobre la microestructura de la cementita proeutectoide. Esto conducirá a la fatiga residual interna del material y un cambio considerable en los parámetros de la dureza en la superficie.

En adecuación a la ecuación 4 se determinó el grado de penetración de las partículas abrasivas, se consideró un radio de partículas de 0,15 mm, la dureza

en las superficies de las bolas es de 296 HV para la primera, 519 HV para la segunda y 488 HV para la tercera, una fuerza nominal de 529 200 N, la cual se obtiene de multiplicar la masa del molino (54 toneladas) por el valor de la gravedad ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).

Como resultado se obtuvo que el grado de penetración para las tres bolas fue de 1,02 mm lo que significa que el mecanismo predominante es el de deformación plástica, en este caso las partículas son rayadas (cantos vivos) y provocan tensiones por encima del límite de rotura del material y altos grados de penetración, se produce la deformación plástica de las capas superficiales, lo que trae como consecuencia el rayado y arrugado de la superficie con bastante generación de partículas de desgaste y endurecimiento de las mismas por acritud.

3.4 Análisis del cálculo para determinar desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo se determinó mediante la ecuación 5, partiendo del indicador lineal de desgaste y calculando el área nominal desgastada de las bolas durante el proceso de molienda, al realizar los cálculos obtenemos que el desgaste volumétrico calculado para la bola 1 es de 222 549 mm³, para la bola 2 de 78 198 mm³ y para la bola 3 de 70 011 mm³. Como fue observado en el análisis microestructural, el acero AISI D2 tratado térmicamente presenta una estructura de cementita proeutectoide rodeando a los granos de perlita, pero para el borde existe la disminución del tamaño de los granos en la medida que se aleja del centro.

En el proceso de fricción bolas-molino se ha determinado que el tamaño de las partículas es superior a 1 μm , cuando se introduce o hay existencia en el par tribológico de partículas abrasivas con estas características, lo cual ha sucedido en la superficie deformada, provoca el desgaste en masa abrasivo, aparece el microcorte o rayado de la superficie, según fue reportado por Bushan (2001).

Por efecto de la fricción acero-acero ha existido un incremento de la dureza la cual ocurre porque las paredes de dislocaciones o los subgranos son bastantes uniformes dentro del grano deformado y la presencia de heterogeneidad local en las proximidades de los bordes de granos iniciales es la responsable de la

nucleación de nuevos granos mediante el mecanismo de migración del límite de grano inducido por deformación, reportado por Callister (1999) y Pero-Sanz (2000).

3.5 Análisis económico

Al abordar la valoración técnico-económica del proceso de desgaste abrasivo en las bolas, se parte del hecho que durante la fabricación de las muestras, intervienen en el mismo proceso de maquinado las siguientes operaciones: corte, preparación de la muestra para análisis químico, análisis metalográfico, mano de obra, técnico de laboratorio. Todo ello sin dudas repercute económicamente en el proceso. La determinación de las consecuencias negativas del desgaste, condiciona un funcionamiento más eficiente en la máquina en general.

3.5.1 Costo de las bolas de los molinos

Según el manual de precios oficiales de la empresa Importadora del Níquel, el precio de una tonelada de bolas en el mercado internacional es de 1 253 €, para el costo total se incluye la puesta fob que es 2 400 €; el marítimo 4 580 €; el seguro 89 €; el cif marítimo 7 069 € y el pago de intereses (5,5 %) 3 145,40 €.

El importe de una recarga para los molinos 202 y 203 de la Empresa Che Guevara es de 54 129,6 €; estos operan al 80 % de su coeficiente de llenado según carga nominal de diseño (54 t de bolas), encontrándose con una capacidad de 43,2 t de bolas, para el costo total se incluye la puesta fob que es 2 400 €; el marítimo 4 580 €; el seguro 89 €; el cif marítimo 7 069 € y el pago de intereses (5,5 %) 3 145,40 €, siendo este de 71 413 €.

Los molinos 201 y 204 operan con el 100 % de la carga de bolas (54 t), el importe de una recarga para estos molinos es de 67 662 €, para el costo total se tienen en cuenta los mismos factores que se analizaron para los otros dos molinos, siendo este de 84 945,4 €.

3.5.2 Costo anual de materiales

Este costo se determinará de acuerdo con algunos parámetros relacionados con el mismo, en este caso se tendrán en cuenta la sustitución de bolas que de

una forma u otra se relacionan con este costo por materiales, teniendo en cuenta asimismo la frecuencia de recarga del molino y el costo de las bolas.

$$C_{AM} = F_{AR} \cdot C_B; \text{€}$$

6

Donde:

F_{AR} - Frecuencia anual de recarga del molino.

C_B - Costo de las bolas, €.

3.6 Análisis del efecto ambiental

Durante la preparación de las muestras, hay que elaborarla por el proceso de maquinado, en el mismo se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, ya que en su composición poseen elementos que pueden ser lixiviables, bajo la acción de las altas temperaturas y las lluvias, pasan a las aguas subterráneas contaminándolas. Además en el taller se consume una gran cantidad de energía eléctrica, la cual se toma de la red nacional convirtiéndose en gasto de combustible y contaminación atmosférica debido al proceso de combustión para generar energía.

El empleo de tratamientos térmicos para lograr durezas superficiales en las piezas conlleva al menos a un mayor consumo de energía eléctrica donde casi siempre la pieza adquiere un temple volumétrico (como en el caso del temple y revenido) con el lógico despilfarro de energía, también porque emplean equipos que son altamente consumidores de energía eléctrica. Adicionalmente, para diferentes variantes de tratamiento térmicos se utilizan en ocasiones una serie de productos químicos y de combustibles, sólidos y gaseosos, que generan gases contaminantes al medio ambiente (vapores de sales, monóxido de carbono), además de desechos sólidos (grasas sólidas, aceites, restos de combustibles líquidos).

También es conocido que la mayor parte de los residuos generados por la industria de tratamiento térmico proviene de los baños usados (por ejemplo, soluciones de cianuro), agentes enfriadores empleados, aguas residuales de la

limpieza de piezas, medios abrasivos utilizados, material refractario y procesos de revestimiento que en mayor o menor medida afectan sensiblemente a la salud humana y son potencialmente peligrosos como agentes contaminantes del entorno. Las implicaciones económicas y sociales que todo esto representa son universalmente conocidas, así como de los esfuerzos que a numerosas instancias se hacen en Cuba para disminuir el impacto negativo que estas tecnologías poseen.

3.7 Análisis del costo anual de materiales

Para determinar el costo anual de materiales se utilizó la ecuación 6, donde está presente la frecuencia anual de recarga del molino, teniendo en cuenta que la recarga del molino se realiza cada siete días, entonces en un año se realizan un total de 48 recargas, donde en cada una se le suministra al molino una tonelada de bolas, lo que representa un importe de 60 144 € al año sin tener en cuenta los intereses mencionados anteriormente en el epígrafe 5.1, sino se incurriría en un costo total de 77 427,4 €.

Si se incrementa la dureza en las bolas hasta un valor que oscile entre 60-65 HRC con el objetivo de que adquieran mayor resistencia al desgaste y darle más durabilidad en el proceso de molienda, logrando recargar los molinos tres veces por mes, se realizarían un total de 36 recargas al año y tendríamos un ahorro de 15 036 €.

4. Conclusiones

- ❖ Por efecto de la fricción entre las bolas, el mineral y las paredes del cilindro se forman las capas, las cuales se encuentran en la superficie de las mismas (bolas), cada una caracterizada por su dureza y por el tamaño del grano.
- ❖ La distribución de las tensiones en las capas de las bolas permitió, a partir del análisis metalográfico, determinar la reducción del tamaño del grano, así como variaciones en la microdureza desde 22,75; 48,18 y 40,17 HRC en el centro de las muestras hasta valores de 29,25; 50,42 y 48,25 HRC en las superficies de las mismas, las cuales endurecen por la acritud.
- ❖ La existencia de rayado y microcorte, la formación de surcos son más profundos donde existe menor dureza y originan el desplazamiento del material por la deformación plástica, el mecanismo de desgaste presente en las bolas es desgaste en masa abrasiva.

❖ Por efecto del desgaste, la recarga de los molinos se realiza en un período de 7 días, lo que representa un importe de 60 144 € al año, sin embargo logrando elevar las propiedades mecánicas de las bolas, tales como, dureza, resistencia al desgaste y a la abrasión se puede alargar el período de recarga de los molinos con el objetivo de disminuir el gasto que se produce con las compras de las mismas.

5. Referencias Bibliográficas

1. Alcántara, D. Comportamiento microestructural del desgaste de los pasadores de las esteras de tractores Komatsu. Tesis Maestría ISMMM. 2012
2. Archard, J., Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 24, 981 – 8, 1953.
3. ASTM 1992, ASM Handbook Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International. USA
4. Austin L.G., Klimpel R.R., Luckie P.T. Process engineering of size reduction: ball milling, Ed: Society of Mining Engineers, New York, 1984.
5. Benavente, H., 2007. Correlacion empirica para estimar consumos de medios demolienda, X Simposium de Molienda Moly-Cop
6. Bermúdez, M., Erosión–corrosión de tantalio y aceros inoxidable, Memorias del IX Congreso de Ciencia y Tecnología de Materiales, Madrid, España, 2003.
7. Bhushan, B., Modern Tribology Handbook, vol. 2: Materials, Coatings & Industrial Applications, CRC Press, 1275 - 1297, 2001.
8. Bond F.C. New equation for calculating the work index from A–C closed circuit ball mill grindability test, Allis Chalmer Publication, 1960.
9. Bond, F.C., 1963. Metal Wear in Crushing and Grinding. Allis-Chalmers Publication 07P1701.
10. Callister, W., Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 p. ISBN 0 – 471 - 32013 - 7.
11. Chenje, T., Radziszewski, P., Hewitt, D., 2009. Steel media wear: experimentation, simulation and validation. CMP Conf., 557–572

12. Gates, J., Dargusch, M.S., Walsh, J.J., Saad, J.R., 2008. Effect of abrasive mineral on alloy performance in the ball mill abrasion test. *Wear* 5–6, 865–870.
13. Gupta V.K., Zouit H., Hodouin D. The effect of ball and mill diameters on grinding rate parameters in dry grinding operation, *Powder Technol.* 42 (1985) 199–208.
14. Hutchings, I., *Solid Particle Erosive Wear Testing*, ASM Handbook, Vol. 8 Mechanical Testing and Evaluation, 2000, pp. 728 – 751.
15. Márquez, M., *Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo*, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Febrero de 2002.
16. Martínez, C., *Ingeniería de Lubricación y Tribología. Fundamentos de tribología*. P 29 - 36, 43 - 47. 2006.
17. Menacho J.M., Concha F., *Mathematical model of ball wear in grinding mills: I. Zeroorder wear rate*, *Powder Technol.* 47 (1986) 87–96.
18. Menacho J.M., Concha F., *Mathematical model of ball wear in grinding mills: II. General solution*, *Powder Technol.* 52 (1987) 267–277.
19. Nam P. Suh, *Tribophysics*, Edit. Prentice Hall, USA. 1994.
20. Pero-Sanz, J., *Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades*, Editorial DUSSAT SA, 2000, 3ra Edición. p 393 - 502. España.
21. Rabinowicz, E., 1983. *The Wear of Hard Surfaces by Soft Abrasive*, *Wear of Materials*. ASME, pp. 12–18.
22. Radziszewski .P. y Tarasiewucz .S. *Modelling and Simulation of ball mill wear*. *Wear* 160 (1993). P 09.
23. Radziszewski, P., 2009. *The steel wheel abrasion test (SWAT): a tool to study wear, friction and ore breakage in the mining industry*. In: *Int'l J. on Wear, Friction and Lub.* 17th International Conference on Wear of Materials, 267, 1–4, 15 June 2009, 92–98.
24. Raymond, G.; Bayer, H., *Mechanical wear prediction and prevention*, Edit. Marcel Dekker, 1994. USA.
25. Rivera I.E., Álvarez B., Bustamante O., Restrepo O.J., Menéndez J.M. *Ceramic ball wear prediction in tumbling mills as a grinding media selection tool*, 2014.

26. Rodríguez, C., Tratamientos superficiales contra el desgaste. Grupo de Tribología. Dpto. Mecánica y Diseño. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente. 2009.
27. Sabih A., Radziszewski P., Mullany I., 2016. Investigating grinding media differences in microstructure, hardness, abrasion and fracture toughness
28. Sepúlveda, E. Methodologies for the evaluation of grinding media consumption rates at full plant scale. Minerals Engineering. 17 (2004). p1269.
29. Subramanian, C., 1992. Some considerations towards the design of a wear resistant aluminum alloy. Wear 155, 193–205.
30. Sundström, A., Rendón, J., Olsson, M., 2001. Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions. Wear 250 (1–12), 744–754.
31. Tenenbaum, M., Soprotiblenia abrasionovomu iznachibanio. Machinoestroyeniya. 1966.