Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad Metalurgia Electromecánica
Departamento Ingeniería Mecánica

Caracterización microestructural de las bolas de los molinos empleadas en la trituración de mineral laterítico

Autor: Yobani Fernández Ramírez
Tutores: Dr.C. Tomás Fernández Columbié
M.Sc. Benigno Leyva de la Cruz

Moa 2016
"Año 58 de la Revolución"

Declaración de autoridad:

Yo: Yobani Fernández Ramírez

Autor de esta tesis de grado, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa ´´Dr. Antonio Núñez Jiménez´´, el cual podrá hacer uso de la misma con la finalidad que estime conveniente.

_____

_____

Yobani Fernández Ramírez

Dr.C. Tomás Fernández Columbié

_____

M.Sc. Benigno Leyva de la Cruz

Pensamientos

"Educar es depositar en cada hombre toda la obra humana que le ha antecedido: es hacer a cada hombre resumen del mundo viviente, hasta el día en que vive: es ponerlo al nivel de su tiempo, para que flote sobre él, y no dejarlo debajo de su tiempo, con lo que no podrá salir a flote: es preparar el hombre para la vida".

José Martí.

"…La mecánica es el paraíso de todas las ciencias".

Leonardo Da Vinci.

"Como mismo la naturaleza les reveló su secreto a los hombres del pasado; así mismo lo hará con los hombres del presente. Solamente tienen que hacerse las preguntas correctas"…

Albert Einstein.

Agradecimientos

A los profesores Dr. C. Tomás Fernández Columbié, el Ms. C. Benigno Leyva de la Cruz, Ms. C Rafael Castillo Días, Ms. C Dayanis Alcántara Borges y al Ing. Ramón Castillo Matos por ofrecerme su ayuda desinteresada y su asesoría científica durante la elaboración de esta tesis.

A todos mis compañeros del departamento, por su apoyo y colaboración, en especial a los profesores William, Dania e Iván.

A mis suegros Carmen y Urbano, así como a todas mis amistades que con su ayuda me alentaron a continuar.

Y a los de que un modo u otro contribuyeron con el desarrollo del trabajo.

A todos muchas gracias.

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a la obra de la Revolución Cubana que ha hecho posible que tantos jóvenes como yo hayan tenido la oportunidad de formarse como profesionales y como hombres de bien.

A mis padres Maribel Ramírez y Ángel Fernández, que han sido los máximos inspiradores en mi formación como profesional y como persona.

A mi hermana Yumeidis que tanto apoyo me ha brindado al igual que mi cuñado Geolvis y mi novia Beatriz.

A mis demás familiares que siempre estuvieron presentes en todo momento para brindarme su apoyo incondicional y en especial a mi tío Alexis Fernández.

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 moledores que forman parte de los molinos empleados en la molienda de mineral. A partir del análisis de muestras cortadas se determinan las capas que se forman por la deformación plástica en frío (acritud) así como el análisis microestructural a través de técnicas de microscopía óptica que permiten establecer el tamaño del grano y al mismo tiempo se realizó ensayos de dureza.

Los efectos de comprender la cinética y el mecanismo de desgastes de bolas, impacta fuertemente sobre los costos de energía en la industria minera. Los usuarios y fabricantes requieren lograr mejores resultados técnicos-económicos en sus aplicaciones, por lo que necesitan aumentar los conocimientos relacionados con los aspectos estructurales de estos materiales.

Las aleaciones de alto cromo son empleadas para la fabricación de bolas de molino en industrias de procesamiento de minerales y más específicamente en la molienda. 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 bolas en una operación de molienda convencional. Aquí se investiga las relaciones entre la estructura de las aleaciones y su comportamiento ante el impacto repetido que es un fenómeno característico en estos procesos.

Summary

Tribológico accomplishes an investigation on the influence that generates the abrasive wear and the friction of a pair itself at work metal – metal on the grinding bodies that are a part of the mills used in the milling of mineral. The capes that form for the plastic deformation in cold (bitterness) as well as analysis microestructural through techniques of optic microscopy themselves that they allow to determine to establish the size of the grain themselves as from the analysis of cut signs and at the same time essays of hardness were sold off.

The effects to understand the kinetics and the mechanism of wears of balls, cause impact strongly on the costs of energy in the mining industry. The users and manufacturers require to achieve better technical cost-reducing results in their applications, which is why they need to increase knowledge once the structural aspects of these materials were related to.

The tall- chrome alloys are used for the manufacture of balls of mill at industries of processing of minerals and more specifically in the milling. An analysis plucked up the wear of the balls in a rotatory mill with the aim of determining in this investigation what the wear of balls in an operation of conventional milling describes type of equation. Here the relations between the structure of the alloys and his behavior in front of the impact repeated that it is a characteristic phenomenon in these processes are investigated.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN **Pág**

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción 6

1.2 Generalidades del proceso de molienda 6

1.3 Materiales para la fabricación de bolas 8

1.4 Generalidades del desgaste 11

1.5 Desgaste en las bolas de los molinos 14

1.5.1 Abrasión pura en bolas con desgaste isotrópico 14

1.5.2 Impacto puro en bolas con desgaste isotrópico 15

1.5.3 Corrosión - erosión pura en las bolas con desgaste isotrópico 16

1.5.4 Desgaste por mecanismo único con distribución radial de dureza y de microconstituyentes 17
1.6 Desgaste abrasivo 18
1.6.1 Manifestaciones del desgaste abrasivo 19
1.6.2 Desgaste por partículas abrasivas 23
1.7 Conclusiones del capítulo 1 25

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción 26
2.2 Características de los molinos de bolas 26
2.3 Composición química del acero AISI D2 27
2.4 Comportamiento microestructural 28
2.5 Caracterización de la capa deformada en las bolas 29
2.6 Carga del molino sobre las bolas 30
2.7 Profundidad del desgaste en las bolas 30
2.8 Dureza superficial 30
2.9 Elaboración mecánica de las probetas 31
2.9.1 Ensayo de microdureza 31

2.9.2 Preparación metalográfica de la probeta 32
2.9.3 Desbaste y pulido 32
2.10 Determinación del desgaste en las bolas 32
2.10.1 Determinación del desgaste lineal 32
2.11 Consideraciones para realizar pruebas de desgaste abrasivo 34
2.12 Metodología de cálculo para el ensayo de desgaste abrasivo 35
2.13 Muestreo aleatorio simple 35
2.14 Diseño del experimento 36
2.14.1 Selección de las variables de entrada y sus niveles 36
2.14.2 Caracterización de las variables de salida 36
2.14.3 Matriz de planificación del experimento 37
2.15 Límites de tolerancia 38
2.15.1 Análisis de varianza 39
2.15.2 Ajuste de curva por regresión 41
2.16 Análisis económico 42

2.17 Costo anual de materiales 42

2.18 Conclusiones del capítulo 2 43

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción 44

3.2 Análisis de la composición química del material empleado en las bolas 44

3.3 Análisis de las microestructuras 45

3.3.1 Análisis de la dureza en la capa 47

3.4 Análisis del desgaste en las bolas 47

3.5 Análisis del cálculo para determinar desgaste abrasivo 48

3.6 Análisis estadístico de los resultados 49

3.6.1 Análisis de la varianza 49

3.6.2 Límites de tolerancia 51

3.7 Ajuste de curvas 52

3.8 Determinación del efecto económico 54

3.9 Costo de las bolas del molino 55

3.10 Aporte en la dimensión ambiental 56

3.11 Efectos en el orden social y ambiental 57

3.12 Análisis del costo anual de materiales 57

3.13 Conclusiones del capítulo 3 58

Conclusiones generales

Recomendaciones

Referencias bibliográficas

Introducción

Por ser Cuba un país subdesarrollado que cuenta con escasos recursos para invertir en su industrialización y desarrollo, es necesaria la racionalización de los procesos industriales y económicos y de esta forma lograr el incremento de la productividad y los rendimientos. El empleo racional de nuevas técnicas y el aumento cada vez mayor de la mecanización, representan aspectos donde se han alcanzado logros incuestionables. 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 moledores de los molinos de bola, se ha convertido en un problema básico en la práctica de la ingeniería en los últimos años. Uno de los equipos en los que mayormente, sus componentes están sujeto al desgaste son los molinos de bola por la actividad que realizan, esos componentes son las bolas, las cuales son fabricadas de hierro blanco aleado y de aceros, las mismas son los componentes esenciales para la molienda de mineral.

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 (Menacho, 1985). 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 (1919) 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 (1958) 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 Powell y Nurick (1996) 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 mismo fue desarrollado inicialmente por Cundall y Strack (1979) 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 me-dio continuo en la modelación de muchos sistemas físicos. Algunas revisiones de ésta técnica de simulación pueden encontrarse en las publicaciones de Mishra (2003).La relación de tamaños de bola y de tamaños de partícula fue inicialmente modelada por Bond (1952), 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 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 de desgaste de cada medio moledor en particular, para optimizar el consumo energético por desgaste a partir de balances de población.

Situación problémica

El material de las bolas de los molinos, las cuales están expuestas a condiciones de desgaste trae consigo que durante el proceso de trituración las partículas no queden con el tamaño según los requerimientos para el proceso de obtención de Níquel más Cobalto. En los últimos tiempos se hace cada vez más confuso el motivo de las bolas lo que trae consigo pérdidas económicas y afectaciones al medio ambiente.

Problema

No existencia de una caracterización microestructural de las bolas de los molinos que permita determinar las condiciones de desgaste luego de retirada de servicio.

Objeto de la investigación

Las bolas de los molinos.

Campo de acción

Microestructura, dureza y capas superficiales de las bolas empleadas como elementos triturantes en los molinos.

Hipótesis

Si se determinan las microestructuras y la dureza en las diferentes capas superficiales, que se forman en las bolas de los molinos, las cuales son obtenidas por fundición, se podrá conocer el efecto del desgaste sobre las mismas, producto del contacto producido entre ellas.

Objetivos del trabajo

Determinar las consecuencias del desgaste, que por el efecto de los choques, provocan cambios adicionales de dureza en las capas superficiales y en la microestructura de las bolas.

Objetivos específicos

1. Definir las regularidades del comportamiento microestructural y la dureza que se originan en las capas superficiales de las bolas.
2. Determinar el efecto del desgaste que provoca cambios microestructurales y de dureza en la superficie de las bolas.
3. Establecer a partir de las regularidades obtenidas como: comportamiento microestructural y tamaño de grano, el incremento de la dureza en las capas superficiales de las bolas.

Tareas

1. Establecimiento y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con las variaciones del proceso de deformación plástica.
2. Análisis de los efectos del desgaste en las capas superficiales de las bolas, deformadas por las interacciones producidas entre ellas.
3. Planificación, diseño y realización de experimentos.

4. Análisis de resultados y obtención de las regularidades provocadas en las superficies de las bolas, deformadas por el efecto de los choques.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

No hay una regla general que sea válida para todas las manifestaciones del desgaste, este fenómeno está afectado por toda una variedad de condiciones, tales como tipo y modo de la carga, velocidad, cantidad y tipo de lubricante, temperatura, dureza, acabado de la superficie, presencia de materiales extraños y naturaleza química del medio. Así como las condiciones varían en cada aplicación, también lo hacen las correspondientes manifestaciones de desgaste, además en la práctica, el desgaste es, generalmente una combinación de una o más formas elementales. Por lo tanto no siempre es fácil, en cualquier aplicación dada, deducir que tipo de desgaste ha ocurrido.

Objetivos del capítulo

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía existente relacionada con el mecanismo del desgaste y su influencia en el incremento de la dureza superficial.

1.2 Generalidades del proceso de molienda

La molienda es una operación de reducción de tamaño de rocas y minerales de manera similar a la trituración. Los productos obtenidos por molienda son más pequeños y de forma más regular que los surgidos de trituración. Generalmente se habla de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1 in (1 in = 2,54 cm) siendo el grado de desintegración mayor al de trituración.

Esta se utiliza fundamentalmente en la fabricación de cemento Portland, en la preparación de combustibles sólidos pulverizados, molienda de escorias, fabricación de harinas, alimentos balanceados. También es utilizada en la concentración de minerales ferrosos y no ferrosos, donde se muele la mena previamente extraída de canteras y

luego se realiza un proceso de flotación por espumas para hacer flotar los minerales y hundir la ganga y así lograr la separación.

La molienda se puede hacer a materiales secos o a suspensiones de sólidos en líquido (agua), el cual sería el caso de la molienda húmeda. Es habitual que la molienda sea

seca en la fabricación del cemento Portland y que sea húmeda en la preparación de minerales para concentración. En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciéndose así el manejo y transporte de pulpas, que podrá ser llevado a cabo por ejemplo con bombas en cañerías.

Los equipos de procesamiento de minerales como son los molinos de bolas empleados en la molienda de mineral están sujetos a severas condiciones de desgaste y de impacto, los mismos están formado por un cuerpo cilíndrico (tambor) de eje horizontal, que en su interior contienen los elementos triturantes, los cuales son de diversos tamaños. Este se llena aproximadamente hasta la mitad del volumen con el medio triturador (elementos triturantes).

Cuando el cuerpo gira sobre su propio eje, provoca que los elementos triturantes sean arrastrados por su superficie interior, levantándose hasta una altura determinada y cayendo libremente o pasando uno por encima de otro hacia abajo, lo cual conlleva a que los elementos triturantes desmenucen el material mediante golpes, desgaste y estrujamientos.

Debido a los regímenes de velocidades de trabajo del molino, existen dos formas de trituración, la de cascada y de catarata. La primera ocurre cuando la frecuencia de rotación del molino es baja y se caracteriza por el rodado de unas bolas sobre otras de forma paralela. Aquí el desmenuzamiento sé realiza principalmente por aplastamiento y por frotación de las bolas que ruedan.

La segunda ocurre a medida que se va aumentando la frecuencia de rotación del molino. En este caso las bolas salen de sus trayectorias circulares y como cuerpos lanzados en ángulos con respecto al horizonte van a caer de nuevo a estas mismas trayectorias en forma de catarata. Bajo este régimen el desmenuzamiento se efectúa principalmente por el golpe de las bolas que caen y parcialmente por el desgaste.

Una vez secado el material este es llevado por medio del tabique elevador a la parte de molienda gruesa del molino. La molienda gruesa se efectúa en la cámara correspondiente, y luego el material abandona el molino por el dispositivo de salida central y pasa a través de aerodeslizadores y de un elevador de cangilones al separador,

donde es clasificado en gruesos y finos. Los finos salen directamente después de la separación, al proceso que sigue en la Planta. Los gruesos vuelven a clasificarse en dos tamaños. Los de tamaño inferior pasan a la cámara refina del molino y solo una pequeña parte (tamaño superior) vuelve a la cámara de molienda gruesa.

El material que se muele en la cámara de refino sale nuevamente por el dispositivo central y pasa nuevamente a través de aerodeslizadores y del elevador de cangilones y llega al separador. El ciclo de molienda y reflujo de los granos gruesos continúa hasta que los mismos alcanzan la granulometría adecuada.

La molienda es la última etapa del proceso de beneficio de mineral, en esta etapa las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impactos y abrasión, ya sea en seco o como una suspensión en agua, también llamado pulpa. En el proceso de molienda las partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaños de 10 – 300 micrones aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice.

1.3 Materiales para la fabricación de bolas

Con el rápido avance de la tecnología, cada vez se incrementa la demanda de materiales con alta resistencia a la temperatura, al desgaste, rigidez y poco peso, ya que los materiales tradicionales no están en la capacidad de suplir estas características, creándose así la necesidad de desarrollar nuevos materiales, este tema ha llamado la atención de científicos y de ingenieros, quienes han descubierto en la técnica de aleación mecánica, un proceso sencillo y económico, comparado con el proceso de aleación en estado líquido, para producir nuevos materiales con excelentes propiedades.

Este proceso utiliza la energía de impacto para realizar aleaciones en estado sólido; a partir de polvos elementales de cualquier tipo de material, lo cual abre un horizonte a la investigación, ya que se pueden alear materiales con puntos de fusión muy diferentes,

como es el caso del metal y los polímeros. Por medio del aleamiento mecánico se ha logrado obtener materiales compuestos con características especiales de resistencia a altas temperaturas, desgaste, y alta rigidez, con una muy buena relación entre resistencia y peso (Suryanarayana, 2001).

Los cuerpos moledores son bolas que pueden estar fabricadas de acero de fundición, acero forjado y éste puede estar aleado al Cr-Mo, para ser resistentes al desgaste por impacto o aleado con Ni, para ser resistentes a la abrasión, bolas de acero muy duro (Bond, 1960). Las aleaciones (hierros blancos) de alto cromo, siguen siendo las preferidas por las empresas consumidoras de bolas de molino, al brindar buenos resultados técnico-económicos, porque combinan buena resistencia al desgaste, resistencia moderada al impacto y, además, son baratas.

El desarrollo de materiales de alta tecnología más eficientes y competitivos está buscando nuevas alternativas (métodos y procesos) para alcanzar este propósito. Un ejemplo muy importante es el de los hierros nodulares, que es considerado como un material tradicional ferroso el cual ha evolucionado a través del tratamiento térmico de autemperizado, que lo hace actualmente más competitivo y considerado como una valiosa y ventajosa alternativa en la sustitución de piezas de acero colado y forjado.

El objetivo de aplicar tratamiento térmico a los hierros nodulares, es el de promover la formación de microestructuras de ferrita acicular y austenita estable con altos contenidos de carbono, microestructura que recibe el nombre de ausferrita (Bext, 1990; Kovacs, 1991). Esta estructura proporciona al hierro nodular una elevada combinación de resistencia y ductilidad, características que han contribuido a hacerlo viable de aplicaciones ingenieriles más extensas y donde se demandan mayores propiedades.

Es sabido que la producción de hierro nodular con tratamiento ADI (Austempered Ductile Iron) depende del control de algunas variables fundamentales como lo son: la composición química del hierro base, la calidad metalúrgica (microestructura de la matriz, tamaño de nódulo, nodularidad, densidad de nódulo), temperatura y tiempo de austenización, temperatura y tiempo de tratamiento térmico, entre otros (Aranzabal, 1987; Rousiere, 2000). Quizá dos de los parámetros más importantes considerados en

la manufactura de hierros ADI de alta calidad son: la composición química y la calidad microestructural del hierro base.

Algunos estudios han clasificado a los hierros ADI en cinco categorías específicas que relacionan la estructura con sus propiedades mecánicas (Crist, 1991; Rohrig, 1999), en

las que se incluyen ausferritas de alta y baja temperatura, pasando por ausferritas intermedias. Las condiciones del tratamiento pueden variar significativamente en función de las características antes mencionadas, en general los intervalos de tratamiento térmico oscilan entre 250 y 480 °C, mientras que el tiempo de tratamiento varía con la temperatura seleccionada en términos de la movilidad de carbono (Putatunda, 2000; Massone, 1996; Arámburo, 1992), lo que determina la rapidez de transformación, tomándose entre 30 y 240 minutos, para altas y bajas temperaturas respectivamente.

Los costos de operación de los procesos de molienda de minerales en seco o en húmedo, constituyen una parte muy importante en el tratamiento de éstos, especialmente la contribución del consumo de bolas de molienda, que en ocasiones puede ser superior al costo del consumo de la energía eléctrica. Dependiendo de la capacidad de la planta, miles de kilogramos de bolas para molienda son consumidos en la industria dedicada a esta actividad. Las propiedades más importantes solicitadas en materiales para la operación de molienda son la resistencia a la abrasión, al impacto y cuando es en húmedo es muy importante la resistencia a la corrosión (Madhusudhanachar, 1997).

Los hierros colados con tratamiento ADI, tienen la ventaja sobre hierros blancos y aceros de tener una mayor tenacidad con lo cual se mejora considerablemente la resistencia al impacto, aunque su resistencia a la abrasión sea ligeramente menor. Estas características combinadas con el costo competitivo de los hierros ADI, lo hacen un material susceptible de sustituir a los materiales tradicionales utilizados en las operaciones de molienda.

Considerando el alto consumo de bolas debido al desgaste y fractura de las mismas en los materiales tradicionales que afectan la eficiencia de molienda de minerales, en este trabajo se trata de proponer un material como medio molturante, con propiedades mecánicas adecuadas que mejoren el tiempo de vida de las mismas y reduzcan el costo

del proceso. Tomando en cuenta que la presencia controlada de carburos en una matriz de ausferrita de hierro CAVI (Carbide Vermicular Ductile Iron) tiene un efecto muy significativo en la resistencia al desgaste de este material y mantiene la alta tenacidad asociada a la ausferrita (Márquez *et al*., 2006).

La característica anterior hace idóneo a los hierros ADI y CAVI en aplicaciones en donde estas propiedades mecánicas son la principal demanda.

1.4 Generalidades del desgaste

Dong y Moys (2001) y 2003) desarrollaron técnicas para medir la velocidad de las bolas y las propiedades de impacto entre bolas en molinos rotatorios. Con ello es posible calcular las trayectorias en función de la fracción de velocidad crítica a partir del análisis de imágenes. Estas técnicas se convierten en una herramienta útil para calcular cantidades de interés como la energía transferida durante un impacto y el coeficiente de restitución.

Este último da una medida de la disipación de energía en los procesos de colisión bola-pared y bola-bola en los molinos, lo cual constituye una variable de interés a la hora de estimar el desgaste por impacto y un parámetro necesario en la simulación mediante el DEM, como ha sido expuesto con anterioridad por Mishra (2003), además de una reciente revisión realizada por Weerasekara *et al.* (2013). 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:

$$\dot{m}_{st/b} = \rho_{st}\left[\frac{\tan\theta}{\pi H_r}\dot{E}_{grc} + \frac{P}{3H_r}\dot{E}_{cr} + \frac{P}{3H_r}\dot{E}_{tum}\right]$$

(1.1)

Donde $\dot{m}_{st/b}$ es la tasa de desgaste de bolas en kg/s, ρ_{st} es la densidad de las bolas, θ es un factor de abrasión (representación angular de un grano abrasivo cónico),H_r es la dureza del material, P es la probabilidad de adhesión y $\dot{E}_{grc}, \dot{E}_{cr}, \dot{E}_{tum}$ son las tasas de

energía cinética distribuidas en la carga de bolas en las zonas de abrasión e impacto al interior del molino. Un análisis sencillo de este modelo, indica que escribiéndola a manera de tasa de desgaste, esta ecuación toma la forma:

$$\frac{d(d)}{dt} = \frac{2\pi}{d^2}\left[\frac{\tan\theta}{\pi H_r}\dot{E}_{grc} + \frac{P}{3H_r}\dot{E}_{cr} + \frac{P}{3H_r}\dot{E}_{tum}\right] = \frac{k}{d^2} = kd^{-2}$$

(1.2)

Donde **k** es una constante que involucra los parámetros $\boldsymbol{\theta}$, $\mathbf{H_r}$, $\mathbf{P}$, $\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{grc}}$, $\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{cr}}$ y $\dot{\mathbf{E}}_{\mathbf{tum}}$. Ello indicaría 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. 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 (Rivera, 2013).

Como puede verse, el DEM se ha convertido en una herramienta muy útil para simular el comportamiento de los medios moledores en molinos rotatorios, lo que ha permitido predecir las trayectorias de las partículas individuales, la distribución de las fuerzas de contacto y las energías asociadas a las colisiones, el desgaste y el consumo de potencia. Las investigaciones mencionadas hasta aquí y que corresponden a un punto de vista puramente mecánico, son útiles para predecir el desgaste y la distribución de tamaños de mineral al interior del molino, entre otras cosas.

En este sentido, cobra interés una segunda clase de trabajos cuyo objetivo es la búsqueda de leyes de cinética de desgaste de cada medio moledor en particular, para optimizar el consumo energético por desgaste a partir de balances de población (Rivera, 2013). 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, 1984).

Utilizaron ensayos de bola marcada, abrasión sobre lija e impacto repetitivo sobre bolas de acero de 5 in de diámetro en un molino semiautógeno, para determinar la tasa promedio de desgaste de las bolas, en términos de la pérdida de masa. En este caso se

partió del supuesto de que la pérdida de masa de un cuerpo moledor es proporcional al área superficial expuesta y que dicho proceso se desarrolla en estado estacionario, es decir:

$$\frac{dW}{dt} = kr^2 \quad (1.3)$$

Donde ***r*** es el radio de la bola, ***W*** es el peso de la bola en un instante ***t*** y ***k*** es la tasa de desgaste másica. Como se vio con anterioridad, esto equivale a decir que el cambio del tamaño de la bola en el tiempo es constante y por lo tanto el fenómeno obedece a una

cinética de orden cero. Con ello, los investigadores determinaron que la masa de una bola en un proceso de desgaste en estado estacionario es de la forma:

$$W = \frac{R\pi\rho^2}{3000 m_0 k}(r^2{}_i - r^2{}_f) \quad (1.4)$$

Donde ***R*** es la tasa de recarga de bolas al molino en kg/h, ***ρ*** es la densidad de las bolas, $\boldsymbol{m_0}$ es la masa inicial de la bola en kg y $\boldsymbol{r_i}$ y $\boldsymbol{r_f}$ son los radios inicial y final de la bola respectivamente. Los resultados de esta investigación mostraron una buena correlación entre los datos experimentales y la ley de desgaste determinada. Además, se encontró una fuerte dependencia entre la tasa de desgaste y la recarga de bolas (Tarifeño, 1984). Posteriormente, el mismo Tarifeño (1987) 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 (2004), donde se utiliza la teoría de desgaste lineal para calcular la constante de velocidad específica de desgaste.

Como consecuencia de esta teoría, en cualquier instante ***t*** 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.

Por tal razón, es difícil, a escala de laboratorio, determinar con precisión la contribución de cada uno de estos mecanismos al desgaste global y se hace crucial realizar pruebas a escala industrial (Rivera, 2013). Problemas como estos se han comenzado a resolver por

algunos investigadores. Tal es el caso de Fiset *et al* (1998) quienes construyeron un dispositivo a escala de laboratorio que somete una probeta cilíndrica (extraída de las bolas) a un ensayo de desgaste donde existen, simultáneamente, los fenómenos de impacto y abrasión. La versatilidad de este dispositivo permite que el material con el cual la probeta se somete a abrasión puede ser el mismo mineral que se está moliendo.

Un aporte significativo de este trabajo lo constituye el hecho de que mediante esta técnica es posible establecer correlaciones lineales entre los ensayos de laboratorio y los ensayos de bola marcada, las cuales son mejores cuando el abrasivo se humedece. En este sentido, esta técnica se convierte en una alternativa más económica que el ensayo convencional de bolas marcadas, aunque aún no ha sido muy aceptado (Rivera, 2013).

1.5 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 cómo resultado del rozamiento durante el deslizamiento de los elementos que desmenuzan el material abrasivo y la colisión entre sí de estos elementos 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 los mismos en el interior del molino. Para contrarrestar este efecto, periódicamente se le adicionan bolas al molino de distintos tamaño según las especificaciones del fabricante.

1.5.1 Abrasión pura en bolas con desgaste isotrópico

En el caso de abrasión pura con desgaste isotrópico, la pérdida de masa ocurre por micromecanizado y rayado de superficies y es un fenómeno netamente superficial que no provoca solicitaciones apreciables al anterior de la bola. En éste caso, la velocidad de pérdida de masa $\frac{dw(d)}{dt}$, es directamente proporcional al área superficial $a(d)$ de una bola de tamaño d:

$$\frac{dw(d)}{dt} = R_A \pi d^2; R_A < 0 \quad (1.5)$$

Donde R_A es la constante cinética de desgaste por abrasión pura, la que depende de la abrasividad de la pulpa y de características físicas de las bolas tales como dureza y macro y microestructura, entre otras. Recordando que:

$$\frac{dw(d)}{dt} = \frac{dw(d)}{d(d)} \frac{d(d)}{dt} \quad (1.6)$$

$$w(d) = \rho \frac{\pi}{6} d^3 \quad (1.7)$$

Combinando las ecuaciones 1.6 y 1.7 resulta:

$$\frac{dw(d)}{dt} = \frac{1}{2} \rho \pi d^2 g(d) \quad (1.8)$$

Igualando las ecuaciones 1.5 y 1.8 se obtiene:

$$g(d) = \frac{d(d)}{dt} = \alpha_A;\ \alpha_A = \frac{2R_A}{\rho} \quad (1.9)$$

Luego, decir que la velocidad de pérdida de masa de una bola es directamente proporcional al área superficial, es equivalente a decir que la velocidad de disminución de su diámetro es constante en el tiempo. Este comportamiento es conocido como cinética de desgaste de orden cero. Las velocidades específicas de desgaste $\boldsymbol{\alpha_A}$, comúnmente llamadas tasas de desgaste, corresponden a las pendientes de las respectivas relacionadas lineales (Rivera, 2013).

1.5.2 Impacto puro en bolas con desgaste isotrópico

En el caso de solicitaciones de impacto puro, la disminución de masa ocurre por microfractura. La velocidad de pérdida de esta masa es directamente proporcional a la fuerza de impacto, la cual, para condiciones dadas de operación, depende solamente del peso de las bolas y por lo tanto de su masa. Matemáticamente:

$$\frac{dw(d)}{dt} = R_1 w(d) = R_1 \rho \frac{\pi}{6} d^3\ ;\ R_1 < 0 \quad (1.10)$$

Donde $\boldsymbol{R_1}$ es la constante cinética de desgaste por impacto, la cual depende de la fluidez de la pulpa dentro del molino, tamaño y densidad de las bolas, porcentaje de velocidad crítica de giro del molino y resistencia de las bolas al impacto, entre otras variable (Rivera, 2013).

Igualando las ecuaciones 1.8 y 1.10 resulta:

$$\frac{dw(d)}{dt} = \alpha_1 d\ ;\alpha_1 = \frac{R_1}{3} \quad (1.11)$$

1.5.3 Corrosión - erosión pura en las bolas con desgaste isotrópico

En el caso de corrosión - erosión el desgaste es nuevamente un proceso que sólo compromete a la superficie de las bolas. No obstante, se diferencia de la abrasión pura

en que la constante cinética de desgaste $\boldsymbol{R_c}$ es ahora una función de las condiciones electroquímicas del medio; en efecto, la velocidad de pérdida de masa está regida por la ley de Faraday:

$$\frac{\mathrm{dw(d)}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{M_w I_c}}{\mathrm{cF}} = \frac{\mathrm{M_w i_c}}{\mathrm{eF}}\mathrm{a(d)} = \mathrm{R_c a(d)}$$

(1.12)

Donde $\boldsymbol{M_W}$ es el peso atómico del elemento que se oxida, $\boldsymbol{F_e}$ en este caso, $\boldsymbol{c}$ es el número de electrones transferidos por átomos de $\boldsymbol{F_e}$ que se oxida, $\boldsymbol{F}$ es la constante de Faraday (9.65x10^{4}C/mol), $\boldsymbol{I_c}$ e $\boldsymbol{i_c}$ son la intensidad y densidad de corriente generada por la corrosión de las bolas.

$$F_e = {F_e}^{2+} + 2e^-$$

$${F_e}^{2+} + 2HO^- = F_e(OH)_2;\ E^0 = -0.887\ volts$$

$$F_e = 2OH^- = F_e(OH)_2 + 2e^-$$

Y por la reducción catódica del oxígeno de la pulpa:

$$O_2 + 2H_2O + e^- = 4OH^-\ ;\ E^0 = 0.401\ volts$$

La densidad de corriente de corrosión está ligada al potencial mixto $\boldsymbol{E_M}$, acidez o $\boldsymbol{pH}$, presión del oxígeno disuelto $\boldsymbol{pO_2}$ y actividad de otras especies presentes $\boldsymbol{c_j}$, susceptibles de oxidar al fierro metálico de las bolas.

Combinando las ecuaciones 1.12 y 1.8 se obtiene

$$\mathrm{g(d)} = \frac{\mathrm{d(d)}}{\mathrm{dt}} = \alpha_e;\ \alpha_e = \frac{2\mathrm{M_w I_c(E_M, pH, pO_2, c_j)}}{\mathrm{ceF}}$$

(1.13)

Para condiciones dadas de operación, la ecuación 1.13 es formalmente idéntica a la 1.9. La diferencia radica en que normalmente $|\boldsymbol{a_e}|>>|\boldsymbol{a_A}|$. La dependencia de $\boldsymbol{i_c}$ con las variables independientes señaladas antes, obedece a modelos electroquímicos cinéticos bien establecidos (Rivera, 2013).

1.5.4 Desgaste por mecanismo único con distribución radial de dureza y de microconstituyentes

Las velocidades específicas de desgaste por mecanismo único, con distribución radial de dureza y de microconstituyentes, son funciones del diámetro de las bolas y para ellas rigen las siguientes relaciones:

Abrasión pura: $g(d) = \alpha_A(d)$ (1.14)

Impacto puro: $g(d) = \alpha_I(d)d$ (1.15)

Corrosión - erosión pura: $g(d) = \alpha_C(d)d$ (1.16)

Del trabajo de numerosos autores, como Menacho (1995), Austin *et al*, (1994) se desprende que las relaciones α(d) pueden ser bien representadas por funciones de potencia de d. Ello significa que cualquiera de las 3 ecuaciones precedentes se puede escribir como:

$$g(d) = \alpha d^{\beta} \quad (1.17)$$

Donde α y β son parámetros independientes del diámetro (d) de las bolas. Note que todas las expresiones cinéticas derivadas antes son casos particulares de la ecuación 1.17, que formalmente representa una cinética de desgaste de orden cero con respecto al diámetro (d) de las bolas.(Rivera, 2013).

1.6 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 (1986); Hutchings (1992); 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).

Si las partículas sólidas impactan las superficies, se le conoce como erosión; lo cual puede ser considerado como un mecanismo del desgaste abrasivo de acuerdo con los criterios de ASTM (1992) y Raymond (1994). Por otro lado Bermúdez (2003) afirma que cuando dos superficies están en contacto y movimiento relativo, se presenta el fenómeno de desgaste en ambas, donde una de ellas, es más dañada que otra, esto no solo es debido a las propiedades del material y a las condiciones superficiales; sino que también depende

de la velocidad de contacto, el medio ambiente, el tipo de carga, así como la presencia y naturaleza del abrasivo (Alcántara, 2012).

1.6.1 Manifestaciones del desgaste abrasivo

Al abordar los efectos sobre el desgaste Archard (1953), manifiesta que el mismo es un proceso complejo que se produce en las superficies de los cuerpos debido a la fricción,

trayendo por consecuencia la variación de la micro y macro geometría superficial; de la estructura y de las propiedades físico - mecánicas con o sin pérdida de material. Bowden y Tabor (1950) propusieron que para materiales dúctiles en deslizamiento, en los puntos de contacto individual (puntas de las asperezas) se generan altas presiones que causan soldadura local y las soldaduras formadas son cortadas subsecuentemente por deslizamiento relativo de las superficies, figura 1.1, a esto se le conoce como el mecanismo de adhesión.

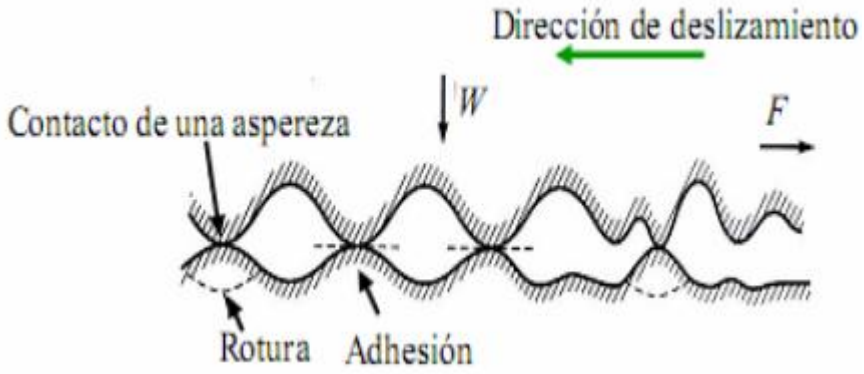


Figura 1.1. Mecanismo de fricción por adhesión durante el deslizamiento de dos superficies rugosas en contacto.

Como se puede observar en la figura 1.1, la rotura ocurre en las regiones más débiles en cualquier parte de la interfase o en uno de los cuerpos unidos. Después de romper los contactos existentes, se forman nuevos contactos. Debido a que la adhesión ocurre a partir de fuerzas moleculares entre las superficies, las fuerzas adhesivas son de la misma naturaleza e intensidad que las fuerzas que existen entre las moléculas del material en volumen (Alcántara, 2012).

Wang (1998) y Kragelski (1982) consideran que el desgaste abrasivo en la industria minera se clasifica en tres categorías de acuerdo al esfuerzo de trabajo al que son sometidas las

superficies en contacto; la primera se conoce como abrasión de bajo esfuerzo, donde las partículas básicamente se deslizan sobre una superficie, sin sufrir grandes impactos; en tanto que la siguiente categoría, la abrasión de alto esfuerzo, resulta cuando el material de gran dureza es retenido entre dos superficies con el fin de triturarlo y la tercera es la

abrasión severa, que se considera dentro del grupo de alto esfuerzo, en la cual se puede observar a simple vista las ranuras o surcos, así como desplazamiento del material que se produce por la intensidad del proceso.

El incremento de la durabilidad de los elementos de máquinas está íntimamente relacionado con la velocidad del desgaste y por ende con la característica dinámica del desgaste. La variación del desgaste con el tiempo (dinámica del desgaste) en su forma más conocida se muestra en la figura 1.2.

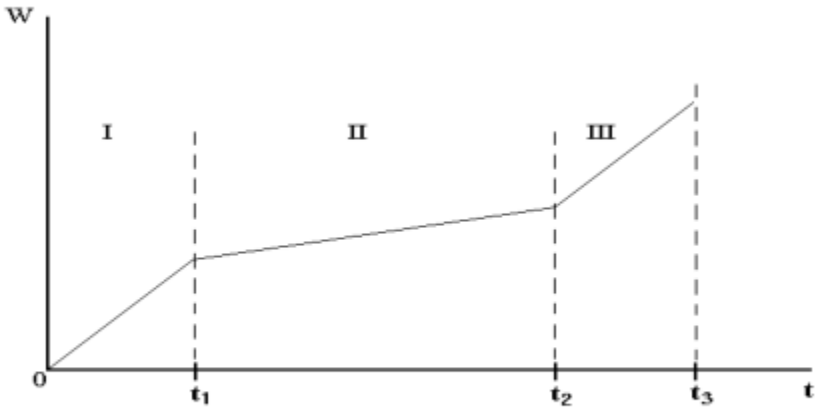


Figura 1.2. Dinámica del desgaste.

La primera etapa (I) es de asentamiento y se caracteriza por un área de contacto real muy pequeña lo que representa altas presiones reales; esto es debido a que solo entran en contacto los "picos" más altos de la rugosidad superficial. El desgaste durante este período es muy intenso y puede tener una influencia apreciable en la durabilidad.

Durante el período de desgaste establecido (II), el área de contacto aumenta debido a la eliminación de los "picos" de la rugosidad superficial. Con el tiempo el desgaste va aumentando hasta llegar a un valor crítico o permisible (III). Cuando se llega a este valor del desgaste se inicia el período de avería de la pieza o unión tribotécnica, el cual se

caracteriza por un incremento de la temperatura, un aumento del nivel de ruido, la presencia de cargas dinámicas (vibraciones), lo cual lleva a un desgaste catastrófico si no se realiza el cambio de la pieza.

Kragelsky (1978) al estudiar el fenómeno de la fatiga superficial y partiendo de la doble naturaleza de la fricción, demostró la influencia de la presión sobre la intensidad del desgaste, concluye que si las superficies no están asentadas (superficies nuevas), la intensidad del desgaste es una función no lineal de la presión. La influencia de la presión de contacto sobre la intensidad del desgaste también fue considerada por Fleischer (1980) quien considera que a partir de la fricción o el estado al que esté sometido la superficie, se diagnostica el tipo de desgaste predominante.

Consideran Verdeja y González (1996), que este es uno de los efectos más destructivos a que están sometidos los aceros, el cual se puede definir como el deterioro a que están sometidos los mismos como consecuencia del uso o del medio ambiente y puede considerarse como un fenómeno superficial donde los esfuerzos tangenciales aunque producen ruptura de los enlaces atómicos no ocasionan, en general, la ruptura del cristal metálico, pues la sencillez y regularidad de la distribución atómica da lugar a que la red se restablezca a cada avance de un espacio interatómico, con lo que la cohesión se restablece y el efecto de los sucesivos deslizamientos produce una deformación plástica, estos esfuerzos normales al vencer la cohesión producen la ruptura total de la red cristalina, ya que ningún restablecimiento de la cohesión es posible (Alcántara, 2012).

Se ha determinado que el comportamiento ante el desgaste de los materiales (Blau, 1992; Tylczak, 1992; Courtney, 2000; Hutchings, 2000 y Allen *et al* 2001) está influenciado tanto por parámetros externos característicos al sistema (velocidad, tamaño y forma del material abrasivo, condiciones ambientales, condiciones de carga), así como por parámetros internos, que dependen de las características mecánicas de los constituyentes del tribosistema (microestructura, módulo de elasticidad, dureza y la tenacidad de fractura), sin embargo, la abrasión también depende del ángulo de impacto del abrasivo.

La acción y penetración de partículas libres de alta dureza producto del medio o del mismo proceso de desgaste en las capas superficiales de los elementos de máquina bajo la

acción de asperezas o partículas y dependiendo de la forma y dimensiones de las mismas; así como de la relación de dureza, resistencia a la rotura y fluencia, módulo de

elasticidad; de las condiciones del medio y de trabajo, de la carga aplicada y del tipo de elemento, se pueden presentar diferentes mecanismos del desgaste abrasivo.

Un precedente sobre desgaste abrasivo fue el de Wirojanupatump (2000), quien realizó pruebas de desgaste, compara el fenómeno de abrasión en condición seca y húmeda, en un acero de medio contenido de carbono, el objetivo fundamental fue determinar el comportamiento de este material cuando se varían los parámetros operaciones, tales como: carga, tamaño, forma y dureza del abrasivo.

Deuis *et al* (1998) realizan una comparación entre el comportamiento del desgaste abrasivo en un medio ambiente seco y uno húmedo empleando abrasivos como la alúmina y arena sílica, el ensayo lo realizó en recubrimientos sobre aluminio, observando que el desgaste en un ambiente húmedo es menor que en el seco, esto lo justifica debido a la generación de calor y consideraciones hidrodinámicas, así como a diferencias en la arena abrasiva.

En relación con el desgaste abrasivo Gatzanis (1993), en sus estudios sobre el empleo de diferentes aleaciones en equipos para la minería, ha investigado las propiedades de abrasión y corrosión del acero al cromo 9 %. Las mediciones de dureza en la superficie desgastada y en el resto del volumen del material no sobrepasaron una diferencia de 2 - 5 %, reflejo de la reducida habilidad de endurecimiento por deformación del material, precisa en esta fuente que es importante establecer que durante el proceso de abrasión, la deformación del material y la fractura eventual ocurren en áreas muy localizadas bajo condiciones de altas presiones y altas razones de deformación.

Por ejemplo Ball (1983) y Lamparter (2000), han reportado que con un incremento de un 30 % en la dureza provoca, sin embargo, un decrecimiento de un 10 % en la resistencia relativa a la abrasión de aceros de mediano contenido de carbono, ya que el acero al presentar mayor dureza se hace más frágil.

En otra importante investigación Zum-Gahr (1981) ha identificado la influencia de las propiedades del material en el desgaste abrasivo, tales como la dureza, el endurecimiento

por deformación, la ductilidad, la anisotropía de los cristales y la inestabilidad mecánica, al considerar, por ejemplo, que la resistencia a la deformación elástica/plástica determina el área de contacto entre la partícula abrasiva y el material. (Alcántara, 2012).

Las curvas de dinámica de desgaste permiten establecer el período de incubación en el que transcurre el endurecimiento por deformación, y se acumula la suficiente energía para la fractura localizada, seguido de un periodo de desgaste acelerado donde ocurren las mayores pérdidas de material, y posteriormente el estado estacionario (Levin, 1995).

1.6.2 Desgaste por partículas abrasivas

Según Hein y Shewmon (1983) se supone que el desgaste en miembros de aceros deslizantes está causado por la presencia de partículas de perlita dispersa entre la ferrita. Estas partículas duras, inicialmente al nivel de la superficie, pueden incrustarse en la región de la ferrita por una cantidad proporcional a la presión aplicada. El efecto de esta presión es abatir la superficie de la ferrita, dejando que las partículas de perlita se proyecten hacia afuera. De esta manera, parece ser únicamente las partículas abrasivas de perlita y la ferrita incorporadas muy cercanas a la superficie, podrían ser removidas durante el principio de desgaste.

En subsecuentes etapas de operación, se forman adhesiones cuando las áreas de las superficies deslizantes se hacen comparables. Es evidente que el desgaste de acero contra acero en presencia de un lubricante es de carácter abrasivo por lo menos en las últimas etapas del pulido de las superficies a cargas altas (Alcántara, 2012).

Han sido aceptados dos modelos estándar para las condiciones de contacto de materiales frágiles masivos. La teoría desarrollada por Evans *et al* (1978), la cual considera condiciones de contacto dinámicas, asume que una partícula esférica penetra en un blanco sin distorsión y la presión de contacto es igual a la presión dinámica que ocurre cuando la partícula golpea la superficie.

Por otra parte, Wiederhon y Lawn (1979) y Lawn *et al* (1979) indicaron que el impacto es análogo a un ensayo de indentación cuasi – estático, en el cual una carga impulsiva es entregada al blanco por una partícula aguda, vía contacto plástico. Ambos modelos

asumen que la tasa de abrasión de estado estacionario sigue una relación tipo potencia (Evans *et al* 1978; Lawn *et al* 1980; Gulden y Rosenblatt 1978).

Sin embargo, es importante mencionar que estos modelos no toman en cuenta las propiedades de la partícula abrasiva, las cuales se considera que tienen un efecto importante sobre la tasa de abrasión (Vaughan y Ball, 1991). Por lo que, Wada *et al* (1992) investigaron el efecto tanto de la dureza de la partícula abrasiva como de la tenacidad de fractura de la partícula abrasiva sobre la tasa de abrasión.

En el estudio se concluyó que este parámetro es fuertemente dependiente de las durezas, de modo que cuando la dureza del par más blando es afectada por la fricción es dominado por un mecanismo de fractura con la formación de grietas laterales (Feng y Ball, 1999), mientras que cuando se incrementan las protuberancias del desgaste abrasivo, el mecanismo de rayado es predominante, criterios análogos a otros investigadores (Shipway y Hutchings 1995, Wada *et al* 1992, Vaughan y Ball, 1991).

Los materiales que presentan abrasión es por la formación e intersección de fracturas frágiles, tales como vidrios inorgánicos impactados por partículas angulares duras que producen agrietamiento local, muestran el máximo de abrasión para un ángulo de incidencia normal (90^0) y una reducción estacionaria a medida que el ángulo disminuye. Sin embargo, esta conversión depende de las propiedades tales como densidad de la partícula y distribución de tamaño (Hutchings, 2000 y Janos *et al* 1999).

1.7 Conclusiones del capítulo

Entonces se puede concluir planteando que el análisis que se realizó de las fuentes bibliográficas consultadas, referidas al desgaste de cuerpos moledores, permite decir que:

Actualmente, el estudio del desgaste de los medios moledores presenta dos enfoques distintos, un enfoque puramente mecánico donde predomina la simulación con herramientas tecnológicas disponibles en la actualidad, como el método de elementos discretos (DEM), y un enfoque basado en el balance poblacional, donde el interés es la determinación de ecuaciones constitutivas de desgaste de cuerpos moledores, siendo este último enfoque el que constituye interés para esta investigación.

El enfoque mecánico no relaciona el desgaste y la recarga de los medios moledores con la cinética de fractura del mineral, lo cual no lo hace muy atractivo a la hora de optimizar las plantas de beneficio de minerales, aunque desde el punto de vista fenomenológico aporta gran conocimiento del proceso de molienda.

Los modelos de desgaste publicados hasta el momento sólo se aplican a fenómenos de desgaste superficiales (abrasión y corrosión), debido a que experimentalmente es muy difícil medir el desgaste por impacto y más aún, es difícil medir el efecto combinado de los diferentes mecanismos de desgaste en el desgaste global.

El enfoque cinético ha centrado su atención en el desgaste de cuerpos moledores de acero, sobre todo porque fenómenos como la corrosión, el astillamiento y el rayado, aportan la mayor cantidad de desgaste en las plantas de beneficio que utiliza este material como medio moledor. Como puede verse, se ha aceptado que el desgaste de las bolas de acero obedece a una cinética de orden cero.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

Para que un material pueda ser rayado o gastado en forma apreciable, es preciso que el abrasivo sea más duro que el material y en algunos casos de desgaste ocurren aun cuando minerales relativamente blandos se frotan contra materiales muy duros, resistentes al desgaste. Sin embargo, por regla general, existe una muy marcada reducción de la tasa de desgaste cuando la dureza del mineral abrasivo es menor que la del material abrasado (Alcántara, 2012).

Objetivo del capítulo

En el capítulo se plantea como objetivo establecer el procedimiento para determinar el comportamiento del desgaste en las bolas de los molinos empleados en la molienda de mineral.

2.2 Características de los molinos de bolas

Los molinos de bolas, tienen las siguientes características:

Capacidad de llenado ---------- 120 t/h
Longitud del molino ---------- 5 700 mm
Diámetro del molino ---------- 3 200 mm
Temperatura del mineral ---------- 50 – 60 ºC
Humedad relativa ---------- 4,5 – 5,5 %
Régimen de trabajo ---------- 24 horas/días
Atmósfera ---------- con presencia de volátiles de petróleo
Petróleo adicionado al mineral ---------- 2 – 4 %
Peso volumétrico del mineral ---------- 1,12 t/m^3
Velocidad de rotación del molino ---------- 17,35 rpm

Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 t por diseño, con la que operan los molinos 201 y

204, la distribución de carga del molino según las dimensiones de las bolas se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Distribución de carga para los molinos 201 y 204

Diámetro	Porciento	Carga (tonelada)	Carga (kilogramo)
100 mm	10 %	5,5 t	5 500 kg
70 mm	10 %	5,5 t	5 500 kg
60 mm	15 %	8,0 t	8 000 kg
40 mm	25 %	13,5 t	13 500 kg
32 mm	40 %	21,5 t	21 500 kg
		54,0 t	54 000 kg

Los molinos 202 y 203, con las mismas características, operan con el 80 % del coeficiente de llenado del molino según carga nominal de diseño (54 t de bolas), encontrándose con 43,2 t de bolas, la distribución de carga para estos molinos según las dimensiones de las bolas se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Distribución de carga para los molinos 202 y 203

Diámetro	Porciento	Carga (tonelada)	Carga (kilogramo)
70 mm	10 %	4,32 t	4 320 kg
50 mm	20 %	8,64 t	8 640 kg
40 mm	23 %	11,66 t	11 660 kg
30 mm	43 %	18,58 t	18 500 kg
		43,2 t	43 200 kg

2.3 Composición química del acero AISI D2

La tabla 2.1, extraída del Databook 1988 y editada por la American Society for Metals, muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, las cuales a su vez, coinciden con el sistema de numeración Unified Numbering System – UNS, de la American Society for Testing Materials – ASTM y la SAE, establece la composición química del acero AISI D2.

Tabla 2.3. Composición química del acero AISI D2

C	Si	Mn	P	Ni
2,3-3,0	0,3-1,5	0,4-1,2	0,00	0,4-1,2
Mo	**Cr**	**S**	**V**	
1,0-3,0	13,0-18,0	0,02	0-0,3	

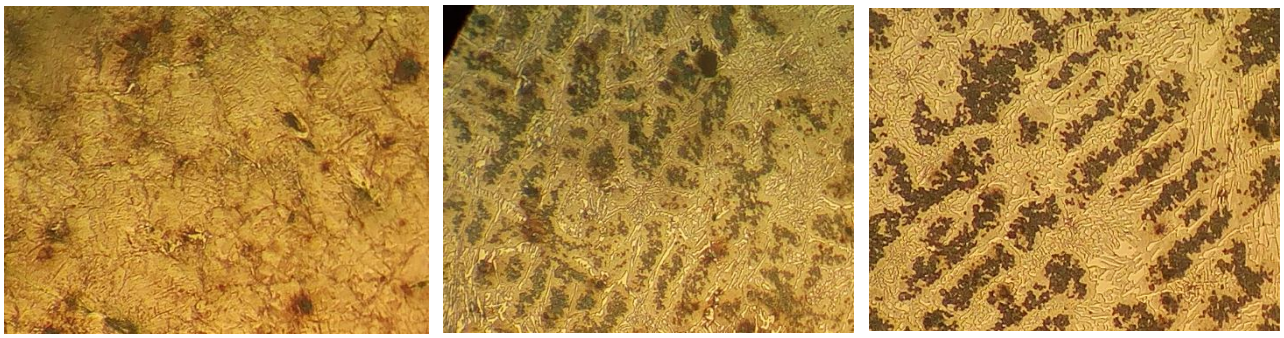
Al igual que el carbono, actúan otros elementos que devienen en intersticiales, debido a su diámetro atómico menor a 2 Å, lo que les da mayor posibilidad de difusión a través de los intersticios de la estructura cristalina del hierro. Estos elementos son el Nitrógeno (d A = 1,42 Å), Hidrógeno (d A = 0,92 Å), Boro (d A = 1,94 Å), Oxígeno (d A = 1,20 Å). Va a ser esta posibilidad de difusión intersticial la responsable de una gran cantidad de posibilidades tecnológicas y variantes de propiedades en el acero, especialmente las vinculadas al endurecimiento, gracias a la solución sólida intersticial de carbono en hierro.

Por otro lado, otros elementos como el cromo, níquel, titanio, manganeso, vanadio, cobre, con diámetros atómicos cercanos al del hierro, formarán soluciones sólidas sustitucionales en un intervalo que dependerá de la semejanza de estructura cristalina, de la afinidad química y de las valencias relativas. Estas soluciones sustitucionales son las más frecuentes y numerosas entre las aleaciones, especialmente en el acero. Las propiedades de la ferrita y la austenita aleadas varían a medida que aumentan en ellas el contenido de estos elementos de aleación, el Mn; Si y Ni, incrementan la dureza y el límite de rotura de la ferrita, la austenita puede formar conjuntos intermetálicos (Alcántara, 2012).

2.4 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 2.1, 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.

a **b** **c**



Figuras 2.1 Muestras patrones de las bolas

c

Puede observarse en la microestructura de la figura 2.1 (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 2.1 (b) y 2.1 (c) presentan microestructuras dendríticas, en forma de collar rodeando a la fase austenítica y en bordes de grano, mostrando una precipitación parcial. En ambos 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.

2.5 Caracterización de la capa deformada en las bolas

Las bolas de la figura 2.2, las cuales se emplean en los molinos rotatorios para la molienda del material laterítico, presentan un diámetro de 48,52; 44,76 y 47,47 mm respectivamente. Luego del proceso de desgaste por efecto de la fricción entre los elementos triturantes, el material y la superficie interior del molino, se forma una capa en toda la superficie de la bola, la cual está directamente en contacto con los elementos deformantes.

Figura 2.2 Muestra de las bolas empleadas en los molinos

2.6 Carga del molino sobre las bolas

Es una influencia a considerar en el desgaste superficial de las bolas y en consecuencia con la formación de la capa, así como la deformación reticular, tamaño de grano y sobre el efecto de endurecimiento que se produzca. Es una magnitud que se relaciona con las propiedades a obtener en las bolas para el incremento de la resistencia al desgaste y la fatiga. Se considerará una carga de 54 t. Las cargas se establecen en consideración al trabajo del molino sin carga y con carga (Alcántara, 2012).

2.7 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 (Alcántara, 2012).

2.8 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.

Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los

experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos.

Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible (porque los errores aleatorios de las respuestas se promedian). La experimentación más económica (mínimo número de experimentos) es aquella en la que cada factor toma sólo dos valores (niveles). Y la que proporcionará la información con menor incertidumbre es aquella en la que estos valores son los extremos del dominio experimental, –1 y +1 (Alcántara, 2012).

2.9 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 provocar transformaciones en la estructura por cambios de fase. Las probetas fueron normadas según norma ASTM E 646 – 00, figura 2.3.

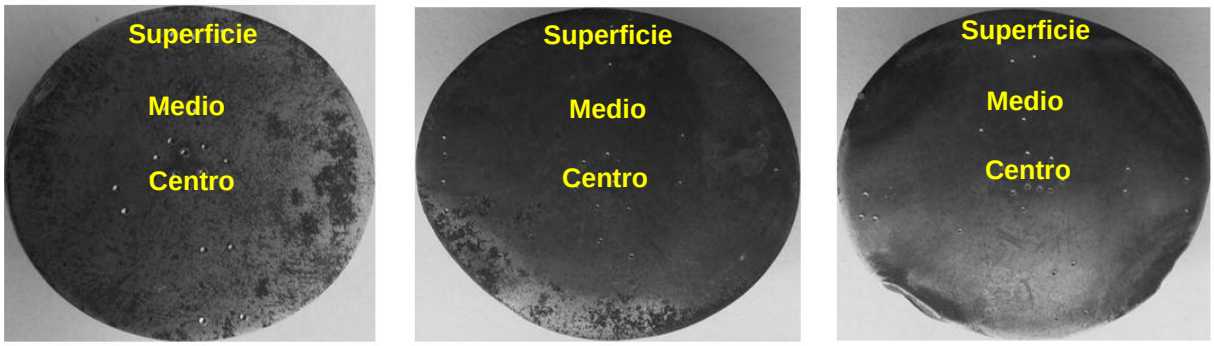


Figura 2.3 Muestras del corte realizado a las bolas

2.9.1 Ensayo de microdureza

En la medición de la microdureza 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.

2.9.2 Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son devaste, pulido y lavado (ASTM E 3 – 95 y Norma NC 10 – 56: 86).

2.9.3 Desbaste y pulido

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 90º 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 emplearon las técnicas 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 debe 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.

2.10.1 Determinación del desgaste lineal

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.

$$W_h = k * t \quad (2.1)$$

Donde:

W_h ------ desgaste lineal; mm

t ------ tiempo de trabajo; hr

De esta manera el coeficiente del desgaste se determina como:

$$k = \frac{H_a}{H_g} \leq 0{,}6 \quad (2.2)$$

Donde:

K ----- coeficiente del desgaste

H_a-----dureza del material abrasivo; HV

H_g----- dureza del material desgastado; HV

Tenembaum (1966) determinó que esta relación en los acero 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 la superficie del material desgastado. 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:

$$\acute{W} = \frac{Wh}{t} \quad (2.3)$$

Donde:

$\acute{W}$- 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:

$$D_p = R\left(\frac{\pi * HV}{2F_n}\right)^{0.5} - \left(\frac{\pi * HV}{2F_n} - R^2 - 1\right)^{0.5} \quad (2.4)$$

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 µm, entonces la deformación plástica es por rayado (Alcántara, 2012).

2.11 Consideraciones para realizar pruebas de desgaste abrasivo

El ensayo típico para el desgaste abrasivo es el llamado “roll paper”, donde un cilindro con papel de lija en la superficie, con el que conociendo las condiciones y parámetros del ensayo tales como velocidad en rev/min, tipo de abrasivo y peso de la carga, se podrá conocer el comportamiento posterior del material controlando la pérdida de masa y el espesor en la probeta. Este ensayo se realiza según la norma ASTM G65 – 81 y también tiene una variante en la que se utiliza un cilindro o rodillo de goma y se va tirando un mineral abrasivo habitualmente sílice y controlando igualmente la pérdida de masa en la probeta (Alcántara, 2012).

2.12 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 del desgaste. Este generalmente se determina partiendo del indicador lineal del desgaste.

$$W_v = W_h * A_n \quad (2.5)$$

Donde

W_v- desgaste volumétrico; mm^3

A_n– área nominal de las bolas; mm^2

Entonces el área nominal se determina como:

$A_n - 4\pi r^2$

2.13 Muestreo aleatorio simple

Este procedimiento se aplica con el objetivo de determinar el tamaño de la muestra mínimo, que permita tener en cuenta las posibilidades de analizar de una manera más eficiente los datos. El tamaño de la muestra se determinó tomando como referencia el siguiente cálculo (Miller *et al*., 2005).

$$n = \left(Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right)^2 \quad (2.6)$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$ – Es el estadístico de la distribución normal,

α – Es el nivel de significancia.

σ – Es la desviación típica poblacional

E- Es el error máximo de estimación

La aleatoriedad de los resultados se aseguró en este trabajo con el empleo de la tabla de números aleatorios. Se escogieron las bolas para realizar las mediciones del diámetro y la dureza por coincidencia con la serie de número aleatorio.

2.14 Diseño del experimento

Para efectuar el diseño del experimento se tuvo en cuenta que es importante asegurar la simplicidad y la conducción de este tal que sea económico y eficiente. Se debe hacer todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental (Hernández, 1997 y Chacín, 2000).

Para la determinación del desgaste de las bolas en las condiciones de trabajo del molino rotatorio se efectúo un diseño de experimento completamente aleatorio. Las variables consideradas fueron los diámetros de las mismas (D) y sus durezas (H). Los diámetros se determinaron después de retiradas del molino, al igual que la dureza.

2.14.1 Selección de las variables de entrada y sus niveles

Se escogió la variable bola, porque además de ser el elemento esencial en el proceso de molienda, es el que permite determinar la variación que experimentan los diámetros y la dureza de las mismas una vez retiradas de los molinos. Con el incremento del tiempo de explotación de dichas bolas es de esperar que haya diferencia en los diámetros y la dureza, lo que se traduce en variaciones del nivel de desgaste. Se seleccionaron tres niveles para la variable bola, sobre la base de la representatividad que se asegura con tal tamaño de muestra y consideraciones de índole económicas.

2.14.2 Caracterización de las variables de salida

Se escogieron las variables diámetro y dureza para caracterizar el problema que presentan las bolas de los molinos por el hecho de que estas indican el grado de utilización de las mismas y además permitirán definir la significación del desgaste que se ha presentado en las bolas que se analizan. Las variaciones que se producen en relación con las mediciones de los diámetros de las bolas después de su proceso de explotación se determinaron a través de las siguientes expresiones, de acuerdo con Prieto (2014).

$$\Delta D_{abs} = \overline{D}_{desp} - \overline{D}_{antes} \quad (2.7)$$

Donde:

ΔD_{abs}- Variación absoluta del diámetro de las bolas, mm.

$\overline{D}_{desp}$- Diámetro de las bolas después del proceso de explotación, mm.

$\overline{D}_{antes}$- Diámetro de las bolas antes del proceso de explotación, mm.

$$\Delta D_{rel} = \left|\frac{\overline{D}_{desp} - \overline{D}_{antes}}{\overline{D}_{antes}}\right| * 100\ \% \quad (2.8)$$

Donde:

ΔD_{rel}- Variación relativa del diámetro de las bolas, %.

Los resultados que se obtuvieron en el cálculo del desgaste de las bolas por medio de la ecuación 2.7, se sustituyen en la ecuación 2.1 para efectuar la determinación del tiempo

que estuvieron las bolas en explotación. Lo que permite dar una medida de la durabilidad de las correspondientes bolas.

Sobre la base de lo planteado anteriormente en este trabajo se precisa la significación del desgaste de las bolas, objetos de estudio, y se establece la relación entre el desgaste y la variación de la dureza superficial.

2.14.3 Matriz de planificación del experimento

En total, para el desarrollo de los experimentos se efectuaron 36 pruebas, 2 experimentos diferentes, seis réplicas para cada uno. Las 36 pruebas se identificaron con números del 1 al 6 siguiendo el momento de la prueba. La letra D para las mediciones referidas a los diámetros y la H para dureza, todas estas pruebas fueron realizadas a las bolas después de retiradas de explotación. La matriz de planificación de experimentos se expone en la tabla 2.4.

Tabla 2.4.Matriz de planificación del experimento

Bola # 1	Bola # 2	Bola # 3
D_{11} y H_{11}	D_{12} y H_{12}	D_{13} y H_{13}
D_{21} y H_{21}	D_{22} y H_{22}	D_{23} y H_{23}
D_{31} y H_{31}	D_{32} y H_{32}	D_{33} y H_{33}
D_{41} y H_{41}	D_{42} y H_{42}	D_{43} y H_{43}
D_{51} y H_{51}	D_{52} y H_{52}	D_{53} y H_{53}
D_{61} y H_{61}	D_{62} y H_{62}	D_{63} y H_{63}

2.15 Límites de tolerancia

Para brindar cierta información vital en la solución de problemas de ingeniería, se necesita reunir datos, esos datos se deben describir y tener en cuenta para producir información resumida. Con frecuencia, las representaciones gráficas pueden ser el medio más eficaz de comunicar esa información. Para analizar los datos obtenidos durante la determinación del diámetro exterior de las bolas, se aplica una de estas técnicas gráficas: El diagrama para control de mediciones.

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectúa aplicando las expresiones matemáticas que se refieren a continuación (Hernández, 1986).

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n}$$

(2.9)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \overline{X})^2}{n-1}}$$

(2.10)

$$LT_{máx} = \overline{X} + t_{\alpha/2} \cdot S$$

(2.11)

$$LT_{mín} = \overline{X} - t_{\alpha/2} \cdot S$$

(2.12)

Donde:

$\overline{X}$ - Media aritmética del diámetro exterior de las bolas ($\overline{D}$), mm.

t - Estadístico de la distribución probabilística de Student, y se determina en la tabla 4 del libro Probabilidad y estadística para ingenieros (Miller *et al.,* 2005) en función del nivel de significancia (α)

S - Desviación típica.

n - Total de observaciones.

α- Nivel de significancia.

En caso que hubo valores anormales, los mismos se eliminan procediendo como se indica a continuación (Hernández, 1986):

1. Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan $\overline{X}$ y S (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos).
2. Se establece el intervalo dado por la ecuación $LT = \overline{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot S$ y se elimina por considerarse como anormales todos los valores que queden fuera del intervalo establecido.

3. Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar, como es lógico, los valores anormales.

Si la muestra es grande se debe cambiar el estadístico t conocido como el estadístico de probabilidad de Student por el estadístico de la distribución de Gauss. El estadístico Z se determina en tabla 3 del libro Probabilidad y estadística para ingenieros (Miller *et al*, 2005).

2.15.1 Análisis de varianza

El análisis de varianza implicó el considerar los supuestos de aleatoriedad, normalidad y homogeneidad de la varianza. La aleatoriedad está referida a la obtención de resultados representativos y objetivos del comportamiento de la variable; la normalidad se refiere al control de la variabilidad en cada tratamiento y la homogeneidad expresa la igualdad de la variancia entre cada tratamiento, las cuales van a estar determinadas por la influencia de las causas que introducen variación en los resultados.

1. Análisis de Hipótesis:

Hipótesis nula, $\mathrm{Ho}:\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna, $\mathrm{Ho}:\mu_1 \neq \mu_2$

2. Nivel de significancia: $\alpha = 0{,}05$

3. Criterio de rechazos de la Hipótesis nula (Ho):

Se rechaza la Ho si $F>Fc$; es el valor de $F_{0,05}$ para (k-1) y k (n-1) grados de libertad donde F se determina por la tabla de análisis de varianza.

4. Cálculo:

Tabla 2.5 Fórmulas para el análisis de varianza

Fuente de variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Fischer
Tratamientos	(k-1)	SS(Tr)	SS(Tr)/ (k-1)	[SS(Tr)/ (k1)]/ [SSE/ K(n-1)]
Error	K(n-1)	SSE	SSE/ K(n-1)	

Total	(k*n-1)	SST		

$$C = \frac{T^2{}_i}{k*n} \quad (2.13)$$

Donde:

C: término de corrosión

$T^2{}_i$: número total de n observaciones en la i – ésima muestra

k: cantidad de tratamientos

n: tamaño de muestra por tratamientos

$$SST = \sum_{I=1}^{K} * \sum_{J=1}^{N} * Y^2{}_{ij} \quad (2.14)$$

Donde:

SST: suma de cuadrado total.

$Y^2{}_{ij}$: variable que adquiere el valor de cada observaciones.

$$SS(Tr) = \frac{\sum_{I=1}^{K} * T^2{}_i}{n} - C \quad (2.15)$$

Donde:

SS (Tr): suma de cuadrado para tratamientos.

SSE=SST- SS (Tr) (2.16)

Donde:

SSE: suma de cuadrado del error.

5. La decisión se plantea sobre la base del criterio del rechazo de la hipótesis nula definida en el paso 3 y el nivel de significancia precisado en el paso 2.

2.15.2 Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado, el cual se basa en el ajuste de una curva al conjunto de puntos ordenados, tal que se logra

minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller *et al.* 2005), la cuales se muestran a continuación.

$$\sum_{i=1}^{n} Y_i = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i \quad (2.17)$$

$$\sum_{i=1}^{n} X_i \cdot Y_i = a \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i + b \cdot \sum_{i=1}^{n} {X_i}^2 \quad (2.18)$$

Donde:

X_i: es la variable que adquiere los valores de las axisas.

Y_i: es la variable que adquiere los valores de las ordenadas.

En este conjunto de ecuaciones lineales a y b son las incógnitas, y dan los valores de la a y b para la línea con el mejor ajuste a un conjunto de datos apareados de acuerdo con el criterio de mínimos cuadrados.

Este sistema de ecuaciones tiene como solución las siguientes expresiones para el cálculo de a y b.

$$a = Y - b \cdot X \quad (2.19)$$

Donde:

Y: es el promedio aritmético de las observaciones referidas a las ordenadas.

$$b = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}$$

Notaciones especiales

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^{n} {X_i}^2 - [\sum_{i=1}^{n} X_i]^2 / n \quad (2.20)$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot Y_i - \frac{[\sum_{i=1}^{n} X_i] \cdot \sum_{i=1}^{n} Y_i}{n} \quad (2.21)$$

La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó utilizando tres criterios: el del coeficiente de determinación, de Student, y el de Fisher. Se consideró que el ajuste es significativo: según el criterio de Student, cuando se cumplió que p-Valor es inferior al nivel de significancia adoptado en la prueba; según el criterio

de Fisher, cuando el Fisher de cálculo es mayor que el Fisher crítico o tabulado y según el criterio del coeficiente de determinación, cuando el valor de este estuvo próximo a 1 ó -1.

En el Software Excel se utilizó la herramienta para análisis de datos que contiene programado la opción regresión, la misma permitió realizar el ajuste de curva con el método de mínimo cuadrado y chequear los tres criterios de bondad del ajuste.

2.16 Análisis económico

Como plantea Omarov (1976), el análisis económico consiste en la forma más fundamental del control de la empresa y sus uniones, de la utilización de recursos materiales, laborales y financieros de las mismas. Es por eso que se tendrán en cuenta los principales procedimientos que caracterizan el análisis económico en el trabajo de caracterización del desgaste de las bolas para cumplir con el control de los recursos y los diferentes costos que puedan presentarse en este proceso. A través de esto, se pueden definir las diferentes expresiones que caracterizan este análisis económico.

2.17 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.

$$Cam = Far \cdot Cur; CUC \tag{2.22}$$

Donde:

Far - Frecuencia anual de recarga del molino.

Cur - Costo de las bolas €.

2.18 Conclusiones del capítulo

Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías, software y equipamientos novedosos que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.

Las ecuaciones desarrolladas caracterizan el comportamiento del desgaste abrasivo en función del carácter de la fricción de los cuerpos en contacto y posibilitan la estimación de la dureza en el acero AISI D2 tratado térmicamente cuando es sometido a este proceso.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Introducción

Se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas estadísticas que describen las regularidades del comportamiento de las bolas de los molinos, elaboradas de acero AISI D2 sometidas a

la acción de desgaste abrasivo ante cargas de trabajo y su posterior incremento en la dureza superficial de las mismas.

Objetivo del capítulo

El objetivo de este capítulo es establecer el comportamiento microestructural, así como el procedimiento metodológico que caracteriza el desgaste abrasivo en las bolas de los molinos empleadas en la molienda de mineral, las cuales están fabricadas de acero AISI D2 tratadas térmicamente y deformadas en frío.

3.2 Análisis de la composición química del material empleado en las bolas

Se tomaron tres bolas, las cuales estuvieron sometidas a la acción de trabajo continuo, una vez que las mismas se pusieron fuera de explotación por perder su configuración geométrica. La composición química se tomó como resultados de tres chispas para obtener el promedio de cada una de ellas, se realizó empleando un espectrómetro cuántico de masa, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón, ubicado en el laboratorio del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, Moa. La misma se relaciona a continuación en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

Tabla 3.1 Composición química de la bola # 1

C	Si	Ti	Mn	V	P
1,45	0,60	0,0027	0,60	0,00	0,030
Mo	**Cr**	**S**	**Cu**	**Zn**	**Fe**
0,72	11,14	0,030	0,0015	0,0074	82,46

Tabla 3.2 Composición química de la bola # 2

C	Si	Mn	P	S	Cr
1,536	0,531	0,329	0,023	0,088	14,17
Mo	**Ni**	**Cu**	**W**	**Fe**	
0,094	0,116	0,021	0,06	80,77	

Bola # 2

Tabla 3.3 Composición química de la bola # 3

C	Si	Mn	P	S	Cr
1,603	0,369	0,349	0,016	0,043	14,06
Mo	**Ni**	**Cu**	**W**	**Fe**	
0,082	0,144	0,020	0,07	81,13	

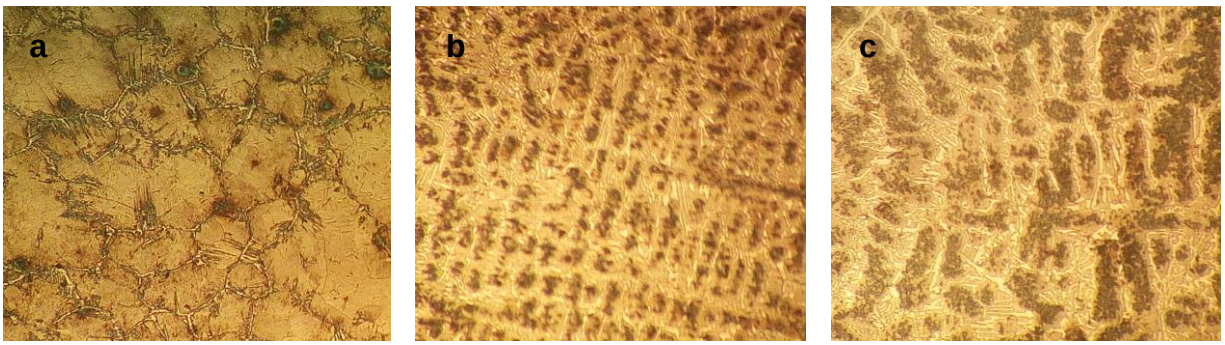
Según las composiciones químicas obtenidas y la que se muestra en la tabla 2.1 del capítulo 2, se determinó que el material de las bolas se corresponde con la de un acero del tipo AISI D2 según norma ASTM A 681.

3.3 Análisis de las microestructuras

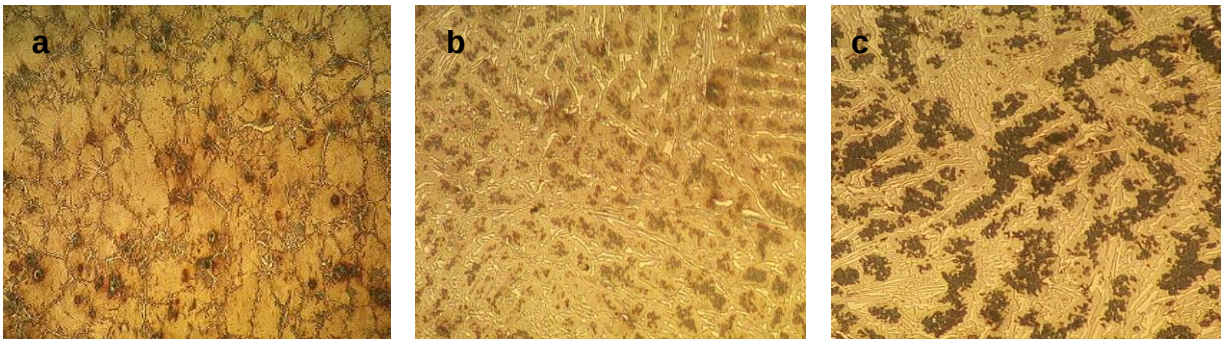
Para el análisis microestructural se tomaron las muestras de las capas que se forman en las bolas por efecto de la carga del molino y por el desgaste abrasivo al cual están expuestas, primero se analizó la superficie (figura 2.3 del epígrafe 2.8) siendo esta la capa deformada en cada medio moledor.

En este análisis se tomó como muestra de comparación las microestructuras patrones analizadas en el epígrafe 2.3 del capítulo 2.

Las figuras 3.1, se corresponden con las superficies de las bolas donde se produce el desgaste, y las 3.2 con los puntos medio los cuales se encuentran entre los centros y las superficies de las mismas (figura 2.3 del epígrafe 2.8)



Figuras 3.1 Muestras de las superficies



Figuras 3.2 Muestras de los puntos medios

En figura 3.1 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 3.1a), 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 3.2b y 3.2c, no cambian tampoco su morfología, pero de igual manera que en la figura 3.2a ha disminuido el tamaño de grano, 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 microdureza de las bolas (29,25, 50,42 y 48,25 HRC) por el fenómeno de la acritud, lo que guarda similitud con los resultados obtenidos por Alcántara *et al* (2008a; 2008b) en pasadores de Acero AISI 1045.

3.3.1 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 diferentes lugares de las superficies de las bolas. La dureza en las capas que se forman en las bolas deterioradas se puede observar en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Dureza en las capas deformadas

Capas	Parte	Dureza (HRC)
	Superficie de la bola	29,25 HRC
Superficie de la bola 1	Parte media	26,33 HRC
	Centro de la bola	22,75 HRC
	Superficie de la bola	50,42 HRC
Superficie de la bola 2	Parte media	50,17 HRC
	Centro de la bola	48,17 HRC
	Superficie de la bola	48,25 HRC
Superficie de la bola 3	Parte media	48,08 HRC
	Centro de la bola	40,17 HRC

3.4 Análisis del desgaste en las bolas

Para determinar el desgaste lineal en las bolas se consideró la ecuación 2.1, 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 2.2 es igual a 1,75 para la primera bola, a 1,01 para la segunda y a 1,07 para la tercera. La primera bola alcanza un desgaste de 42,0 mm, la segunda de 24,2 mm y la tercera de 25,7 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 alta cantidades en los suelos; así por ejemplo el óxido de sílice (arena de cuarzo) con dureza HV = 10 000/12 500 MPa constituye entre el 40 – 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, según lo reportado por Rojas (2001).

La velocidad del desgaste en las bolas se determinó considerando el desgaste lineal W_h para los diferentes tiempos de trabajo, al sustituir estos valores en la ecuación 2.3 se tiene que la bola 1 se gasta a una velocidad de 0,48 mm/h, la bola 2 a 0,64 mm/h y la tercera a 0,52 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 2.4 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 (HV = 3 000, 5 200 y 4 900 MPa), fuerza nominal de 529 200 N, como resultado se obtuvo que el grado de penetración para la primera bola fue de 1,02 μm, para la segunda de 0,97 μm y para la tercera fue de 0,95 μm 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.

3.5 Análisis del cálculo para determinar desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo se puede determinar mediante la ecuación 2.5, partiendo del indicador lineal de desgaste y calculando el área nominal desgastada en las bolas, una vez retiradas del proceso de molienda para ello tenemos que el desgaste volumétrico calculado para la bola 1 es de 44 910 mm^3, el de la bola 2 de 76 398 mm^3 y el de la bola 3 de 52 876 mm^3. Se han obtenido diferentes valores de resistencia al desgaste en cada una de las capas que se han observado en las diferentes bolas, lo que demuestra que la resistencia al desgaste se incrementa con el aumento de la dureza.

Como fue observado en el análisis estructural, 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 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).

3.6 Análisis estadístico de los resultados

El muestreo aleatorio simple es el procedimiento que permitió determinar el tamaño mínimo de la muestra que asegura los requisitos de representatividad especificada, y para eso se utiliza la ecuación 2.6 del epígrafe 2.12. Se escoge un nivel de confianza del 90 % para el establecimiento del estadístico crítico (Z_α). La tarea consistió en definir la especificación de precisión y exactitud tal que se asegure un tamaño de muestra igual a tres, para un nivel de confianza del 90 % y asumiendo una desviación típica igual al error máximo de estimación se obtiene que el tamaño de la muestra necesario es de tres unidades.

3.6.1 Análisis de la varianza

En el caso que ocupa se asegura el cumplimiento del supuesto de aleatoriedad de las observaciones mediante el empleo de la tabla de número aleatorio, es decir de un lote de bolas se selecciona una muestra de tamaño 3 por coincidencia con la serie de la tabla de número aleatorio. El supuesto de homogeneidad de la varianza no se verifica basado en los siguientes argumentos: Miller *et al*, (2005) plantean que la prueba de Fischer es poco sensible a la violación de la homogeneidad de la varianza, esto es que se obtienen resultados bastantes confiables aun violándose dicha condiciones; además, Montgomery (2002) refiere que se hace más necesario la verificación del cumplimiento del supuesto de homogeneidad cuando el experimento es desbalanceado, esto es cuando la cantidad de observaciones por tratamiento no es la misma.

Las tablas 3.5 y 3.6 muestran los resultados de las mediciones realizadas para la determinación del diámetro y la dureza de las tres bolas seleccionadas, con arreglo al plan de diseño estadístico experimental.

Tabla 3.5. Resultados de los diámetros.

Diámetros, mm		
Bola 1	Bola 2	Bola 3
49,34	44,22	46,48
44,9	44,22	48,36
49,18	45,3	48,36
49,36	45,26	46,56
49,18	45,56	47,92
49,18	43,99	47,16

Tabla 3.6. Resultados de las dureza

Dureza, HRC		
Bola 1	Bola 2	Bola 3
21	51	48,5
29	51	50,5
31	51	48,5
32	51	48,5
32	48,5	48
30,5	50	45,5

En la tabla 3.7 y 3.8 se muestran los resultado
desarrollo del procedimiento para la prueba de Fischer, utilizando las ecuaciones desde la 2.13 a la 2.16. El correspondiente análisis permitió inferir si existen diferencias significativas o no en el comportamiento de las variables que se comparan (Dureza y diámetro), al nivel de confianza del 95 %.

Tabla 3.7. Resultados del cálculo de Fischer para la comparación de los diámetros.

Análisis de varianza					
Origen de las variaciones	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Crítico para F
Tratamientos	2	45,30	22,65	15,56	3,68
Error	15	21,84	1,46		
Total	17	67,14			

Tabla 3.8. Resultados del cálculo de Fischer para la comparación de la dureza.

Análisis de varianza					
Origen de las variaciones	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Crítico para F
Tratamientos	2	1627,44	813,72	115,19	3,68

Error	15	105,96	7,06		
Total	17	1733,40			

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior se formula la siguiente decisión:

- Puesto que el valor de Fischer calculado es mayor que el valor de Fischer crítico para el diámetro de las tres bolas la hipótesis nula se rechaza, en otras palabras existen diferencias significativas entre los diámetros de las bolas de los molinos para la trituración del material, después de la puesta en explotación al nivel de confianza es del 95 %.
- Puesto que el valor de Fischer calculado es mayor que el valor de Fischer crítico para la variable dureza de las tres bolas la hipótesis nula se rechaza, es decir existen diferencias significativas entre los valores de la dureza superficial de las bolas de los molinos para la trituración del material, después de la puesta en explotación al nivel de confianza es del 95 %.

3.6.2 Límites de tolerancia

Las tablas 3.9 y 3.10 muestran los rangos de variación del diámetro y la dureza superficial de las tres bolas que fueron objeto del muestreo, respectivamente. Los límites de tolerancias indicados se determinaron utilizando las expresiones de la 2.9 a la 2.12, expuestas en el capítulo anterior, para un nivel de confianza del 95 % y 5 grados de libertad.

Tabla 3.9. Rango de variación de los diámetros.

	Bola 1	Bola 2	Bola 3
Límite máximo	53,10	46,53	49,68
Límite mínimo	43,94	42,99	45,26
Media	48,52	44.76	47.47

Tabla 3.10. Rango de variación de las durezas.

	Bola 1	Bola 2	Bola 3
Límite máximo	59,29	53,04	52,36
Límite mínimo	18,48	47,80	44,14
Media	29,25	50,42	48,25

El análisis de los resultados indicados en las tablas anteriores permite inferir que el proceso de medición realizado para la determinación tanto del diámetro como de las durezas de las bolas estuvo bajo control estadísticos, puesto que todos los correspondientes valores mostrados en la tabla 3.5. y 3.6 están incluidos en los límites de tolerancias calculados. Por lo que se puede considerar que las correspondientes medias son representativas de las tendencias del comportamiento de la variable.

3.7 Ajuste de curvas

En la tabla 3.11 se muestran los valores promedio obtenidos de la dureza y el diámetro de las bolas después de la puesta en explotación. Los resultados mostrados se fundamentan en los límites de tolerancias indicados, para un nivel de confianza del 95 % y 5 grados de libertad, de lo que se pudo inferir que las correspondientes medias son representativas de las tendencias del comportamiento de las variables medidas.

Tabla 3.11. Diámetro y dureza de las bolas después de su explotación.

Observaciones	Diámetros (después)	Durezas (después)
1	48.52	29.25
2	44.76	50.42
3	47.47	48.25

La figura 3.3 muestra el comportamiento del diámetro de las bolas en función de la dureza superficial. Se observa que la dureza aumenta con la disminución del diámetro, o sea a media que se desgastan las bolas su dureza va incrementándose.

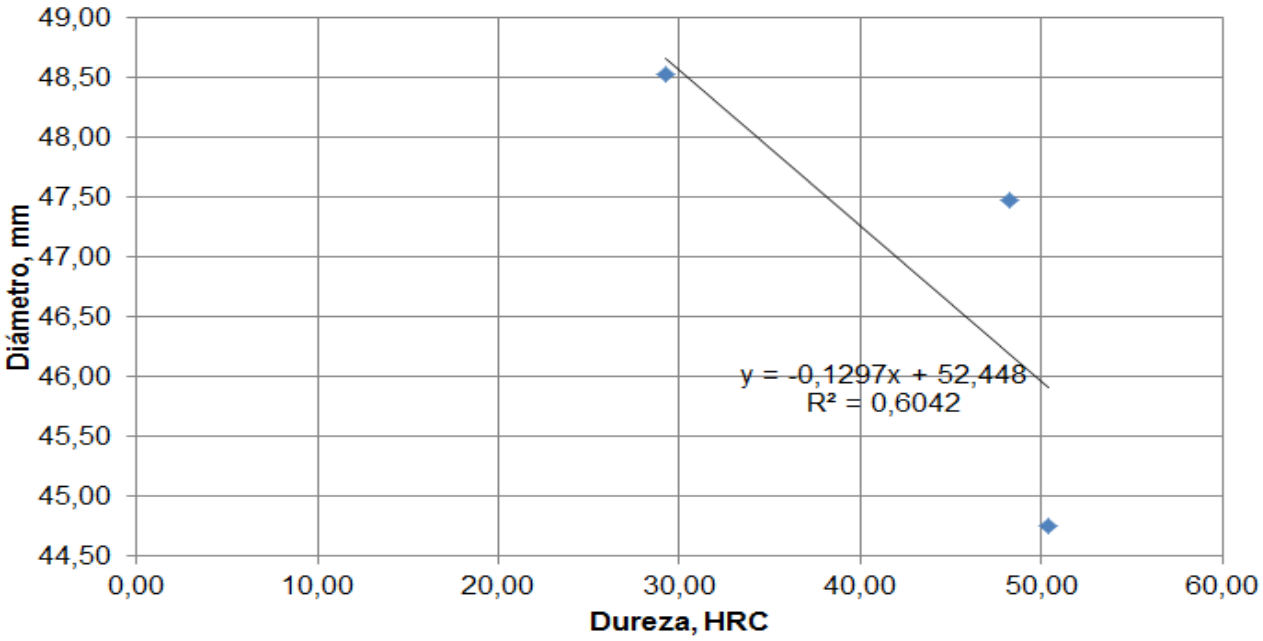


Figura 3.3. Comportamiento del diámetro de las bolas en función de la dureza superficial.

La tabla 3.12 muestra el modelo matemático que relaciona al diámetro de las bolas con la dureza superficial y los criterios de idoneidad del modelo ajustado. Se aprecia que la representación de la relación entre la dureza superficial y el diámetro por un modelo lineal no es significativa al nivel de confianza del 95 %, puesto que se cumplen con todos criterios de idoneidad, o sea el coeficiente de correlación no está próximo a la unidad, el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico y la probabilidad para la intersección y para la variables no son menores que 0,05.

Tabla 3.12**.** Relación entre la dureza y el diámetro.

Modelo	Parámetros	Criterio de idoniedad	Ec.
$D = -0{,}1297 \cdot H + 52{,}448$	D- es el diámetro de las bolas, mm. H- es la dureza,	R^2= 0,60 F=1,53 y F=0,43 Intercepción= 0,06	3.1

HRC. Pvariable= 0,43

La figura 3.4 muestra el modelo determinado por línea de tendencia para el pronóstico de los valores del diámetro cando se conocen valores de dureza. Se observa que el modelo parabólico se ajusta significativamente a los datos, puesto que el coeficiente de determinación está próximo a 1 (0,95), lo que indica que el 95 % de las variaciones del diámetro pueden ser explicada por las variantes de la dureza con el modelo propuesto.

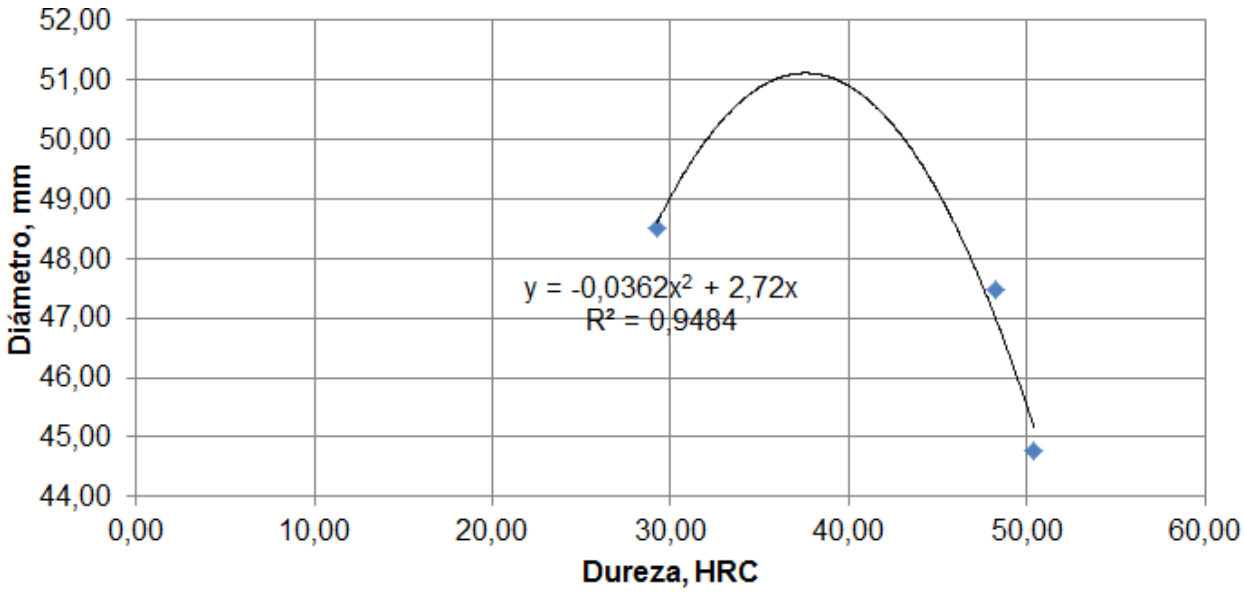


Figura 3.4. Comportamiento del diámetro de las bolas en función de la dureza superficial.

3.8 Determinación del efecto económico

Al abordar la valoración técnico económico del proceso de desgaste abrasivo en las bolas, se parte del hecho que durante la fabricación de muestras intervienen en el mismo proceso de maquinado como: corte, preparación de 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 maquina en general.

Para la estimación de los costos de fabricación que se desean determinar se parte de la metodología del cálculo del costo de fabricación conocida como “Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que en formato de hoja de cálculo se utiliza como Norma empresarial en la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa, para calcular las fichas de costo. Dicho documento, elaborado conjuntamente por los Ministerios de Finanzas y de Economía y Planificación, es por el cual se rige la empresa, realizando sus adecuaciones según las características particulares de cada tipo de pieza.

La metodología empleada está destinada para el estimado del cálculo del costo de fabricación para diferentes procesos tecnológicos que se llevan a cabo en dicha industria, posee además una amplia y actualizada base de datos que comprende tarifas salariales, máquinas herramienta y sus consumos de energía eléctrica, precios de materiales, entre otros, resulta factible emplear esta norma por cuanto posee una base de información de larga data en dicha empresa.

Los costos generales que se generan durante el proceso de elaboración de las muestras son:

Costo total de materiales: $ 26,012

Costo por operario: $ 21,28

Salario complementario: $ 2,128

Aporte a la seguridad social: $ 23,408

Gasto de energía eléctrica: kW 17,1

Costo de la energía eléctrica: $ 177,81

3.9 Costo de las bolas del molino

Según el manual de precios oficiales de la empresa Importadora del Níquel, el costo total de las bolas importadas que utilizan los molinos, es de 50 120 €; 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 €. Todo lo anterior incurre en un costo total de 60 334,40 €.

El cambio de las bolas se realiza en un tiempo de cinco meses, realizando un cambio de bolas dos veces por año, esto implica un costo de. Si se incrementa la dureza de las bolas hasta 590 HV (54 HRC), se alargaría la vida útil de las mismas, presumiblemente el cambio se realizaría cada entonces existiría un ahorro de.

3.10 Aporte en la dimensión ambiental

La industria extractiva en lo que se refiere a la explotación de los minerales no metálicos y materiales de construcción se ha convertido en la segunda mitad del siglo XX en una actividad a considerar en sus impactos negativos sobre el medio ambiente. Si se considera las pérdidas de eficiencia y el aumento en el consumo de energéticos, así como el reemplazo de piezas desgastadas y los tiempos muertos de la maquinaria; puede determinarse su impacto económico. Por ello, en la actualidad la industria en general, se ha interesado en el estudio de los fenómenos y beneficios tribológicos, que se pueden tener, si son bien aplicados.

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 temperaturas altas 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.

3.11 Efectos en el orden social y ambiental

El estudio de los fenómenos de la tribología es una fuente de una gran potencial para economizar recursos financieros, materias primas y materiales energéticos, tomando así significación económica, científica y multidisciplinaria, de aquí su gran importancia, haciéndose efectiva por muchos países la estimulación de las investigaciones en la fricción, la lubricación y el desgaste. Todos los procesos macroscópicos en la naturaleza son irreversibles. La tribología es necesaria para el estudio detallado de los procesos irreversibles de la Mecánica y contribuye a explicar los fenómenos de la pérdida de energía y materiales.

3.12 Análisis del costo anual de materiales

Para determinar el costo anual de materiales se utiliza la ecuación 2.22 del epígrafe 2.15 donde está presente la frecuencia anual de recarga del molino, la cual va e tener un valor de 48 porque el molino se recarga con 1000 kg de bolas cada 7 días, lo que equivale a una tonelada de bolas y el costo de las bolas es de 1 253 € la tonelada. Ahora podemos decir que el costo anual de materiales es de 60 144 €.

3.13 Conclusiones del capítulo

Al analizar el comportamiento microestructural de las capas deformadas se determinó que en las mismas predomina una estructura cementita proeutectoide, pero por efecto de la fricción entre las bolas y el material existe una disminución del tamaño del grano desde el No 10 hasta el No 11.

Durante el proceso de desgaste por fricción rodadura se forma una capa en toda la superficie de las bolas con una dureza de 29,25; 50,42 y 48,25 HRC.

Durante el ensayo de desgaste abrasivo realizado a las muestras de las bolas retiradas de servicio, se determinó que existe una mayor resistencia a ser desgastada la muestra en la superficie de las mismas, la cual presenta una dureza mayor de las capas analizadas.

Conclusiones generales

• 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 esto implica un costo 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.

Recomendaciones

• Analizar la posibilidad de incrementar la dureza en las bolas antes de su puesta en funcionamiento de 29,25; 50,42 y 48,25 HRC existente en la superficie de las mismas hasta un valor de 60 o 65 HRC para alargar su vida útil de trabajo.

• Seguir profundizando en el estudio de la deformación plástica en frío como alternativa tecnológica de endurecimiento de piezas y disminuir los tratamientos térmicos que provocan efectos negativos al medio ambiente y consumidores de portadores energéticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias bibliográficas

1. Alcántara D; Comportamiento del desgaste en pasadores de equipos de laboreo minero fabricados de acero AISI 1045, 2012.
2. Rivera I; Balance poblacional en un molino de bolas para una ley de desgaste exponencial en tiempos largos, 2013.
3. Rivera I; Análisis del desgaste de medios moledores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos S.A, 2011.
4. Guzmán, S; Estudio de la influencia del proceso de molienda de alta energía en derivados carbonosos, 2008.

5. Ocampo, A; Hernández, H; Evaluación de la integral estructural de un molino de bolas usando elemento finito, 2014.
6. Álvarez, E., Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo - Agosto. 1999. p 69 - 76.
7. Alfonso, E., Apuntes sobre la interrelación composición microestructura y propiedades del acero. Monografía. Universidad de Matanzas. 2002.
8. Barceinas, S.; Juárez, H., Propiedades, Fortalecimiento y comportamiento de los Materiales, Capítulo IV, 2001.
9. Boada, O., Métodos tecnológicos para aumentar la durabilidad de las piezas, Revista Construcción de Maquinaria, Año 10, No. 3, Septiembre – Diciembre 1985, Cuba.
10. Boada, O., Díaz, S., Campos, Y. “Estudio del estado físico-mecánico de superficies tratadas por deformación plástica superficial”, Revista Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarria (ISPJAE), Volumen 6, No. 2, Mayo - Agosto 2003, P 53 - 58, Cuba. ISSN 1029 - 516X.
11. Caubet, J., Teoría y Práctica Industrial del rozamiento. España, 1971.
12. Chacín, F., Diseño y análisis de experimentos I. Ed. FEPUVA – UCV. Caracas, Venezuela. 2000. p 388.
13. Fernández, T., Comportamiento de las variaciones mecánicas superficiales mediante la Deformación Plástica por rodadura. Trabajo de Titulación de Maestría, ISMMM, 2007, Cuba.
14. Fernández, T.; Alcántara, D.; Rodríguez, I., La Deformación Plástica Superficial por rodadura como método de endurecimiento. NEXO. 21 (01) 01 – XX, Mayo 2008.
15. Govantes, G.; Rodríguez, G., Relación entre el desgaste abrasivo, composición química y propiedades mecánicas de una familia de aceros inoxidables Al Cr - Ni-Cu - Al. 1 (1) 21-26, 1989.