



**FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

**COMPORTAMIENTO DE LA MICROESTRUCTURA EN
LAS BOLAS DE LOS MOLINOS DESGASTADAS POR
EFECTO DE LA MOLIENDA**

Tesis en opción al título de Máster en Metalurgia

Ing. Yobani Fernández Ramírez

Moa - 2020



**FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

**COMPORTAMIENTO DE LA MICROESTRUCTURA EN
LAS BOLAS DE LOS MOLINOS DESGASTADAS POR
EFECTO DE LA MOLIENDA**

Tesis en opción al Título de Máster en Metalurgia

Autor: Ing. Yobani Fernández Ramírez

**Tutores: Prof. Tit. Tomás Fernández Columbié, Dr. C.
Prof. Tit. Alfredo Lázaro Coello Velázquez, Dr. C.**

Moa - 2020

Declaración de autoridad:

Yo: Yobani Fernández Ramírez

Autor de esta tesis de maestría, certifico su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, la cual podrá hacer uso de la misma con la finalidad que estime conveniente.

Ing. Yobani Fernández Ramírez

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

Dr. C. Alfredo Lázaro Coello Velázquez

Pensamiento

Educación 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 al hombre para la vida.

José Martí

Como mismo la naturaleza le 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 mis tutores el Dr. C. Tomás Fernández Columbié y
el Dr. C. Alfredo Lázaro Coello Velázquez por la
asesoría científica en la realización de este trabajo,
y al especialista principal del laboratorio de la
Empresa Mecánica del Níquel el Ing. Yoel Ochoa Mc
Intosh.***

***A mis familiares que siempre estuvieron presentes
para brindarme su apoyo.***

A mis amigos que siempre creyeron en mi.

***A todos los que de una forma u otra me apoyaron y
ayudaron en la realización de este trabajo.***

***A la revolución, por darme la oportunidad de
convertirme en profesional .***

A todos,

Muchas Gracias.

Dedicatoria

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

A mi hermana Yumeidis Fernández Ramírez, mi cuñado Geolvis y a mi esposa Lizaine Rodríguez.

A mi tío Alexis Fernández y demás familiares.

A la Revolución Cubana, por darnos la posibilidad de estudiar y formarnos como profesionales.

RESUMEN

En el trabajo se realiza una investigación sobre las variaciones microestructurales ocurridas en las bolas de los molinos que muelen el mineral laterítico, influenciadas por el desgaste abrasivo y la acritud. A partir del análisis metalográfico se determinó que las bolas mantienen las mismas estructuras de cementita proeutectoide (M_3C), granos de martensita y la presencia de carburos (M_7C_3), pero con un menor tamaño de grano, así como variaciones en la microdureza desde valores de 48,9; 47,8 y 47,6 HRC en el centro de las muestras hasta valores de 53,2; 52,4 y 50,6 HRC en las superficies de las mismas, las cuales endurecen por acritud. Que para un radio de partículas de 0,15 mm y una velocidad de desgaste promedio de 0,55 mm/h en las bolas provoca la existencia de rayado, microcorte, la formación de surcos y originan el desplazamiento del material por la deformación plástica.

ABSTRACT

In the work a research is carried out on the microstructural variations occurred in the balls of the mills that grinding the lateritic ore, influenced by abrasive wear and acrimony. From the metallographic analysis, it was determined that the balls maintain the same structures of proeutectoid cementite (M_3C), martensite grains and the presence of carbides (M_7C_3), but with a smaller grain size, as well as variations in microhardness from values of 48.9; 47.8 and 47.6 HRC in the center of the samples up to values of 53.2; 52.4 and 50.6 HRC on their surfaces, which harden by acrimony. Those for a particle radius of 0.15 mm and an average wear speed of 0.55 mm/h in the balls cause the existence of scratches, micro-cuts, the formation of grooves and cause the displacement of the material due to plastic deformation.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	PÁG
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	
1.1. Introducción	4
1.2. Generalidades del proceso de molienda	4
1.3. Materiales para la fabricación de bolas	7
1.4. Generalidades del desgaste abrasivo	9
1.5. Características de los aceros aleados al cromo	12
1.5.1. Influencia de los elementos aleantes en los aceros	14
1.6. Desgaste de los cuerpos molidores	16
1.6.1. Deformación del acero por compresión	19
1.7. Técnicas de procesamiento digital de imágenes	21
1.8. Conclusiones del capítulo 1	24
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	25
2.2. Características de los molinos de bolas	25
2.3. Composición química del acero AISI D2	26
2.4. Determinación del diámetro de las bolas	26
2.5. Preparación metalográfica de las probetas	27
2.5.1. Determinación de la microestructura	28
2.5.2. Obtención del porcentaje de microconstituyentes	29
2.5.3. Ensayo de medición de la dureza	29
2.6. Pruebas de desgaste abrasivo en las bolas	30
2.7. Diseño de experimentos	33
2.7.1. Selección de la variable de entrada y sus niveles	34
2.7.2. Matriz de planificación de experimentos	35
2.7.3. Límites de tolerancia	35
2.7.4. Análisis de varianza	36
2.7.5. Ajuste de curva por regresión	38
2.8. Determinación del aspecto económico	39
2.9. Conclusiones del capítulo 2	40

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción	41
3.2. Análisis de la composición química del material empleado en las bolas	41
3.3. Análisis de las microestructuras	42
3.3.1. Comportamiento microestructural de los puntos medios	43
3.3.2. Comportamiento microestructural en el centro de las bolas	45
3.3.3. Determinación del porcentaje de microconstituyentes	46
3.4. Análisis de la dureza en las capas deformadas	48
3.5. Análisis del desgaste en las bolas	48
3.5.1. Análisis del cálculo para determinar desgaste abrasivo	49
3.6. Análisis estadístico de los resultados	51
3.6.1. Análisis de la varianza	51
3.6.2. Límites de tolerancia	53
3.6.3. Ajuste de curvas	53
3.7. Análisis de la valoración económica	55
3.7.1. Costo de las bolas	55
3.7.2. Análisis del costo anual de materiales	56
3.8. Valoración del impacto ambiental	56
3.9. Conclusiones del capítulo 3	57

CONCLUSIONES GENERALES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTRODUCCIÓN

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

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

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

Esta contradicción se debe a las diferentes condiciones de operación, parámetros de configuración y tipos de pruebas utilizadas (Subramanian, 1992). Además, esta contradicción puede atribuirse a los métodos de endurecimiento del material (Sabih *et al.*, 2016). La cinética del desgaste de los medios de molienda se estima basándose en teorías presentadas poco antes de la segunda mitad del siglo XX, como se evidencia en el trabajo

de Sepúlveda (2004), que utiliza la teoría del desgaste lineal para calcular el desgaste constante de la velocidad específica.

Según Austin *et al.* (1984) y Gupta *et al.* (1985), hay un tamaño de bola que maximiza la velocidad de rotura de un tamaño de partícula de alimentación dado. La relación de tamaño de bolas y el tamaño de partículas fue inicialmente modelada por Bond (1960), quien, utilizando un criterio basado en la caracterización de la distribución de tamaños a la entrada del molino, desarrolló ecuaciones que permiten seleccionar los tamaños de bolas al inicio de la operación.

Desde esta perspectiva es importante estudiar la recarga de bolas y desgaste de los medios de molienda. Desde el punto de vista de las ecuaciones cinéticas que rigen el desgaste de las bolas de acero y sus aplicaciones en modelos de equilibrio poblacional, las contribuciones de Menacho y Concha (1986 y 1987) constituyen un buen avance; esto queda demostrado por la bondad de ajuste entre los resultados teóricos y los experimentales.

Situación problémica

Las bolas de los molinos horizontales de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, fabricadas de acero AISI D2 están expuestas a desgaste continuo durante el proceso de molienda debido a la fricción generada en el mismo y los choques producidos entre ellas, con el mineral y la superficie interna del molino, lo que trae consigo pérdidas a la economía del país y afectaciones al proceso productivo.

Problema: No existencia de una caracterización de las variaciones microestructurales en las bolas de los molinos que desmenuzan el mineral laterítico, fabricadas de acero AISI D2 y endurecidas por acritud.

Como posible solución al problema se establece la siguiente **hipótesis:** la causa del desgaste originado en las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2, puede ser determinada según las variaciones microestructurales y la dureza que presentan las mismas, luego de ser retiradas de servicio.

En el presente trabajo se establece como **objetivo general:** determinar las variaciones microestructurales y la dureza de las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2 luego de retiradas de servicio por el fenómeno del desgaste.

Objeto de la investigación: las bolas de los molinos horizontales de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Campo de acción: microestructura y dureza de las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el comportamiento mecánico metalúrgico de los aceros herramientas empleados en elementos moledores, así como las variaciones que experimentan los mismos en condiciones de desgaste abrasivo y de acritud.
2. Establecer los procedimientos metodológicos relacionados con la determinación de las variaciones microestructurales y la dureza de las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2.
3. Establecer a partir de las regularidades obtenidas, como: comportamiento microestructural, dureza y las fases presentes, el fenómeno del desgaste en las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2, luego de retiradas de servicio.

Para dar cumplimiento al objetivo se plantean las siguientes **tareas:**

1. Sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con las variaciones del proceso de deformación plástica.
2. Planificación y realización de experimentos.
3. Análisis de los resultados y obtención de las variaciones microestructurales y de dureza, resultantes en las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2.
4. Fundamentación de las inestabilidades mecánicas - metalúrgicas que se originan en las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2.
5. Planteamiento de los efectos económicos.

Capítulo 1

Marco teórico. Antecedentes investigativos

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. El desgaste es generalmente una combinación de una o más formas elementales, este genera considerables pérdidas de materiales, recursos y tiempo, con la consiguiente disminución de la producción. Conlleva a la pérdida de gran cantidad de medios para su reparación, así como en la elaboración o adquisición de nuevos elementos.

El objetivo del presente capítulo es definir los elementos fundamentales relacionados con la influencia del fenómeno del desgaste en aceros bajo aleado empleados en la fabricación de elementos moledores, así como la influencia en la microestructura de las bolas.

1.2. Generalidades del proceso de molienda

A partir de reportes de Andréiev *et al.* (1987), se conoce que la trituración y el desmenuzamiento son procesos de disminución de las dimensiones de los trozos (granos) de los materiales, mediante la destrucción de los mismos por la acción de fuerzas exteriores que superan las fuerzas interiores de cohesión, las que unen entre si las partículas del cuerpo sólido (Gresesqui, 2018).

Según Rivera *et al.* (2014), 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 una pulgada (2,54 cm), siendo el grado de desintegración mayor al de trituración.

El molino de bolas consta de un tambor metálico que gira sobre un eje horizontal a cierta velocidad de rotación (velocidad crítica), dentro del mismo se encuentran los cuerpos moledores (las bolas) y el mineral. Este tipo de molienda se fundamenta en los principios de impacto y atrición entre las bolas, el mineral y las paredes del molino. El mineral que es impactado se troza en partes, que dependen de la fuerza de impacto, de las propiedades físicas y forma de los cuerpos moledores, así como de las propiedades intrínsecas del mineral (Weerasekara *et al.*, 2013).

De acuerdo con Gresesqui-Lobaina *et al.* (2017), esta se utiliza fundamentalmente en la fabricación de cemento Portland, en la preparación de combustibles sólidos pulverizados, molienda de escorias, fabricación de harinas y alimentos balanceados. También 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.

El efecto de molienda en este tipo de molino se consigue por medio de la rotación del tambor que levanta los cuerpos moledores a cierta altura crítica respecto a la pared, de donde caen encima del mineral, logrando el efecto de disgregación del mineral. Otros factores que intervienen e influyen en la molienda o disgregación del mineral es la fuerza de fricción desarrollada en toda la masa, debido al rozamiento entre los cuerpos moledores y el tambor por efecto de rotación. Este efecto es el llamado atrición, el cual se le atribuye a la molienda fina (Cruz, 2001).

La molienda se puede realizar a materiales secos o a suspensiones de sólidos en 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 (Industrias I, 2015).

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. El desmenuzamiento se realiza principalmente por aplastamiento y frotación de las bolas que ruedan (Osorio *et al.*, 2009).

Plantea Osorio *et al.* (2009) que, 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.

Las máquinas industriales utilizadas en el desmenuzamiento de minerales, son en su mayoría molinos de tambor, aunque existen en clasificaciones diversas como los de barras, bolas, autógenos y semi-autógenos. El movimiento dentro de estos puede describirse como

colisión con rotura inducida principalmente por impacto o como rodadura con rotura inducida principalmente por aplastamiento y desgaste (King, 2001).

También aportan King (2001) y Albertin *et al.*, (2008), que el movimiento relativo de los medios molidores está determinado por la acción del tambor, que a su vez, está influenciada por los revestimientos y los elevadores que evitan el deslizamiento entre la carga y la superficie del molino. El deslizamiento consume mucha energía y reduce la capacidad de la cubierta del molino para transmitir energía a la carga.

Cuando el tambor rotatorio del molino gira, los elementos moledores son elevados en el lado ascendente del molino, hasta que se logra un equilibrio dinámico, donde los cuerpos de molienda caen en cascada y en catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos alrededor de una zona muerta donde ocurre poco movimiento hasta el pie de la carga del molino (Alcántara *et al.*, 2008). En la figura 1.1 se muestra el esquema de movimiento de los medios moledores en un molino.

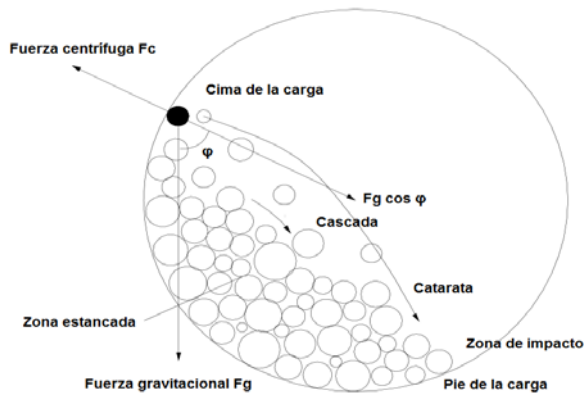


Figura 1.1. Movimiento de los medios en el molino. Fuente: King (2001).

El régimen de cascada fractura las partículas por el mecanismo de abrasión, conduciendo a una molienda más fina (lo que conlleva a una mayor producción de lamas) y a un mayor desgaste de los medios moledores y el revestimiento del molino, mediante este mecanismo (Menacho, 1985). De otro lado, el régimen de catarata fractura las partículas por impacto y, de igual manera, el mecanismo de desgaste de los medios moledores es el impacto.

A velocidades de rotación relativamente bajas o con revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie de la carga y la conminación que ocurre es principalmente abrasiva, por lo que se produce una molienda más fina. Sin embargo, a mayores velocidades de rotación, los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de descender en el pie de esta, lográndose una fisuración por impacto y un producto más grueso (King, 2001). Cuando la velocidad de

rotación es crítica, la capa exterior de los medios de molienda se adhiere a la superficie interior del cilindro debido a la fuerza centrífuga. Normalmente, el rango de la velocidad de rotación del molino es entre 70 a 80 % de la velocidad crítica.

Se afirma además, que la fragmentación del mineral se produce a través de los procesos de presión (las partículas de menor tamaño son apretadas entre las más grandes), impacto (por los golpes y rebotes) y erosión (desgaste superficial de las partículas más grandes) de los materiales involucrados en el proceso (Gresesqui, 2018).

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, las partículas de 5 a 250 mm son reducidas en tamaños de 10 a 300 micrones aproximadamente, dependiendo del tipo de operación que se realice (Montafur, 2013).

Austin *et al.* (1984) y Austin y Concha (1994) han propuesto modelos de balanceo de bolas, sin embargo, aún no se precisa acerca de si la recarga se debe hacer con bolas de un único tamaño (monotamaño) o con una distribución de bolas de diferentes tamaños.

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 tradicionales no están en la capacidad de suplir estas características. 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 alea 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.

Hierros blancos y aceros colados de alta aleación han sido ampliamente usados en las industrias de procesamiento y manejo de minerales, minería, metalurgia, del cemento y energética (Studnicki *et al.*, 2006 y Mazar *et al.*, 2012), es decir, en aplicaciones que requieren excelente resistencia a la abrasión, erosión e impacto de ligero a moderado.

Aleaciones de alto carbono-cromo y moderada cantidad de molibdeno, generalmente son empleadas en estas industrias presentando buenos resultados en la práctica con un adecuado rango de seguridad tecnológica en la manufactura de partes resistentes al desgaste.

Sin embargo, al considerar el proceso de molienda de minerales, las bolas y otros medios son expuestos severamente a la acción abrasiva de minerales que contienen cuarzo, alúmina, feldespatos y otros minerales, produciendo un fuerte desgaste abrasivo sobre la superficie expuesta de las bolas (Čikara *et al.*, 2009 y Maldonado *et al.*, 2014). Dentro de estas aleaciones, los hierros colados son caracterizados por una combinación de adecuadas propiedades mecánicas e importantes ventajas económicas y de manufactura.

Estas aleaciones son ampliamente usadas en aplicaciones mecánicas como quebrado primario, molienda y equipos de bombeo de pulpa mineral usados en el procesamiento de materiales duros tales como minerales con cuarzo, coque y grava (Doğan *et al.*, 1995).

Los medios moledores pueden estar fabricados de acero de fundición, acero forjado y este 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, 1952). 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 (Albertin *et al.*, 2008).

La solidificación de los hierros colados consiste de nucleación y crecimiento de diferentes fases presentes, tales como: austenita, grafito y diferentes carburos como cementita, M_7C_3 , MC o $M_{23}C_6$. Con la adición de elementos de aleación, el carbono se estabiliza formando carburos y por tanto hierro colado blanco. El severo contacto metal-metal en fases austeníticas con alto manganeso conduce a un incremento importante de la dureza debido a la deformación superficial, produciendo un endurecimiento por la transformación de la austenita a martensita, incrementando su resistencia al desgaste abrasivo (Coronado y Sinatora, 2009). La fase martensítica también se presenta con un tratamiento térmico adecuado: templado desde 850° C + revenido a 250° C.

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 *et al.*, 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.

1.4. Generalidades del desgaste abrasivo

La tribología ha establecido determinados parámetros que caracterizan al desgaste. Estos parámetros se reconocen como indicadores y permiten evaluar, estudiar, caracterizar y diagnosticar dicho proceso. A partir del método empleado para la determinación de sus valores absolutos, el mismo puede ser lineal (W_h), gravimétrico (W_g) o volumétrico (W_v) (Álvarez, 1999).

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, 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.

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.

La ASTM (1992) afirma que el desgaste abrasivo es debido a partículas o protuberancias duras que son forzadas y movidas a lo largo de una superficie de un sólido más blando teniendo como resultado una pérdida de material o rayado de la misma, sin embargo autores como Márquez (2002), Hutchings (2000), Nam (1994), Raymond y Bayer (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), Raymond y Bayer (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).

De acuerdo con Stratton (2007), el grado de abrasión depende de la naturaleza de las partículas, su morfología, tamaño y dureza, además del grado de humedad de la superficie. Otros factores determinantes incluyen la presión ejercida por la partícula sobre la superficie, la concentración de partículas abrasivas, el ángulo de incidencia de éstas sobre la superficie, como se muestra en la figura 1.2 y la velocidad relativa partículas-superficie.

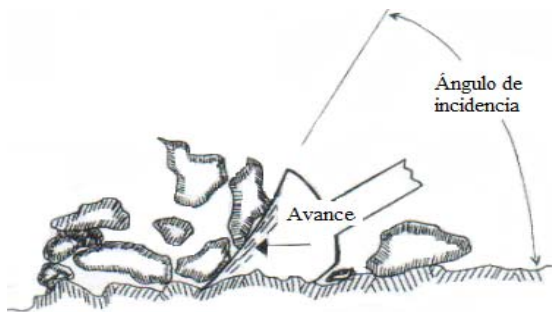


Figura 1.2. Ángulo de incidencia de partículas abrasivas. Fuente: Stratton (2007).

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. Bower y Johnson (1989) 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.

De acuerdo con Wang (1998), Kragelski y Kombatov (1982) 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.

Kragelski (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 (1985) quien considera que a partir de la fricción o el estado al que esté sometida 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 de 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 producen 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.

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

Deuis y Subramian (1998), realizaron una comparación entre el comportamiento del desgaste abrasivo en un ambiente seco y uno húmedo, empleando abrasivos como la alúmina y arena sílice, el ensayo se 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.

Gatzanis (1993), realizó 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.

Ball (1983) y Lamparter (2000), reportaron 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. Zum-Gahr (1982) referenciado en Alcántara (2012) 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 y plástica determina el área de contacto entre la partícula abrasiva y el material.

1.5. Características de los aceros aleados al cromo

De acuerdo con Illescas (2008), los aceros aleados de alta resistencia han reemplazado a los aceros al carbono tradicionales en aplicaciones de la industria automotriz y de la construcción por sus ventajas en cuanto a propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión

y soldabilidad. Estos aceros logran sus propiedades mecánicas, especialmente altos niveles de resistencia, mediante el agregado de microaleantes y procesos termomecánicamente controlados.

Los aceros de baja aleación contienen adiciones menores de otros elementos tales como níquel, cromo, manganeso, silicio, vanadio, columbio, aluminio molibdeno y boro. La presencia de estos elementos en pequeñas cantidades da como resultado una marcada diferencia en sus propiedades mecánicas. Estos aceros de baja aleación generalmente son clasificados como aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, aceros para maquinaria y partes para automotores, aceros para servicio a baja temperatura, o aceros para servicio a elevada temperatura (Guliaev, 1983).

Plantean Porter y Easterling (1981) que los elementos formadores de carburo (cromo, molibdeno, tungsteno, vanadio, tantalio, niobio y titanio) retardan los procesos de ablandamiento por la formación de carburos aleados. El efecto de los elementos formadores de carburo es mínimo a bajas temperaturas; sin embargo, a temperaturas más elevadas, como la de revenido, donde se forman los carburos aleados, decrece la dureza suavemente.

El cromo es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de materiales aleados. Se suele emplear en cantidades diversas, desde 0,3 a 30 %; según los casos, aumenta la dureza y la resistencia de los aceros, mejora la templabilidad, disminuye las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste y la inoxidableidad (Rivera *et al.*, 2012).

Belzunce (2001), Bedolla-Jacuinde *et al.* (2003) consideran que el cromo, desde un 5 % en peso, aumenta la resistencia a la oxidación del hierro en atmósfera seca, por eso para un satisfactorio comportamiento en atmósferas oxidantes, a temperaturas de hasta 750 °C, los aceros utilizados suelen ser de alto contenido en cromo. Simultáneamente, contenidos crecientes de cromo en solución sólida en el hierro, disminuyen la conductividad térmica de él y por tanto le confieren refractariedad.

Según Pero-Sanz (2000) el cromo tiene cierta incidencia en la templabilidad de la austenita, la hace más estable a las transformaciones durante el enfriamiento continuo, disminuyendo su temperatura de inicio de formación en martensita. A pesar de ser enfriados lentamente, puede no tener lugar la transformación perlítica de la austenita, que requeriría descensos de temperatura aún más lentos y aquella austenita se transformará parcialmente en martensita

y quedará, a temperatura ambiente, una cierta proporción de austenita residual sin transformar.

Verdeja y González (1996); Pero-Sanz (2000); Dogan *et al.* (1997), consideran que el cromo aumenta además la templabilidad, la resistencia a elevadas temperaturas, así como las temperaturas de temple, recocido y normalizado, disminuye ligeramente la tendencia al sobrecalentamiento y la ductilidad no siendo así para contenidos superiores al 1,5 %.

La austenización de las fundiciones al cromo es crítica para la obtención de microestructuras endurecidas con alta dureza final, pero se sabe que existe un rango de temperaturas para la cual estas fundiciones alcanzan la máxima dureza. Dicha temperatura es la que ocasiona la óptima disolución de los carburos de aleación en la austenita sin que se genere una fracción excesiva de austenita retenida. Suele estar en los 1025 °C, dependiendo del contenido en cromo de la fundición (Tabrett y Sare, 2000).

Las fundiciones aleadas al cromo son empleadas en la fabricación de elementos expuestos a situaciones en las que el producto debe soportar simultáneamente acciones de desgaste abrasivo e impactos, como ocurre en las instalaciones de trituración y molienda, clasificación granulométrica o sistemas de bombeo de mezclas de líquidos-sólidos abrasivos (Fernández-Pariente y Belzunce-Varela, 2006). Zhang *et al.* (2014) plantean que el empleo de estas fundiciones blancas requiere de un previo tratamiento térmico para mostrar un buen comportamiento mecánico, dureza, resistencia al desgaste y tenacidad en ciertas temperaturas de trabajo entre 200 y 600 °C.

1.5.1. Influencia de los elementos aleantes en los aceros

Estos aceros surgen de la necesidad de conjugar una buena resistencia mecánica sin disminuir la soldabilidad, lo que comporta una disminución del carbono, compensando el decrecimiento de resistencia que esto implica, con una adición controlada de aleantes que ejerzan una acción directa sobre el mecanismo de crecimiento del grano. Esta técnica va acompañada de otras, que son utilizadas en el proceso de fabricación, como son los procesos termomecánicos de laminación controlada (T.M.C.P.) y enfriamiento acelerado (González-Palma, 1994).

La influencia de los elementos aleantes se puede analizar desde el punto de vista del comportamiento de los aceros durante el revenido. Los elementos aleantes bien por su presencia en la ferrita o su influencia en la formación de carburos deben propiciar propiedades mecánicas más elevadas con la temperatura de revenido (Guliaev, 1983).

Askeland (1998) y Pero-Sanz (2000) afirman que el manganeso y el níquel ejercen un efecto parecido y contenidos de 1 a 1,5 % de manganeso en aceros de 0,30 a 0,60 % de carbono hacen aproximadamente el mismo efecto que porcentajes de 3 a 4,5 % de níquel. La acción del cobre es en cierto modo similar a la del níquel, pero su influencia es mucho más débil.

Plantea Ju (2008) que en ciertos aceros, el manganeso se suele emplear también como elemento de aleación para aprovechar la influencia beneficiosa que ejerce en las propiedades de los aceros. Al aumentar de 0,60 a 1,60 % aproximadamente el porcentaje de manganeso en los aceros, se aumenta ligeramente su resistencia, se mejora su templabilidad, es un elemento de aleación relativamente barato, tiene influencia en la templabilidad, ligeramente superior a la del molibdeno.

Fazzini y Otegui (2006) afirman que la influencia que ejercen los elementos de aleación es muy variada y empleados en proporciones convenientes, se obtienen aceros con ciertas características que, en cambio, no se pueden alcanzar con los aceros ordinarios al carbono. Utilizando aceros aleados es posible fabricar piezas de gran espesor, con resistencias muy elevadas en el interior de las mismas. En elementos de máquinas y motores se llegan a alcanzar durezas con gran tenacidad. Es posible fabricar mecanismos que mantengan elevadas resistencias, aún a altas temperaturas.

Elementos de aleación como el Cr, el Mo y el W, los cuales se encuentran comúnmente en los aceros para herramientas, aumentan la temperatura eutectoide del acero, por la estabilización de la fase ferrítica. Adiciones de vanadio tienen un efecto similar (De Beer *et al.*, 2005). Al mismo tiempo el contenido de carbono de la composición eutectoide disminuye con el incremento de la adición de algunas aleaciones. Esto tiene lugar debido a que estos elementos tienen mayor afinidad por el carbono que el hierro. Como resultado de esto, en los aceros para herramientas se requieren altas temperaturas para disolver los carburos en la austenita.

Influyen de una forma especial en la cinética de la descomposición elementos formadores de carburos tan enérgicos como el vanadio, el titanio, el niobio y parcialmente el volframio. Como estos elementos forman carburos difíciles de disolver, a las temperaturas de temple ordinarias (800 – 900 °C) permanecen enlazados en los carburos y no pasan a la austenita (González-Cabrera *et al.*, 2014). Como resultado de esto la templabilidad del acero disminuye, ya que los carburos actúan como centros preparados de cristalización de la

perlita. Cuando es alta la temperatura de calentamiento para el temple, estos carburos se disuelven ya; la austenita contiene entonces estos elementos en disolución, lo que aumenta la templabilidad.

Al igual que el carbono, actúan otros elementos que devienen en intersticiales, debido a su diámetro atómico menor a 0,2 nm, que le ofrece posibilidad de difusión a través de los intersticios de la estructura cristalina del hierro. Estos elementos son el nitrógeno ($d_A = 0,184 \text{ nm}$), hidrógeno ($d_A = 0,106 \text{ nm}$), boro ($d_A = 0,196 \text{ nm}$), oxígeno ($d_A = 0,178 \text{ nm}$). 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 (Fernández-Columbié, 2011).

Por otro lado, otros elementos como el cromo, níquel, titanio, manganeso, vanadio y cobre, con diámetros atómicos cercanos al del hierro ($d_A = 0,252 \text{ nm}$), formarán soluciones sólidas sustitucionales en un intervalo que dependerá de las semejanzas de estructuras cristalinas, 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).

1.6. Desgaste de los cuerpos moledores

La molienda eficiente de las diferentes fracciones de tamaño del material alimentado a un molino rotatorio requiere la presencia dentro del mismo, de una variedad de bolas de diferentes tamaños, que maximizan la velocidad de producción de cada tamaño de partícula. Debido al desgaste sufrido por los medios de molienda, es necesario agregar bolas nuevas en forma periódica a los molinos para mantener una carga de granulometría estable, la que recibe el nombre de carga balanceada. La distribución de tamaño de esta carga depende de la cantidad y composición de la recarga de bolas nuevas. La práctica industrial de cargar bolas a los molinos está basada en la experiencia y tradición y lo más frecuente es cargar solamente bolas del mayor tamaño, como lo recomienda Bond (1961).

Desde esta perspectiva es importante el estudio de la recarga de bolas y el desgaste de los medios moledores. La utilización de una ley de desgaste en un molino industrial para ser aplicada en un modelo matemático fue realizada por Menacho y Concha (1986), donde la

ley de desgaste encontrada en sus molinos obedeció a una ley de desgaste constante, un estudio realizado también en una planta piloto para la molienda de carbón encontró que la ley de desgaste era constante, pero muy cortos los tiempos en los que operaban los molinos.

Albertin y Moraes (2007), refieren que toma importancia entonces hacer investigaciones para el desgaste de bolas en tiempos largos de operación de los molinos porque esto supone que se pueden encontrar otro tipo de cinéticas de desgaste como las de tipo exponencial y las de tipo hiperbólico y utilizarlas para ser aplicadas en modelos de balance poblacional y obtener predicciones mas óptimas de la recarga de bolas.

Ha sido referido por Dong y Moys (2001) que estos fenómenos de desgaste de bolas y también de revestimientos en la minería de minerales industriales, afectan la productividad de los equipos, las distribuciones granulométrica generadas, las razones de recirculación, la eficiencia de los separadores de tamaño y en general, de las diferentes operaciones que están alrededor del proceso de molienda, generando sobre costos en el producto final.

Fiset *et al.* (1998) 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 pueda ser el mismo mineral que se está moliendo.

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 método de los elementos discretos (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 molidores se han encontrado trabajos como el de Radziszewski y Tarasiewucz (1993), quienes, mediante un balance de energía cinética al interior de un molino de bolas de acero alto en carbono y de acero austenítico, lograron establecer, la tasa de desgaste de bolas y revestimientos.

En su estudio ellos destacan que las bolas más grandes se desgastan mucho más lentamente que las bolas pequeñas y por lo tanto, la cinética de desgaste no es la misma para diferentes tamaños de bola. Aseguran que lo interesante de este modelo, es ver cómo se relaciona la dureza del material con su tasa de desgaste, algo que no es muy común en la literatura. Además, según este estudio, la tasa de consumo de energía cinética durante la fragmentación por abrasión permanece, prácticamente constante y es independiente de la velocidad de rotación del molino y su fracción de llenado (Rivera, 2013).

En este sentido, cobra interés una segunda clase de trabajos cuyo objetivo es la búsqueda de leyes de cinética de desgaste de cada medio molidor en particular, para optimizar el consumo energético por desgaste a partir de balances de población (Rivera *et al.*, 2014). 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 (1987) utilizó ensayos de bola marcada, abrasión sobre lija e impacto repetitivo sobre bolas de acero de 5 pulgadas de diámetro (12,7 cm) 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 molidor es proporcional al área superficial expuesta y que dicho proceso se desarrolla en estado estacionario, 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. 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.

Plantea Sepúlveda (2004) que, una de las dificultades en la investigación del desgaste de cuerpos molidores 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.

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 *et al.*, 2012).

1.6.1. Deformación del acero por compresión

Según Hernández-Flores *et al.* (2010) la laterita del yacimiento de la base minera es esencialmente ferrosa, donde el Fe se concentra en valores entre un 20 y un 49,7 % en las diferentes fracciones granulométricas; se encuentran además como elementos mayoritarios en esta mena el óxido de magnesio, aluminio, sílice, cromo y manganeso. El níquel y el cobalto aparecen como microelementos, pero de mucho interés desde el punto de vista técnico y económico como materia prima una mena con contenido industrial de níquel de 1,32 %, hierro 38,5 %, cobalto 0,105 %, sílice en el rango de 10,5 % a 11,5 % y óxido de magnesio en el rango de 4 a 6 %.

El desgaste en el material de las bolas ocurre como consecuencia de las propiedades del mineral que se tritura, estas partículas abrasivas de origen mineral, que se encuentran en los suelos, como el óxido de sílice (arena de cuarzo) presenta una dureza de 10 000 a 12 500 MPa y constituye entre el 40 - 60 % de los elementos del yacimiento de la base minera, tal dureza al entrar en contacto con los cuerpos moledores, los desgasta y los deforma desde el punto de vista de su resistencia a la fragilidad o impacto.

Liu y Spencer (2004), reportan la molienda como el proceso donde se consume la mayor cantidad de energía en la reducción de tamaño de las partículas mineralizadas, viene a ser la última etapa de la conminución de minerales (Rivera *et al.*, 2014), se logra conseguir la liberación de las especies mineralógicas y por lo tanto en este circuito el costo de operación fluctúa entre el 60-70 % del costo total en el beneficio de los minerales (Berger *et al.*, 2014) y es donde se consume la mayor cantidad de acero (Albertin *et al.* (2008).

En lo referente al proceso de deformación Wada y Ritter (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 afectado por la fricción, es dominado por un mecanismo de fractura con la formación de grietas laterales, mientras que, cuando se incrementan las protuberancias el desgaste abrasivo, el mecanismo de rayado es predominante, (Shipway y Hutchings, 1995; Vaughan y Ball, 1991).

El grado de acritud que adquiere un material depende de factores externos al material metálico, naturaleza del esfuerzo y velocidad de aplicación de éste, pero sobre todo depende del grado de deformación en frío que el material experimenta y de la naturaleza del material (sistema cristalino, energía de defectos de apilamiento, tamaño de grano, pureza de la aleación). La acritud guarda relación con el sistema cristalino al que pertenece la aleación (Smeliansky y Blumenstein, 2001).

Bajo fuerza de rozamiento constante, el mineral penetra y alisa la superficie, lo que causa una mayor deformación plástica debido a la pequeña área de contacto entre el par tribológico, entonces de forma general el coeficiente de desgaste abrasivo de una superficie, es directamente proporcional a la dureza de la superficie (Wang, 1998; Kim *et al.*, 2006 y Bansal *et al.*, 2007).

Según Fernández-Columbié *et al.* (2017) el endurecimiento de una aleación se pone de manifiesto tanto mecánica, como microestructuralmente. Desde el punto de vista mecánico ocurre un aumento en la resistencia del material durante la deformación irreversible, cuando la tensión aplicada supera su límite elástico y tiene como consecuencia el aumento de la dureza. A nivel microestructural se manifiesta en un aumento de la densidad de las dislocaciones, activando las fuentes que generan dislocaciones del tipo Frank–Red y la formación de celdas de subgranos. Los estudios sobre la microestructura resultante de la deformación, de Gourdet y Montheillet (2000), sobre aluminio y Belyakov *et al.* (1998), sobre acero ferrítico, han mostrado que se trata de formación de nuevos granos, con mecanismos diferentes de deformación dinámica continua.

Nes (1998) referenciado Fernández-Columbié (2011) concluye que la evolución de la subestructura durante la deformación plástica depende de tres parámetros fundamentales que son las que controlan el proceso de las dislocaciones; el primero es la probabilidad de que una dislocación móvil pueda detenerse por la subestructuras que se forman en el interior de las celdas, en los bordes de celdas preexistentes y en los bordes de las nuevas celdas; el segundo es establecer un sistema de compatibilidad capaz de cuantificar las dislocaciones almacenadas en un determinado parámetro de deformación y el tercero es dar una descripción analítica sobre la distribución de dislocaciones, incluyendo las que se forman en las estructuras de las celdas.

La etapa de endurecimiento por deformación está relacionada con la evolución de la densidad de dislocaciones durante el proceso de deformación, parámetro fundamental de

esta etapa. Mecking y Kocks (1981) proponen un modelo de parámetro único, cuyo objetivo es calcular la tensión de fluencia a través de la variación de la densidad de dislocaciones durante el proceso de deformación, sin embargo, el modelo de Estrin y Mecking (1984), similar al primero, distingue entre dos tipos de dislocaciones, la densidad de dislocaciones móviles y de dislocaciones inmóviles.

Los principales factores que influyen en la movilidad de los bordes de grano (figura 1.3), es la diferencia de orientación entre ellos (Gleiter y Chalmers, 1973; Pero-Sanz, 2000), la presencia de átomos o impurezas (Aust y Rutter, 1959; Ungár *et al.*, 2001), la presencia de partículas de segunda fase y la temperatura (Porter y Easterling, 1981).

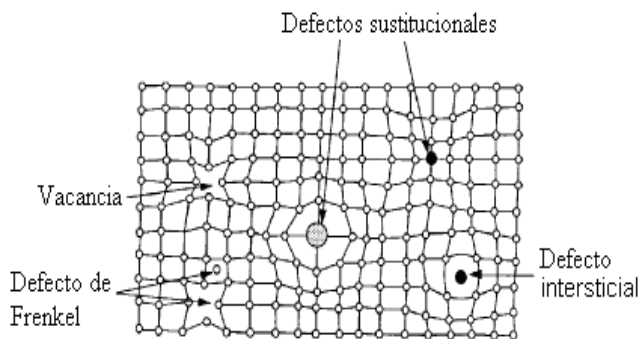


Figura 1.3. Factores que influyen en la movilidad de los bordes de grano. Fuente: Callister (1999).

Según Pleiman (1985); Hassan (1997), Hu y Zhou (2002), la velocidad a la que migra el borde de grano es el principal factor que controla esta cinética, la velocidad local de migración depende de la energía, de la movilidad y de la curvatura local del borde de grano; tanto la energía como la movilidad del borde están afectadas por la desorientación entre granos vecinos (Radhakrishnan y Zacharia; 1995).

1.7. Técnicas de procesamiento digital de imágenes

Las técnicas de procesamiento digital de imágenes son particularmente útiles en metalografía cuantitativa, ya que mejoran la exactitud y precisión de las medidas en relación con las obtenidas por métodos de comparación visual. Las técnicas computarizadas de metalografía cuantitativa juegan un papel preponderante, permitiendo comparaciones precisas, tanto entre muestras como entre laboratorios. A pesar de que los métodos de comparación visuales tienen la ventaja de ser simples y económicos, se fundamentan en el criterio del analista, siendo por lo tanto dependientes de su experiencia y subjetividad (Chesnaud *et al.*, 1999).

El interés en el estudio del procesamiento digital de imágenes se basa en dos áreas de aplicación primordiales: a) El mejoramiento de la calidad de la información contenida en una imagen con el fin de que esta información pueda ser interpretada por los humanos, y b) el procesamiento de los datos contenidos en un escenario a través de una máquina de percepción autónoma (Rojas-Fernández, 2011).

Se destacan los trabajos pioneros de Horn (1975, 1977) sobre la formación de la imagen. En ellos Horn establece modelos de cálculo que expresan la formación de la imagen a través de ecuaciones diferenciales que relacionan los valores de intensidad de la imagen con la geometría de la superficie tras estudiar con detalle el modo en que la iluminación, la geometría, la reflectancia de la superficie y el punto de vista del observador actuaban de forma conjunta para crear los valores de intensidad medidos en la imagen.

Fan *et al.* (2001) fundamentan que la imagen de la muestra metalográfica debe convertirse a algún formato numérico adecuado para realizar el análisis computarizado. Este proceso es realizado por una cámara digital y una computadora, convirtiendo la imagen de la muestra en una serie de números, que es el único formato que una computadora puede manejar.

La comprensión de imágenes pretende asignar significado al contenido de las mismas y una de las tareas clásicas consiste en la segmentación completa de la imagen, donde se busca una partición de ella en regiones correspondientes a objetos de la escena que esta imagen captura. Algunos autores en los que se encuentran Deng y Manjunath (2001) consideran a esta tarea parte del análisis de imágenes, otro como Stockham (2002) plantea que parten de la visión por computador.

Una imagen está definida como la representación de un objeto real, tridimensional (3D), en el plano (2D). Desde un punto de vista físico, una imagen puede considerarse como un objeto plano cuya intensidad luminosa y color puede variar de un punto a otro (Du y Sun, 2006; Baudrier *et al.*, 2008). Los autores Du y Sun (2006), Wainschenker *et al.* (2011) plantean que las imágenes monocromáticas (en blanco y negro), se pueden representar como una función continua $f(x,y)$ donde (x,y) son sus coordenadas y el valor de f es proporcional a la intensidad luminosa (nivel de gris) en ese punto.

Con el procesamiento digital de imágenes, Fajardo *et al.* (2007); Wainschenker *et al.* (2011), aseguran que se desarrollan operaciones sobre un set de datos que proporcionan una imagen, para mejorarlas de alguna forma, para ayudar a su interpretación o para extraer

algún tipo de información útil de ella. Esto refiere también al tratamiento de las imágenes que han sido previamente digitalizadas.

Para obtener una imagen que pueda ser tratada por el ordenador es preciso someter la función $f(x,y)$ a un proceso de discretización tanto en las coordenadas como en la intensidad, a este proceso se le denomina digitalización. En la figura 1.4 se muestra el procedimiento a realizar.

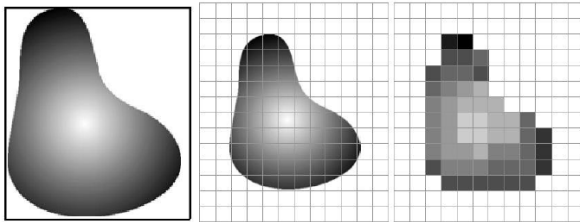


Figura 1.4. Digitalización de un objeto. Fuente Wainschenker *et al.* (2011).

Wainschenker *et al.* (2011) señalan que la digitalización consiste en la descomposición de la imagen en una matriz de $M \times N$ puntos, donde cada uno tiene un valor proporcional a su nivel de gris (ver figura 1.5). Dado que este valor puede ser cualquiera dentro de un rango continuo, es preciso dividir dicho rango en una serie de k intervalos, de forma que el nivel de gris de cada punto sea asignado a uno de los valores que representa dicho intervalo. Los modernos sistemas de proceso digital de imágenes suelen trabajar con 256 niveles de gris.

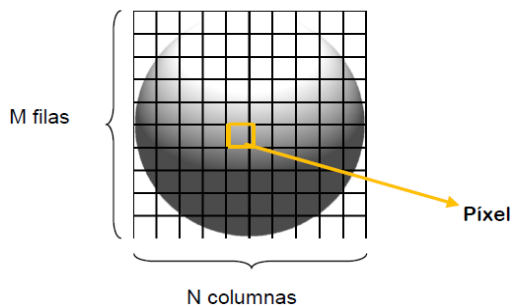


Figura 1.5. Descomposición de un objeto en una matriz $M \times N$.

Fuente: Wainschenker *et al.* (2011).

Cada elemento en que se divide la imagen recibe el nombre de "píxel" (picture element), Wainschenker *et al.* (2011) y Domingo (1996). El número de niveles de gris y las dimensiones de la matriz (número de filas por número de columnas) condicionan la capacidad de resolución de la imagen digital. Las dimensiones de las imágenes digitales varían en función de las capacidades del sistema empleado. Por lo general se utiliza un octeto para almacenar cada píxel, por lo que las intensidades de las imágenes se cuantifican en 256 niveles (8 bits). Según estos tamaños una imagen digital con 256 niveles de gris y

una dimensión de 256 x 256 píxeles, ocupa 64 KB de memoria, la misma imagen con una dimensión de 512 x 512 píxeles ocupa 256 KB y si se trata de una imagen de 1024 x 1024 ocupa 1 MB de memoria (Domingo, 1996).

1.8. Conclusiones del capítulo 1

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

- ✓ Las bibliografías consultadas, aportan información sobre las propiedades físicas y mecánicas de las diferentes aleaciones empleadas en la fabricación de bolas para la molienda, pero no muestran las regularidades del comportamiento microestructural en las mismas.
- ✓ Las teorías científicas existentes sobre la deformación plástica superficial en aceros bajo aleado no resuelven el comportamiento del efecto del tamaño de grano y comportamiento de la microestructura, ni el mecanismo que provoca el endurecimiento de las capas deformadas por impacto y rodadura en las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2.
- ✓ El desgaste, efecto directo de la fricción, se caracteriza por presentar períodos como la fatiga, el micro corte de las asperezas superficiales y las deformaciones plásticas, las cuales dependen de la carga aplicada; velocidad; temperatura; impactos; tipos de movimiento; tipo de fricción; recorrido de fricción y tiempo de trabajo.

Capítulo 2

Materiales y métodos

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. 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 abrazado.

El objetivo del capítulo es establecer los métodos, procedimientos y condiciones de ensayos para determinar el comportamiento microestructural y la resistencia al desgaste de las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2.

2.2. Características de los molinos de bolas

Los molinos empleados en el proceso son de forma cilíndrica y para el proceso de molienda fina poseen una carga de bolas de 54 ton por diseño, con la que operan los molinos 201 y 204. En la tabla 2.1 se muestra la distribución de carga según las dimensiones de las bolas.

Tabla 2.1 Distribución de carga para los molinos 201 y 204

Diámetro (mm)	Por ciento (%)	Carga (ton)
100	10	5,5
70	10	5,5
50	15	8,0
40	25	13,5
30	40	21,5
		54,0

Los molinos 202 y 203, poseen una carga de bolas de 43,2 ton, el 80 % de la capacidad de diseño (54 ton de bolas). En la tabla 2.2 se muestra la distribución de carga según las dimensiones de las bolas.

Tabla 2.2 Distribución de carga para los molinos 202 y 203

Diámetro (mm)	Por ciento (%)	Carga (ton)
70	10	4,32
50	20	8,64
40	27	11,66
30	43	18,58
		43,2

Bajo el efecto de rotación estas bolas son arrastradas a lo largo de las paredes, ruedan y luego vuelven a caer en cascada unas sobre las otras. De esta manera la materia a moler es sometida a innumerables acciones de presión, fricción y choque, a la vez en el seno de la masa de las bolas y entre esta y las paredes del tambor. El molino de bolas funciona entre 35 a 45 % de nivel de llenado. Su medio de molienda está constituido por bolas de acero AISI D2 y generalmente opera en circuito cerrado. Durante el proceso son tres los mecanismos que gobiernan el desgaste de medios de molienda; abrasión, impacto y corrosión (Gangopadhyay y Moore 1985).

2.3. Composición química del acero AISI D2

En la tabla 2.3, editada por la *American Society for Testing Metals* (ASTM) y según la designación de la AISI y SAE, se muestra la composición química del acero AISI D2.

Tabla 2.3 Composición química del acero AISI D2, % en masa

Tipo	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
AISI D2	1,4-1,6	0,6 máx	0,6 máx	11,0-13,0	0,30 máx	0,7-1,2	1,1 máx

La microestructura de este acero presenta una dispersión de carburos ricos en cromo del tipo Cr_7C_3 , alargados. Generalmente este acero se suministra en estado recocido, para lo cual hay que hacerle el tratamiento térmico correspondiente, según la dureza que se quiera obtener, y la estructura o dispersión de carburos deseada. Para el caso de las bolas, el proceso de obtención es por fundición.

2.4. Determinación del diámetro de las bolas

Para la realización del proceso experimental se empleó en la determinación de los parámetros geométricos de las bolas un pie de rey digital, con el cual se midió los valores del diámetro después de la deformación plástica. Tiene un margen de error de 0,05 mm.

Para trabajar con el instrumento se tuvo en cuenta:

1. Se realizó la colocación adecuadamente, ajustándolo en la dirección correcta de la medición a realizar.
2. Se chequeo el desgaste y flexión en las patas de medición, así como en el cuerpo, cuando las patas del pie de rey están en contacto. Este debe estar en la indicación cero y no debe percibirse un claro entre las superficies de contacto.
3. Se Aplicó una presión moderada al medir, para evitar deformaciones plásticas en las superficies en contacto, que puedan alterar la medición.

Fueron seleccionadas tres bolas, se consideró que las mismas estuviesen retiradas de servicio, con lo cual se pudiera determinar la incidencia del desgaste en las mismas, así como las variaciones microestructurales originadas por el fenómeno de la acritud. En la figura 2.1 se muestran las bolas objetos de medición.



Figura 2.1. Bolas seleccionadas para la medición.

Las bolas desgastadas y deformadas por las altas temperaturas, por impactos dentro del molino en medio de la operación, fueron comparadas con otras que no habían sido expuestas a condiciones de trabajo.

2.5. Preparación metalográfica de las probetas

Dentro de los procesos de diseños, el corte de las muestras debe realizarse meticulosamente, tratando en lo posible de la selección de cada máquina, para ensayos microestructurales la no alteración de las propiedades de los materiales es de vital importancia, ya que el cambio de la misma refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener. En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3-95 y Norma NC 10-56: 86).

Las operaciones de corte se realizaron con el empleo de una máquina cortadora de la marca echo LAB, modelo CM 260, con un disco abrasivo bajo 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.

El encapsulado se realizó en una máquina encapsuladora de la marca Echo LAB, modelo MP 350 A, la presión aplicada fue de 9,81 MPa, la temperatura del encapsulado de 150 °C, el material empleado para el encapsulado fue resina termofusible de baquelita, el tiempo del encapsulado fue de 11 minutos, la temperatura de salida 32 °C y el tiempo de enfriamiento en agua de 5 minutos.

El desbaste y el pulido se realizaron en una máquina pulidora de la marca Echo LAB, modelo PM 52 D con una velocidad de rotación de 1000 rev/min, bajo régimen de enfriamiento. Se

emplearon papeles abrasivos del tipo: 180, 240, 600, 800 y 1200, variando la granulometría de los mismos desde la más gruesa a la más fina al ser aplicados a las piezas de trabajo. Para el pulido final se le agregó suspensión de diamante con un tamaño de partículas de 0,5 micrones.

Para el acabado final se utilizó un paño de fieltro grueso y como sustancia abrasiva el óxido de cromo. Una vez pulidas las probetas se lavaron con agua limpia y se secaron con papel de filtro. Se empleó la técnica de ataque manual de las muestras por inmersión en el reactivo químico, solución de nital (alcohol y ácido nítrico) al dos por ciento (2 ml de ácido nítrico y 98 ml de alcohol etanol) durante quince segundos (ASTM E-262 Practice A).

2.5.1. Determinación de la microestructura

Para determinar la microestructura se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100 y se emplearon las siguientes normas, ASTM E 3-95; NC 10-55: 86 y NC 04-77: 86. La figura 2.2 se corresponde con la estructura metalográfica del acero AISI D2 empleado en las bolas de los molinos.

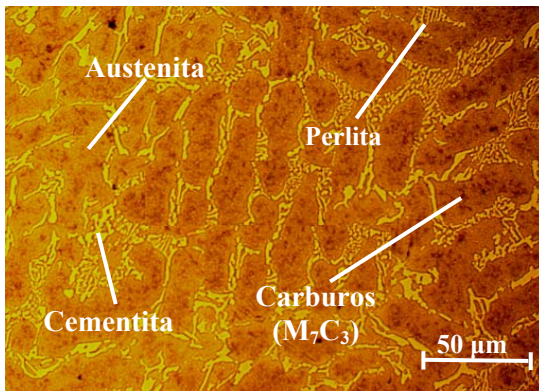


Figura 2.2. Microestructura del acero AISI D2.

La microestructura 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 perlita muy blanda, la primera se verá clara, iluminada, mientras que la última se verá oscura. El tamaño de grano es No. 6 según la ASTM E 112.

Los constituyentes de la microestructura, al ser sometidos al 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.

2.5.2. Obtención del porcentaje de microconstituyentes

El porcentaje de microconstituyentes se determinó en el microscopio reflexivo marca Echo LAB. Funciona básicamente por medio de la combinación entre el sistema óptico y la iluminación. En este ensayo los granos van a presentar colores diferentes, adicionalmente los átomos en los límites de grano son más reactivos durante el ataque químico y se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad. En la tabla 2.4 se muestra el procedimiento para el análisis de los microconstituyentes según la norma ASTM A 247.

Tabla 2.4. Procedimiento para la determinación de los microconstituyentes.

Datos de las fases		
Microconstituyentes	Área	Área %
1	Área 1	Área 1
2	Área 2	Área 2
3	Área 3	Área 3

El análisis de imagen fue necesario para estimar los porcentajes de los microconstituyentes presentes en las diferentes zonas analizadas en las bolas, consistentes en la superficie, medio y centro, con los cuales a su vez se puede estimar la dureza en esta zona.

2.5.3. Ensayo de medición de la dureza

Se siguió los procedimientos de la norma cubana NC 10-56: 86 para determinar la dureza de las bolas. Las mediciones se realizaron por el método de Rockwel (HRC), por lo que se utilizó un durómetro de la marca echo LAB, modelo 2818 TP. La carga aplicada fue de 150 kg, el penetrador fue un cono de diamante, el tiempo empleado en cada una de las pruebas fue de 15 s. Se efectuaron un total de 18 mediciones a cada una de las muestras, 6 en cada una de las regiones representadas. En la figura 2.3 se muestra el procedimiento empleado, consistente en un barrido en toda la bola.

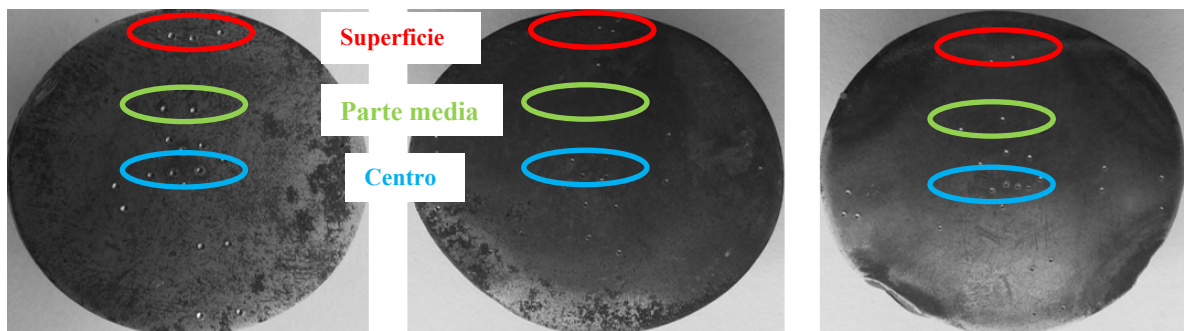


Figura 2.3. Barrido de dureza realizado en las bolas.

Las bolas empleadas en los molinos rotatorios para la molienda del mineral laterítico, el diámetro promedio de las mismas es de 45,4 mm para la primera; 46,9 mm para la segunda y 49,3 mm para la tercera. Durante el proceso de molienda, la superficie de las bolas es la que está directamente en contacto con todo lo que hay en el interior del molino y por tanto es donde aparece la capa deformada.

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 en las bolas deformadas por acritud. 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 complementaron de tal modo que la información buscada se obtuvo combinando las respuestas de todos ellos. Esto permitió obtener la información con el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor costo) 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). 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).

2.6. Pruebas de desgaste abrasivo 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.

El tipo de ensayo para realizar el desgaste abrasivo fue el “*roll paper*”, el cual consiste en un cilindro con papel de lija en la superficie, con el que conociendo las condiciones y parámetros del ensayo tales como velocidad en r/min, tipo de abrasivo, peso de la carga, se determinó el comportamiento posterior del material, controlando la pérdida de masa y el espesor en la probeta (ASTM G65 – 81).

Se realizó en condiciones seca, utilizando un papel abrasivo con granos de óxido de silicio de grado 60, además se consideró los tres tipos de parámetros básicos, los cuales son: estructurales, operacionales y estructurales de interacción.

La elección del ensayo en seco se tuvo en cuenta por dos razones, la primera por que es en esas condiciones que trabajan las bolas y la segunda por que permite mostrar los mecanismos de erosión: eliminación superficial instantánea de la fase ligante, deformación plástica considerable, fractura de carburos grandes, crecimiento de grietas entre granos y rotura final de carburos (Gee *et al.*, 2003 y Gee *et al.*, 2004).

Para el ensayo de desgaste abrasivo se empleó el procedimiento siguiente: las probetas se limpiaron con alcohol y se dejaron secar para evitar errores en la medición de sus respectivas masas. Se determinó la masa inicial de cada probeta, utilizando una balanza analítica. La balanza y máquina tribológica se limpiaron de todo residuo y contaminante de pruebas anteriores.

Para el ensayo se empleó la metodología siguiente: se pegó el papel abrasivo al disco rotatorio, luego se fijó la probeta en el portaprobeta, se encendió de forma simultánea la pulidora metalográfica y el cronómetro, finalmente se retiró la probeta.

Luego de retirada las probetas, se limpió con agua y luego con alcohol absoluto para retirar los residuos y el abrasivo, seguido de un secado por aproximadamente cuatro minutos. Se pesó cada probeta por lo mínimo tres veces para hallar la masa promedio. Como las pruebas son por pérdida de masa acumulada, es necesario repetir el proceso, por lo tanto, se tiene que colocar en la misma posición y con la misma dirección de deslizamiento.

Para el cálculo de las bolas desgastadas se deben tener en cuenta diferentes factores que influyen en las mismas como son: el tiempo de explotación del molino, la carga y el diámetro de las bolas. 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 (1999) por la ecuación siguiente:

$$W_h = k \cdot t \tag{2.1}$$

Dónde:

W_h - desgaste lineal; mm

t - tiempo de trabajo; hr

De esta manera el coeficiente del desgaste se determina como:

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

Dónde:

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 aceros es de 0,6; hasta este valor se observa una dependencia lineal entre el aumento de la dureza del abrasivo y el desgaste que sufre 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:

$$\dot{W} = \frac{W_h}{t} \quad 2.3$$

Dónde:

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

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

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

Dónde:

D_p - grado de penetración; μm

HV - dureza del material más blando; MPa

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

F_n - fuerza sobre la zona de contacto; N

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

El desgaste en 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.

$$W_v = W_h \cdot A_n \quad 2.5$$

Donde

W_v - desgaste volumétrico; mm^3

A_n - área nominal de las bolas; mm^2

Entonces el área nominal se determina como: $A_n = 4\pi r^2$

2.7. Diseño de experimentos

Para efectuar el diseño de experimentos 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 el 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 efectuó un diseño de experimentos completamente aleatorio. Las variables consideradas fueron los diámetros de las mismas (D) y sus durezas (H).

Se realizó un muestreo aleatorio simple, este procedimiento se aplica con el objetivo de determinar el tamaño de la muestra mínima, 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 Miller *et al.* (2005).

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

Dónde:

$Z_{\alpha/2}$ - 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.

2.7.1. Selección de la variable de entrada y sus niveles

Se escogió la variable bola, porque además de ser el elemento esencial en el proceso de molienda, es la 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 es de esperar que haya una disminución en los diámetros de las mismas y un aumento de 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.

Para las variables de salida se escogió el diámetro y la 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. Las variaciones que se producen en relación con las mediciones de los diámetros después de su proceso de explotación se determinan a través de las ecuaciones siguientes:

$$\Delta D_{abs} = D_{antes} - D_{después} \quad 2.7$$

Dónde:

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

$D_{después}$ - diámetro de las bolas después del proceso de explotación, mm.

D_{antes} - diámetro de las bolas antes del proceso de explotación, mm.

$$\Delta D_{rel} = \left| \frac{D_{después} - D_{antes}}{D_{antes}} \right| \cdot 100\% \quad 2.8$$

Dónde:

ΔD_{rel} - variación relativa del diámetro de las 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.

2.7.2. Matriz de planificación de experimentos

Para el desarrollo de los experimentos se efectuaron 36 pruebas, 2 experimentos diferentes, seis réplicas para cada uno. En la tabla 2.5 se muestra la matriz de planificación de experimentos realizados en las bolas.

Tabla 2.5. Matriz de planificación de experimentos

Bola No. 1	Bola No. 2	Bola No. 3
D ₁ y H ₁	D ₁ y H ₁	D ₁ y H ₁
D ₂ y H ₂	D ₂ y H ₂	D ₂ y H ₂
D ₃ y H ₃	D ₃ y H ₃	D ₃ y H ₃
D ₄ y H ₄	D ₄ y H ₄	D ₄ y H ₄
D ₅ y H ₅	D ₅ y H ₅	D ₅ y H ₅
D ₆ y H ₆	D ₆ y H ₆	D ₆ y H ₆

De acuerdo a la matriz de planificación de experimentos, se realizaron 36 pruebas, las cuales 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.

2.7.3. Límites de tolerancia

Para brindar información en la solución de problemas de ingeniería, se necesita reunir datos, los cuales 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 realizó según el criterio de Hernández (1997).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad 2.9$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\sum_{i=1}^{i=n} X_i - \bar{X} \right)^2}{n-1}} \quad 2.10$$

$$LT_{m\acute{a}x} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad 2.11$$

$$LT_{m\acute{i}n} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad 2.12$$

Dónde:

\bar{X} - media aritmética del diámetro exterior de las bolas, mm.

t - estadístico de la distribución probabilística de Student.

El estadístico (t) se determina de acuerdo con 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 haya valores anormales, los mismos se eliminan procediendo como se indica a continuación según el criterio de Hernández (1997):

1. Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan \bar{X} y S (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos).
2. Se establece el intervalo dado por la ecuación $LT = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot S$ 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 según Miller *et al.* (2005).

2.7.4. 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, $H_0 : \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna, $H_0 : \mu_1 \neq \mu_2$

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

3. Criterio de rechazos de la hipótesis nula:

Se rechaza la H_0 si $F > F_c$; 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: para el cálculo se consideran las ecuaciones establecidas en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Ecuaciones 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)/(k-1)] / [SSE/k(n-1)]
Error	k(n-1)	SSE	SSE/k(n-1)	
Total	(k · n-1)	SST		

Entonces se procede a través de las ecuaciones siguientes:

$$C = \frac{T_i^2}{k \cdot n} \tag{2.13}$$

Dónde:

C: término de corrosión

T_i^2 - número total de n observaciones en la i-ésima muestra

k - cantidad de tratamientos

n - tamaño de muestra por tratamientos

$$SST = \sum_{i=1}^K \cdot \sum_{j=1}^N \cdot Y_{ij}^2 \tag{2.14}$$

Dónde:

SST - suma de cuadrado total.

Y_{ij}^2 - variable que adquiere el valor de cada observaciones.

$$SS(T_r) = \frac{\sum_{i=1}^K \cdot T_i^2}{n} - C \tag{2.15}$$

Dónde:

SS (Tr) - suma de cuadrado para tratamientos.

$$SSE = SST - SS (Tr) \quad 2.16$$

Dónde:

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.

2.7.5. 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 y se determinan de acuerdo con Miller *et al.* (2005) como:

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

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

Dónde:

X_i - es la variable que adquiere los valores de las abscisas.

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 para el cálculo de a y b como:

$$a = y - b \cdot x \quad 2.19$$

Dónde:

y - es el promedio aritmético de las observaciones referidas a las ordenadas.

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

Notaciones especiales

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n X_i \right]^2}{n} \quad 2.20$$

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

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 o -1.

El Software Excel se utilizó 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. Para el procesamiento se empleó el software STATGRAPHICS.

2.8. Determinación del aspecto económico

Como plantean Ashimov *et al.* (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.

El costo anual de materiales se determinó de acuerdo con algunos parámetros relacionados con la sustitución de bolas que considera este costo por materiales, teniendo en cuenta asimismo la frecuencia de recarga del molino y el costo de las bolas.

$$C_{AM} = F_{AR} \cdot C_B \quad 2.22$$

Dónde:

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

C_B - Costo de las bolas, €.

2.9. Conclusiones del capítulo 2

- ✓ Se establecieron los métodos de investigación y los procedimientos para la realización de los ensayos con el empleo de tecnologías y equipamientos que garantizan precisión y confiabilidad para determinar el comportamiento microestructural, así como el desgaste de los cuerpos molidores.
- ✓ Las ecuaciones planteadas caracterizan el comportamiento del desgaste abrasivo en las bolas de los molinos fabricadas de acero AISI D2, así como la realización del diseño experimental.
- ✓ Se realizaron ensayo de desgaste abrasivo para determinar la resistencia del acero AISI D2 empleado en la fabricación de los elementos molidores, teniendo en cuenta las técnicas operatorias.

Capítulo 3

Análisis de los resultados

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. 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 microestructural de las bolas de los molinos, elaboradas de acero AISI D2 y sometidas a la acción de desgaste abrasivo ante cargas de trabajo y su posterior incremento en la dureza superficial de las mismas.

El objetivo del capítulo es determinar el comportamiento microestructural, así como el procedimiento metodológico que caracteriza el desgaste abrasivo en las bolas de los molinos deformadas en frío, las cuales están fabricadas de acero AISI D2.

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

En la tabla 3.1, se muestra la composición química de cada bola. Las mismas se obtuvieron como resultado promedio de tres chispazos a cada una de ellas. Se realizó empleando un espectrómetro cuántico de masa, de la marca GS 1000-II, modelo OBLF 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.

Tabla 3.1. Composición química de los elementos moledores, % en masa

Tipo	Bola No. 1				
AISI D2	C	Si	Ti	Mn	V
	1,563	0,334	0,005	0,412	0,024
	Mo	Cr	Ni	P	Fe
	0,550	11,90	0,164	0,007	80,76
	Bola No. 2				
	C	Si	Ti	Mn	V
	1,560	0,329	0,003	0,436	0,039
	Mo	Cr	Ni	P	Fe
	0,520	11,84	0,159	0,009	81,94
	Bola No. 3				
	C	Si	Ti	Mn	V
	1,562	0,330	0,005	0,428	0,043
	Mo	Cr	Ni	P	Fe
	0,521	11,87	0,162	0,006	81,87

Según la composición química obtenida en cada una de las bolas y comparadas con la establecida por las normas, la misma se corresponde con la de un acero herramienta del tipo AISI D2 según norma ASTM A 681. En correspondencia con cada uno de los elementos que presentan, los mismos están en los rangos que se establecen, pero con decrecimiento en el tenor del contenido molibdeno.

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. La figura 3.1, se corresponden con las superficies de las bolas, parte que mayormente está expuesta al fenómeno del desgaste.

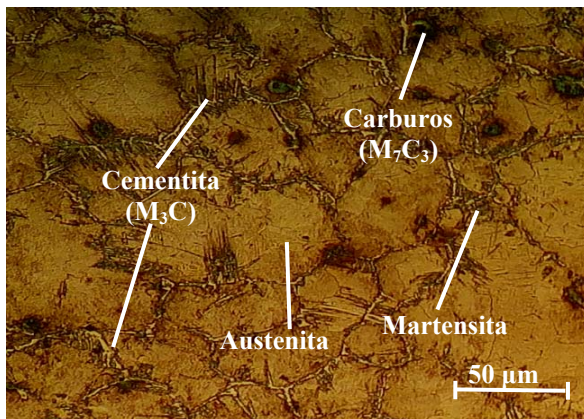


Figura 3.1a. Microestructura bola No.1.

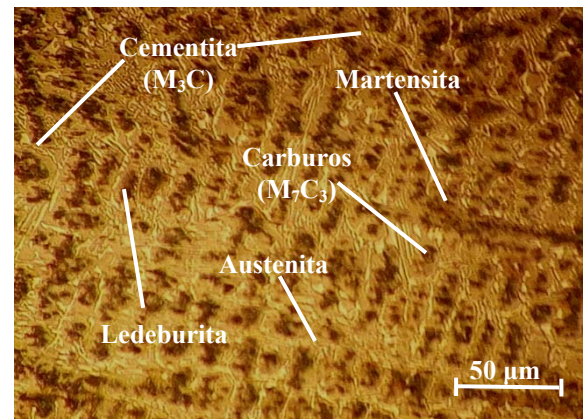


Figura 3.1b. Microestructura bola No.2.

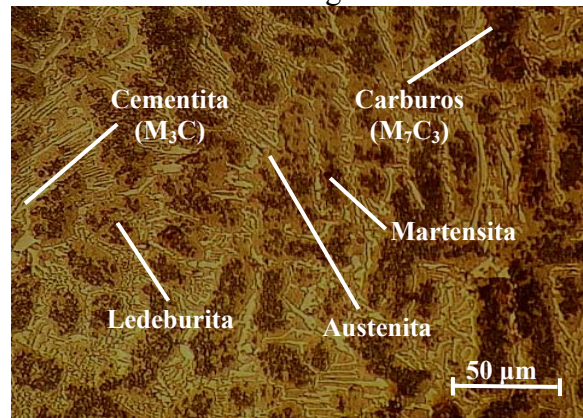


Figura 3.1c. Microestructura bola No.3.

En las figuras 3.1 (a, b y c) se observan las microestructuras de las bolas luego de retiradas de servicio, las cuales por el contenido de carbono ($\approx 1,561\%$) y cromo ($\approx 11,87\%$), estos aceros presentan un alto contenido de carburos, los cuales forman una red tridimensional dentro del mismo. Se observa una estructura de cementita proeutectoide (M_3C) de forma interdendrítica, rodeando los granos de martensita (figura 3.1a), así como la presencia de

carburos M_7C_3 , atribuible a los elementos cromo y carbono. Las figuras 3.1b y 3.1c presentan microestructuras dendríticas, en forma de collar, rodeando a la fase austenítica y en bordes de grano, muestran una precipitación parcial, en ambas se observa una distribución equiaxial de los granos.

Se observan las líneas de deformación, así como también una transformación martensítica instantánea debido a la deformación que sufrió el material al ser desgastado. Las estructuras dendríticas observadas en las figuras 3.1b y 3.1c, en relación con la muestra patrón, no cambian su morfología, pero de igual manera que en la figura 3.1a ha disminuido el tamaño de grano, lo cual es característicos de elementos sometidos fundamentalmente a esfuerzos de impacto o percusión durante el proceso de molienda, en la medida que las bolas realizan el trabajo de conminución y sufren desgaste, también están expuestas al fenómeno de endurecimiento por acritud.

Los carburos (M_3C) que se observan presentan un porcentaje ledeburítico reducido; en la figura 3.1c, los carburos interdendríticos complejos (M_7C_3 - M_3C) aparecen en forma de placas. La ledeburita es definida como la estructura eutéctica establecida entre el Fe/ Fe_3C . El término sirve para caracterizar las transformaciones eutécticas. Esta estructura se forma generalmente en un proceso de dos etapas. La primera en la formación del hierro blanco con el crecimiento de números de dendritas Fe_3C , tal como en aleaciones eutécticas y en estas aleaciones, las dendritas Fe_3C crecen alrededor de las preexistentes dendritas de austenita, según ha sido reportado por Dasa *et al.* (2008).

3.3.1. Comportamiento microestructural de los puntos medios

Se determinó el comportamiento microestructural en los puntos medios de las muestras. Las microestructuras de la figura 3.2 se corresponde con el resultado de esta zona.

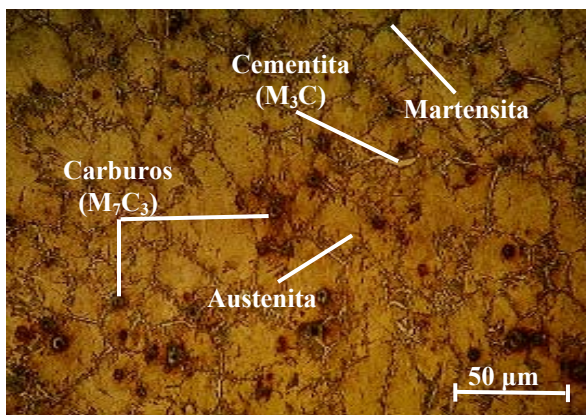


Figura 3.2a. Microestructura bola No.1.

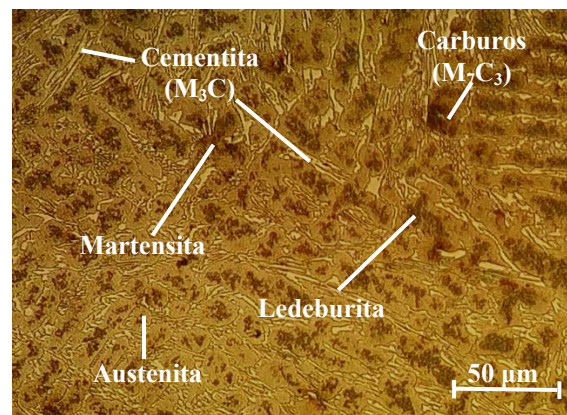


Figura 3.2b. Microestructura bola No.2.

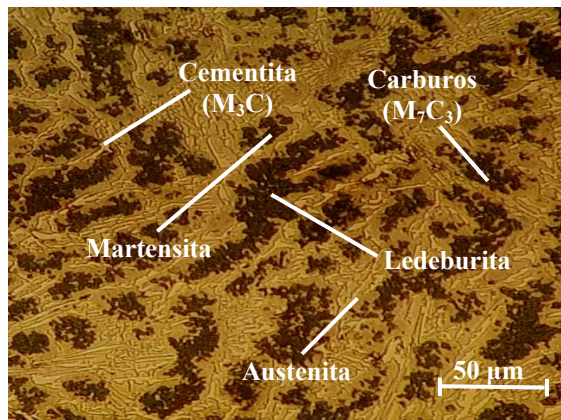


Figura 3.2c. Microestructura bola No.3.

En las bolas desgastadas y retiradas de servicio, las estructuras muestran zonas con baja concentración de carburos y con distribución homogénea en pequeña banda. La menor presencia de los mismos, presumiblemente haya sido un desprendimiento de estos, como mecanismo de desgaste. Así mismo se observan las líneas de deformación con una distribución en dirección perpendicular, mayormente donde ocurre la deformación.

Las fases presentes y que están en correspondencia con las analizadas superficialmente en las bolas, presentan disminución en el tamaño de ellas, sin embargo, una vez que exista reducción en estas fases, conduce a un incremento de la dureza. Hornbogen (1981) planteó que la resistencia al desgaste es proporcional a las áreas parciales de carburos y de la matriz, mientras que Zum-Gahr (1982) refiere que los factores que influyen sobre la resistencia al desgaste son la orientación, tamaño, módulo de elasticidad, dureza relativa y resistencia de la segunda fase.

Al aplicar una carga mayor en las bolas al inicio del proceso, se utiliza mayor energía para la deformación del acero AISI D2, lo cual permite ir desprendiendo los carburos de la matriz, mientras que, cuando las bolas van perdiendo el diámetro, la carga es menor, por lo que la resistencia al desgaste de estos aceros es más dependiente de los carburos primarios, de su orientación y homogeneidad que de la dureza de la matriz.

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 mismas por el fenómeno de la acritud, lo que guarda similitud con los resultados obtenidos por Alcántara *et al* (2008).

3.3.2. Comportamiento microestructural en el centro de las bolas

Las microestructuras observadas en la figura 3.3 se corresponden con el centro de las bolas. Los resultados obtenidos fueron realizados de igual manera en las tres bolas.

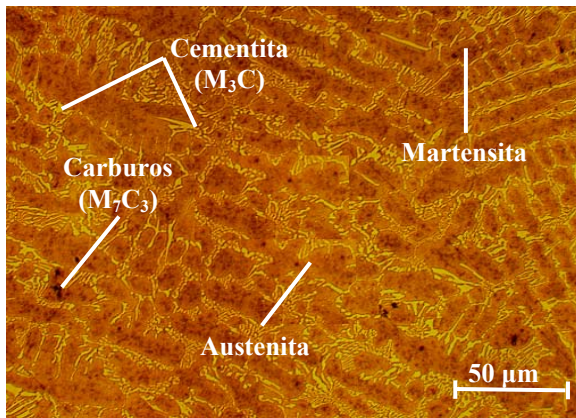


Figura 3.3a. Microestructura bola No.1.

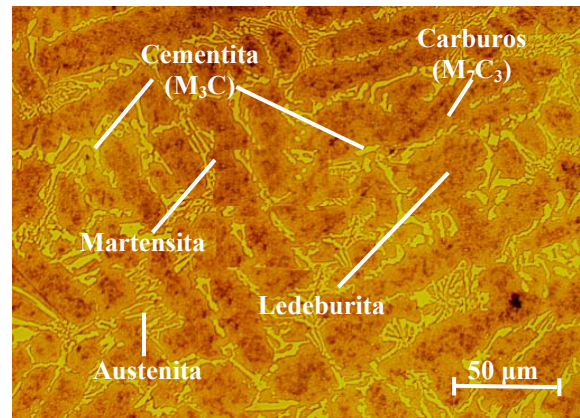


Figura 3.3b. Microestructura bola No.2.

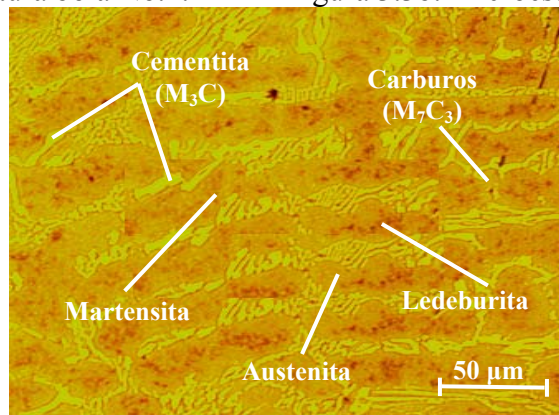


Figura 3.3c. Microestructura bola No.3.

Las muestras analizadas en el centro de las bolas presentan similitud con la muestra patrón, con una distribución equiaxial de las fases sobre la matriz. Se mantiene además el tamaño de granos No. 6, con estructura orientada. Este comportamiento está asociado a que, en esta zona, aunque existe deformación del retículo cristalino, el efecto del fenómeno de la acritud tiene menor incidencia en esta área.

La no variación de la estructura en el centro de las bolas ocurre ya que al estar en contacto con el mineral y chocar una con otra, las mismas endurecen por el fenómeno de la acritud, el esfuerzo máximo normal se localiza sobre la superficie, el esfuerzo cortante máximo se localiza en el interior del material, por debajo del material. El coeficiente de desgaste abrasivo de una superficie, es directamente proporcional a la dureza de la superficie, razón por lo que los elementos moledores en esta área mantengan un comportamiento en las fases de forma equiaxial, también reportado por Archard (1953) y Albertin (2007).

3.3.3. Determinación del porcentaje de microconstituyentes

Se analizó la distribución de los microconstituyentes en las muestras en cada una de las capas analizadas luego de ser retiradas de servicio. Las figuras 3.4a, 3.4c y 3.4e, se corresponden con las estructuras de las diferentes capas y las 3.4b, 3.4d y 3.4f, los microconstituyentes obtenidos.

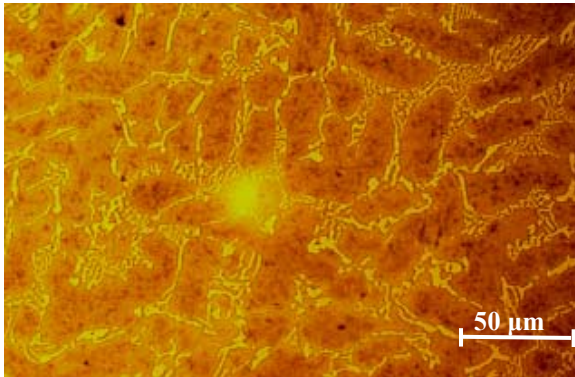


Figura 3.4a. Microestructura bola No.1.

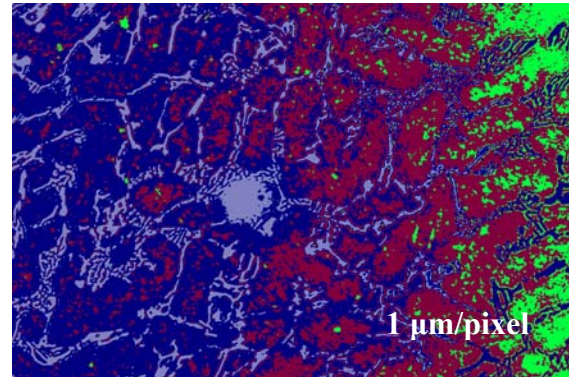


Figura 3.4b. Microconstituyentes bola No.1.

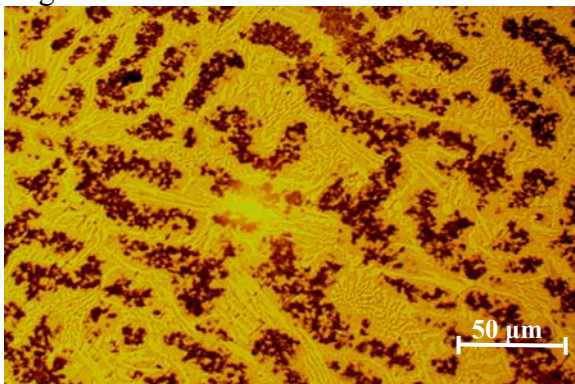


Figura 3.4c. Microestructura bola No.2.

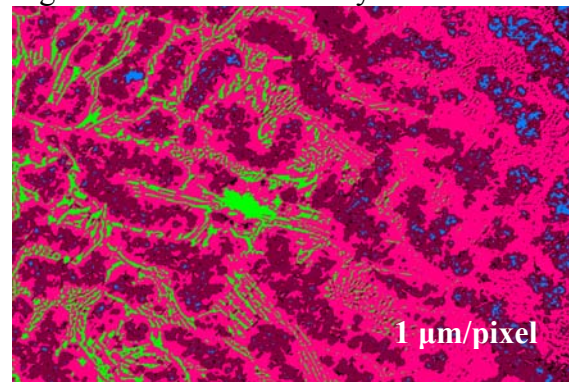


Figura 3.4d. Microconstituyentes bola No.2.

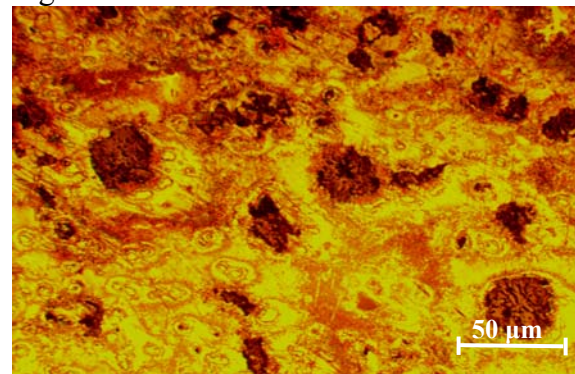


Figura 3.4e. Microestructura bola No.3.

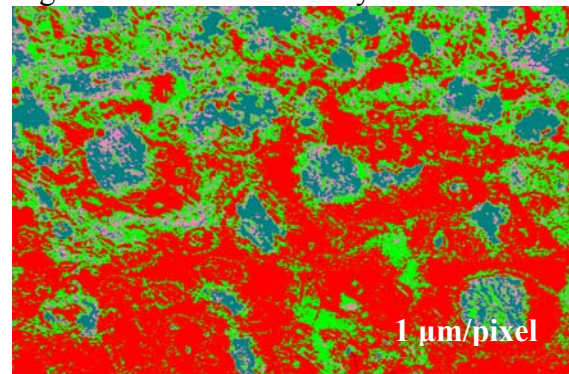


Figura 3.4f. Microconstituyentes bola No.3.

Al evaluar el comportamiento de la distribución de los microconstituyentes se establece las fases presentes, según las microestructuras en cada una de las capas analizadas. Se establece a través del método los contornos y fronteras de cada uno de los granos de la estructura metalográfica. La figura 3.5a se corresponde con las fases para la bola No. 1, la 3.5b con las de la bola No. 2 y la figura 3.5c con las fases de la bola No. 3.

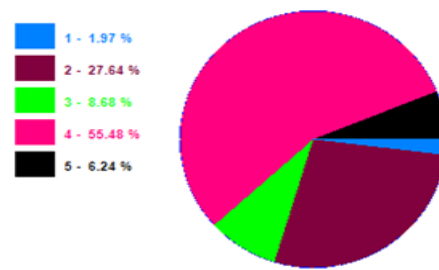
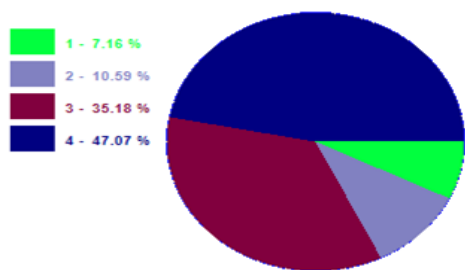


Figura 3.5a. Fases presentes en la bola No.1. Figura 3.5b. Fases presentes en la bola No.2.

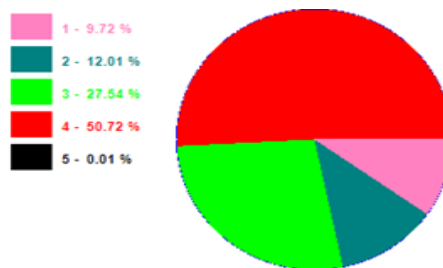


Figura 3.5c. Fases presentes en la bola No.3.

En la tabla 3.2 se muestra el área que ocupan los mismos en la estructura.

Tabla 3.2. Área de los microconstituyentes en la estructura

Datos de las fases en la bola No. 1			Datos de las fases en la bola No. 2		
Microconstituyentes	Área	Área %	Microconstituyentes	Área	Área %
Carburos M_7C_3	60 251	7,16	Cementita M_3C	16 578	1,97
Cementita M_3C	89 131	10,59	Ledeburita	232 624	27,64
Martensita	296 140	35,18	Martensita	73 051	8,68
Austenita	396 206	47,07	Austenita	466 985	55,48
			Carburos M_7C_3	52 490	6,24
Datos de las fases en la bola No. 3					
Microconstituyentes	Área	Área %			
Martensita	81 778	9,72			
Cementita M_3C	101 105	12,01			
Carburos M_7C_3	231 806	27,54			
Austenita	426 919	50,72			
Ledeburita	120	0,01			

Al establecer la relación de las fases presentes en la microestructura de las muestras en las capas deformadas, se pudo determinar que, en la bola No. 1, la influencia la ejerce la fase austenítica con el 47,07 %; precedida por la martensita con el 35,18 %. En la bola No. 2 la fase mayoritaria es la austenita con el 55,48 % y luego los collares de ledeburita que rodea las demás fases en la matriz con el 27,64 %. En la bola No. 3 el área de fases es la austenita con el 50,72 % y luego los carburos con el 27,54 %.

La distribución de los microconstituyentes está asociada a los parámetros del proceso de deformación por el fenómeno de la acritud. Durante el período de trituración, en las

superficies de las bolas va a existir una mayor agrupación de carburos, en la medida que los elementos moledores se van desgastando, entonces en el centro va a haber una tendencia a mantener la misma estructura que la de la muestra patrón.

3.4. Análisis de la dureza en las capas deformadas

En el proceso de molienda, la fatiga de contacto la capa superficial del metal se forma como resultado de la trayectoria de la deformación plástica del metal, teniendo esto lugar en condiciones de deformaciones de signo variable y bajo el surgimiento de diferentes cargas internas inducidas no simétricas de carácter cíclico. En las bolas, el análisis de la dureza se realizó en las diferentes zonas. En la figura 3.6 se muestran los resultados.

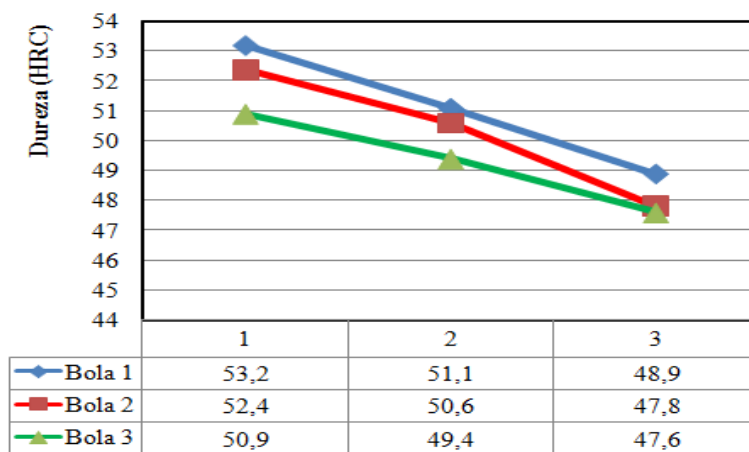


Figura 3.6. Dureza en las capas deformadas

Las bolas poseen una dureza promedio en todas las superficies analizadas, compuestas por tres capas; en la primera (azul) se alcanza un valor de dureza por efecto del tratamiento por deformación por el fenómeno de la acritud; la segunda superficie que se corresponde con la capa media (roja), es endurecida por el apilamiento o aplastamiento de los granos y la tercera capa (verde), ubicada en el centro de la bola mantiene esta propiedad según la asignada para el servicio de molienda. En los tres casos analizados se observa que, en la medida que se acerca al centro de las bolas esta (la dureza) va disminuyendo. Se puede observar que, en dependencia de la fricción y el desgaste, las capas alcanzan diferentes durezas, lo que es consistente con lo expuesto por Alcántara *et al.* (2008).

3.5. Análisis del desgaste en las bolas

Para determinar el desgaste lineal en las bolas se empleó 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 el coeficiente K se determinó mediante la ecuación 2.2, y se obtuvo como resultado 0,55

para la primera bola; 0,56 para la segunda y 0,60 para la tercera. La primera bola alcanza un desgaste de 13,2 mm; la segunda de 13,4 mm y la tercera de 14,4 mm.

El desgaste en el material de los cuerpos molidores ocurre de forma rápida lo cual está en correspondencia con la dureza, la forma y el tamaño de las partículas de mineral que está siendo fragmentado. Las velocidades específicas de desgaste por mecanismo único, con distribución radial de dureza y de microconstituyentes, son funciones del diámetro de las bolas, donde tiene influencia el proceso de la conminución que se realiza en seco, planteado por Laborde (2005).

La velocidad del desgaste en las bolas se determinó considerando el desgaste lineal W_h , al sustituir estos valores en la ecuación 2.3 se tiene que la bola uno se desgasta a una velocidad de 0,55 mm/h; la bola 2 a 0,56 mm/h y la bola 3 a 0,60 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 es de HV = 1 870, 1 820 y 1 710 MPa, la fuerza sobre la zona de contacto es de 40,3 N (masa de la bola; 4,11 kg por el valor de la gravedad; 9,8 m/s²).

Como resultado se obtuvo que el grado de penetración para la primera bola fue de 0,48 μm ; para la segunda de 0,49 μm y para la tercera fue de 0,52 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.

3.5.1. 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 uno es de 0,0313 mm³, el de la bola 2 de 0,0328 mm³ y el de la bola 3 de 0,0358 mm³. Se

han obtenido diferentes valores de resistencia al desgaste en cada una de las diferentes bolas, lo que demuestra que esta resistencia se incrementa con el aumento de la dureza. En la figura 3.7 se muestra el comportamiento del desgaste volumétrico con relación al tiempo.

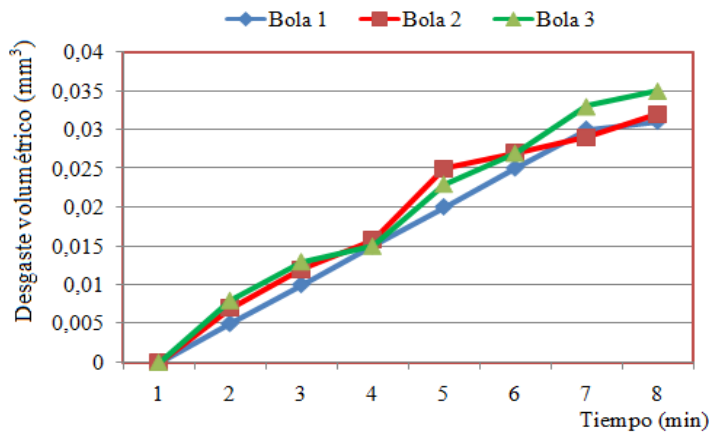


Figura 3.7. Comportamiento del desgaste volumétrico con relación al tiempo.

Se observa que, al incrementarse el tiempo de prueba, el volumen desgastado en todas las condiciones aumenta, existiendo diferencias no apreciables en los comportamientos de acuerdo a la deformación del acero. Pese a obtenerse prácticamente un mismo valor de volumen desgastado a los pocos minutos de prueba en todas las condiciones, a medida que aumenta el tiempo se van desplegando diferencias en el comportamiento del desgaste, de manera que a los tiempos finales se observan diferencias en el volumen desgastado de acuerdo a la dureza de cada capa desgastada y deformada.

El acero AISI D2 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-mineral se ha determinado que el tamaño de las partículas es superior a $1 \mu\text{m}$, cuando se introduce o hay existencia en el par tribológico de partículas abrasivas con estas características, provoca el desgaste en masa abrasiva, aparece el microcorte o rayado de la superficie, criterio que coincide con lo reportado por Bhushan (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. Se escoge un nivel de confianza del 95 % para el establecimiento del estadístico crítico (Z). 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 95 % 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 argumentos siguientes considerado por Miller *et al.* (2005): la prueba de Fischer es poco sensible a la violación de la homogeneidad de la varianza, se obtienen resultados bastantes confiables aun violándose dichas condiciones; además, se hace necesario la verificación del cumplimiento del supuesto de homogeneidad, cuando el experimento es desbalanceado, que ocurre si la cantidad de observaciones por tratamiento no es la misma.

La tabla 3.3 muestra 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 3.3. Resultados de los diámetros y de las durezas en las bolas

Diámetros (mm)			Dureza (HRC)		
Bola No. 1	Bola No. 2	Bola No. 3	Bola No. 1	Bola No. 2	Bola No. 3
44,8	46,4	48,5	54,1	53,3	51,3
45,0	46,5	48,7	53,8	53,2	51,1
45,3	46,6	49,0	53,5	52,4	50,8
45,6	46,8	49,3	52,9	52,3	50,5
45,6	47,2	49,4	52,7	52,1	50,1
46,0	47,9	49,6	52,3	51,1	49,9

Al determinar los diámetros en las bolas y relacionarlos con las durezas en cada una de las capas deformadas se observa que, son proporcionales ambos parámetros lo cual presumiblemente ocurra porque a mayor tamaño, tiene más incidencia en el choque de estas

con el mineral y con el forro del molino, lo cual conlleva a un incremento del endurecimiento por acritud, debido a la deformación.

Como consecuencia de esta teoría, en cualquier instante de tiempo, después de que el cuerpo molidor 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. La velocidad de disminución de su diámetro es constante en el tiempo, por lo tanto, el desgaste obedece a una cinética de orden cero. 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 (Sepúlveda, 2004).

En la tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos a partir del cálculo para el desarrollo del procedimiento para la prueba de Fischer, utilizando las ecuaciones desde la 2.13 a la 2.16 del epígrafe 2.7.4. 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 3.4. Resultados del cálculo de Fischer para la comparación de diámetros y durezas

Análisis de varianza para la comparación de los diámetros					
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			
Análisis de varianza para la comparación de la dureza					
Origen de las variaciones	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Crítico para F
Tratamientos	2	1627,44	813,72	115,1	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, existen diferencias significativas entre los diámetros de las bolas de los molinos para la trituración del mineral, después de la puesta en explotación al nivel de confianza 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, existen diferencias

significativas entre los valores de la dureza superficial de las bolas para la trituración del mineral, después de la puesta en explotación al nivel de confianza del 95 %.

3.6.2. Límites de tolerancia

La tabla 3.5 muestra los rangos de variación del diámetro y la dureza superficial de las tres bolas que fueron objeto del muestreo. Los límites de tolerancias indicados se determinaron utilizando las expresiones de la 2.9 a la 2.12. Los resultados obtenidos justifican esta variación en ambos parámetros para un nivel de confianza del 95 % y 5 grados de libertad.

Tabla 3.5 Rango de variación de los diámetros

Límites de tolerancia	Bola No. 1	Bola No. 2	Bola No. 3
Límite máximo	46,51	48,35	50,18
Límite mínimo	44,25	45,45	47,99
Media	45,4	46,9	49,1
Rango de variación de las durezas			
Límites de tolerancia	Bola No. 1	Bola No. 2	Bola No. 3
Límite máximo	55,00	54,47	52,04
Límite mínimo	51,43	50,33	49,20
Media	53,2	52,4	50,6

El análisis de los resultados indicados en la tabla anterior 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 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.

3.6.3. Ajuste de curvas

Para el ajuste de la curva se consideró que, las velocidades específicas de desgaste por mecanismo de abrasión, con distribución radial de dureza y de microconstituyentes, son funciones del diámetro de las bolas. 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 mediciones son representativas de las tendencias del comportamiento de las variables medidas. En la figura 3.8 se muestra el comportamiento de la dureza de las bolas en función del diámetro, ambos parámetros obtenidos después de retiradas de explotación por efecto del fenómeno de desgaste.

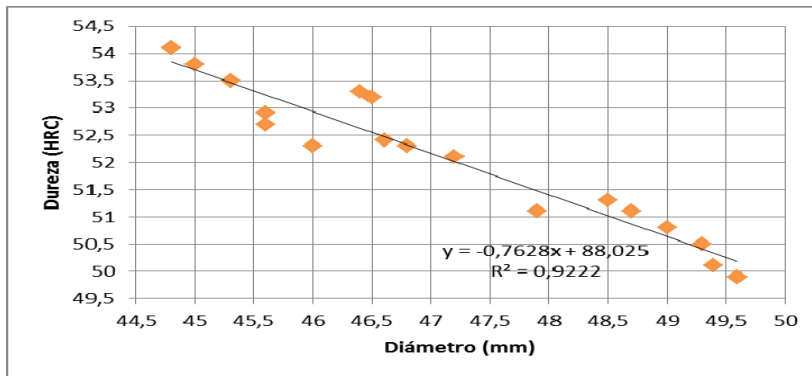


Figura 3.8. Comportamiento de la dureza superficial de las bolas en función del diámetro.

Se observa que la dureza aumenta con la disminución del diámetro, a medida que se desgastan las bolas su dureza va incrementándose, ocurre bajo el efecto de rotación ya que las bolas al ser arrastradas a lo largo de las paredes, ruedan y luego vuelven a caer en cascada unas sobre las otras, sometiendo la materia a moler a innumerables acciones de presión, fricción y choque, sin embargo será más forzado, cuanto más larga sea la permanencia de la materia en el tambor, y teóricamente, no hay límite de finura que pueda obtenerse y el tratamiento de una carga puede variar, según las necesidades, desde unos minutos hasta 24 horas o más.

En la tabla 3.6 se muestra el modelo matemático que relaciona al diámetro de las bolas con la dureza superficial y los criterios de idoneidad del modelo ajustado.

Tabla 3.6. Relación entre la dureza y el diámetro

Modelo	Parámetros	Criterio de idoneidad	Ecuación
$H = -0,7628 \cdot D + 88,025$	D- es el diámetro de las bolas, mm. H- es la dureza de las bolas, HRC.	$R^2 = 0,9222$ F = 1,53 y F = 0,43 Intercepción = 0,04 Pvariable = 0,43	3.1

Se aprecia que la representación de la relación entre la dureza superficial y el diámetro por un modelo lineal es significativa al nivel de confianza del 95 %, puesto que se cumplen con todos los criterios de idoneidad, el coeficiente de correlación está próximo a la unidad, el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico y la probabilidad para la intersección y para las variables son menores que 0,05.

3.7. Análisis de la valoración económica

Al abordar la valoración técnico económico del proceso de desgaste abrasivo en las bolas, se parte del hecho de que durante la fabricación de las muestras intervienen en el mismo proceso de maquinado: corte, preparación de muestra para análisis químico, análisis metalográfico, encapsulado, pulido, mano de obra, técnico de laboratorio. Todo ello si repercute económicamente en el proceso. La determinación de las consecuencias negativas del desgaste, condiciona un funcionamiento más eficiente en la máquina 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, 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 que se generan durante el proceso de elaboración de las muestras son:

Costo de preparación de las muestras: \$ 10,61

Costo de materiales: \$ 26,89

Costo de la mano de obra: \$ 24,94

Costo de la energía eléctrica: \$ 5,4

El costo total del proceso es de 67,84 CUP.

3.7.1. Costo de las bolas

Según el manual de precios oficiales de la Empresa Importadora del Níquel, el precio de una carga completa de bolas para los molinos de 54 ton es de 67 662 € (1 253 € cada tonelada de bolas), a este valor se le agregan 7 069 € de cif marítimo; el cual se descompone en 2 400 € de la puesta fob, 4 580 € de flete marítimo y 89 € de seguro, más el

pago de intereses (el cual representa el 5,5 % de la suma del precio de una carga completa de bolas más el cif marítimo), dando como resultado 4 110 €, lo que genera un importe total de 78 841 €. Para los molinos de 43,2 ton el precio de una carga de bolas es de 54 130 €, más 7 069 € de cif marítimo y 3 366 € de pago de intereses, da como resultado un importe total de 64 565 €.

3.7.2. Análisis del costo anual de materiales

Para determinar el costo anual de materiales se utiliza la ecuación 2.22 del epígrafe 2.8 donde está presente la frecuencia anual de recarga del molino; una carga completa de bolas dura alrededor de cinco meses y medio (veintidós semanas). Estos se recargan semanalmente con el objetivo de contrarrestar el desgaste generado durante el proceso con 1 ton de bolas, a partir de la segunda semana de haber cargado completamente el molino. Por tanto al precio total de una carga completa de bolas hay que sumarle 26 313 € de las 21 ton de bolas recargadas al molino semanalmente, obteniendo como resultado un valor total de 105 154 € para los molinos de 54 ton y 90 878 € para los molinos de 43,2 ton. Sustituyendo estos valores en la ecuación 2.22 y multiplicándolos por dos tenemos que el costo anual de materiales para los molinos de 54 ton es de 210 308 € y para los de 43,2 ton es de 181 756 €.

3.8. Valoración del impacto 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 altas temperaturas y las lluvias, pasan a las aguas subterráneas contaminándolas.

El empleo de tratamientos térmicos para lograr durezas superficiales en las piezas conlleva a un mayor consumo de energía eléctrica, donde casi siempre la pieza adquiere un temple volumétrico (como en el caso del temple y revenido). 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 y líquidos (grasas sólidas, aceites, restos de combustibles).

También es conocido que la mayor parte de los residuos generados por la industria de tratamiento térmico proviene de los baños usados (soluciones de cianuro), agentes enfriadores empleados, aguas residuales de la limpieza de piezas, medios abrasivos, 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, así como de los esfuerzos que a numerosas instancias se hacen en Cuba para disminuir el impacto negativo que estas tecnologías poseen.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

- ✓ Al analizar el comportamiento microestructural de las capas deformadas se determinó que en las mismas predomina una estructura cementita proeutectoide, y por efecto de la fricción entre las bolas, el mineral y las paredes del molino existe una disminución del tamaño del grano desde el No 10 hasta el No 11.
- ✓ 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 en la superficie de las mismas, la cual presenta una dureza mayor que las otras capas analizadas.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ La fricción entre las bolas, el mineral y las paredes del molino deforma las capas superficiales de las bolas, sin embargo, estas mantienen las mismas estructuras de cementita proeutectoide (M_3C), granos de martensita, así como la presencia de carburos (M_7C_3), pero con un menor tamaño de grano por efecto de la acritud.
- ✓ 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 valores de 48,9; 47,8 y 47,6 HRC en el centro de las muestras hasta valores de 53,2; 52,4 y 50,6 HRC en las superficies de las mismas, las cuales endurecen por la acritud.
- ✓ Para un radio de partículas de 0,15 mm y una velocidad de desgaste promedio de 0,55 mm/h en las bolas provoca la existencia de rayado, microcorte, la formación de surcos y originan el desplazamiento del material por la deformación plástica, el mecanismo de desgaste presente en las bolas es desgaste en masa abrasiva.
- ✓ Los molinos se cargan completamente dos veces al año, cada cinco meses y medio (veintidós semanas). Además, se les mantiene una recarga de bolas semanalmente para contrarrestar el desgaste generado en el proceso, realizándose un total de 2 cargas completas y 42 recargas semanales, lo que genera un costo anual de 181 756 €

RECOMENDACIONES

- ✓ Determinar el efecto de las tensiones que surgen en las bolas a través de técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) o difracción de rayos X, con las cuales se pueda evaluar la deformación reticular y el tamaño de la cristalita en el acero AISI D2.
- ✓ Analizar otros materiales de los que se emplean en el proceso de molienda para que puedan ser utilizados en la molienda de la laterita, con el objetivo de alargar el período de recarga de los molinos y disminuir el costo total del proceso.

Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Albertin, E.; Moraes, S.L. Maximizing wear resistance of balls for grinding of coal. *Wear* 263 43–47, 2007.
2. Albertin, E.; Sinatora, A.; Pitaluga, G.; Parada, A. Relación entre factores microestructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino, *Ingeniería Mecánica*, 1(2): 57 – 62, 2008.
3. Alcántara, D. Comportamiento del desgaste en pasadores de equipos de laboreo minero fabricados de acero AISI 1045, 2012.
4. Alcántara, D.; Fernández, T.; Rodríguez, I. Comportamiento de las capas deformadas por rodadura en los equipos de laboreo minero. 21 (01) 26-32, 2008.
5. Allen, C.; Sheen, M.; Williams, J.; Pugsley, V. The wear of ultra-fine WC-Co hard metals. *Wear*. 250 (125) 604 – 610, 2001.
6. Álvarez, E. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. *Construcción de Maquinaria*. UCLV. Año 20. N 2. p 69 - 76. Mayo - Agosto. 1999.
7. Andréiev, S.E.; Perov, V.A.; Zverievich, V.V. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. 1ed. Pueblo y Educación, p. 431, La Habana, 1987.
8. Archard, J. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 24, 981 – 8, 1953.
9. Ashimov, A.; Sagyngaliev, K.; Omarov, A. Scheduling a continuous plus batch process and marketing, 1976.
10. Askeland, D. *La Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Grupo Ed. Iberoamérica, México, 1998.
11. ASTM. *ASM Handbook Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM International. USA. 1992.
12. Aust, K.; Rutter, J. Ductility and Grain Size of Nanocrystalline Iron Produced by Mechanical Attrition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 215 (21) 119 – 127, 1959.
13. Austin, L.G.; Concha F. *Diseño y Simulación de circuitos de molienda y clasificación*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED. Subprograma de Tecnología Mineral. Red de Fragmentación XIII-A. Concepción. Chile. 1994.
14. Austin, L.G.; Klimpel, R.R.; Luckie, P.T. *Process Engineering of Size Reduction. Ball Milling*. Ed: Society of Mining Engineers. New York. 1984.

15. Ball, A. On the Importance of Work Hardening in the Design of Wear Resistant Materials", *Wear* 91, págs. 201, 1983.
16. Bansal, P.; Shipway, P.; Leen, S. Residual stresses in high-velocity oxy-fuel thermally sprayed coatings - Modelling the effect of particle velocity and temperature during the spraying process. *Acta Materialia*. Vol. 55, pp. 5089 - 5101. 2007.
17. Baudrier, E.; Nicolier, F.; Millon, G.; Ruan, S. Binary-image comparison with local-dissimilarity quantification. *Pattern Recognition*, 41: 1461-1478. 2008.
18. Bedolla-Jacuinde, A.; Arias L.; Hernández B. Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Iron *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 12 (4) 371 - 382, 2003.
19. Belyakov, A.; Kaibyshev, R.; Sakai, T. New grain formation during warm deformation of ferritic stainless steel. *Metall. Trans. A*. 29 (1) 161 -167, 1998.
20. Belzunce, F. *Aceros y Fundiciones: Estructuras, Transformaciones, Tratamientos Térmicos y Aplicaciones*. Universidad de Oviedo, 2001.
21. Benavente, H. Correlación empírica para estimar consumos de medios de molienda, X *Symposium de Molienda Moly-Cop*, 2007.
22. Berger, E.; Núñez, L.; Yarín, A. Análisis de la confiabilidad del sistema de molienda en una planta concentradora, basado en la criticidad. *Revista de la Facultad de la Ingeniería Industrial*. 17(1): 56-64. 2014.
23. Bermúdez, M. Erosión–corrosión de tantalio y aceros inoxidables, *Memorias del IX Congreso de Ciencia y Tecnología de Materiales*, Madrid, España, 2003.
24. Bhushan, B. *Modern Tribology Handbook*, vol. 2: Materials, Coatings & Industrial Applications, CRC Press, 1275 - 1297, 2001.
25. Blau, P. *Lubrication and Wear Technology*, Glossary of Terms in *ASM Handbook*. Vol. 18 Friction, printed in USA, p. 942, 1992.
26. Bond, F.C. *Crushing and Grinding Calculations*, Allis Chalmers Tech. Pub. 07R9235B, 1961.
27. Bond, F.C. *Metal wear in crushing and grinding*. Allis-Chalmers Publication 07P1701, 1963.
28. Bond, F.C. *New equation for calculating the work index from A–C closed circuit ball mill grindability test*, Allis Chalmer Publication, 1960.
29. Bond, F.C. *The Third Theory of Conminution*. *Trans. AIME*. Vol. 193. 484-494. 1952.

30. Bower, A.; Johnson, K. The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact. *J. Mech. Phys. Solids*. Vol. 37, no. 4. P 471 - 493. 1989.
31. Callister, W. *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah John Wiley & Sons, Inc. 8195 p. ISBN 0 – 471 - 32013 - 7. 1999.
32. Chacín, F. *Diseño y análisis de experimentos I*. Ed. FEPUVA – UCV. Caracas, Venezuela. p 388. 2000.
33. Chenje, T.; Radziszewski, P.; Hewitt, D. Steel media wear: experimentation, simulation and validation. *CMP Conf.*, 557–572, 2009.
34. Chesnaud, C.; Réfregier, P.; Vlady, B. Statistical region snake-based segmentation adapted to different physical noise models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21 (11):1145-1157. 1999.
35. Čikara, D.; Rakin, M.; Todić, A. «Cast Steel-SiC Composites as Wear Resistant Materials», *FME Transactions*, vol. 37, pp.151-155, 2009.
36. Coronado, J.J.; Sinatora, A. «Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates», *Wear*, vol. 267, pp. 2116-2121, 2009.
37. Courtney, T. *Mechanical Behaviour of Materials*, 2nd. Ed., McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore, p. 733, 2000.
38. Cruz, J. *Activación mecánica de arcillas*, 2001.
39. Dasa, D.; Duttab, A.K.; Rayc, K.K. Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D2 steel. Pp. 297-310. 2008.
40. De Beer, D.; Booysen, G.; Barnard, L.; Truscott, M. Assembly Automation. Rapid tooling in support of accelerated new product development". vol. 25(4). pp. 306-308. 2005.
41. Deng, Y.; Manjunath, B. Unsupervised segmentation of color-texture regions in images and video. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23 (8): 800-810. 2001.
42. Deus, R.; Subramian, C. Three-body abrasive wear of composite coatings in dry and wet environments, *Wear* 214, pg. 112-130, 1998.
43. Dogan, O.; Hauk, J.; Laird, G. Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons *Metallurgical and Materials Transactions A*. 28 (3) 23-28, 1997.

44. Doğan, Ö.N.; Laird II, G.; Hawk, J.A. «Abrasion resistance of the columnar zone in high Cr white cast irons», *Wear*, vol. 181-183, pp. 342-349, 1995.
45. Domingo, A. *Procesamiento digital de imágenes*. Perfiles educativos, mayo junio n°72, Universidad nacional autónoma de México. México. issn 0185-2698. 1996.
46. Dong, H.; Moys, M. A technique to measure velocities of a ball moving in a tumbling mill and its applications. *Minerals Engineering*. Vol. 14. No. 8. P 841. 2001.
47. Dong, H.; Moys, M. Measurement of impact behaviour between balls and walls in grinding mills. En: *Minerals Engineering*. 16. P 543. 2003.
48. Du, C.; Sun, D. Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of Food Engineering*, 72: 39–55. 2006.
49. Estrin, Y.; Mecking, H. A unified phenomenological description of work hardening and creep based on one-parameter models, *Acta Metallurgica*. 32 (1) 57 – 70, 1984.
50. Fajardo, J.; Abuchar, J.; Ureche, Y.J. *Caracterización mecánica y micro-estructural del acero A131 sometido a cargas explosivas*. Scientia technica año XIII, Colombia, septiembre de 2007.
51. Fan, J.; Yau, D.; Elmagarmid, A.; Aref, W. Automatic image segmentation by integrating color-edge extraction and seeded region growing. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10 (10): 1454-1466. 2001.
52. Fazzini, P.; Otegui, J. Influence of old rectangular repair patches on the burst pressure of a gas pipeline. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83: 27-34, 2006.
53. Fernández-Columbié, T. Mecanismos de endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura. Prof. Tit., Lic. Rafael Quintana Puchol, Dr. C. (Tutor). Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 147 p, 2011.
54. Fernández-Columbié, T.; Rodríguez-González, I.; Alcántara-Borges, D.; Gainza-Galbán, N. Movimiento por cicloide en la deformación en frío del acero AISI 1045 empleando rodillo. *Minería y Geología / v.33 n.1 / p. 76-93 / enero-marzo / 2017*.
55. Fernández-Pariente, I.; Belzunce-Varela, F. Influencia de diversos tratamientos térmicos en la microestructura de una fundición blanca con alto contenido en cromo. *Revista de Metalurgia*, 42 (4) 279 - 286, 2006.
56. Fiset, M.; Huard, G.; Grenier, M.; Jacob, C.; Comeau, G. Three-body impact-abrasion laboratory testing for grinding ball materials. *Wear*. 217 p71. 1998.
57. Fleischer, F. *Tribología y Fiabilidad*. Mandeburgo .1985.

58. Gangopadhyay, A.K.; Moore, J.J. The role of abrasion and corrosion in grinding media wear. *Wear*, vol. 104, pp 49-64. 1985.
59. Gates, J.; Dargusch, M.S.; Walsh, J.J.; Saad, J.R. Effect of abrasive mineral on alloy performance in the ball mill abrasion test. *Wear* 5–6, 865–870, 2008.
60. Gatzanis, E. The abrasion and abrasion - corrosion properties of 9 % chromium steel, *Wear* 165, pp 213 – 220, 1993.
61. Gee, M.G.; Gee, R.H.; McNaught, I. Stepwise erosion as a method for determining the mechanisms of wear in gas borne particulate erosion, *Wear*, Ed. Elsevier, Reino Unido, 2003.
62. Gee, M.G.; Phatak, C.; Darling, R. Determination of wear mechanisms by stepwise erosion and stereological analysis, *Wear*, Ed. Elsevier, Reino Unido, 2004.
63. Gleiter H.; Chalmers B. High Angle Grain Boundaries, Pergamon Press, Oxford. 13, 1973.
64. González-Cabrera, O.; Gómez-Pérez, C.; Quintana-Puchol, R.; Perdomo-González, L.; Miguel-Oria, J.; López-Fontanills, R. Alternativa de doble recubrimiento para electrodo destinado al proceso de relleno manual con arco eléctrico. *Ingeniería Mecánica*. 17 (3): 245-254, 2014.
65. González-Palma, R. Estudio de la tenacidad a la fractura relacionada con la microestructura en la zona afectada por el calor (ZAC) de los aceros microaleados para plataformas Off-Shore [tesis doctoral]. Cádiz: Facultad de Ciencias, Universidad de Cádiz; 1994.
66. Gourdet, S.; Montheillet, F. An experimental study of the mechanism during deformation of aluminium, *Materials Science and Engineering*. A 283 (151) 274-288, 2000.
67. Gresesqui, E. Características microestructurales, reticular y de microdeformación de aceros empleados en elementos moledores de clínquer, 2018.
68. Gresesqui-Lobaina, E.; Rodríguez-González, I.; Fernández-Columbié, T. Caracterización del acero 70XL empleado en la fabricación de bolas para la molienda del clinker. *Minería y Geología*. 33 (4): 486-497, 2017.
69. Guliaev, A.P. Metalografía. t.2. Moscú: Mir; 1983.
70. Gupta, V.K.; Zouit, H.; Hodouin, D. The effect of ball and mill diameters on grinding rate parameters in dry grinding operation, *Powder Technol.* 42, 199–208, 1985.

71. Hassan, A. The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non ferrous metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 72 (3) 385 – 391, 1997.
72. Hernández, S. *Metodología de la Investigación*. Editorial McGraw-Hil. México. 1997.
73. Hernández-Flores, A.; Trujillo, R.A.; Toirac, M.M. "Separación y concentración de fases minerales en la mena laterítica. *Rev. Minería y Geología* Vol-25, No. 4. 2010.
74. Hornbogen, E. *Metallurgical Aspects of Wear, Microstructure and Wear*, 1981.
75. Hu, N.S.; Zhou, H.J. The effect of surface plastic deformation on fatigue strength and its mechanism. *The Research Institute for Strength of Metals*. 11 (3) 156 – 163, 2002.
76. Hutchings, I. Solid Particle Erosive Wear Testing, *ASM Handbook*, Vol. 8 Mechanical Testing and Evaluation, pp. 728 – 751, 2000.
77. Illescas, S. Estudio del efecto de los elementos microaleantes en un acero HSLA [tesis de maestría]. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica; 2008.
78. *Industrias I. Molienda*, V.1, 72.02-92.02, 2015.
79. Ju, S. Characterization of bainitic microstructures in low carbon HSLA steels. *International Journal of Modern Physics B*. 22 (31): 5965 – 5970, 2008.
80. Kim, C.; Massa, T.; Rohrer, G. Modeling the relationship between microstructural features and the strength of WC-Co composites. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. Vol. 24, pp. 89 - 100. 2006.
81. King, R.P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Reino Unido, p. 415, 2001.
82. Kragelski, I. *Friction and Wear*. Butterworth, London 1978.
83. Kragelski, I.; Kombalov, V. *Fundamentos de los cálculos de fricción y desgaste*, Mashinoestroenie, Moscú. 1982.
84. Laborde, R. *Modelación y simulación del proceso molienda de mineral laterítico, con composición sustancial variable*, Tesis Doctorado ISMM. Moa 2005.
85. Lamparter, P. Crystallite sizes and micro strains from x - ray diffraction line profile analysis. 40 (11) 145 – 150, 2000.
86. Liu, Y.; Spencer, S. "Dynamic simulation of grinding circuits", *Minerals Engineering*. Vol 17 pp 1189 – 1198. 2004.

87. Madhusudhanachar, B.; Yargol, M.; Udupa, K.R.; Bhat, K.L. Recents Advances in Metallurgical Progress, V. II Pu. New Age International, pág. 1233, 1997.
88. Maldonado, S.I.; Orozco, P.; Baltazar, V.H.; Bedolla, A.; Hernández, M.A. «Effect of V-Ti on the Microstructure and Abrasive Wear Behavior of 6CrC Cast Steel Mill Balls», *Journal of Minerals & Materials Characterization and Engineering*, vol. 2, pp. 383-391, 2014.
89. Márquez, M. Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Febrero de 2002.
90. Martínez, C. Ingeniería de Lubricación y Tribología. Fundamentos de tribología. P 29 - 36, 43 - 47. 2006.
91. Mazar, M.; Jafariiv, S.; Abdollah, H. «Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel- A Comparison», *Journal of Iron and Steel Research, International*. vol. 19, (4), pp. 43-50, 2012.
92. Mecking, H.; Kocks, U. Kinetics of flow and strain-hardening, *Acta Met.* 29 (4) 1865 – 1875, 1981.
93. Menacho, J.M. Modelo de desgaste de bolas y optimización de su perfil de tamaño en molinos rotatorios continuos. En: Avances en Mineralurgia. Volumen 1. Serie de Metalurgia Extractiva. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 1985.
94. Menacho, J.M.; Concha, F. Mathematical model of ball wear in grinding mills: I. Zeroorder wear rate, *Powder Technol.* 47, 87–96, 1986.
95. Menacho, J.M.; Concha, F. Mathematical model of ball wear in grinding mills: II. General solution, *Powder Technol.* 52, 267–277, 1987.
96. Miller, R.; John, E.; Freun, J. R. Probabilidad y Estadística Para Ingeniero. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2005.
97. Mishra, B.K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method. Part II: Practical Applications. *International Journal of Mineral Processing*. 71. P 95. 2003.
98. Montafur, E. Optimización de la relación de bolas, para la molienda de piedra caliza mediante un molino de uso experimental. Trabajo de graduación, Guatemala, 2013.
99. Nam, P. Suh, Tribophysics, Edit. Prentice Hall, USA. 1994.
100. Nes, E. Modelling of work hardening and stress saturation in FCC metals, *Progress in Materials Science*. 41 (18) 129 – 193, 1998.

101. Osorio, A.; Restrepo, G.; Marín, J. Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda. *Dyna* 76(158): 69-77. 2009.
102. Pero-Sanz, J. Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, Editorial DUSSAT SA, 3ra Edición. p 393 - 502. España, 2000.
103. Pleiman, R. Roller burnishing comes to nonlinear surfaces. *Modern Machine Shop*. 57 (9) 68 – 71, 1985.
104. Porter, D.; Easterling, K. Phase transformations in metals and alloys. Van Nostrand Reinhold, Berkshire (UK). 1981.
105. Rabinowicz, E. The Wear of Hard Surfaces by Soft Abrasive, *Wear of Materials*. ASME, pp. 12–18, 1983.
106. Radhakrishnan, B.; Zacharia T. *Met. Mat. Trans.* 26^a, 167. 1995.
107. Radziszewski, P. The steel wheel abrasion test (SWAT): a tool to study wear, friction and ore breakage in the mining industry. In: *Int'l J. on Wear, Friction and Lub.* 17th International Conference on Wear of Materials, 267, 1–4, 15 June 2009, 92–98, 2009.
108. Radziszewski, P.; Tarasiewucz, S. Modelling and Simulation of ball mill wear. *Wear* 160. P 09. 1993.
109. Raymond, G.; Bayer, H. Mechanical wear prediction and prevention, Edit. Marcel Dekker. USA, 1994.
110. Rivera, I. Balance poblacional en un molino de bolas para una ley de desgaste exponencial en tiempos largos, 2013.
111. Rivera, I.; Quintero, F.; Bustamante, O.; Loaiza, G. Aplicación de un modelo de balance poblacional a un molino de bolas en la industria del cemento, *Ingeniería y Ciencia*, ISSN-1794-9165, 10(19): 163–177, 2014.
112. Rivera, I; Quintero, F.; Bustamante, O. Análisis del desgaste de medios moledores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos SA, *Prospect*. 10 (1): 108-112, 2012.
113. Rodríguez, C. Tratamientos superficiales contra el desgaste. Grupo de Tribología. Dpto. Mecánica y Diseño. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad de Oriente, 2009.
114. Rojas-Fernández, M.V. Resistencia al desgaste de la aleación Ni-Resist con adición de aluminio como elemento de aleación. Alberto Velázquez Del

- Rosario y Félix Ariel Morales Rodríguez (Tutores). Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 78 p, 2011.
115. Sabih, A.; Radziszewski, P.; Mullany, I. Investigating grinding media differences in microstructure, hardness, abrasion and fracture toughness, 2016.
 116. Sepúlveda, E. Methodologies for the evaluation of grinding media consumption rates at full plant scale. *Minerals Engineering*. 17, p1269, 2004.
 117. Shipway, P.; Hutchings, I. Measurement of coating durability by solid particle erosion *Surface and Coatings Technology*. Vol. 71, pp. 1 – 8, 1995.
 118. Smelianky, V.; Blumenstein, V. Technological succession mechanics succession appropriateness's of the plasticity resource exhaustion at the stage of surface plastic deformation. *International Conference*. 37 (5) 461 – 472, 2001.
 119. Stockham, T. Image Processing in a Context of Visual Model, *Proc. IEEE*, 60 (7): 957-972. 2002.
 120. Stratton, P.F. Optimising nano-carbide precipitation in tool steels, *Mater. Sci. Eng. A* 449–451 P. 809–812. 2007.
 121. Studnicki, A.; Kilarski, J.; Przybyl, M.; Suchoń, J.; Bartocha, D. «Wear resistance of chromium cast iron—research and application», *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 16, (1-2), pp. 63-73, 2006.
 122. Subramanian, C. Some considerations towards the design of a wear resistant aluminum alloy. *Wear* 155, 193–205, 1992.
 123. Sundström, A.; Rendón, J.; Olsson, M. Wear behaviour of some low alloyed steels under combined impact/abrasion contact conditions. *Wear* 250 (1–12), 744–754, 2001.
 124. Tabrett, C.; Sare, I. Fracture Toughness of High-Chromium White Irons: Influence of Cast Structure *Journal of Materials Science*, 3, 2069-2077; 2000.
 125. Tarifeño, E. Desgaste de bolas en molienda semi autógena. V Simposium sobre molienda. 1987. Viña del Mar. Chile.
 126. Tenenbaum, M. Soprotiblenia abrasinovomu iznachibanio. *Machinoestroenia*. 1966.
 127. Tylczak, J. Abrasive wear in *ASM Handbook*, Vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology, printed in USA, p. 942, 1992.
 128. Ungár, T.; Gubicza, J.; Hanák, P.; Alexandrov, I. Densities and character of dislocations and size-distribution of subgrains in deformed metals by x – ray diffraction profile analysis”, *Mater. Sci. Eng. A* 319 (321) 274 – 278, 2001.

129. Vaughan, R.; Ball, A. *Hard Mater.* 2 (3 – 4), 257 – 269. 1991.
130. Verdeja, L.; González, R. El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: conceptos generales. *Revista de minas.* Madrid: No 13 y 14, 1996.
131. Wada, S.; Ritter, J. *Erosion of Ceramic Materials* 71 Trans Tech Publications, Zurich, 1992.
132. Wainschenker, R.; Massa, J.; Tristan, P. *Etapas del procesamiento digital de imágenes.* Guía informativa área procesamiento de señales. 2011.
133. Wang, J. Effect of Martensite and Austenite on Grinding Media Wear, *Wear* 122, págs. 285 – 299, 1998.
134. Weerasekara, N.S.; Powell, M.S.; Cleary, P.W.; Tavares, L.M.; Evertsson, M.; Morrison, R.D.; Quist, J.; Carvalho, R.M. The contribution of DEM to the science of comminution, *Powder Technology*, 2013.
135. Wirojanupatump, P. Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus, *Wear* 239 91 – 101, 2000.
136. Zhang Z.; Chengkai Y.; Peng Z.; Wei L. Microstructure and wear resistance of high chromium cast iron containing niobium. *Research & Development.* Vol.11. No 3. May 2014.
137. Zum-Gahr, K. Formation of Wear Debris by the Abrasion of Ductile Metals, *Wear* 74, pp 353 – 373, 1982.