



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

Tesis presentada en opción al título
de
Ingeniero Mecánico

Resistencia al desgaste de aleaciones empleadas en la
molienda del clinker de cemento

Autor: Luis Miguel Cuba Cardoza

Tutores: Dr.C Isnel Rodríguez González

Ing. Eider Gressesqui Lobaina

Moa, 2017
“Año 59 de la Revolución

Declaración de Autoría

Yo: Luis Miguel Cuba Cardoza, autor del presente trabajo de diploma y tutores Dr. C. Isnel Rodríguez González y el Ing. Eider Gressesqui Lobaina declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que esta entidad disponga de su uso cuando estime conveniente.

Luis Miguel Cuba Cardoza

Dr. C. Isnel Rodríguez González

Ing. Eider Gressesqui Lobaina

Pensamiento

El futuro de nuestra patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia, tiene que ser un futuro de hombres de pensamiento, porque precisamente es lo que más estamos sembrando; y lo que más estamos sembrando son oportunidades a la inteligencia.

Fidel Castro Ruz

Dedicatoria

En primer lugar dedico mi trabajo de diploma a nuestro padre Jesucristo por nunca dejarme desamparado y por brindarme el conocimiento necesario para poder llegar a realizar mi sueño.

A la Revolución Cubana por darme la posibilidad de estudiar.

A mis tutores Isnel y Eider por la confianza depositada en mí.

A mis padres José Manuel Cuba Aguilera, Caridad Cardoza Garrido y toda la familia por el apoyo que me han brindado.

A mi hermano José Manuel Cuba Cardoza

A mi novia Arielis Asencio Leyva.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco de todo corazón a Dios mi Señor por alumbrarme el camino para llegar hasta aquí, por haber puesto en mi camino personas que me han ayudado durante toda la carrera.

Agradezco a la Revolución Cubana por darme la oportunidad de estudiar Ingeniería Mecánica.

A mis tutores Isnel y Eider por la confianza depositada, por su constante preocupación y por la ayuda prestada para la realización de esta investigación.

Al colectivo de profesores del departamento de Mecánica por el trabajo realizado estos cinco años.

A mis familiares por el apoyo incondicional en especial a mis padres José Manuel y Caridad por guiarme por el buen camino.

A mi novia por ser fuente de inspiración, apoyo en momentos difíciles, por la preocupación mostrada y por todos los consejos.

A mis tías Ramona, Estrella, Yunelis y muy especial a Iris por la ayuda recibida durante la realización de la tesis.

A mis primos Lismay, Ramonita, Laritza, Yanitza, Juan Alberto por los momentos felices que pasamos juntos.

A mi hermano KIKI por ser una fuente de inspiración.

A mi sobrinito Leonard por hacerme reír en los momentos más difíciles.

A mi suegra Arilda por ser tan preocupada conmigo y por darme consejos necesarios para mi formación como futuro profesional.

A mis compañeros de estudio Geiser, Javier, Javier Carballo (El Master), Adrián, Rolando, Moisés, Raymond, Guillermo, Santiago, Dani Luis, Yadier, por ser paciente y acompañarme como un hermano durante estos cinco años, por cada consejo y momento de ayuda.

A Daily, Niorges, Diarelis y a Robislandis por ser compañeros, amigos durante estos cinco años de estudio y estrés.

A mi Amiga Dayana por escucharme y aconsejarme.

A quienes de forma desinteresada ayudaron a la realización de este trabajo.

A los nombrados hoy y a quienes imperdonablemente no he podido recordar mis agradecimientos sinceros y desde mi corazón.

A todos muchas gracias

El autor

Resumen

En el presente trabajo se realizaron ensayos mecánicos para determinar cuál de las aleaciones estudiadas presenta mayor resistencia al desgaste en las bolas empleadas en la molienda del clinker de cemento, para ello se seleccionaron tres muestras de acero (AISI 51100, AISI 5046 y AISI 1060) respectivamente a las que se le realizó el ensayo de desgaste gravimétrico, en el que se demuestra que la de mayor resistencia al desgaste es la aleación AISI 51100 con respecto a las otras, de la misma manera se comportó para el ensayo de dureza dando como resultado un valor promedio de 60,34 HRC. La microestructura del acero AISI 51100 presenta una estructura martensítica en una matriz austenítica a diferencia del acero AISI 5046 y el AISI 1060 que presentan una estructura del tipo martensítica en su matriz, revenido con alguna presencia de ferrita acicular y una estructura de cementita respectivamente cuyos tamaño de los granos son superiores y poseen menor dureza. Las bolas de 90 mm comercializadas por la Empresa Mecánica del Níquel tienen un costo de 6 477,22 CUP y 3 596,60 CUC, que representa una cifra comparable con las del mercado mundial, aunque se espera que el impacto sea positivo pues la durabilidad de las mismas se prevé que sea mayor.

ABSTRACT

In the present work, mechanical tests, to determine which is the alloys with the greatest wear resistance, to manufacture the balls used in the grinding of the cement clinker, were carried out. Three steel samples were selected (AISI 51100, AISI 5046 and AISI 1060), in order to determine the resistance to the wear the gravimetric wear test was carried out, it was demonstrated that the better behavior to the is the AISI 51100 alloy with respect to the others two samples, as the same time it has an average of HRC 60,34. The AISI 51100 steel, presents a martensitic structure in an austenitic matrix, meanwhile the steel AISI 5046 and the AISI 1060 are presenting a martensitic structure in its matrix, tempered with some presence of acicular ferrite and a cementite structure respectively with the grains size superior and less hardness. The economic analysis reflects that the balls of 90 mm of diameter has a cost of 6 477, 22 CUP and 3 596, 60 CUC, which represents a figure comparable to those of the world market, although the expected durability impact will be positive.

ÍNDICE

Introducción	1
Capítulo 1. Marco teórico conceptual de la investigación	4
1.1. Introducción	5
1.2. Procesos de trituración y molienda	5
1.2.1. Teorías vinculadas al proceso de molienda	6
1.2.2. Tipos de molienda	7
1.2.3. Factores que influyen en la eficiencia de la molienda	8
1.2.4. Etapas de la desintegración	10
1.3. Materiales usados en la elaboración de clinker de cemento	11
1.4. Materiales para la elaboración de equipos de molienda	12
1.4.1. Partes principales de un molino	13
1.5. Materiales para la obtención de las bolas	15
1.6. Efectos de los elementos de aleación en los aceros	19
1.7. Mecanismos de desgaste	20
1.8. Formas de medir el desgaste en aleaciones metálicas	22
1.9. Conclusiones del Capítulo I	23
Capítulo 2. Materiales y métodos	24
2.1. Introducción	25
2.2. Factores involucrados en el proceso de molienda	25
2.3. Volumen de la carga de bolas de un molino	26
2.4. Determinación de los esfuerzos de fricción en bolas de acero para molinos	27
2.5. Análisis químico de las muestras	27
2.6. Métodos, procedimientos y condiciones experimentales	28
2.5.1 Selección y preparación de muestras	28
2.5.2 Preparación mecánica de las probetas	29
2.5.3 Encapsulado de las muestras	29
2.5.4 Desbaste y pulido	30
2.5.5 Ataque químico	30
2.7. Análisis microestructural de las aleaciones	31
2.8. Dureza de los materiales estudiados	32
2.7.1 Ensayo de dureza	32
2.9. Ensayos de desgaste gravimétrico	32
2.10. Conclusiones del capítulo 2	33
Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados	35

3.1. Introducción	36
3.2. Determinación de la velocidad de rotación del molino	36
3.3. Determinación de la carga total de cuerpos moledores	36
3.4. Análisis de la dureza.....	42
3.5. Análisis del desgaste gravimétrico.....	44
3.6. Análisis microestructural de las muestras.....	39
3.7. Selección del material para la fabricación de las bolas	47
3.8. Valoración del Impacto Ambiental y social.	48
3.8.1 Medidas para la prevención	48
3.9. Valoración económica de la investigación	49
3.10. Conclusiones del capítulo 3.....	50
Conclusiones generales	51
Recomendaciones.....	52
Referencia bibliográfica	53
Anexos	57

Introducción

El cemento, como principio para innumerables actividades de construcción, representa un atractivo material base que puede fabricarse de forma similar en cualquier parte del mundo. Si bien la obtención de la materia prima es relativamente sencilla y económica, las diferentes etapas de producción en la planta de cemento requieren un alto aporte de energía. Fundamentalmente, los procesos de molienda, requieren en una línea de producción mediana, aproximadamente 20 millones de KW/h de aporte de energía eléctrica anual. Estos mismos procesos son llevados a cabo a través de molinos rotatorios que por lo general son horizontales. Se valen de cuerpos molturantes que pueden tener diferentes geometría, aunque son de mayor utilidad las bolas.

Varios autores han estudiado las bolas de los molinos, entre ellos podemos citar a Vermeulen & Howat (1986); Andréiev *et al.* (1987); García-Hinojosa (2006); Albertin *et al.* (2008); Alcántara, (2008); Rivera *et al.* (2012), (2014); Rivera (2013); Silot (2014); Yosvani (2016); Maujo (2016); y otros. Estos han indagado el temas en cuestión en aspectos relacionados con el diseño de los molinos, la tecnología de fabricación de las bolas, el comportamiento teórico de estas dentro del molino, el cálculo de la carga de materiales para la molienda e incluso han caracterizado materiales empleados en la molienda del clinker para el cemento a través del desgaste abrasivo de bolas de molienda en molinos rotatorios. Sin embargo, en la industria cementera cubana se usan bolas de otros materiales como el acero AISI 1060, el AISI 51100 y el AISI 5046 que no han sido estudiados con profundidad por estos autores.

En investigaciones recientes, Silot (2014), trató el tema de las bolas para molinos fabricadas en la UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa, estas son fabricadas de cuatro diámetros (60, 70, 80 y 90 mm), de acero bajo aleado al cromo 70XL, producto que es obtenido por fundición en hornos de inducción. Esta autora, indagó en el asunto desde el punto de vista tecnológico y de fabricación, evaluó el tipo de aleación que utiliza la empresa para la fundición de las bolas y logró una tecnología de fundición, utilizando el método de moldeo químico en arena con resina furánica autofraguante. Además, propuso tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido para lograr propiedades de dureza y ductilidad óptimas para la comercialización del

producto. Sin embargo, no reparó en el hecho de la resistencia al desgaste que posee el material del cual están fabricadas.

Maujo (2016), trató el tema teniendo en cuenta el porcentaje de desgaste del material, pero solo se limitó a evaluar el comportamiento del acero 70XL (AISI 8660) y el de una bola forjada de acero AISI 4140, llegando a la conclusión de que el acero AISI 4140 posee menor resistencia al desgaste que el acero 70XL.

Situación problemática

La industria cementera cubana está siendo afectada por la continua necesidad de parar los molinos horizontales de bolas para la molienda del clinker de cemento antes del tiempo planificado. Esto se debe al continuo desgaste y deterioro de las bolas. Esta situación provoca que ocurran afectaciones en la producción de cemento, ocasionando grandes pérdidas económicas a las entidades productoras de este material para la construcción. Esto trae consigo que haya menor producción de cemento, lo que afecta la construcción de viviendas y el desarrollo industrial del país, además de que se producen afectaciones al ambiente por la emisión de polvo al entorno.

En correspondencia con lo planteado se presenta el siguiente **problema** de la investigación:

Aún no es suficiente el conocimiento sobre cuál es la aleación más apropiada para la elaboración de bolas que trituran el material en la producción de cemento, que responda a las exigencias de resistencia al desgaste en los procesos de molienda.

El **objeto de estudio** es:

Aleaciones de bolas de molinos empleadas en la molienda del clinker de cemento.

Se define como **objetivo general**:

Determinar a partir de un estudio gravimétrico, la resistencia al desgaste de las aleaciones de AISI 1060, el AISI 51100 y el AISI 5046, empleadas en la molienda del clinker de cemento que permita la elección del material más adecuado para la fabricación de las bolas de los molinos.

Y su **campo de acción** es:

Resistencia al desgaste de aleaciones de bolas empleadas en la molienda del clinker de cemento.

Se establece la siguiente **hipótesis**:

Evaluando las condiciones microestructurales, físicas y de desgaste de los aceros AISI 1060, AISI 51100 y AISI 5046, es posible determinar cuál de estas aleaciones tiene mejores condiciones para ser usadas como bolas en la molienda del clinker de cemento.

Se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar microestructuralmente las aleaciones empleadas en la fabricación de bolas para los procesos de molienda de clinker de cemento.
2. Determinar la resistencia al desgaste de las aleaciones de bolas de molinos, usados en la molienda de materiales, con el empleo de un ensayo gravimétrico.
3. Proponer el material más adecuado para la fabricación de bolas empleadas en los molinos de clinker de cemento.

Para dar cumplimiento al objetivo general se desarrollan las siguientes **tareas**:

1. Búsqueda bibliográfica relacionada con la temática de la molienda de materiales, a partir del análisis de los trabajos precedentes consultados.
2. Análisis del comportamiento microestructural de las aleaciones de bolas empleadas en los molinos para la molienda de clinker.
3. Desarrollo de un ensayo de desgaste gravimétrico.
4. Propuesta del material más adecuado según los resultados de los ensayos.
5. Valoración de los resultados

Capítulo 1. Marco teórico conceptual de la investigación

Capítulo 1. Marco teórico conceptual de la investigación

1.1. Introducción

El cemento, como material principal para innumerables actividades de construcción, es material base que puede fabricarse de forma similar en cualquier parte del mundo. Si bien la obtención de la materia prima es relativamente sencilla y económica, las diferentes etapas de producción en la planta de cemento no lo son tanto, requiriendo un alto consumo de energía y cuerpos moledores.

En la industria cementera como en la minera, el consumo de las bolas ocasiona pérdidas económicas considerables. Además, cada día tiene nuevos diseños de molinos con altas energías de impacto, exigen incrementar los parámetros de trabajo de las bolas, principalmente la tenacidad, para lograr una molienda de mayor calidad Albertin *et al.* (2008).

Por tal motivo, el presente capítulo tiene como **objetivo**:

Realizar una búsqueda bibliográfica que permita definir aspectos existentes en los mecanismos de trituración y molienda en los molinos de bolas, así como definir los mecanismos de desgaste de las mismas.

1.2. Procesos de trituración y molienda

Se entiende por molienda la reducción de los materiales a polvo. Particularmente, el objetivo de la molienda es el aumento de la superficie específica de dichos materiales, siempre de acuerdo con una distribución granulométrica establecida.

Según Andréiev *et al.* (1987), para el tratamiento industrial de rocas y minerales, es necesario practicar una preparación de los mismos, donde normalmente se requiere efectuar una reducción del tamaño de la partícula. Estas operaciones son de aplicación habitual en los procesos industriales, tal como puede observarse en el proceso de fabricación del cemento. Si bien no existe una diferencia clara entre el proceso de trituración y el de molienda, en general se habla de trituración cuando se fragmentan partículas de tamaños superiores a una pulgada (2,54 cm) y de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a esta medida.

Dentro del proceso de trituración y molienda existen transformaciones básicas de minerales, el primer paso para el proceso de transformación de minerales es la extracción, luego se procede a la trituración del material extraído, una vez que el mineral es triturado se le da paso al proceso de molienda para que el material quede con la granulometría requerida.

Diez-Esteban (2008), expone que el proceso de molienda forma parte del proceso productivo, necesario para obtener cemento a partir de diversas materias primas. Es uno de los procesos principales y el final de las operaciones tecnológicas en la fabricación del cemento. En el clinker descargado del horno con la adición de cierta cantidad de yeso y otros componentes, se reducen a polvo fino con lo que se obtiene el producto final de todo el proceso: cemento.

Este mismo autor afirma 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.

1.2.1. Teorías vinculadas al proceso de molienda

Las teorías de molturación se ocupan de las relaciones existentes entre el requerimiento de energía y el tamaño de partícula del producto resultante del material de alimentación (Waganoff, 1956).

La llamada “primera ley de molturación” postulada por Rittinger (1867), plantea que el área de la nueva superficie producida por trituración o por molturación es directamente proporcional al requerimiento de energía útil. Por lo tanto, la cantidad de energía sería inversamente proporcional al tamaño de la partícula del material de alimentación y del tamaño del producto.

Sin embargo Kick (1885), expuso en la “segunda ley de molturación”, que el requerimiento de energía es proporcional a la reducción del volumen de las partículas involucradas. Entonces, el requerimiento de energía es una relación directa entre el tamaño del material de alimentación y el tamaño del producto.

En este sentido Bond (1952), postuló la “tercera ley de molturación”, afirmando que el requerimiento de energía es proporcional a la longitud de la nueva fisura resultante del rompimiento de las partículas. Para partículas de forma similar, la energía requerida es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño promedio de las partículas del producto.

1.2.2. Tipos de molienda

Según reporte de Cemex (1997), el proceso de molienda con molinos tubulares que tienen cuerpos moledores esféricos, además de ser los más usados en la industria del cemento, tiene diferentes categorías que varían dependiendo de varios aspectos como son la naturaleza del proceso (molienda húmeda o seca) y el número de cámaras en el molino.

En la molienda por vía húmeda los circuitos contienen materiales con humedades mayores a 25%, siendo estos más eficientes que los procesos por vía seca. Sin embargo, el porcentaje de desgaste de las bolas y del revestimiento del molino es mayor. Por su parte, la molienda por vía seca posee humedad aproximada del 2 % y es habitual en la fabricación del cemento Portland.

En la tabla 1.1 aparecen algunas características de los procesos de molienda por vía húmeda y seca.

Tabla 1.1. Características de la molienda húmeda y seca

Molienda seca	Molienda Húmeda
Requiere más potencia por tonelada tratada	Requiere menos potencia por tonelada tratada (la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos)
Se requieren equipos adicionales para el tratamiento de polvo	No requiere equipos adicionales para el tratamiento del polvo y los equipos se calientan menos.
Consume menos revestimiento	Consume más revestimiento por la corrosión

Debe señalarse que independiente del porcentaje de humedad, la molienda puede ser de circuito abierto o de circuito cerrado.

En molinos de circuito abierto, para mantener las especificaciones de finura del producto, comúnmente se realiza una molienda excesiva del material, provocando un mayor desgaste en los revestimientos del molino y los cuerpos moledores, mientras que en circuito cerrado, la instalación de tamices a la descarga del molino ayuda a evitar la

molienda excesiva y mejorar su rendimiento; en estos, el material que no tiene la finura óptima es regresado al molino para recircular por el proceso.

Coincide con esto lo planteado por Andréiev *et al.* (1987), sobre los sistemas abierto y cerrado de molienda

Sistema abierto: es un molino donde la carga permanece dentro de él hasta que está totalmente molida. Generalmente tienen dos o tres cámaras donde el material va pasando conforme se van moliendo y tienen diferentes diámetros de bolas en cada una. Este tipo de molino se usa para el clinker y el cemento se prepara agregando yeso y puzolana cuando se desea hacer cemento puzolánico.

Sistema cerrado: en este molino la carga permanece un tiempo predeterminado y sale a un separador clasificador donde las partículas de tamaño adecuado son enviadas al proceso y las de mayor tamaño son recirculadas al molino. Generalmente estos molinos tienen una sola cámara y consumen menos energía y menos cuerpos moledores.

También señala Cemex (1997), que los molinos de bolas, ya sean de una o varias cámaras, manejan grandes flujos de gases o aire para secar el material antes y durante la molienda si se quiere que esta sea realmente efectiva.

Los molinos de una sola cámara usualmente mantienen una baja caída de presión y el exceso de humedad provoca una disminución de la molienda de gruesos. En los molinos de dos cámaras, la subdivisión de los molinos en dos compartimentos por medio de un diafragma permite la alimentación de material más duro y con una granulometría más gruesa que aquellos con una sola cámara.

1.2.3. Factores que influyen en la eficiencia de la molienda

Una característica distintiva de los molinos rotatorios es que los cuerpos moledores son grandes y pesados en relación a la partícula de mena, pero pequeñas en relación al volumen del molino, además de que ocupan menos de la mitad del volumen de este.

Para que la eficiencia dentro del molino de bolas sea buena, es necesario que la densidad de la pulpa a la entrada sea lo más alta posible, pero es de vital importancia que el flujo de esta pulpa sea constante y fácil a través del molino. Es esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mena, puesto que una pulpa demasiado diluida aumenta el

contacto metal-metal, acrecentando el desgaste de los cuerpos moledores y disminuyendo la eficiencia.

El rango de llenado para operación normal de los molinos de bolas es alrededor del 80 % de sólidos en peso, dependiendo de la mena Alcántara (2008). Si la partícula es fina la viscosidad será mayor, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar densidad de pulpa menor. La eficiencia depende del área de la superficie de contacto en el medio molidor. Luego las bolas deberían ser lo más pequeñas posible y la carga debería ser distribuida de modo tal que las bolas más grandes sean justo lo suficientemente pesadas para moler las partículas más grandes y más duras de la alimentación.

Plantea Alcántara (2008), que estructuralmente, cada tipo de molino consiste en un casco cilíndrico, con revestimientos renovables y una carga de medios de molienda. El tambor es soportado en muñones huecos fijos a las paredes laterales de modo que puede girar en torno a su eje. El diámetro del molino determina la presión que puede ejercer el medio en las partículas de mena y, en general, mientras mayor es el tamaño de la alimentación mayor necesita ser el diámetro. Este, en conjunto con la longitud determina el volumen y por consiguiente la capacidad de carga del molino.

Cuando el tambor rotatorio del molino gira, los medios de molienda son elevados en el lado ascendente del molino hasta que se logra una situación de 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 (ver figura 1.1).

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 produciendo una molienda más fina. Mientras que 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. Cuando la velocidad de rotación es crítica, la capa exterior de 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.

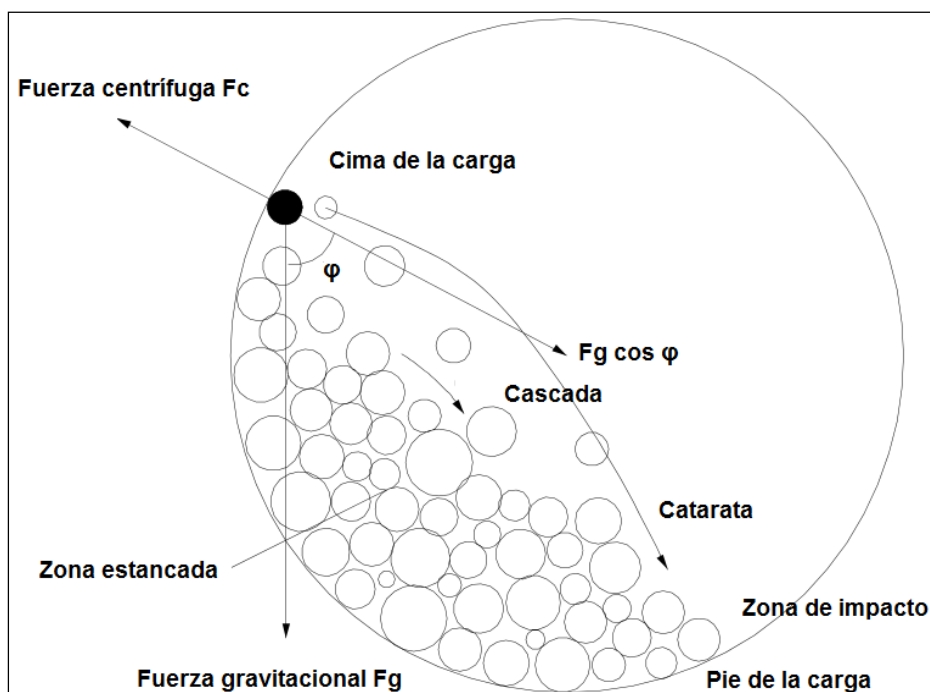


Figura 1.1. Movimiento de los medios de molienda en el molino.

En investigaciones realizadas por Alcántara (2008) y Chillcce & Rojas 2012, se expone que para una adecuada eficiencia del molino de bolas, la densidad de la pulpa de alimentación debe ser lo más alta posible, pero garantizado un flujo fácil a través del molino, con estolas bolas estarás cubiertas con una capa de mena, disminuyendo el contacto metal-metal y por consiguiente el consumo de acero.

Plantea Andréiev *et al.* (1987), que la eficiencia de la molienda depende de varios factores entre los que se encuentran el tipo de molienda, la velocidad crítica del molino, la carga equivalente de material, la distribución de las bolas por cámaras, el área superficial del medio de molienda, los parámetros del molino y la relación entre los elementos variables del proceso de molienda (diámetro del molino, su velocidad y el diámetro de los elementos moledores).

1.2.4. Etapas de la desintegración

La desintegración se realiza en distintas etapas y en una gran diversidad de máquinas. Se identifica como etapa de trituración primaria cuando el material extraído de la cantera se trata en una trituradora. Si de allí el material producido pasa a una segunda trituradora, en esta se efectuara la trituración secundaria. Si sigue triturándose en otra máquina, la terciaria, y así sucesivamente.

Tanto el mineral extraído de la cantera como el que ha sufrido una o más etapas de reducción, se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño. En general, se clasifican de la siguiente forma:

- Material grueso: trozos de un tamaño mayor a 750 mm.
- Material mediano: trozos de un tamaño de 10 a 750 mm.
- Material fino: trozos de un tamaño menor a 100 mm.

Por otra parte, según el tamaño que tienen las partículas a la salida de las máquinas de desintegración, se pueden distinguir distintas etapas de trituración y molienda.

Seguidamente se detallan las mismas:

a) Trituración (desintegración grosera)

- Trituración gruesa-tamaños de partículas de salida: 150mm.
- Trituración mediana-tamaños de partículas de salida: entre 30 y 150mm.
- Trituración fina-tamaños de partículas de salida: entre 5 y 30mm.

b) Molienda (desintegración fina)

- Molienda grosera-tamaños de partículas de salida: entre 0,1 y 0,3 mm.
- Molienda fina-tamaños de partículas de salida: menores de 0,1 mm.

La trituración grosera, mediana y fina corresponden, prácticamente, a la primera, segunda y tercera etapa de trituración; mientras que la molienda grosera y fina corresponden a las etapas primaria y secundaria de la molienda.

1.3. Materiales usados en la elaboración de clinker de cemento

El clinker de cemento Portland es un material sólido inorgánico granulado de color gris o blanco. Según Holcim (España), S.A., se utiliza exclusivamente para la producción de cementos comunes y otros conglomerantes hidráulicos. Es una sustancia que consta de cuatro fases principales (silicatos tricálcico y dicálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) y aluminoferrito tetra cálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)), aunque habitualmente puede haber cierta cantidad de cal (CaO) sin reaccionar.

Se origina por medio de una transformación mineralógica de una mezcla específica y precisa de materias primas basada en óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro y pequeñas cantidades de otros elementos.

Para Pospisil (1979) y Decasper (1981), la disminución del rendimiento en la molienda del clinker no se debe tanto a la influencia de la temperatura, como a la carga electrostática que se engendra durante la pulverización. La composición química y por tanto también mineralógica tiene ciertas influencias sobre la molturabilidad.

La **porosidad** del clinker de un horno Lepol requiere 17% menos energía para su molturación que el clinker de un horno con precalentador, pero se ha encontrado que para finuras superiores a los 2000 cm²/g el efecto es poco pronunciado.

La **cal** libre tiene un efecto positivo, pues sus partículas carecen de una firme unión con el material que las rodea, y esto perturba la estructura de la masa. Mientras que un incremento en la **magnesia** libre por encima del 2% de MgO se halla en forma de periclase, lo que dificulta la molienda.

La molturabilidad aumenta al incrementarse el contenido de **silicato** tricálcico C₃S y decrece al acrecentar el silicato di cálcico C₂S; la tendencia a la aglomeración aumenta con C₂S.

La disminución de la eficacia de los molinos, es causada además por la adhesión del material, motivada por las cargas electrostáticas que aparecen en la superficie de las partículas cuando se alcanzan altos valores de la superficie específica. La adherencia a los cuerpos moledores y a las paredes de los molinos se incrementa al aumentar la temperatura. Las partículas de cemento portland absorben aire formándose una capa que las aísla entre sí. Por encima de 100°C la película de aire se destruye y las cargas electrostáticas producen agregados compactos.

Hay que agregar la deshidratación de yeso (CaSO₄·2H₂O) transformándose en hemihidrato (CaSO₄·½H₂O) y anhidrita con efectos perjudiciales sobre el fraguado y endurecimiento del cemento.

1.4. Materiales para la elaboración de equipos de molienda

Los equipos de molienda más empleados son los molinos de bolas estas máquinas tienen un proceso de operación continua están compuestas por un tambor cilíndrico, en algunos

casos pueden ser una combinación entre cilíndricos y cónicos con paredes en el interior del molino que pueden ser blindadas o revestidos.

En el interior de estas máquinas se encuentran los cuerpos molidores los cuales pueden tener diferentes geometrías y volumen. El tambor está apoyado en rodamientos y chumaceras, los cuales facilitan el proceso de molienda. El diámetro del tambor del molino tiene una estrecha relación la fuerza y la presión que ejercen los cuerpos molidores (bolas) con el material a moler ya que a mayor diámetro mayor cantidad de bolas en el interior del molino. La longitud y el diámetro determinan el volumen y por consiguiente la capacidad del molino. Normalmente, el molino se alimenta continuamente el material a moler se cargada en la tolva de alimentación y luego de que es molido es descargado

1.4.1. Partes principales de un molino

En el Manual de molinos se plantea que la corteza del molino consiste en varias secciones de placas soldadas con un bajo contenido de sulfuro. En Estados Unidos, las cortezas de molino son manufacturadas con una calidad de acero ASTM A 28,3 grado C. El contenido de carbono debe ser Inferior a 0,2 %, para obtener la resiliencia adecuada. El espesor de la corteza está determinado por el tamaño y diseño del molino. Esta es la parte del molino que más está expuesta a tensiones provocadas por los choques del material con los cuerpos molidores. Decaspe, (1981)

Cabezales del molino: Los molinos tubulares sostenidos por cojinetes de muñón están provistos de cabezales de molino. Los cabezales son atornillados o soldados a la corteza del molino. Los molinos de menor tamaño están frecuentemente dotados con cabezales de molino de una pieza (cabezal integral), atornillados al flanco de la corteza del molino. En los molinos grandes, el cabezal del molino está frecuentemente dividido concéntricamente en una parte externa y una parte interna. La parte externa está atornillada a la parte interna y soldada a la corteza del molino. La parte interna cónica del cabezal puede ya sea estar fundida con el muñón o estar unidas ambas partes por soldadura.

Con el fin de liberar a los cabezales de molino, en los molinos grandes, de las fuerzas elevadas de reacción del soporte, existe cierta tendencia a instalar cojinetes de patín en

conjunción con un anillo montado a la corteza del molino. El cabezal del molino, en este caso, consiste de una construcción soldada de placas de acero.

Cojinetes del molino: Los muñones de los molinos tubulares son sostenidos por cojinetes lisos. El cojinete incluye la caja de envoltura, la corteza de soporte montada en superficies esféricas, el manguito del cojinete forrado en metal blando y los equipos de lubricación y de enfriamiento. La mayoría de los molinos tubulares están apoyados en ambos extremos por cojinetes de muñón.

Según Drzymala (2007), las caras de trabajo internas del molino consisten en revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga. Generalmente están hechos de acero al manganeso acero al cromo-molibdeno, con alta resistencia al impacto; también los hay de goma. Los extremos de los molinos de bolas generalmente tienen nervaduras para levantar la carga con la rotación del molino. Ellos impiden deslizamientos excesivos y aumentan la vida del revestimiento. Generalmente están hechos de hierro fundido blanco aliado con níquel, además de otros materiales resistentes a la abrasión, como goma. Los revestimientos de muñones son diseñados para cada aplicación y pueden ser cónicos, planos y con espirales de avance o retardo.

Los accionamientos de molinos pueden ser subdivididos básicamente en tres grupos:

- Accionamiento con corona dentada y piñón.
- Accionamientos centrales.
- Accionamientos sin reductor.

El accionamiento con corona dentada y piñón: La corona dentada (o borde dentado) está atornillada al cuerpo del molino y es accionado por uno o dos piñones. El reductor dispuesto entre el motor y el piñón del molino está equipado con un accionamiento auxiliar. El accionamiento auxiliar permite la rotación lenta del molino ($0,2-0,3 \text{ min}^{-1}$) para su inspección o para girar el molino hasta determinada posición. La corona dentada está contenida en una caja y es lubricada por inmersión o lubricación por pulverización.

Accionamientos centrales: Consiste en una unidad compacta del reductor, la misma que es acoplada al molino ya sea por medio de un eje hueco o sea con un árbol de torsión. El

reductor opera en un baño de aceite, en una caja completamente cerrada. Para un consumo de energía de hasta 3000 kW se instala, generalmente, un accionamiento con reductor par vía doble equipado con un motor, o equipado con dos motores.

1.5. Materiales para la obtención de las bolas

Según el manual tecnológico del cemento, redactado por Duda (1977), en los molinos los elementos encargados de la trituración y la molienda son los cuerpos moledores, los cuales, generalmente son bolas fabricadas por fundición y en algunos casos se obtienen por el método de conformación.

Entre otras combinaciones, pueden estar aleados al Cr-Mo con Ni, para hacerlos más resistentes al desgaste por impacto o a la abrasión. (Bond, 1952 & Fernández, 2016)

Acosta *et al.* 2000; Díez-Cícero *et al.* 2008 & Putatunda & Bingi 2012, sugieren los hierros nodulares para la obtención de aleaciones con buenas propiedades de resistencia, porque son considerados materiales ferrosos tradicionales que han evolucionado a través del tratamiento térmico de autemperizado, por lo que son más competitivos y es considerado el tratamiento térmico como una valiosa y ventajosa alternativa en la sustitución de piezas de acero colado y forjado.

El objetivo principal de la aplicación del tratamiento térmico en los hierros nodulares es el de promover la realización de microestructuras de ferrita acicular y austenita estable con altos contenidos de carbono, estas estructuras por la presencia de ferrita y austenita reciben el nombre de ausferrítica). Esta estructura proporciona al hierro nodular una elevada combinación de resistencia y ductilidad, características que han contribuido a hacerlo un hierro de grandes aplicaciones ingenieriles más extensas y donde se demandan mayores propiedades mecánicas.

Además de la austemperización, la norma soviética Gost-977-75, propone tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido para aceros de alto contenido de carbono, según Silot (2014). Con esto se transforma la microestructura de las bolas, logrando una combinación de tenacidad y ductilidad, que la hacen favorables para la molienda del clinker de cemento según Maujo (2016).

Las bolas de molinos pueden ser fabricadas con diversa composición química, siendo las aleadas al alto cromo los elementos molturadores más resistentes al desgaste. Decasper (1981), recomienda determinadas cantidades de composición química y dureza en HRC (*Hardness Rockwell C*) para algunas aleaciones.

Tabla 1.2. Composición química y dureza de bolas de molinos. Fuente: Decasper (1981)

Bolas	Composición química %				Dureza superficial (HRC) Decreciente hacia el centro
	Carbono	Manganeso	Cromo	Silicio	
Forjadas	0,5-1,0	0,8-1,2	0,8-12	---	35-42
Bajo Cr	2,8-3,3	0,1-0,4	0,1-0,4	0,4-0,8	45-50
Alto Cr	2-2,5	---	17	---	60-61

Una aleación que contiene aproximadamente 25 % de carburos ricos en Cromo (Cr) y una dureza del orden de 65 HRC es muy frágil. Sin embargo, esto no tiene importancia si se considera la forma masiva de los cuerpos moledores y la energía máxima que cada cuerpo puede recibir. Además, el riesgo de rotura disminuye cuando los factores involucrados en el proceso están bajo control.

Entre todas las cuestiones importantes, el control de la austenita residual que se forma luego del tratamiento térmico y la salud interna (ausencia de rechupes en cada cuerpo moledor) de la bola son puntos particularmente cruciales, a fin de evitar todo fenómeno de rotura, tanto en la capa exterior (descascarillado) como en todo el volumen de la bola.

Plantea también Magotteaux S.A, que hasta los años 50, los cuerpos moledores estaban fabricados de acero forjado perlítico o de fundición blanca perlítica. Ambos productos tenían una dureza aproximada de 40 HRC y un desgaste medio de 800 g/t de clinker molido aproximadamente.

Magotteaux S.A. entró en este mercado mejorando las estructuras por tratamiento térmico y obteniendo una matriz perlítica más fina y más regular. Sin embargo, en 1954 produce una familia de aleaciones duras con un contenido de más del 10% de Cr. Esta importante adición de Cr permite templar la matriz y hacerla martensítica, además de substituir los carburos de hierro del tipo M_3C -cementita por carburos especiales ricos en Cr.

Para esta empresa, los nombres comerciales de las aleaciones más clásicas son Maxicrom y Duogam 1 para la primera cámara y Hardalloy y Duogam 2 para la segunda cámara. Sin embargo, el avance más extraordinario en cuanto a calidad de bolas viene

definido por el nuevo producto denominado Ecogam, que supone tener la máxima tecnología de vanguardia estando destinado sobre todo a las primeras cámaras de los molinos en los cuales se conjugan los efectos de abrasión, corrosión e impacto.

La estructura de base de estos cinco productos es la misma, aunque por su composición química son aleaciones diferentes como se muestra en la tabla 1.3, además de que el porcentaje de sus diferentes fases y su dureza varía.

Tabla 1.3. Composición química, porcentaje y dureza de las aleaciones Maxicrom, Hardalloy, Duogam y Ecogam

Aleación	Composición química (%)			% Austenita	% Carburos	Dureza HRC
	C	Cr	Otros			
Maxicrom	2,2	17	---	2	22	60
Hardalloy	3,0	12		8	30	65
Duogam 1	2,9	21	Mo: 0,8	2	30	63
Duogam 2	2,7	19		8	28	63
Ecogam 18	2,3	18	---	2	23	63
Ecogam 21	2,8	20		7	27	64

Otro gran productor de bolas de molinos es la empresa *Moly-Cop Grinding Media*, filial del grupo australiano *One Steel*. Esta empresa logra sus productos a partir de barras de acero de alto carbono y baja aleación, por medio de un proceso de calentamiento, forjado y tratamiento térmico, cuyo objetivo es alcanzar la máxima durabilidad del producto en su aplicación final. La composición química de estas bolas varía según el diámetro de bola a fabricar. En la tabla 1.4 se muestran los rangos para las bolas de diámetro 90 mm.

La empresa *Suprasteel suppliers of grinding media*, es especializada en el suministro de bolas de acero (forjadas o fundidas) con posterior tratamiento térmico para molienda de minerales y áridos, especialmente para las industrias cementeras. Sugiere que todas las bolas de molienda deben garantizar un bajo desgaste, una baja tasa de rotura, alto poder de impacto, excelente esfericidad, además de una dureza y composición química adecuadas para el producto a moler, como muestra la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Composición química, dureza superficial y volumétrica de las bolas de acero fabricadas por la empresa *Moly-Cop Grinding Media*

Composición Química (%)							Dureza (HRC)
C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P	
0,96	1	0,8	0,25	0,20	0,40	0,35	60-65

Para *Moly-Cop Grinding Media*, la resistencia al desgaste de las bolas depende de su microestructura. Esta se optimiza mediante una cuidadosa selección de variables en el

proceso de tratamiento térmico, siendo el rango de dureza la variable de control del producto terminado.

Para Cuba, la norma NC-13-05-83, especifica las características principales requeridas para la utilización de las bolas para la industria del cemento. Las características principales se muestran en la tabla 1.5 como sigue:

Tabla 1.5. Composición química y dureza de las bolas según *Suprasteel*

Composición Química (%)										Dureza
Bola	C	Cr	Si	Mn	S	P	Cu	Mo	Ni	HRC
Forjada	0,9	≤1,0	0,38	1,1	≤0,04	≤0,04	≤0,1	≤0,25	≤0,1	55-65
Fundida	Cr	2,6	17	≤1,0	≤1,5	≤0,08	≤0,06	---	≤1,0	---
	Cr	2,8	2,5	≤1,0	≤1,5	≤0,08	≤0,06	---	≤1,0	55-65

El Ni-Hard es una fundición blanca con contenidos aproximados de cromo y níquel (Ni) de 2 y 4% respectivamente y bajo contenido de silicio (Si). Es resistente al desgaste por deslizamiento, por proyección o por chorro, no siendo así para el desgaste por choque. Sin embargo, hay bolas de este material hasta el diámetro de 60 mm a las que se les atribuye cuatro veces la duración de las bolas de acero forjado y endurecido según platea Duda (1977).

Se fabrican bolas de Ni-Hard I, con resistencia al desgaste por rozamiento y por chorro mayoritariamente y de Ni-Hard II con elevada resistencia al desgaste por choque y a la flexo-tracción. La composición química de estas bolas se muestra en la tabla 1.6.

Tabla 1.6. Composición química de las bolas Ni-Hard I y II según Duda, W. 1977

Elemento	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Mo
Ni-Hard I	3,0-3,6	0,4-0,8	0,3-1,0	1,5-2,6	≤ 0,15	≤ 0,30	0,3-4,8	0-1,4
Ni-Hard II	≤ 2,9	0,4-0,8	0,3-1,0	1,4-2,4	≤ 0,15	≤ 0,30	0,3-5,0	0-0,4

Tabla 1.7. Composición química y dureza de las bolas según NC-13-05-83

Composición química						Dureza HRC
C	Mn	Si	Cr	S Máx.	P Máx.	
0,45-0,70	0,60-1,20	0,15-0,37	0,10-0,30	0,045	0,050	40-55

Atendiendo a estas propiedades y usándolas como dato de partida, Silot (2014), propuso las recomendaciones de composición química de la norma soviética Gost-977-75 para aceros aleados al carbono (ver tabla 1.7), además, de las composiciones químicas que plantea dicha norma.

Tabla 1.8. Composición química, dureza y tratamiento térmico de las bolas según Silot (2014)

Composición química						Dureza (HRC)
C	Mn	Si	Cr	Ni	S y P	
0,65-0,75	0,55-0,85	0,25-0,45	0,8-1,0	0,4-1,0	≤0,045	50-65
Tratamientos térmicos						
		Normalizado	Temple		Revenido	
Temperatura °C		820-840	860		190	
Medio de enfriamiento		Aire	Aceite		Aire	
Permanencia en el horno		1h y 40min	1h y 40min		1h	

1.6. Elementos de aleación en los aceros

Según Días del Castillo & Reyes (2012), un acero que contiene, hasta 2,11 % Carbono (C), tiene elementos químicos inducidos intencionalmente y que no se encuentran en un acero al carbono los cuales reciben el nombre de acero aleado. Los elementos químicos de que se hace mención anteriormente, reciben el nombre de “Elementos de Aleación”. Así, un acero puede contener varios elementos de aleación y de acuerdo al número de ellos se pueden clasificar como: aceros ternarios cuando tienen un elemento de aleación, además del hierro (Fe) y el C, aceros cuaternarios cuando contienen dos elementos de aleación además del Fe y el C, y así sucesivamente. El efecto de los elementos de aleación sobre el acero es el de causar que estos tengan una amplia variedad de microestructuras como consecuencia de los tratamientos térmicos, lo que se refleja asimismo en un amplio rango de propiedades.

Los elementos empleados como aleantes en los aceros, ordenados en orden descendente de su aplicación práctica son: Cr, Ni, Mn, Si, W, Mo, V, Co, Ti, Al, Cu, Nb, Zr, B, N y Be. La interacción de estos elementos de aleación con el hierro, carbono y con otros elementos de aleación, tiene como efecto cambios en las propiedades mecánicas, químicas y físicas del acero, llevando a una mejora de ellas de acuerdo a ciertos propósitos definidos.

El nivel al cual cambian estas propiedades, depende de la cantidad de elemento de aleación introducido y del carácter de su interacción con el Fe y el C. Por esta razón es necesario analizar la influencia que tiene cada elemento sobre el hierro y el acero y las fases que están presentes.

1.7. Mecanismos de desgaste

De forma general se conoce, que tanto durante el período de explotación de las máquinas, como en el almacenaje, ocurren procesos que predeterminan no sólo la disminución de la capacidad de trabajo de las máquinas, sino también la pérdida total de esta cualidad. El desgaste es un proceso complejo que se produce en las superficies de los cuerpos sólidos debido a la fricción de otro cuerpo o medio; trayendo por consecuencia la variación de la macro y micro geometría superficial; de la estructura; y de las propiedades de las capas superficiales; con o sin pérdida de material.

El mecanismo depende en primer lugar de las deformaciones elasto-plásticas que tienen lugar en el micro irregularidades en contacto y de la magnitud de las tensiones térmicas. Este tipo de deterioro origina diferentes niveles de defectos de la estructura y el incremento de las tensiones residuales.

Es necesario aclarar que en la práctica pueden coexistir dos o más tipos de desgaste y que en determinados momentos uno se puede transformar en otro.

Mecanismo adhesivo: La atracción molecular (cohesión) produce una unión adhesiva (microsoldadura) de las asperezas en contacto; el movimiento relativo de los cuerpos cizalla esta unión produciendo la transferencia de un material de un cuerpo hacia otro y/o la generación de partículas de desgaste.

Como adhesión se entiende el fenómeno de formación de una fuerte unión de los metales en las áreas reales de contacto como resultado de la fricción, de los procesos de deformación mutua y para temperaturas inferiores a la de recristalización. Durante estos procesos se forman fuertes uniones en diferentes puntos en contacto. Durante el contacto de las asperezas estas se arrugan y se produce el efecto mecánico de engrane lo cual constituye la causa primaria de la adhesión.

Desgaste abrasivo por impacto: El mecanismo de desgaste abrasivo por impacto no solo se puede relacionar con el impacto directo de la partícula abrasiva sobre la superficie de la pieza. Finalmente la naturaleza del desgaste abrasivo por impacto se define por el carácter de interacción con la superficie de desgaste. Por tal motivo durante el análisis del surgimiento y desarrollo del desgaste abrasivo por impacto independientemente de la

forma de las superficies en contacto como causa fundamental se debe considerar la penetración directa de la partícula abrasiva en la superficie desgastada sin tomar en cuenta la forma y sentido del movimiento de esta por la superficie de contacto.

La veracidad del surgimiento del desgaste abrasivo por impacto para una referida dinámica de interacción de las superficies de impacto, resulta la forma y característica del macro relieve de la superficie de desgaste. Durante el desgaste abrasivo por impacto la superficie de desgaste toma un aspecto poroso, representadas claramente por muescas de diferentes tamaños y profundidades y como resultado de la penetración de las partículas abrasivas. En una superficie de este tipo no se crea una rugosidad direccional definida por surcos y ralladuras, lo cual es típico del conocido desgaste abrasivo bajo condiciones de fricción por deslizamiento. Por consiguiente un aspecto definitorio y confiable para el diagnóstico del desgaste abrasivo por impacto resulta el macro relieve de la superficie desgastada

Desgaste por fatiga superficial: La teoría del desgaste por fatiga superficial fue planteada por Kragelski (1952) y ha sido desarrollada por él y sus colaboradores. Según sus postulados los ciclos de cargas alternativas que surgen en las microirregularidades de los cuerpos en fricción condicionan el deterioro paulatino de sus superficies y con ello el surgimiento de su rotura. Se supone que para tensiones superiores al límite de fatiga surjan tres estadios característicos del proceso de variaciones de las microtensiones: de rápida disminución, de estabilización y de rápido incremento.

El efecto final está relacionado con la formación de micro grietas en la capa superficial. Desde el punto de vista práctico resulta muy importante, el hecho de que, el material lubricante disminuye considerablemente las tensiones superficiales y como resultado el proceso de formación de las grietas se torna lento. Lo anterior hace que crezca el número de ciclos a los cuales tiene lugar la rotura. Algunos autores han demostrado que existe una estrecha relación entre la intensidad del desgaste por fatiga y el límite de fatiga del material de los elementos del sistema tribológico. El coeficiente de fricción y la intensidad del desgaste durante el mecanismo de desgaste por fatiga superficial para todos los tipos de materiales van a depender de la presión y la velocidad de deslizamiento.

Desgaste por erosión: Es el proceso de eliminación de material provocado por el contacto de un material sólido sobre una superficie. Este puede ser liberado en algunos casos por una mezcla de arena y agua el cual se le aplica a la superficie desgastada a una elevada presión.

1.8. Formas de medir el desgaste en aleaciones metálicas

Existen disímiles formas de evaluar el desgaste en elementos, entre los que se encuentran los que siguen a continuación.

Con ayuda de rugosímetro: Este método consiste en la toma de perfilogramas en una misma micro sección antes y después del ensayo de fricción. La ventaja fundamental de este método es la posibilidad que brinda de poder determinar valores muy pequeños de desgaste con alta exactitud. Este método se utiliza para investigaciones científicas.

La utilización de este método permite obtener gráficamente el estado de la superficie de desgaste, posibilitando valorar la distribución del desgaste por la superficie estudiada, en los límites de recorrido de la aguja del rugosímetro. El valor medio del desgaste es fácil de determinar, si se conoce el valor vertical de la escala de ampliación del perfilograma. Durante la utilización de este método debe tomarse en cuenta la longitud del recorrido de la aguja del perfilógrafo o rugosímetro.

Mediante el método de bases de medidas artificiales: La determinación de los valores absolutos del desgaste mediante este método consiste en la realización de huellas sobre la superficie estudiada y la posterior determinación de las dimensiones que existen desde la superficie de fricción hasta el fondo del ahondamiento hecho en estas superficies y regularmente estrechado desde la superficie hasta el fondo de la cavidad. La profundidad de la huella en la superficie puede ser realizada con instrumentos de diamantes en forma de pirámide o cónica a presión, barrenado cónico, corte de la superficie con cuchilla de diamante giratoria, afilada en forma de pirámide triangular o realización de la huella con disco abrasivo.

Con la utilización de indicadores de carátulas: Este método está fundamentado con la medición del desgaste de las muestras o probetas durante el período de ensayo con indicadores de carátulas los cuales se fijan con una presión determinada y pueden

registrar la valoración de la dimensiones (desgastes) de las probetas sin parada o con parda de la máquina de fricción en la cual se realiza el ensayo.

Mediante el desgaste gravimétrico: Este indicador generalmente se utiliza para la determinación del desgaste de piezas de pequeñas dimensiones las cuales se pesan antes y después del desgaste. Antes del pesaje las piezas deben ser lavadas y secadas para eliminar partículas de polvos, y otros productos como, grasas y otros. El grado de exactitud de este método depende de la exactitud de las balanzas. Este método no se recomienda en los casos en que las dimensiones de las piezas cambian no solo como resultado del desprendimiento de partículas de la superficie de los materiales sino también debido a las deformaciones plásticas, así como para la determinación del desgaste de materiales porosos bajo de régimen de fricción.

1.9. Conclusiones del Capítulo I

Con análisis y revisión de las fuentes bibliográficas se determinó lo siguiente:

1. Los elementos encargados de la trituración y la molienda en los molinos son los cuerpos moledores, los cuales, generalmente son bolas fabricadas por fundición.
2. La norma NC-13-05-83, específica para nuestro país que las bolas deben poseer una dureza de HRC 40-55.
3. Dentro de los principales mecanismos de desgaste que aparecen en pares sólido-sólido, podemos encontrar el desgaste abrasivo, adhesivo, por fatiga superficial, corrosiva mecánico, por deslizamiento y desgaste por frotamiento.

Capítulo 2. Materiales y métodos

Capítulo 2. Materiales y métodos

2.1. Introducción

Debido al constante deterioro que tiene los equipos y piezas durante su explotación, el desgaste es un tema tratado en todas las entidades que poseen máquinas y equipos. Es por ello que en la actualidad este asunto es estudiado por varios investigadores, especialmente aquellos que se encuentran en la búsqueda de nuevas aleaciones resistentes al desgaste (Ishikawa, Yamamoto & Kyoshioka 2001; Yamamoto & Hiroaki 2001).

El **objetivo** de este capítulo es explicar los métodos y procedimientos en los cuales se realizaron los estudios físicos, químicos y microestructurales de aleaciones empleadas en la fabricación de bolas de molinos de molienda de clinker de cemento.

2.2. Factores involucrados en el proceso de molienda

En la tabla 2.1 se muestran los parámetros de un molino de producción de cemento por vía seca y de circuito abierto. El mismo está formado por un cilindro de 13 m de largo y 2,6 m de diámetro, dividido en tres cámaras. Cada cámara está revestida de placas metálicas, que son un blindaje de acero de alta dureza, para proteger al cuerpo del molino del constante golpear de las bolas y maníes que se encuentran en el interior del mismo.

Tabla 2.1. Parámetros del molino de bolas

PARAMETROS	VALOR	PARÁMETROS	VALOR
Longitud del molino	13 m	Productividad del molino	23 t/h
Longitud de trabajo	12,46 m	Temperatura aceite	60 °C
Cantidad de cámaras	3	chumaceras reductor principal	
Diámetro exterior	2,6 m	Temperatura aceite a la entrada del reductor principal	40 °C
Diámetro interior	2,48 m		
Velocidad angular	1,96 rad/s (18,8 rpm)	Intensidad de la corriente de excitación motor 6kV	220-240 A
Velocidad angular motor principal	75,4 rad/s (720 rpm)	Presión del aceite trunion de entrada y salida	0,06-0,01 MPa
CÁMARA No. 1		Intensidad máxima de la corriente transmisión principal	108 A
Longitud	3,25 m		
CÁMARA No. 2		CÁMARA No. 3	
Longitud	2,51 m	Longitud	6,7 m

Entre la cámara 1 y la cámara 2 hay dos rejillas, mientras que entre la 2 y la 3 hay una (cada rejilla tiene 180 mm de espesor). A la entrada del molino se hallan los liners de

copa que protegen al cuerpo del molino de los golpes de las bolas y a la salida del molino se haya la rejilla de salida colocada en posición vertical.

En la tabla se muestran algunos de los parámetros que influyen en la eficiencia del proceso de molienda como son los parámetros técnicos del elemento de accionamiento. Es necesario tener en cuenta los parámetros de trabajo del molino y los materiales a moler, además del área de la superficie de contacto de los cuerpos moledores.

Es de suma importancia el control de la velocidad crítica de rotación del molino (velocidad en que la fuerza centrífuga anula la influencia de la gravedad sobre las bolas) porque a velocidades iguales o superiores los cuerpos moledores se adhieren a la superficie interior del molino y no caen, por tanto no prestan servicio de molienda. Esta velocidad se expresa mediante la expresión 2.1.

$$n = \sqrt{\frac{60^2 \cdot g}{4 \cdot \pi^2 \cdot r}} \quad 2.1$$

Dónde:

n: Velocidad crítica de rotación; rpm

g: Aceleración de la gravedad; m/s²

r: Radio del molino; m

En la práctica, está comprendido entre el 70 y el 80 % de la velocidad crítica el número de vueltas por minuto, siendo el 75 % una velocidad recomendable de operación. Por tanto, la velocidad de rotación real n_r del molino se muestra en la expresión 2.2.

$$n_r = 75\%n \quad 2.2$$

2.3. Volumen de la carga de bolas de un molino

Dentro de las características principales de los molinos de bolas se hace notar que para la molienda de productos gruesos se suelen utilizar bolas de 50 a 100 mm de diámetro, mientras que para la molienda de productos finos se emplean bolas de 15 a 50 mm.

La carga del medio de molienda se expresa en función del porcentaje del volumen del molino, al ser ocupado por el medio de molienda.

El peso de la carga de bolas (Q) puede ser calculado de la expresión 2.3.

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot L_1 \cdot f \cdot \gamma \quad 2.3$$

Donde:

D_i : Diámetro interno de las placas de blindaje; m

L_1 : Longitud interna del molino o del compartimiento; m

f: Grado de llenado

γ : Peso específico de la masa de las bolas; kg/dm³.

Generalmente, los molinos de descargas operan con un 40 a un 42 % del volumen total del molino. Con el diámetro total se puede encontrar el porcentaje relativo de cada bola dentro del molino, considerando un factor de empaquetamiento de 0.52 según dato aportado por Osorio *et al.* (2009). El volumen de la carga de bolas en el molino se calcula empleando la siguiente relación:

$$V_{\text{bolas del molino}} = V_{\text{molino}} \cdot 0,4 \cdot 0,52 \quad 2.4$$

El volumen interior del molino relaciona el radio interior del tambor y su longitud

$$V_{\text{molino}} = \pi \cdot r^2 \cdot L \quad 2.5$$

2.4. Determinación de los esfuerzos de fricción en bolas de acero para molinos

Número de choques de las bolas por vueltas

En investigaciones exhaustivas han demostrado que durante una vuelta del molino, las bolas realizan ciclos de trabajos que varían de 1,79 a 2,85 lo que significa que para un molino que la carga de bolas sea de gran magnitud el número de choques dentro será elevado.

2.5. Ensayo de chispa para determinar la composición química de las muestras

El análisis de la composición química del material de las bolas, se realizó empleando un espectrómetro de emisión óptica con medio de argón OBLF (ver nexos), de marca Gs 1000-II, fabricado en el 2015 y que pertenece al Laboratorio de análisis químico del Taller 08 (Fundición) de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed

de Beche” de Moa. Para esto se analizaron tres muestras de material, sometiendo cada una a tres momentos de chispas con lo que se obtuvo un promedio individual para cada una de las muestras analizadas.

Antes de verificar los componentes de aleación de las muestras, estas se limpiaron de óxidos y grasas en una muela abrasiva y luego sobre una máquina pulidora. Las tablas 2.2, 2.3 y 2.4 muestran la composición química estándar de los posibles materiales correspondientes a las aleaciones de las muestras de bolas.

Tabla 2.2. Composición química estándar del acero AISI 5046. Fuente: Tabla Aceros SAE-AISI

AISI	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cromo	Fe
5046	0,43-0,50	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	---	0,20-0,35	Balance

Tabla 2.3. Composición química estándar del acero AISI 1060. Fuente: Tabla Aceros SAE-AISI

AISI	C	Mn	P	S	Fe
1060	0,55-0,65	0,60-0,90	0,040	0,050	Balance

Tabla 2.4. Composición química estándar del acero AISI 51100. Fuente: Tabla Aceros SAE-AISI

AISI	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cromo	Fe
51100	0,95-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,20-0,35	---	0,90-1,15	Balance

2.6. Métodos, procedimientos y condiciones experimentales

Para la realización de un estudio de experimento es de vital importancia la recopilación de toda la información necesaria para la para la realización de este, para que el experimento se haga con la calidad requerida se debe tener en cuenta una series de pasos lógicos para garantizar que los datos que se obtengan sean los esperados.

En la selección de los materiales adecuados para la fabricación de bolas para los molinos hay que tener en cuenta una serie de parámetros que debe cumplir esos materiales, resistencia desgaste, hay que analizar el material que se desea moler, la granulometría de este, el tipo de molienda, las condiciones en la cual el molinos trabaja (corrosivas) y de importancia relativa de los mecanismos de desgaste que predominan durante el proceso de molienda (abrasión, corrosión, impacto) y los factores que los influncian.

2.5.1 Selección y preparación de muestras

Las muestras de las bolas obtenidas se preparan para realizar los análisis de la dureza y composición química. Para esto, las bolas se cortaron en una máquina de corte de tipo

CM 260, marca *echo RD* de 2015, con varios chorros de agua que garantizan una buena lubricación para evitar calentamiento y por consiguiente transformaciones micro estructurales en las superficies de contacto con un disco de numeración SZ05062006. Se cortan en las secciones necesarias para lograr en el caso de la dureza, superficies fijas que no introduzcan errores por causa de inclinaciones o movimientos indebidos de las muestras a la hora del análisis.

Se obtuvieron tres muestras de bolas destinadas a la molienda del clinker de cemento. Una de acero AISI 1060, otra de acero AISI 5046 y la otra muestra es de acero AISI 51100.

2.5.2 Preparación mecánica de las probetas

Puesto que es necesario validar la hipótesis planteada, se procede a tomar las muestras necesarias de las bolas como parte de la experimentación. Con la intención de lograr superficies planas con la menor deformación posible, las bolas se limpiaron en toda la superficie y se cortaron en una máquina de corte de tipo CM 260, marca *echo RD* fabricada en el 2015. La misma tiene cinco chorros de líquido refrigerante que garantizan una buena lubricación para evitar calentamiento y por consiguiente transformaciones microestructurales en las superficies de contacto.

Con estas condiciones se confeccionaron cinco probetas para la prueba de desgaste, con dimensiones de 40 mm de diámetro, además de otras cinco para los otros exámenes con medidas de 10 mm de diámetro y 8 mm de espesor.

2.5.3 Encapsulado de las muestras

Antes de las operaciones de desbaste y pulido, es necesario montar las muestras en un soporte adecuado (encapsulado) para tener una mayor garantía de una buena preparación de las mismas. Esta operación se realizó por medio de una máquina de encapsular *echo RD*, de tipo MP 350 A, fabricada en el 2015. Para esto se empleó resina fenólica negra con una temperatura de fusión de 150-170°C durante un tiempo de 6-8 minutos, para luego enfriarse en el molde hasta los 60°C. Las muestras después de encapsuladas se pueden observar en el la figura 2.1.

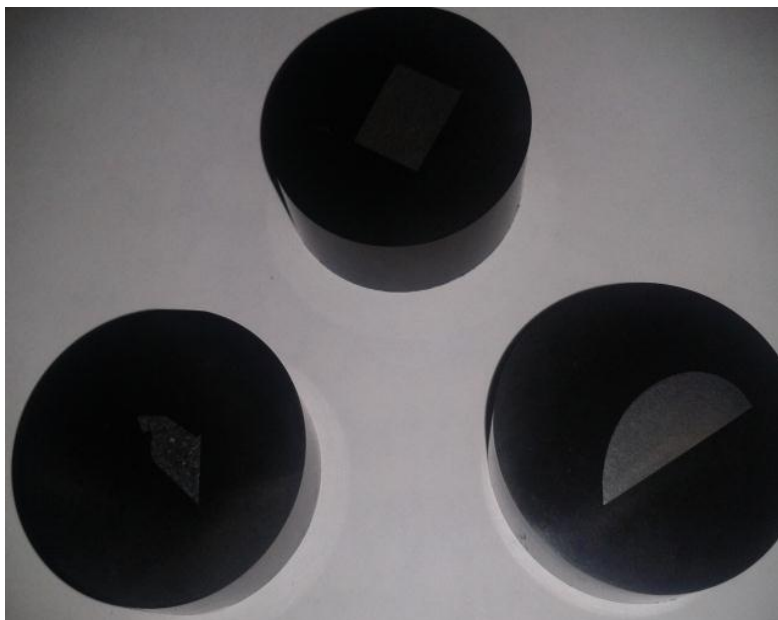


Figura 2.1. Muestras encapsuladas.

2.5.4 Desbaste y pulido

Las operaciones de desbaste y pulido de las probetas se realizaron bajo la norma ASTM E3-11, empleando una pulidora metalográfica *echo LAB*, de tipo PM 52 D, fabricada en el 2015. Se empleó un disco giratorio cubierto con papel abrasivo de diversas granulometrías (180, 240, 600, 800 y 1200). Una vez puesto este en movimiento se colocaron encima las probetas, alternando el sentido en 90° para eliminar la capa de material distorsionado y teniendo en cuenta no aplicar una fuerza excesiva para no introducir defectos por deformaciones, rayas, arranques de material, elementos extraños, bordes redondeados o daños térmicos.

Para el acabado final se utilizó un paño de fieltro grueso, usando como sustancia abrasiva el polvo de diamante.

2.5.5 Ataque químico

Una vez pulidas las probetas, fueron lavadas con agua destilada y secadas con papel de fieltro. Se volvieron a lavar con etanol para eliminar toda la grasa y pasta de pulir. Luego se realizó un ataque químico empleando las técnicas de ataque manual por inmersión, siendo el reactivo a utilizar el Ácido Nítrico (Nital). La composición del reactivo y las condiciones en las que se aplica el ataque se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Composición del ácido nítrico

Reactivo	Composición química	Forma y tiempo	Observación
Ácido nítrico (Nital)	Ácido nítrico 5 ml Alcohol etílico 95 ml	Inmersión de 15 s	Estructura general

Después de atacadas las muestras se lavan con agua destilada, se sumergen en alcohol etílico durante unos segundos y finalmente se secan, lo que elimina impurezas y humedad, luego de esto las muestras están listas para ser colocadas en el microscopio para la realización del estudio metalográfico.

2.7. Análisis microestructural de las aleaciones

Cada aleación posee una estructura que no puede ser observada a simple vista. Sin embargo, es importante conocer la estructura verdadera (microestructura) de las mismas durante el estudio de diversos materiales, porque existe una estrecha relación los micros constituyentes y el comportamiento mecánico de las piezas.

El examen microscópico proporciona información sobre la constitución de las aleaciones ferrosas, pudiéndose determinar características tales como forma, tamaño y distribución de los granos, además de las inclusiones y la microestructura metalográfica. Con esto se puede tener información general de los procesos por los cuales ha transitado la pieza (Paumier, 2013).



Figura 2.2 Microscopio óptico *NOVEL* (marca NIM-100).

La microestructura se observó con la ayuda de un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMMM de Moa (figura 2.2), empleando aumento de 200X. Para colocar las muestras en

el microscopio se montan en un dispositivo usando plastilina para lograr una nivelación adecuada de las mismas (ASTM E 3–95; NC 10–55: 86 y NC 04–77: 86).

2.8. Dureza de los materiales estudiados

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 Alcántara et al, (2009). La dureza superficial es uno de los ensayos no destructivos conocidos. Por medio de este método obtuvo en piezas ya elaboradas las características mecánicas importantes en forma rápida.

2.7.1 Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se desarrolló con el empleo de un durómetro digital modelo HRS-ISO (Digital Rockwell Hardness Tester) que es un equipo especialmente diseñado para medir dureza, ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMMM, se utilizó como penetrador un cono de diamante con un ángulo de 136°, expresando la dureza en HRC y la carga aplicada es de 1471 N en un tiempo de 15 segundos.

Conociendo el valor de la dureza en HRC de las mediciones realizadas se calcula la dureza promedio de la probeta teniendo en cuenta la cantidad de huellas realizadas en el experimento.

$$HRC = \frac{\sum_{i=1}^n HRC}{n} \quad 2.6$$

Dónde:

HRC.- dureza promedio; (kgf/mm²).

n.- número de mediciones realizadas.

2.9. Ensayos de desgaste gravimétrico

El ensayo de desgaste gravimétrico se realiza con un cilindro metálico (roll paper) al cual se le acopla un papel de lija con una granulometría requerida, este cilindro debe tener los parámetros de trabajo especificados como son la velocidad de rotación, debe estar establecido el tipo de abrasión y el peso de la carga. Se podrá controlar el nivel de desgaste de las muestras con la pérdida de masa de esta, el ensayo se realizó según la

norma ASTM G65-81, aunque también se puede realizar con un rodillo de goma en el cual se le va depositando material abrasivo (generalmente sílice) y se controla la pérdida de masa de la muestra. Paumier, (2013).

El ensayo de desgaste gravimétrico se realizó en una pulidora automática (PM 52 D). Automatic Metallographic Sample Grinding and Polishing Machine) marca *echoLAB*, perteneciente a la Empresa Mecánica del Níquel de Moa (ver anexo). Para esto, se colocó primeramente en el disco rotatorio de la pulidora metalográfica, un papel abrasivo con granos de óxido de silicio de grado 180 como sustancia abrasiva. Se fijaron las probetas en el portaprobetas del equipo. Luego de encender la máquina de ensayos se aplica una carga de 0,6 kgf y se activó el cronómetro para un tiempo de 15 minutos. Pasado este tiempo se retiraron las probetas para realizar el primer pesaje.

Después se volvieron a colocar en el portaprobetas para ejecutar el segundo proceso de desgaste gravimétrico en las mismas condiciones. Culminado el tiempo de 15 minutos se retiraron las probetas y se realizó el segundo proceso de pesaje de las mismas. Antes de pesar cada una de la probetas se limpiaron con agua y luego con alcohol absoluto para retirar los residuos y el abrasivo seguido de un secado por aproximadamente 4 minutos.

La pérdida de peso se determinó utilizando la expresión (Rojas, 2011):

$$\Delta P = G_i - G_f \quad 2.7$$

Donde:

ΔP .- pérdida de peso por desgaste abrasivo gravimétrico (g).

G_i .- peso inicial de la pieza (g).

G_f .- peso final (g).

Para el experimento se consideraron los tres tipos de parámetros básicos para el ensayo de desgaste gravimétrico, los cuales son: parámetros estructurales, operacionales y parámetros estructurales de interacción.

2.10. Conclusiones del capítulo 2

1. Con el chispeo de las muestras, se determinó que las aleaciones tratadas son de acero AISI 1060, AISI 51100 y AISI 5046.

2. El ensayo de dureza se desarrolló con el empleo de un durómetro digital, con un penetrador de cono de diamante que posee un ángulo de 136° y aplicando una carga de 1471 N.
3. El ensayo de desgaste permitió definir cuál de las aleaciones tratadas posee mayor resistencia al desgaste.

Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados

Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados

3.1. Introducción

El análisis de los resultados experimentales permite arribar a conclusiones detalladas sobre el tema en estudio. Por esta razón se plantea el siguiente objetivo para el presente capítulo.

Objetivo: Realizar la valoración crítica de los resultados obtenidos durante el proceso de ensayo a las muestras de las diferentes aleaciones.

3.2. Determinación de la velocidad de rotación del molino

Para realizar los cálculos de la velocidad crítica de rotación se empleó la expresión 2.1, la cual depende entre otros elementos del radio del molino y de la aceleración de la gravedad, dando como resultado 26,25 rpm. La velocidad real de rotación de un molino debe ser de 70 a 80 % de la velocidad crítica de rotación, por lo que el molino debe rotar a 19,68 rpm.

3.3. Determinación de la carga total de cuerpos moledores

Para el cálculo de la carga de bolas en el interior del molino se empleó la expresión 2.3, la misma relaciona el diámetro interior del molino, la longitud, el grado de llenado y el peso específico de la aleación de la bola, dando como resultado 112 toneladas.

Para el cálculo del volumen de las bolas y el molino se tuvieron en cuenta las expresiones 2.4 y 2.5, las mismas tienen como parámetros fundamentales el radio y la longitud del molino. El cálculo del volumen de las bolas depende del volumen del molino. El volumen del molino es de 69 m³, mientras que el de las bolas dentro de este es de 14,35 m³.

3.4. Resultados y análisis de la composición química

Con el estudio del análisis de la composición química de las aleaciones investigadas, se puede determinar el porcentaje de C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni y Mo en cada una de las aleaciones analizadas. Con esto se descarta que según la norma AISI/SAE, las aleaciones en estudio son 5046, 1060 y 51100. Se evidencia que la muestra que mayor porcentaje de carbono y cromo posee es el acero AISI 51100, lo que es de mucha importancia en las propiedades mecánicas de las bolas de molienda.

En la figura 3.1 aparecen las muestras de bolas extraídas, a las cuales se les realizó la preparación para el ensayo de composición química. En La figura 3.1 a) se muestra la bola de acero AISI 1060. Se observa por la superficie lisa, que ha tenido un desgaste poco pronunciado o sedoso, lo que se puede traducir en un desgaste parejo de la superficie, que es característico de la fractura dúctil. El hecho de que la muestra esté seccionada por el centro se atribuye a que en los primeros impactos recibidos durante la molienda fue fracturada por impacto. También se muestra la superficie rasgada, propia de la deformación plástica.



Figura 3.1. Muestras de bolas. a) AISI 1060; b) AISI 51100; c) AISI 5046.

En la figura 3.1 b) se observa la muestra de la bola de acero AISI 51100. Es claro en la forma de chevrones de color brillante de la superficie irregular que se visualiza en esta imagen, que la misma ha sufrido un desgaste que mayoritariamente ha sido por impacto.

La fractura que se muestra es frágil, propia de las aleaciones con elevada dureza. Además sugiere que la bola fue hecha por fundición con elevado contenido de carbono.

En la figura 3.1 c) aparece la muestra de bola de acero AISI 5046. Se aprecian defectos que son atribuibles a problemas en la tecnología de fundición de esta bola, que salieron a relucir en el momento de la molienda por medio de los choques contra el clinker, las paredes del molino y las propias bolas. Además de la línea de división y los defectos, se observa una zona de desgaste poco pronunciado.

En la tabla 3.1 aparece la composición química correspondiente a las muestras ensayadas en el espectrómetro de emisión óptica.

Tabla 3.1. Composición química de las bolas obtenidas

Aleación	Composición química								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
AISI 5046	0,403	0,208	1,155	0,034	0,035	0,222	0,124	0,033	Balance
AISI 1060	0,616	0,323	0,679	0,011	0,014	0,043	0,043	<0,001	Balance
AISI 51100	1,055	0,272	0,411	0,014	0,004	1,518	0,044	<0,001	Balance

Las piezas de acero AISI 5046 pueden ser logradas por fundición o por forjado, además pueden ser tratadas térmicamente. Por ser un acero estructural, se utilizan extensamente en vehículos, en misiles teledirigidos, en armas, partes del ferrocarril, construcción de puentes, para recipientes de presión, en máquinas herramienta, en sujetadores de turbina, barras de soporte de calderas, en engranajes mecánicos, bielas, pernos, tuercas y otras piezas mecánicas.

El acero AISI 1060 es considerado de alto carbono, presenta buena forjabilidad, no es recomendable para ser sometido a proceso de soldadura. En condición de temple presenta durezas cercanas a los 65 HRC, cuando es endurecido de forma adecuada la estructura consiste de martensita rica en carbono esencialmente libre de carburos. Es empleado en la fabricación de herramientas de mano como martillos, mazos, partes en donde se requiere buena resistencia al desgaste, flechas, resortes, cuchillos, hachas, entre otros. Es susceptible a tratamientos térmicos de Normalizado, Recocido y Revenido.

La aleación AISI 51100 es aleada al cromo, se utilizan en la molienda con bolas, para rodillos de cojinetes entre otras aplicaciones en las que se requieren alta dureza y resistencia al desgaste. Comprende tres tipos de acero, cuya templabilidad varía según la

cantidad de cromo que contienen: acero SAE 50100, de baja templabilidad; acero SAE 51100, de media templabilidad y el acero SAE 52100, de alta templabilidad.

3.5. Análisis microestructural de las muestras

Para la realización del análisis microestructural se realizaron tres muestras de diferentes tipos de material de las bolas de los molinos de cemento, acero AISI 1060, AISI 5046 y AISI 51100 respectivamente. El análisis consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en las muestras obtenidas, el mismo se realizó con el objetivo de determinar la forma, tamaño y distribución de las inclusiones de grafito, y con el contenido de la masa metálica, basado en la norma ASTM-A 247-67 (1998). En la figura 3.2 se muestra la microestructura del acero AISI 1060 en esta muestra se aprecia una estructura del tipo austenítica.

Se puede observar que existe la formación de gérmenes de cementita, lo que da origen a un agregado complejo que crece por nucleación cooperativa de la ferrita y de la cementita, dando láminas alternas de ferrita y de cementita en bordes de grano (negra), que es lo que constituye exactamente ese tipo de agregado complejo que recibe el nombre de perlita. La separación entre láminas varía según sea la temperatura a la que se haya realizado la transformación isotérmica de esa austenita.

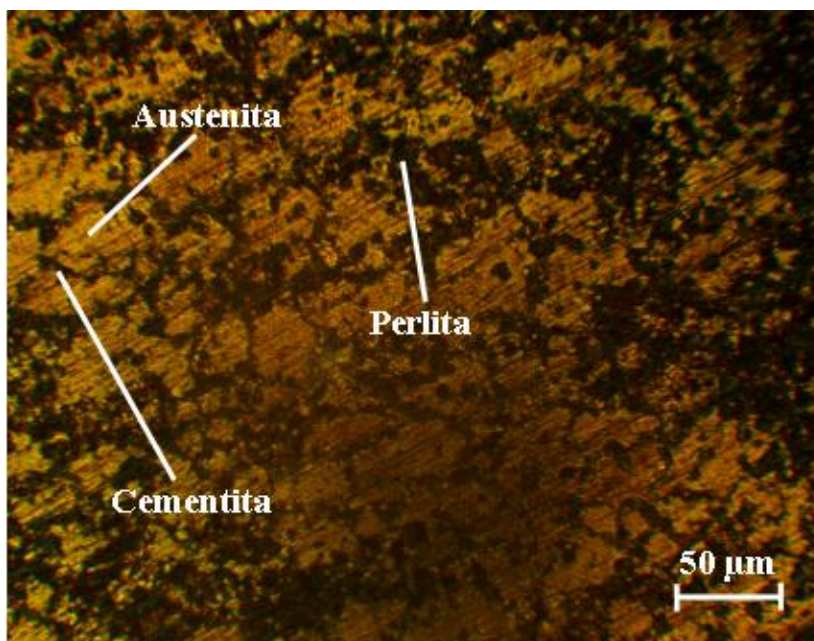


Figura 3.2. Microestructura del Acero AISI 1060.

La figura muestra un acero fundido, enfriado desde el estado austenítico con una velocidad tal que los constituyentes que aparecen son los que corresponden al diagrama Fe-C. Por tratarse de este tipo de acero, la austenita inicia su transformación a la temperatura de 727 °C y esa transformación, regida por la formación de gérmenes de cementita.

En la figura 3.3 se muestra un acero del tipo AISI 5046 en la cual existe la presencia de una pequeña fracción de austenita retenida, es decir una parte de este micro constituyente sin transformar, lo cual provoca que el promedio de dureza decrezca ligeramente.

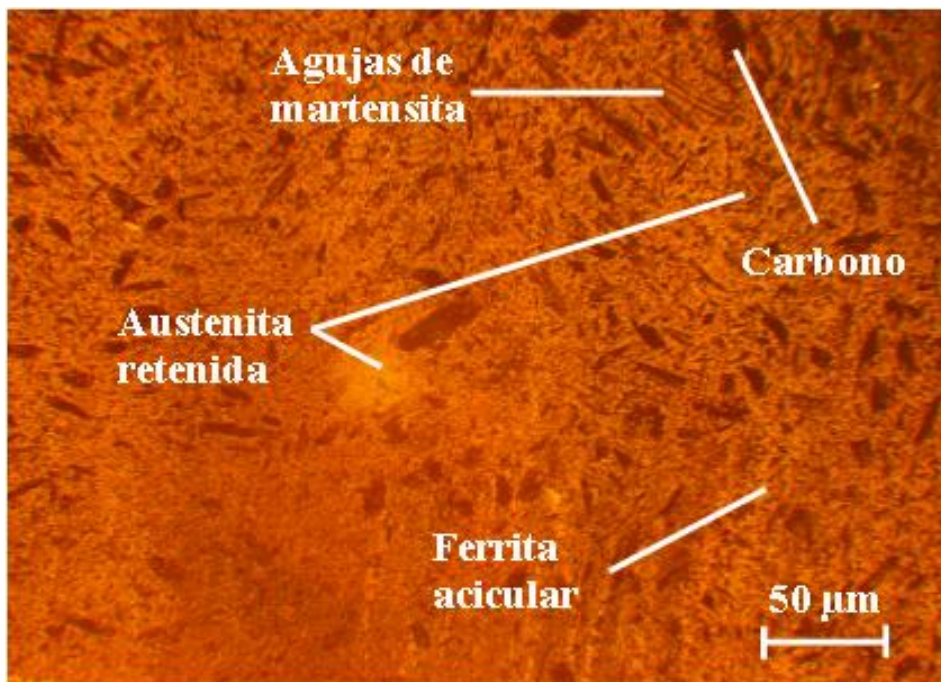


Figura 3.3. Estructura del acero AISI 5046.

La microestructura se corresponde con una estructura del tipo martensítica en su matriz, revenido con alguna presencia de ferrita acicular, estructura típica de estos aceros en estado recocido. Se observa una pequeña fracción de austenita retenida, es decir una parte de este microconstituyente sin transformar, lo cual provoca que el promedio de dureza decrezca ligeramente.

Por calentamiento a baja temperatura (encima de 150° C), la retícula tetragonal inestable de la martensita tiende a transformarse en cúbica, precipitando el C (puntos negros) en forma de pequeñísimas partículas submicroscópicas. Este tratamiento se denomina revenido. Para diferenciarlas, se denomina alfa prima (α') a la primer martensita y beta (β)

a la última. Ésta se ve como agujas ennegrecidas, a diferencia de las agujas más claras de martensita α' . A medida que aumenta la temperatura, sin llegar a A_{c1} la precipitación es cada vez más intensa.

En la figura 3.4 se puede observar una microestructura perteneciente a un acero del tipo AISI 51100 el cual presenta una estructura martensita en una matriz austenítica, la cual es producto del contenido presente en la composición química. La martensita se encuentra distribuida aleatoriamente en bandas estrechas sobre la matriz. También, aunque de forma aislada se notan algunos carburos.

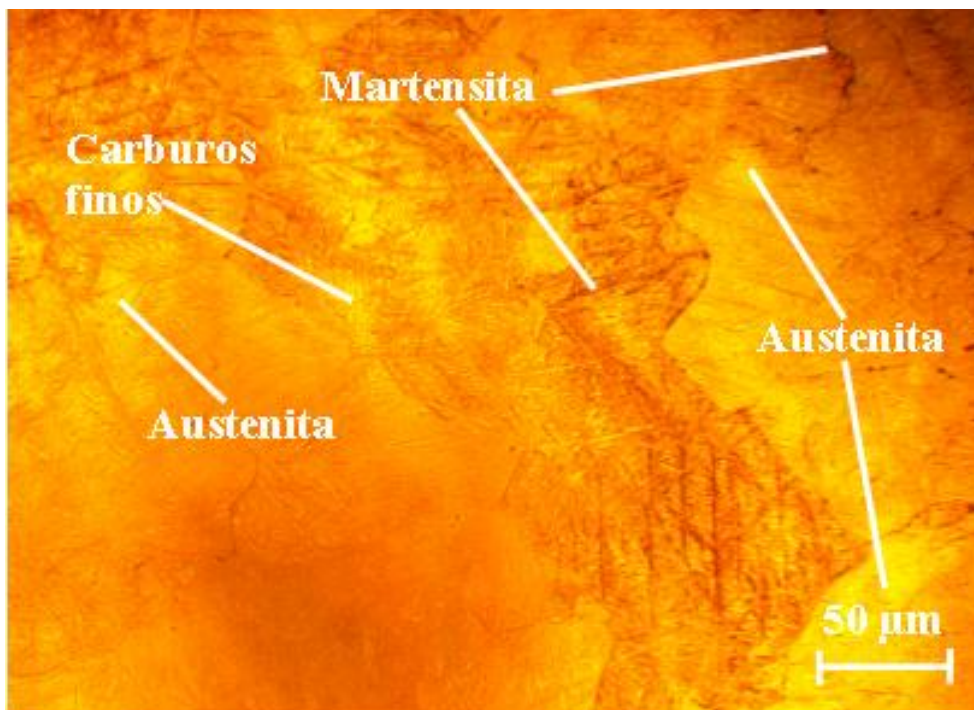


Figura 3.4. Estructura de acero AISI 51100.

El fenómeno de crecimiento de grano austenítico en estos aceros está controlado por la acción de los carburos complejos. Su presencia constituye una barrera al movimiento de los límites de grano que es capaz de dificultar o impedir el crecimiento del mismo. La cantidad, tipo, morfología y distribución de dichos carburos son factores decisivos para la efectividad de su dirección. Carburos alargados de tamaños finos y numerosos, uniformemente distribuidos por la fase austenítica, retardarán con mayor intensidad el crecimiento de grano que los carburos groseros no homogéneos y con distribuciones no uniformes.

3.6. Análisis de la dureza

Las mediciones de la dureza se realizaron por el método Rockwel (HRC). Se efectuaron cinco mediciones para cada muestra en diferentes lugares de las superficies de las probetas y se promediaron los valores de dureza para cada material. Las durezas calculadas en las aleaciones se presentan en la tabla 3.2 según se muestra a continuación.

Tabla 3.2. Valores de dureza obtenidos para las aleaciones analizadas

Aleación	Número de ensayo				
	1	2	3	4	5
	Valores de dureza en HRC				
AISI 5046	46,8	48	48,5	50,2	51,5
AISI 1060	34,3	35	35,5	37	37,7
AISI 51100	56,6	60	61,7	61,7	61,7

En estos resultados se observa que existe diferencia en el valor de dureza alcanzado por las muestras. El incremento de dureza mostrado en los ensayos evidencia que el acero AISI 51100 es superior con respecto a las otras dos aleaciones en cuanto a este parámetro. Esto coincide con el hecho de que esta aleación posee mayor contenido de carbono (1,055 %) y cromo (1,518 %).

La aleación de acero AISI 5046 posee menor contenido de carbono (0,403 %) que la de AISI 1060 con 0,616 %, sin embargo se aprecia una mayor dureza en el primero. Esto se adjudica al hecho de que la diferencia en el contenido de este elemento es poca, mientras que en cuanto al contenido de manganeso (elemento de aleación que incrementa la dureza) y cromo existe una diferencia más pronunciada, alcanzando contenidos de 1,155 % Mn y 0,222 % Cr el acero AISI 5046, por 0,679 % Mn y 0,043 % Cr el acero AISI 1060.

De lo antes expresado se corrobora que el carbono y el cromo funcionan como agentes endurecedores en los materiales en estudio, mejorando así, sus propiedades de resistencia.

Conociendo el valor de la dureza de cada aleación en HRC, se calcula por medio de la expresión 2.6 la dureza promedio, como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Promedio de la medición de dureza de las aleaciones

Aleaciones	Dureza (HRC)
AISI 5046	49
AISI 1060	35,9
AISI 51100	60,34

La tabla anterior, confirma que existe diferencia en las durezas de las diferentes aleaciones. La muestra de acero AISI 51100 experimenta una dureza promedio de 60,34 HRC. Para el acero AISI 5046 la dureza es de 49 HRC, mientras que para la aleación de AISI 1060, el valor de HRC es de 35,9.

Los valores antes mencionados en la tabla 3.3 se corresponden con los mostrados en la figura 3.4 donde se observa un Gráfico de Columnas Agrupadas, que compara valores entre categorías usando rectángulos verticales.

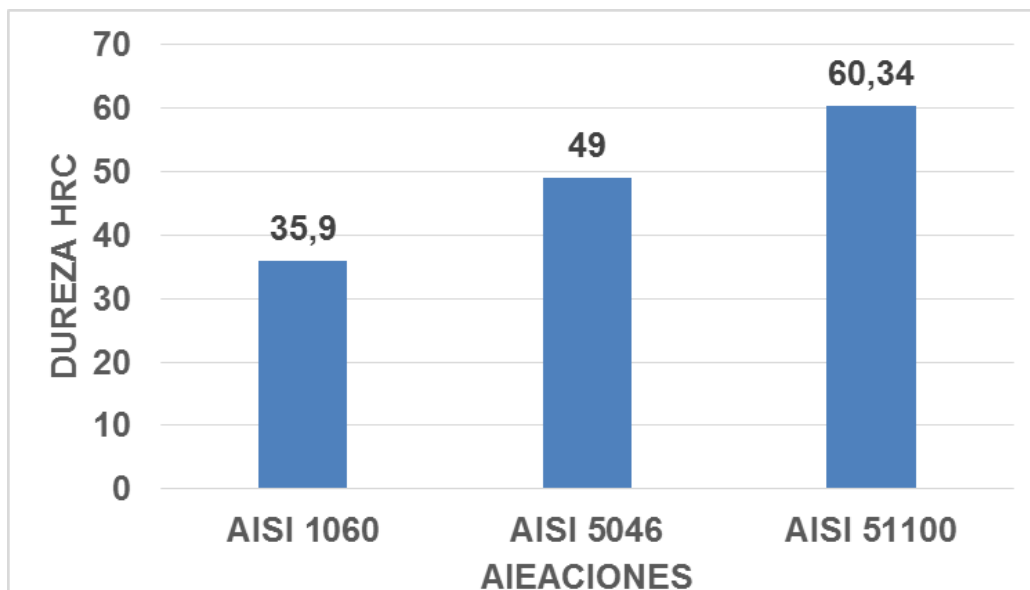


Figura 3.4. Valores de la dureza en las probetas estudiadas.

En la figura 3.4 se expone de forma ascendente el comportamiento de la dureza comprobada en las muestras de las diferentes bolas, comenzando por el acero AISI 1060 con dureza HRC de 35,9. Se nota un ascenso de la dureza en el acero AISI 5046 y una mayor altura de la barra correspondiente al acero AISI 51100 con durezas de HRC 49 y HRC 60,34 respectivamente.

3.7. Análisis del desgaste gravimétrico

Según expresa Rojas (2011), se ha demostrado experimental y teóricamente que la dureza del material está relacionada con el grado de abrasión y que además ha quedado manifestada la dependencia de la resistencia a la abrasión, de la composición química, dureza y microestructura de un material.

El desgaste abrasivo de los cuerpos que trabajan a impacto repetido y por fricción, se caracteriza por la adherencia molecular, de cuyo resultado se presentan múltiples rasguños y cortes del metal, ocasionado por los procesos de fatiga y acritud de los materiales. Por lo tanto deben estar contruidos con un material de gran resistencia a la abrasión que garantice una elevada resistencia al desgaste durante un período de explotación razonable.

Para determinar el grado de desgaste en las bolas se empleó la expresión 2.6, la cual tiene como parámetros las masas iniciales y finales de las muestras ante y después de realizado el ensayo de desgaste. En la tabla 3.3, se plasman los valores de las masas de cada una de las probetas.

Tabla 3.3. Valores de las masas para cada una de las muestras

Materiales	Primer pesaje	Segundo pesaje	Tercer pesaje
AISI 5046	83,66	83,56	83,55
AISI 1060	56,66	56,60	56,58
AISI 51100	50,92	50,88	50,87

Se evidencia que el desgaste del acero AISI 51100 con es menor en relación al a las otras dos aleaciones (AISI 5046 y AISI 1060).

En las figuras 3.5-3.7 se muestran a través de gráficos de dispersión el comportamiento del pesaje de las probetas en función del tiempo.

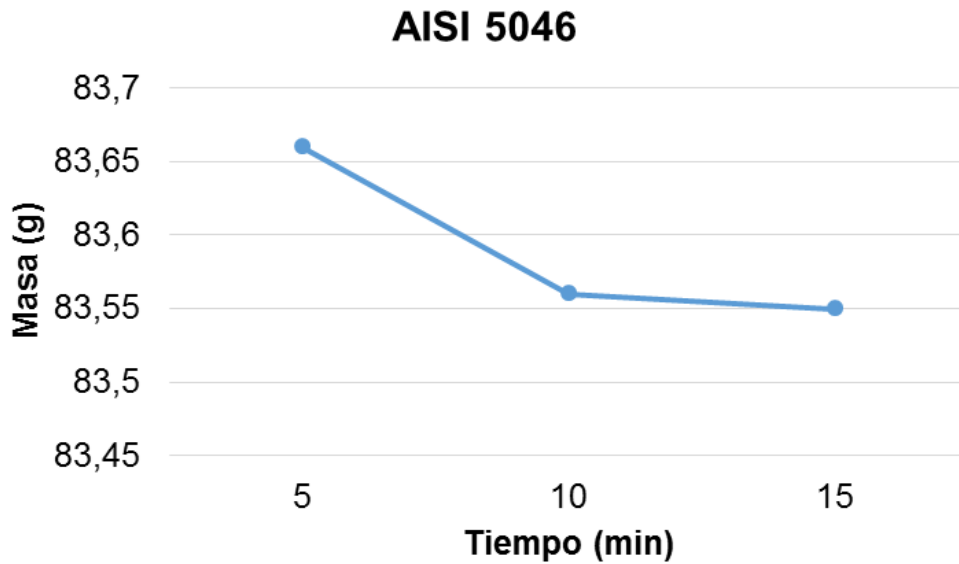


Figura 3.5. Comportamiento del pesaje de la probeta de acero AISI 5046 en función del tiempo.

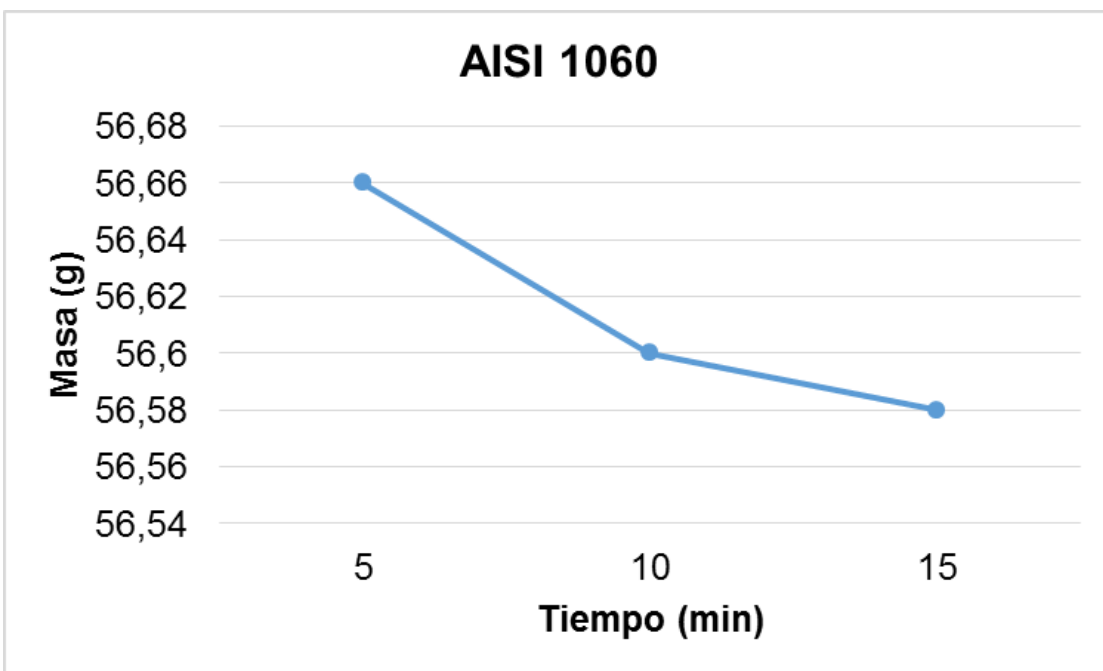


Figura 3.6. Comportamiento del pesaje de la probeta de acero AISI 1060 en función del tiempo.

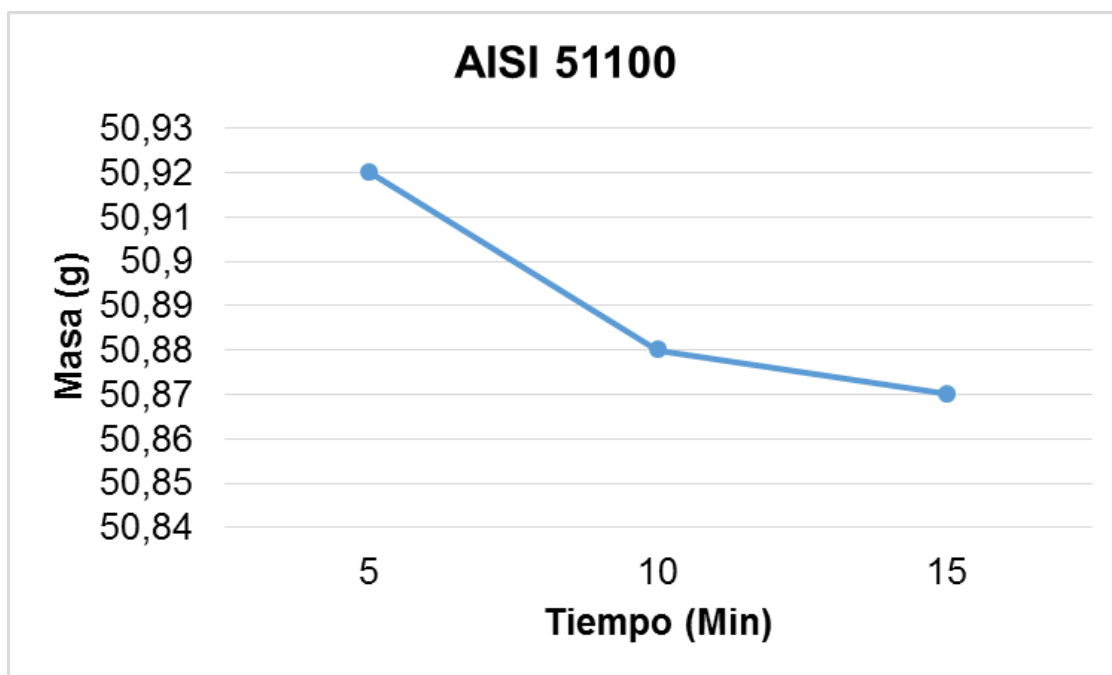


Figura 3.7. Comportamiento del pesaje de la probeta de acero AISI 51100 en función del tiempo.

Para cada una de las gráficas mostradas se evidencia un descenso en el desgaste en función del tiempo, lo que está directamente vinculado con los valores de la tabla 3.4, la que muestra el valor de la pérdida de masa para cada ensayo realizado. También se plasma la Media (promedio) de material desgastado en función de los pesajes realizados a las muestras.

Tabla 3.4. Variación de masa para cada una de las muestras

Materiales	$\Delta P1$	$\Delta P2$	Promedio
AISI 5046	0,01	0,01	0,055
AISI 1060	0,06	0,06	0,04
AISI 51100	0,04	0,01	0,025

La variación de la masa en las aleaciones estudiadas se calculó mediante la expresión 2.7, la cual tiene como principales parámetros la masa inicial de las muestras y la final. Luego se calculó el promedio para estos valores de pérdida de masa en las aleaciones estudiadas y para una mayor comprensión de los resultados del desgaste gravimétrico se muestra en la figura 3.8 que para un valor de dureza de 35,9 HRC correspondiente a la aleación de AISI 1060, el valor del desgaste gravimétrico es de 0,04 g. Para el acero AISI 5046 con un valor de dureza de HRC 49, la variación de masa (ΔP) es de 0,055 g. Por otra parte se observa que para la muestra de acero AISI 51100 el comportamiento del

desgaste es de 0,025 g, siendo este el material de mayor resistencia al desgaste de las muestras analizadas.

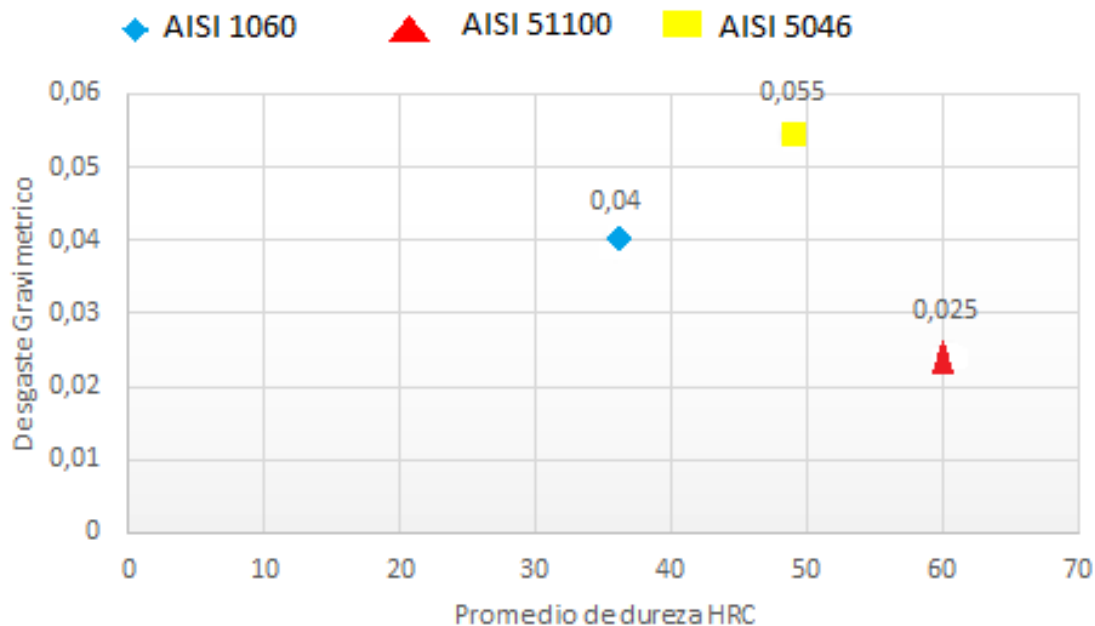


Figura 3.2. Comportamiento del desgaste gravimétrico con respecto a la dureza del material.

3.8. Valoración de las propiedades mecánicas de las aleaciones de las bolas

Se conoce que la estructura presentada en la aleación del acero AISI 51100 es del tipo martensítica, en una matriz austenítica, dándole un valor de dureza elevada a la aleación, la cual es de 60,34 HRC, lo que no se comprobó para el acero AISI 5046 ni para el AISI 1060. Además, se evidenció que existe un comportamiento ascendente en las durezas analizadas en los diferentes materiales. Empezando por el acero AISI 1060 con un valor de dureza de 35,9 HRC, luego pasando por el acero AISI 5046, con una dureza de 49 HRC y por último el acero AISI 51100, el que experimentó una dureza correspondiente a 60,34 HRC.

También se conoce que el porcentaje del desgaste gravimétrico en cuanto a las aleaciones de acero AISI 5046 con dureza de 49 HRC y AISI 1060 con 35,9 HRC diverge en 0,015 décimas. Aunque la dureza de del acero AISI 5046 es mayor, obtuvo un mayor desgaste, lo cual parece contradictorio, sin embargo, esto se explica por el hecho de que en la composición química se observa que el contenido de carbono de esta aleación es menor que el del acero AISI 1060 que además contiene cementita.

A partir de estos resultados no solo se puede afirmar que el acero AISI 51100 tiene mayor valor de dureza que el AISI 5046 y que el AISI 1060, sino que también posee mayor resistencia al desgaste abrasivo y por ello es el de mejores propiedades mecánicas y el recomendado para el empleo como cuerpo molidor en la molienda de clinker para la fabricación de cemento. No obstante, se debe tener en cuenta el empleo correcto de los tratamientos térmicos, para que el elevado porcentaje de dureza no cause demasiada fragilidad en las aleaciones de las bolas.

3.9. Valoración del Impacto Ambiental y social.

En las industrias cementeras cubanas la mayor contaminación que estas provocan es la emisión de partículas sólidas a la atmósfera. Aunque no son del todo perjudiciales por la carencia de los elementos tóxicos, pero si causan molestias en la población cercana a la industria y pueden afectar el sector agrícola.

Alrededor de un 7 % de estas partículas son pesadas, un 25 % de estas partículas tienen de un 1 a 10 micras las que se trasladan a distancias significativas contaminando el entorno. Solo un 3 % de estas partículas son submicronicas estas son las más perjudiciales para el hombre al encontrarse en el suelo y pueden ocasionar neumoconiosis en los individuos sometidos a larga exposición.

El polvo de clinker de cemento puede provocar alergias, irritación de la garganta, irritación cutánea, lesiones oculares graves e irritaciones en las vías respiratorias.

3.8.1 Medidas para la prevención

- En caso de contacto con los ojos se debe lavar con abundante agua cuidadosamente durante varios minutos.
- En caso de contacto con la piel se recomienda lavar con abundante agua y jabón para evitar irritaciones en la misma.
- Evitar a toda costa la inhalación de polvo. En caso de la respiración dirigirse a una zona que esté libre de este para que respire aire limpio y permanecer en el lugar hasta que se recupere, en caso de una inhalación excesiva visitar al puesto médico más cercano.

3.10. Valoración económica de la investigación

En todo proceso industrial la relación entre la fabricación de un determinado producto y su costo de producción es de vital importancia para la sostenibilidad económica, de ahí que utilizar métodos que permitan mitigar los gastos hace más eficiente a la entidad.

En el caso particular de la Empresa Mecánica del Níquel de Moa (EMNI) la cual tiene una demanda de 800 toneladas al año de bolas para los molinos de las diferentes industrias cementeras cubanas como son Santiago de Cuba, la de Nuevitas en Camagüey y la 26 de Julio en Ciego de Ávila es necesario emplear métodos de fabricación más eficientes, de ahí que producir bolas de acero AISI 51100 recomendadas para el empleo como cuerpo molidor en la molienda de clinker para la fabricación de cemento permite el ahorro de importaciones al país.

En la tabla 3.5 que se muestra a continuación se establecen los gastos de forma general en los que se incurren para la fabricación de las bolas en la EMNI de Moa.

Tabla 3.5 Gastos generales en la fabricación de las bolas

Conceptos de Gastos	CUC	CUP
Materia primas y materiales	2986,57	2496,02
Subtotal de gastos de elaboración	2769,51	929,31
Otros gastos directos	584,97	295,10
Gastos de fuerza de trabajo	655,25	45,22
Gastos indirectos de producción	1 050,18	335,00
Gastos generales y de administración	312,58	90,78
Gastos Bancarios	166,53	163,21
Costo de Producción	5756,08	3425,33
Impuestos y Contribuciones	444,19	-
Margen de utilidad S/ Base Autorizada	276,95	-
Precio establecido por el MFP	6477,22	-
% Sobre los gastos en divisa	-	171,27
Componente en pesos convertibles	-	3596,60

Se encontró además que el precio de venta de algunas empresas suministradores de bolas como son (Magotteaux, expandido por todo el mundo, desde América hasta Europa; Aceros y Suministros, España) a las que las cementeras cubanas compran en el extranjero. A continuación se relaciona en la tabla 3.6 el precio de venta de algunos suministradores de bolas.

Tabla 3.6 Precios de venta de algunos suministradores extranjeros

PAIS	EMPRESAS	PRECIO/T
Canadá	Ontario Limited	1587,50 USD
España	Aceros y Suministros	1875,57 USD
Bélgica	Magotteaux	1300,00 USD
España	Consortio Industrial	1785,91 USD
China	S.L Gonio	1027,00 USD

Luego de realizada la valoración económica de la producción de las bolas y comparados los costos de producción con las ganancias que estos generan, se define que es más factible la fabricación de las bolas en la EMNI que importarlas de los principales proveedores.

3.11. Conclusiones del capítulo 3

- El método de observación metalográfica propuesto permitió obtener la forma de la microestructura para los aceros AISI 1060, AISI 5046, AISI 51100, dando la posibilidad de comparar los resultados en función de la dureza obtenida.
- Con la aplicación de los ensayos de desgastes antes expuestos fue posible caracterizar el comportamiento de la variación de la masa (ΔP) en las muestras analizadas.
- Con los gráficos de tendencia se conoció el comportamiento de las aleaciones en cuanto a la variación de masa.

Conclusiones generales

1. Los métodos utilizados permitieron caracterizar microestructuralmente las aleaciones empleadas en la fabricación de bolas para los procesos de molienda de clinker de cemento en el acero AISI 1060 existe la formación de gérmenes de cementita, lo que da origen a un agregado complejo que crece por nucleación cooperativa de la ferrita y de la cementita, dando láminas alternas de ferrita y de cementita en bordes de grano. En el acero AISI 5046 existe la presencia de una pequeña fracción de austenita retenida, lo cual provoca que el promedio de dureza decrezca ligeramente. Por su parte, el acero AISI 51100 presenta una estructura martensita en una matriz austenítica, la cual es producto del contenido presente en la composición química.
2. Con el estudio del desgaste gravimétrico a las muestras analizadas, se determinó que el acero AISI 1060 presenta un índice de desgaste de 0,04, mientras que el AISI 5046 tiene un valor de 0,055, y por último la aleación de AISI 51100 presentó un valor de 0,025 siendo la de mayor resistencia al desgaste.
3. Luego de haber realizado el estudio correspondientes se afirma que el material con mejores propiedades mecánicas para la fabricación de las bolas para la molienda del clinker de cemento es el AISI 51100 al presentar menor índice de desgaste (0,025) y una dureza de 60,34 HRC.

Recomendaciones

- Aplicar los resultados obtenidos en función de la fabricación de las bolas para los molinos utilizados en la molienda del clinker de cemento.
- Fabricar las bolas para los molino del clinker de cemento con propiedades mecánicas lo más cercanas posibles al acero AISI 51100.
- Realizar el control pertinente al tratamiento térmico empleado en las bolas para la molienda del clinker de cemento.
- Desarrollar una producción de prueba para verificar la durabilidad de las bolas que se fabriquen.

Referencia bibliográfica

1. ACOSTA-ESQUEDA, M. A.; Martínez-Madrid, M. & Alfredo-López, J. 2000: *El tratamiento de los hierros nodulares en el mejoramiento de los materiales en la industria automotriz*. Sanfandila, Qro. Publicación Técnica No. 148.
2. ALBERTIN, E.; SINATORA, A.; PITALUGA, G.; PARADA, A. 2007: Relación entre factores micro- estructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino. *Ingeniería Mecánica*. 1 (2008): 57–62.
3. ALCÁNTARA-VALLADARES, J. R. 2008: *Diseño práctico de un molino de bolas*. Tesis de grado. Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad profesional “Azcapotzalco”. 123 p.
4. ÁLVAREZ-GARCÍA, E. 1999: *Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación*. Santa Clara-Cuba, 255 p.
5. ANDRÉIEV, S.E.; PEROV, V.A.; ZVERIÉVICH, V.V. 1987: *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*. 1ed. Pueblo y Educación, La Habana, 431 p.
6. BELZUNCE, F. J. Universidad de Oviedo, 2001: Disponible en: <http://www.aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>
7. CALLISTER, W. 2007: *Materials Science and Engineering. An Introduction*. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, United State, 975.
8. Copyright, 1997 CEMEX CENTRAL, S.A. DE C.V
9. CHILLCCE-AQUINO, V. M.; ROJAS-AMARO, R. H. 2012: *Implementación del sistema experto en molinos para optimizar la molienda del circuito de cobre en la planta concentradora de sociedad minera cerro verde S.A.A*. Tesis de grado. Universidad nacional del centro del Perú. 189 p.
10. Decasper, J. 1981: Manual del Molino. Holderbank. Administración y Asesoría S.A. Centro Técnico. Departamento de Procesos y Tecnología

11. DIEZ-ESTEBAN, V. 2008. *Proyecto de instalación de una planta de molienda de cemento*. José Luís Pérez Díaz (Tutor), Tesis de grado. Universidad Carlos III de Madrid. 293 p.
12. Diez-Cicero, C. J.; Figueroa-Hernández, C. R.; Ordóñez-Hernández, U.; Fernández-López, G. R.; Mondelo-García, F. 2008: Influencia de los factores microestructurales en la resistencia al desgaste por deslizamiento de las fundiciones nodulares austemperadas. *Ingeniería Mecánica*. 3 (2008): 21-28.
13. DUDA, W. 1977: *Manual tecnológico del cemento*. Romargraf S. A., Hospitalet de Llobregat (Barcelona), 345 p.
14. FERNÁNDEZ-RAMÍREZ, Y. 2016: *Caracterización microestructural de las bolas de los molinos empleadas en la trituración de mineral laterítico*. Tomás Fernández Columbié; Benigno Leyva de la Cruz (Tutores), Tesis de grado. Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa. 78 p.
15. Holcim (España), S.A. Ficha de datos de seguridad del clinker de cemento Portland. Conforme al Reglamento REACH (CE) n° 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006, y al Reglamento (UE) n°453/2010 que lo modifica.
16. KING R. P. 2001: *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Butterworth-Heinemann, Oxford, Reino Unido, 415 p.
17. KING, R. P. 2000: *Grinding*. 6 (1): 8-39.
18. Magotteaux, shaping a world of performance.
19. MÁRQUEZ-SÁNCHEZ, J.A.; GARCÍA-HINOJOSA, J.A.; AMARO-VILLENA, A. M. & HUERTA-CERDÁN, A. 2006: Bolas para molienda de minerales fabricadas de hierros ADI/CAVI. En: VI Congreso Binacional de Metalurgia y Materiales. CONAMET/SAM. Memorias. Santiago de Chile, Chile, 27 Nov-1 Dic.
20. MAUJO-ARCE, O. 2016: *Selección del material para la fundición de bolas empleadas en la molienda del clinker*. Eider Gresesqui Lobaina; Isnel Rodríguez González (Tutores). Trabajo de diploma. Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa. 80 p.

21. Menacho, J. M. & Concha, F. J. 1986: Mathematical model of ball wear in grinding mills I. Zero-order wear rate. Powder Technology [en línea] 47 (1). Consultada: 10 feb 2017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032591086800134> 165, 166, 169.
22. Menacho, J. M. & Concha, F. J. 1987: Mathematical model of ball wear in grinding mills II. General solution. Powder Technology [en línea] 52 (3). Consultada: 10 feb 2017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003259108780116X> 165, 166, 169.
23. Moly-Cop Grinding Media.
24. MONOV, V., SOKOLOV, B. & STOENCHEV, S. 2012: Grinding in Ball Mills: Modeling and Process Control. *Cibernética y tecnologías de la información*. 12 (2): 51-68.
25. OSORIO, A.; RESTREPO, G.; MARÍN, J. 2001: 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.
26. PUTATUNDA, S. & BINGI, G. 2012: Influence of step-down austempering process on the fracture toughness of austempered ductile iron. *Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology*. 5 (1): 39-70.
27. POSPISIL, Z. 1979: Influencia de la temperatura del clinker sobre su molturabilidad. *Checoslovaquia Zement-Kalk-Gips*. 32 (1): 20-23.
28. RIVERA-MADRID, I.; QUINTERO, F.; BUSTAMANTE-RÚA, O. 2012: Análisis del desgaste de medios moledores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos S.A. *Prospect*. 10 (1): 108-112.
29. RIVERA-MADRID, I. (2013): *Balance poblacional en un molino de bolas para una ley de desgaste de tipo exponencial e hiperbólico en tiempos largos*. Moises Oswaldo Bustamante Rúa (Tutor). Tesis doctoral. Universidad Nacional de Colombia. 84p.
30. RIVERA-MADRID, I.; QUINTERO, F.; BUSTAMANTE-RÚA, O.; LOAIZA, G. (2014): Aplicación de un modelo de balance poblacional a un molino de bolas en la industria del cemento. *Ingeniería y Ciencia*. 10 (19): 163-177.

31. SAMPÉN, L. 2003: Pautas para el diseño de partes metálicas resistentes al desgaste. *Industrial Data*. 6 (2): 74-78.
32. SIERPINSKI, Z. & G. JANUSZ. (1999). Phase transformations and strengthening during ageing of Cu Ni₁₀Al₃ alloy. *Materials Science and Engineering A* (264, 279 - 285).
33. SILOT-MONTERO, Y. 2014: *Obtención de bolas para la molienda del clinker a partir de una nueva tecnología de fundición*. Yúnior Correa Cala (Tutor). Trabajo de Diploma. Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa. 68 p.
34. Suprasteel suppliers of grinding media
35. Taggart. 1999. Manual de preparación de Minerales.
36. Tabla Aceros SAE-AISI. Servicio Industrial, S.A. de C.V. Naranjos 6, Naucalpan, Estado de México.
37. Vázquez, J. C. (1997). Elementos de control de desgaste. En línea: <http://www.monografias.com/trabajos5/laweb/laweb.shtml>. Consultado 5 mayo 2017.
38. VERMEULEN, L.A. & HOWAT D.D. 1986: Desgaste abrasivo e impacto de bolas de molienda en molinos rotatorios. *Mining and Metallurgy*. 86 (4): 113-124.
39. Waganoff. (2003) Trituración, Molienda y Separación de Minerales. Editorial Alsina.
40. Waganoff Nicolás P. (1956) Trituración, Molienda y Separación de Minerales. Ed. Alsina
41. Walter, H. 1977. Manual Tecnológico del Cemento. ETA, Barcelona.

Anexos

Anexos 1



Figura 1. Espectrómetro cuántico de masa Belec Compact Port (Mobile Spectrometer for Metal Analysis) para base hierro, marca SPECTROLAB 230.

Anexos 2



Figura 2. Durómetro digital modelo HRS-ISO

Anexo 3



Figura 3. Pulidora automática (PM 52 D. Automatic Metallographic Sample Grinding and Polishing Machine.

Anexo 4



Figura 4. Balanza analítica RADWAG modelo PS 3500 R1.